

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Токарук Віталій Володимирович



УДК 620.193:620.197.5

ДИСЕРТАЦІЯ
«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

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Віталій ТОКАРУК

Науковий керівник: Мікосянчик Оксана Олександрівна, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2023

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 міцнісних 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.

Теоретичні дослідження ґрунтувались 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. У роботі застосовувались трибологічні випробування; реєстрація та обробка сигналів акустичної емісії; проводилось вимірювання твердості, мікротвердості та склерометрування; параметри профілю мікрорельєфу визначали на профілометрі; металофізичні дослідження проводились на мікроскопі-інтерферометрі, методом растрової електронної мікроскопії на мікроскопі-мікроаналізаторі; визначення хімічного складу поверхонь тертя проводилося за методикою кількісного визначення вмісту хімічних елементів та за методикою напівкількісного розподілу елементів за площею. У роботі використовувалась статистична обробка експериментальних даних із застосуванням регресійного аналізу, при розрахунку використовувався пакет прикладних програм.

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 для зазначених матеріалів 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 рівня максимальних напружень за рахунок зростання залишкових напружень в покритті та дотичних напружень в площині адгезійного контакту.

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.

Встановлено, що армування дюралюмінію Д16 комбінованим електроіскровим покриттям ВК-8+Сu 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+Сu, підвищують їх несучу здатність, контактну довговічність, питому маслоємність поверхні. 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.

Проведена 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. Залежно від твердості матеріалу електроіскрового покриття забезпечується зниження розповсюдження деформаційних процесів в приповерхневих шарах матеріалу основи по глибині від 20 до 95%. 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.

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 $-70\dots-90$ МПа, локалізації головних нормальних напружень в покритті та зниження розповсюдження деформаційних процесів в приповерхневих шарах матеріалу по глибині на 70 %.

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.

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 мікросхоплюванняв фрикційному контакті та переходом до внутрішнього тертя.

Встановлено, що армування дюралюмінію Д16 електроіскровим покриттям ВК8+Си 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.

Визначено ефективність структурної пристосованості трибосистеми сталь 30ХГСА – дюралюміній Д16 при армуванні дюралюмінію Д16 електроіскровим покриттям ВК8+Си 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.

На основі проведеного 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 неармованого / армованого електроіскровим покриттям ВК8+Си дюралюмінію Д16.

Наукова новизна роботи полягає в наступних основних положеннях.

Встановлено механізми підвищення зносостійкості в 2 рази в умовах ковзання та збільшення роботоздатного 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.

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.

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 $(0.88 \dots 1.6) \cdot 10^{-5}$ Дж, інтенсифікацією пластичних деформацій, мікросхоплюванням пар тертя.

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 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, дюралюміній, дисипативні структури, дискретне покриття, електроіскрове легування, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, зносостійкість, маслоємність поверхні, напружено-деформований стан, поверхнево-пластичне деформування, усереднена потужність акустичної емісії.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані у 32 наукових працях.

Монографія

1. Mikosianchyk 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 (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. (категорія Б)

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 (категорія Б).

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

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

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 (категорія Б)

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

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 (категорія Б).

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 (категорія Б).

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 30HGSA 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 (категорія Б).

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 (категорія Б)

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 (категорія Б).

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 (категорія Б).

20. Токарук В. В., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Жосан О. Ю., Долот Д.В. Аналіз міцнісних характеристик електроіскрових покриттів. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 3 (92). С. 47-53. DOI: 10.18372/0370-2197.3(92).15936 (категорія Б).

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

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 Tribosuction 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 нанопокрывтий 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 chemmotology. 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. Моделювання процесів зношування зубчастого зачеплення. *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.

ANNOTATION

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.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences (PhD) by specialty 05.02.04 «Friction and wear in machines» (13 – Mechanical engineering). – National Aviation University, Kyiv, 2023.

In the dissertation work, the scientific and technical problem of increasing the tribotechnical and strength characteristics of aluminum alloys and expanding the load-speed range of their workable state by controlling the structure formation and mechanical characteristics during the modification of the surface layers of aluminum alloys with wear-resistant electrospark coatings (ESC) has been solved.

Theoretical research was based on the main statements of materials science, tribology, physical chemistry, physicochemical fundamentals of electrospark alloying, rheological-kinetic concept of wear resistance, theory of self-organization and mathematical statistics. The assessment of the stress-strain state was carried out using finite element analysis methods. Tribological tests were performed in this work along with: registration and processing of acoustic emission signals; hardness, microhardness and sclerometry measurements; determination of microrelief profile parameters on a profilometer; conducting the metallophysical research on a microscope-interferometer using the method of raster electron microscopy on a microscope-microanalyzer; determination of the chemical composition of friction surfaces was carried out using the method of quantitative determination of the content of chemical elements and the method of semi-quantitative distribution of elements by area. Statistical processing of experimental data using regression analysis was used in the work and a package of application programs was used for different calculations.

Based on the results of modeling the stress-strain state of the coating - the base, the advantages of discrete coatings with density 55 – 65% have been established: an increasing of the coating density from 20 to 60% for VK-8, Cu, VK-8+Cu materials leads to a decreasing in the equivalent stresses in a single-layer coating, by 1.95 : 1.14 : 1.81 times for the specified materials respectively and in the base by 1.52 : 1.33 : 1.65 times respectively. When the density of the coating is more than 65%, an increase in the level of maximum stresses is determined due to the growth of residual stresses in the coating and tangential stresses in the plane of adhesive contact.

The optimal workable state of discrete ESCs with a density of 55-65% was determined, which is characterized by minimal indicators of wear and average AE power due to the reduction of the stress-strain state of the coating and the base while optimizing the discreteness of the coating, the distribution of contact loads, and the formation of optimal surface geometry.

It was determined that the modification of duralumin D16 with the combined electric spark coating of VK-8+Cu provides a decrease of the average arithmetic height of the protrusions of the upper part of the profile by 4.4 and 3.2 times, an increase in the average arithmetic depth of the core of the micro-uniformities of the profile by 2 times, an increase in the average arithmetic depth of the depressions of the profile by 1.8 and 1.1 times, compared to electrospark coatings of hard alloy VK-8 and copper, respectively. These parameters contribute to shortening the run-in period of contact surfaces strengthened with the combined electrospark coating VK-8+Cu, increase their load withstanding capacity, contact durability, and specific oil capacity of the surface. The working condition of discrete EIPs with a density of 20...80% was determined. The minimum indicators of wear and average AE power, characteristic of ESC with a density of 55-65%, are due to the optimal distribution of contact loads, the formation of optimal microgeometry of the surface in the area of the maximum increase in the material of the profile of the surface microrelief on the Abbott curve to 36-56%, and the increase in the oil capacity of the surface by 1.23...3.12 times.

The evaluation of the strength characteristics of discrete electrospark coatings under friction has determined the influence of the microhardness of the surface and sub-surface layers of the material, the gradient of mechanical properties along the depth and the integrity of the coating on their optimal structural suitability. Depending on the hardness of the electrospark coating material, the spread of deformation processes in the near-surface layers of the base material was reduced by 20 to 95% in depth. The combined coating of hard (VK8) and soft (Cu) materials on duralumin D16 demonstrates effective anti-wear characteristics due to the presence of a positive gradient of mechanical properties along the depth of the coating-base and localization of deformation processes in the coating.

A double increase of the wear resistance of duralumin D16 was established by forming a discrete combined electrospark coating of VK8 alloy and copper with a density of 55-65% with subsequent surface plastic deformation due to the formation of residual compressive stresses of -70...-90 MPa in the coating, localization of the main normal stresses in the coating and reduction of the spread of deformation processes in the near-surface layers of the material in depth by 70%.

A triple reduction of values of the mechanical deformation changes in the near-surface layers of duralumin D16 with a combined electrospark coating was established as a result of the effective relaxation of frictional stresses due to the combination of rheological indicators of the VK8 hard alloy (destruction viscosity $13.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) and the plastic material copper (fracture toughness of $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) and the formation of a positive gradient of mechanical properties along the depth of the ESC – the base of D16.

Some regularities of the transition of the tribosystem to catastrophic wear with a gradual increase in the load, which causes the intensification of plastic deformations, the nucleation and development of defects and is accompanied by the appearance of acoustic emission signals with large amplitudes and their dispersion values, the growth of the destruction energy up to $1.5\cdot 10^{-5}$... $8, 5\cdot 10^{-6}$ J, the formation of areas of microseizures in frictional contact and the transition to internal friction have been determined and reasoned.

It was determined that the modification of duralumin D16 with electrospark coating VK8+Cu provides an increase in the specific oil capacity of the surface to $0.128 \text{ mm}^3/\text{cm}^3$, which causes the dominance of elastohydrodynamic or mixed lubrication modes, an increase in the antifriction characteristics of the contact, and a decrease in the rate of wear under the conditions of a gradual increase in the load up to 1200 N.

It was determined that the effectiveness of the structural adaptability of the tribosystem steel 30KhGSA - duralumin D16 increases with the modification of duralumin D16 with electrospark coating VK8+Cu due to the formation of wear-resistant dissipative structures with a concentration of sulfur 0.62...0.95%, phosphorus 0.9...1.13%, and oxygen up to 3.65% as a result of mechanical-temperature activation of surface layers of triboelements and lubricant components activated by the shear rate gradient.

Based on the conducted statistical analysis of the influence of random variables (equivalent stresses, temperature, coefficient of friction, average power of AE signals, etc.), independent characteristics with a pairwise correlation coefficient > 0.6 with a multiple correlation coefficient for the sample of 0.866 were selected, and an empirical multiple regression equation was obtained for evaluation of wear of unmodified / modified with electrospark coating VK8+Cu duralumin D16.

The scientific novelty of the work consists of the following main statements.

Mechanisms have been established for increasing wear resistance by a factor of 2 under sliding conditions and increasing the working state up to 1200 N of D16 duralumin reinforced with a combined electric spark coating of VK8 alloy and copper with subsequent surface-plastic deformation, consisting in the discreteness of the coating with a density of 5 properties in depth and the dominance of elastohydrodynamic or mixed lubrication mode.

For the first time, empirical dependences of the intensity of wear of steel - duralumin D16 tribosystems (unmodified / modified ESC) were obtained, taking into account the antifriction characteristics, the ability of the material to absorb the mechanical energy of the processes of deformation or destruction, and the intensity of the mechano-destructive

processes in the surface layers of the metal during friction, which can be used to predict the effectiveness of the created wear-resistant coatings at the stage of laboratory research.

The method of assessing the transition of the tribosystem from normal to catastrophic wear on the basis of the analysis of acoustic emission signals has been furtherly developed: the prerequisites for the onset of catastrophic wear are factors such as an increase in density, averaged power and an increase in the dispersion of acoustic emission signals, which is caused by an increase in the energy of destruction, intensification of plastic deformations, and microseizure of friction pairs.

The mechanism of formation of wear-resistant dissipative structures for tribosystems with a combined discrete electrospark coating of VK8 alloy and copper is determined, which consists of the formation of chemically modified boundary layers, saturation of the surface layers of friction pairs with active elements of sulfur, phosphorus, and oxygen as a result of the activation of mechanochemical oxidation processes during friction and the presence of a lubricant reserve material due to the discreteness of the coating.

The practical values of the obtained results are implemented in the developed complex of technological and experimental methods of researching 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.

Key words: acoustic emission, duraluminium, dissipative structures, discrete coating, electric-spark alloying, wear intensity, friction coefficient, wear resistance, oil capacity of the surface, spring-deformed state, surface plastic deformation, average power of acoustic emission.

The main results of dissertation research have been published in 32 scientific works.

Monograph

1. Mikosianchyk O., Mnatsakanov R., Tokaruk V., Kharchenko O. Phenomenological probabilistic model of friction pair wear taking into account thermal mechanical stability of boundary layers. / In: Chemmotological Aspects of Sustainable Development of Transport. Sustainable Aviation. Springer, Cham. 2022. P.31-49. (**Scopus**).

In professional publications:

2. Babak V.P., Stadnichenko V.M., Pryimakov O.G., Tokaruk V.V. Forecasting the durability of aviation materials. *Automation. Automation, electrotechnical complexes and systems*. 2004. No. 1 (13). P. 158-162.

3. Zaporozhets V.V., Bilyakovich O.M., Tokaruk V.V. Experimental evaluation of the activation energy of surface fracture of ShKh15 steel in TS-1 aviation fuel. *Problems of tribology*. 2006. No. 1. P.118-126.

4. Zaporozhets V.V., Bilyakovich O.M., Tokaruk V.V. Influence of load parameters on the thickness of the lubricating layer in the contact zone of tribocompounds. *Problems of tribology*. 2006. No. 2. P.101-104.

5. Zaporozhets V.V., Bilyakovich O.M., Tokaruk V.V. Evaluation of the influence of transmission oil on the condition of the surfaces of tribo-couplers. *Problems of tribology*. 2007. No. 3. P. 30-33.

6. Zaporozhets V.V., Bilyakovich O.M., Tokaruk V.V., Fedina V.P. The application of Fourier analysis for estimation of the resource of transmission oils. *Bulletin of the National Transport University*. 2007. No. 14. P. 242-244.

7. Zaporozhets V.V., Stadnichenko V.M., Tokaruk V.V. Methodology for quick assessment of wear resistance of specimens with electrospark coatings. *Problems of tribology*. 2010. No. 4. P.25-31.

8. Zaporozhets V.V., Stadnichenko V.M., Tokaruk V.V. Dynamics of scuff resistance and transient processes during the wear of electrospark coatings. *Problems of tribology*. 2010. No. 4. P. 47-51.

9. Zaporozhets V. V., Stadnychenko V. M, Tokaruk V. V. Criteria for evaluation of the mechanism of energy dissipation and lifetime forecasting during acoustic-emission diagnostics of axial-piston hydraulic machines. *Problems of friction and wear: science and technology*. 2010. Issue 54. P.5-18.
10. Mikosyanchyk O. O., Kudrin A. P., Mnatsakanov R. G., Yakobchuk O. Ye., Tokaruk V. V. The evaluation of thermal processes in frictional contact during rolling with sliding. *Problems of friction and wear*. 2017. No. 4 (77). P. 1-4.
11. Yakobchuk O. E., Mnatsakanov R. G., Mikosyanchyk O. O., Khimko A. M., Tokaruk V.V. Anti-seize properties of Aero Shell 33 Grease while using 9XC and 30XГCA structural steels. *Problems of friction and wear*. 2018. No. 1 (78). P. 27-36.
12. Mnatsakanov R. G., Mikosyanchyk O. O., Yakobchuk O. Ye., Tokaruk V. V. Predictioning of linear wear of contact surfaces under extreme friction conditions. *Problems of friction and wear*. 2018. No. 4 (81). P. 4-12.
13. Tokaruk V. V., Mnatsakanov R. G., Mikosyanchyk O. O., Kudrin A. P. Patterns of changing of tribotechnical parameters and acoustic emission signals for friction pair 30XГCA steel-Д16 duraluminium. *Problems of friction and wear*. 2019. No. 2 (83). P. 19-28.
14. Tokaruk V. V., Mnatsakanov R. G., Mikosyanchyk O. O. Kinetics of changes of acoustic emission signals and tribotechnical characteristics for friction pairs in sliding conditions. *Problems of friction and wear*. 2019. No. 3 (84). C. 40-47.
15. Mikosianchyk O.A., Tokaruk V.V., Mnatsakanov R.G. Estimation of tribotechnical characteristics and signals of acoustic emission for a friction pair of steel 30HGSA and duraluminium D16 modified by an alloy VK8. *Problems of Tribology*. 2019. №2 (92). C. 48-54.
16. Bogdanovich O.I., Tokaruk V.V., Statnikov Yu.Ya. Determination of the activation energy of mechano-chemical modification of ShKh15 steel in the environment of TS-1 long-term storage aviation fuel. *Problems of friction and wear*. 2020. No. 1 (86). P. 93-97.

17. Tokaruk V.V., Mikosianchyk 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.
18. Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Yakobchuk O. E., Khimko A. M., Tokaruk V. V. Development of a technique for monitoring and diagnosing operational properties of lubricants based on tribotechnical parameters. *Problems of friction and wear*. 2021. No. 1 (90). P. 11-19.
19. Mikosyanchyk O. O., Tokaruk V. V., Mnatsakanov R. G., Zanko S. M., Zhosan O. Yu. The influence of deformation processes and structural-phase transformations on the wear resistance of contact surfaces. *Problems of friction and wear*. 2021. No. 2 (91). P. 54-62.
20. Tokaruk V. V., Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Zhosan O. Yu., Dolot D. V. Analysis of strength characteristics of electrospark coatings. *Problems of friction and wear*. 2021. No. 3 (92). P. 47-53.
21. Tokaruk V. V., Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Khimko A. M., Ilyina O. A. The estimation of the stress-strain state of tribocontact after changing of the average power of acoustic emission. *Problems of friction and wear*. 2022. No. 3 (96). P. 30-40.

In foreign specialized У іноземних спеціалізованих publications:

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. (**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. (**Scopus**)

Materials and theses of conferences:

24. Zaporozhets V.V., Tokaruk V.V. Fourier analysis of the structure of the surface layer in connection with the estimation of the resource of lubricants. International scientific

and technical conference *Modern problems of mechanical engineering*. September 22-23, 2008, Kyiv: theses add. 2008. P. 32.

25. Zaporozhets V.V., Tokaruk V.V. Tribological evaluation of nanocoated friction pairs by the acoustic-emission method. International of science technical conf. *Modern problems of tribology*. May 19-21, 2010, Kyiv: theses add. K.: IVT ALKON NAS of Ukraine. 2010. P. 51.

26. Bogdanovich O. I., Tokaruk V. V. Comparison of the energy of activation of the surface destruction of SHK 15 steel in the environment of aviation fuels "TS-1" of conditioned and "TS-1" of long-term storage. *AVIA-2017: XIII International Scientific and Technical Conference* 19 -April 21, 2017: theses add. K., 2017. P. 19.78-19.82.

27. Tokaruk V. V., Mnatsakanov R. G., Mikosyanchyk O. O. Kinetics of changes in acoustic emission signals and tribotechnical characteristics for friction pairs in sliding conditions. IV International Scientific and Technical Conference "*Modern Problems of Mechanical Engineering*" , October 10, 2019, Kyiv. 2019 P. 40-47.

28. Tokaruk V.V., Mikosianchyk O.O. Stress-strain state of duralumin alloy with wear-resistant discrete coatings. *AVIA-2019: XIV International Scientific and Technical Conference*, April 23-25, 2019: theses add. K., 2019. P. 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. Conference: VIII International Scientific-Technical Conference «*Problems of chemmotology. theory and practice of rational use of traditional and alternative fuels & lubricants*» At: Kyiv–Kamianets-Podilskyi, Ukraine, 21-25 June 2021. P.31-49.

30. Ilyina O.A., Mikosyanchyk O.O., Mnatsakanov R.G., Kharchenko O.V., Tokaruk V.V. Modeling of gear wear processes. The XXVIII International Scientific and Practical Conference "*Science and practice, actual problems, innovations*", July 19-22, 2022, Milan, Italy. P. 280-284.

31. Tokaruk V.V., Mnatsakanov R.G., Gorb E.S., Yakobchuk O.E. The assessment of the structural adjustability of the tribosystem based on registration and processing of acoustic emission signals. The Tenth World Congress "*AVIATION IN THE XXI-st CENTURY*" *Safety in Aviation And Space Technologies*. September 28-30, 2022 theses add. – Kyiv. P. 1.2.1.-1.2.4.

Patents:

32. Zaporozhets V. V., Stadnychenko V. M., Stadnychenko M. G., Tokaruk V. V. Device for measuring the value of linear wear without stopping the machine: Utility Model Patent No. 62928 Ukraine: G01 B21/06 (2006.01). u201100937; statement 28.01.2011; published 26.09.2011, Bull. No. 18. - 3 p.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ТА АНАЛІЗ МЕТОДИК ОЦІНКИ ЇХ ЯКОСТІ	36
1.1. Аналіз основних теоретичних відомостей про механізми тертя та зношування	36
1.2. Аналіз методів підвищення задиростійкості і зносостійкості поверхонь фрикційного контакту	42
1.3. Методики триботехнічних випробувань та критерії оцінки зносостійкості пар тертя	47
1.4. Трибомоніторинг вузлів тертя акустичними методами контролю.....	51
1.4.1. Джерела акусто-емісійного випромінювання під час тертя.....	53
1.4.2. Параметри акустичної емісії в трибодіагностиці.....	58
Висновки до розділу 1.	63
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	65
2.1. Застосування алюмінієвих сплавів в якості антифрикційних матеріалів та технології їх армування	65
2.2. Технологія нанесення електроіскрових покриттів	67
2.3. Методологія розрахунку напружено-деформованого стану дискретних ЕП.....	71
2.4. Методика трибологічних досліджень контактних поверхонь з електроіскровими покриттями	73
2.5. Методика реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії	80
2.6. Методи дослідження механо-фізико-хімічних характеристик пар тертя	85

Висновки до розділу 2.....	87
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТРИБОСПРЯЖЕННЯ	89
3.1. Моделювання нанесення електроіскрових покриттів різної щільності	89
3.2. Вплив щільності електроіскрових покриттів на їх зносостійкість ...	93
3.3. Мікрогеометричні характеристики електроіскрових покриттів в вихідному стані	98
3.4. Аналіз міцнісних характеристик електроіскрових покриттів	104
Висновки до розділу 3.....	108
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ З РЕЄСТРАЦІЄЮ ТА ОБРОБКОЮ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ	111
4.1. Закономірності зміни триботехнічних параметрів та сигналів акустичної емісії при випробуваннях пари тертя 30ХГСА - Д16 на зносостійкість	112
4.2. Триботехнічні характеристики контакту та акустична емісія для трибоспряження сталь 30ХГСА та дюралюміній Д16 з електроіскровим покриттям ВК8.....	118
4.3. Аналіз триботехнічних характеристик контакту та оцінка сигналів акустичної емісії пари тертя сталі 30ХГСА та дюралюмінію Д16 з дискретним покриттям міді.....	123
4.4. Оцінка інтенсивності зношування контактних поверхонь при армуванні дюралюмінію електроіскровими покриттями.....	130
Висновки до розділу 4.....	139
РОЗДІЛ 5. ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТРИБОСИСТЕМИ ЗА ПАРАМЕТРАМИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ	142

5.1. Визначення критеріїв переходу трибосистеми до катастрофічного зношування	142
5.2. Формування зносостійких дисипативних структур дискретним комбінованим електроіскровим покриттям	153
5.3. Регресійний аналіз оцінки впливу домінуючих чинників на знос дискретних електроіскрових покриттів	159
Висновки до розділу 5.....	165
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	170
ДОДАТКИ.....	190

ВСТУП

Широке застосування алюмінію та сплавів на його основі в машинобудуванні визначається високими показниками питомої міцності, підвищеною корозійною стійкістю, а також здатністю до демпфування коливань та великого поглинання енергії. При виборі конструкційного матеріалу для триботехнічних пар головними умовами стають здатність забезпечити високі антифрикційні та механічні властивості у процесі експлуатації.

Домінуючим фактором, що визначає опір зношуванню деталей машин, є рівень міцності їх контактних поверхонь. На процес зовнішнього тертя впливає велика кількість чинників: напружено-деформований стан, механічні та фізико-хімічні властивості контактуючих тіл, навколишнє середовище, режим роботи і т.д. Застосування методів, спрямованих на зміцнення або зміну поверхневого шару, дозволяє запобігти процесу зародження деформаційних дефектів, що забезпечує підвищення зносостійкості контактних поверхонь.

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).

Метод ЕІЛ має унікальний комплекс переваг: низька енергоємність, екологічна безпека, простота технології (відсутність спеціального робочого середовища та попередньої підготовки поверхні), міцність зчеплення з основою. Електроіскрова обробка забезпечує утворення на поверхні деталі шару, який має відмінні від вихідного стану структуру та властивості, що залежать від параметрів іскрового розряду, складу електродного матеріалу, матеріалу оброблюваної деталі та інших факторів.

В кожному конкретному випадку потрібно оптимізувати режим обробки (вибір енергії розряду, час обробки), а також підібрати зносостійкий матеріал електрода. Тому

вивчення характеристик міцності і пружності покриттів, наплавлених методом ЕІЛ, має важливе теоретичне і практичне значення.

Оскільки структурна пристосованість і зміна трибологічної системи в процесі експлуатації можуть істотно змінити вихідні параметри, які використовуються при прогнозуванні ресурсу вузла тертя, необхідно накопичення великої кількості експериментального матеріалу щодо взаємозв'язку між вихідною твердістю матеріалів і їх опором зношуванню. Отримані методом ЕІЛ покриття за структурою та властивостями відрізняються від вихідних сплавів. Причиною цього є мікрометалургійні процеси, що протікають на оброблюваній поверхні в зоні дії іскрового розряду внаслідок фізико-хімічної взаємодії перенесеного матеріалу з матеріалом катода і елементами навколишнього середовища при наявності імпульсних термодинамічних напружень.

Особливістю ЕІЛ-покриттів є притаманна їм несучільність, яка забезпечує підвищення зносостійкості за рахунок дискретності структури покриття, відповідальної за зниження залишкових напружень. Наявність в поверхневому шарі дискретних ділянок підвищеної твердості, оптимальної суцільності, геометрії і глибини впровадження в поверхню усуває концентрацію напружень від контактних навантажень і перериває процес тріщиноутворення, пластичного деформування, а також знижує схильність до схоплювання деталей, що істотно підвищують міцність і експлуатаційну надійність пар тертя.

Основною перевагою дискретних покриттів є можливість шляхом зміни суцільності та розмірів дискретних ділянок на поверхні основи, підбором матеріалів за фізико-механічними характеристиками керувати та мінімізувати напружено-деформований стан поверхні, забезпечуючи підвищення зносостійкості ЕІП.

Існують численні дані, які показують, що знос займає провідне місце в списку небезпечних пошкоджень машин і механізмів, що мають рухомі деталі. Дедалі створювані більші навантаження, більш жорсткі умови експлуатації, використання

нових матеріалів, властивості яких не завжди докладно вивчені, роблять вузли тертя все більш небезпечними об'єктами, які потребують безперервного контролю.

Багато експериментальних досліджень були проведені для вивчення взаємозв'язку між параметрами АЕ та зносостійкістю пар тертя.

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. 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 працездатності, що дозволяє розробити рекомендації щодо застосування армованих поверхонь у певному навантажувально-швидкісному режимі.

Таким чином, перспективним способом підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів є їх поверхневе зміцнення. При цьому важливу увагу слід надавати вибору методу зміцнення, застосування якого обумовлено як економічними, так і технологічними вимогами. Економічно вигідніше в умовах дрібно- та середньосерійних виробництв застосовувати мікроплазмоіскові методи, до яких відноситься ЕІЛ.

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 покращенню 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, Zhao, H., Feldshteina E.E.; Mao Y.;, Xie Y.J.; Wang M.C.; Johnson R.N., Reynold J.L. 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. Ефект дискретності покриття посилюється при ЕІЛ за рахунок формування на початковому етапі обробки сфероподібних глобул підвищеної твердості в порівнянні з поверхнею. Наявність таких глобул, крім зниження залишкових напружень, зменшує площу трибоконтакта, що призводить до збільшення питомого навантаження і, як результат, ініціює реакції трибоокислення, які відповідальні за формування вторинних зносостійких структур.

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.

Встановлення закономірностей впливу мікрогеометричних та фізико-механічних властивостей армованих ЕІЛ алюмінієвих сплавів на їх триботехнічні характеристики потребує розробки нових методик оцінки їх якості.

Важливим напрямком у вивченні якості створюваних електроіскрових покриттів є встановлення критеріїв, що визначають діапазон їх роботоздатного стану. 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. До інформаційно-аналітичних методів визначення діапазону роботоздатності триботехнічної пари можна віднести метод акустичної емісії, який характеризується високою чутливістю до пружно-пластичних деформацій у фрикційному контакті.

Таким чином, управління структуротворенням та механічними характеристиками поверхневих шарів алюмінієвих сплавів за рахунок формування зносостійких електроіскрових покриттів дозволить вирішити науково-технічну проблему підвищення триботехнічних і міцністних характеристик алюмінієвих сплавів та розширити навантажувально-швидкістний 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 задиростійкості 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 застосування 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 трибосистеми сталь – дюралюміній Д16;

– провести статистичну оцінку впливу еквівалентних напружень в ЕПП 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 трибоконтакту сталь – неармованого / армованого електроіскровим покриттям дюралюміній Д16.

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

Методи дослідження. Теоретичні дослідження ґрунтуються на підставі фундаментальних положень 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» методом безперервного вдавлювання індентора; параметри профілю мікрорельєфу визначали за допомогою профілометра 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.

1. Встановлено механізми підвищення зносостійкості в 2 рази в умовах ковзання та збільшення роботоздатного 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 методика 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 $(0.88 \dots 1.6) \cdot 10^{-5}$ 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 «ПОДОЛІЯ-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) (Додаток В).

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 ЕІП 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. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: 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; 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 (із них тих, що займають повну сторінку – 1), 57 рисунків (із них тих, що займають повну сторінку – 4), 5 додатків. Список використаних джерел налічує 190 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ТА АНАЛІЗ МЕТОДИК ОЦІНКИ ЇХ ЯКОСТІ

1.1. Аналіз основних теоретичних відомостей про механізми тертя та зношування.

Тертя – це процес перетворення зовнішньої механічної енергії в теплоту та в енергію внутрішніх процесів, результат різних видів взаємодій, які реалізуються в механічних, фізико-механічних, механо-хімічних, теплових, електричних та інших взаємообумовлених процесах [1, 2].

Серед основних теорій дослідження тертя і зносу деталей машин, які найбільш повно пояснюють сутність явищ, що відбуваються в різних умовах експлуатації матеріалів, виділяють наступні: деформаційно-адгезійна, молекулярна, молекулярно-механічна, молекулярно-кінетична, структурно-енергетична [3]. В наш час найбільшого поширення набули: молекулярно-механічна та структурно-енергетична теорії тертя і зносу, основні положення яких розглянуто нижче.

Молекулярно-механічна теорія тертя і зношування, розроблена такими вченими як І. В. Крагельским, Б. В. Дерягіним, М. М. Хрущовим та ін., розглядає тертя як процес, на який впливають комплекс фізичних, механічних і хімічних чинників, а також характер контактування елементів трибоспряження [4].

Відповідно до молекулярно-механічної теорії реальні тверді тіла (деталі машин) завжди мають певну шорсткість і хвилястість. При контакті двох тіл А і Б розрізняють номінальну площу контакту, яка визначається геометричними параметрами тертьових тіл (наприклад, довжиною і діаметром підшипника ковзання), контурну площу контакту, яка визначається хвилястістю поверхонь, і фактичну площу контакту, яка визначається контактом мікронерівностей поверхонь (рис.1.1).

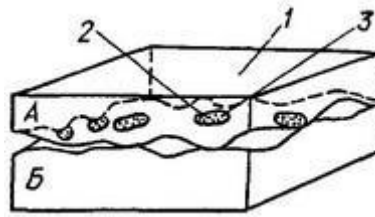


Рис.1.1. Схема контакту двох поверхонь тертя: 1 - номінальна площа; 2 - контурна площа; 3 - площа фактичного контакту.

Молекулярно-механічна теорія тертя та зношування виходить з того, що процеси зношування відбуваються в місцях фактичного контакту поверхонь тертя елементів трибоспряження. При дії на контактуючі тіла в процесі їх відносного переміщення нормальних і тангенціальних сил, в контактному шарі виникають пружно-пластичні деформації, відбувається взаємне проникнення елементів і молекулярна взаємодія шарів. Багаторазові пружні деформації мікрооб'ємів металу викликають втомні руйнування поверхневого шару [5].

При щільному контакті металів і відсутності між ними плівки оксидів або поверхнево-активних речовин, наприклад оливи, виникає молекулярна взаємодія (адгезія) тіл, яка призводить до виривання деяких об'ємів металу в одного з тіл тертя. Під впливом кисню повітря на поверхнях тертя утворюються окисні плівки, що екранують металеві поверхні та перешкоджають появі молекулярних зв'язків між ними. Одночасно відбувається окислення деформованих мікрооб'ємів металу, в результаті чого прискорюються процеси їх руйнування, тобто механічне зношування поверхонь тертя [6].

Таким чином, при відносному переміщенні тертьових тіл виникає складний процес зміни фізико-механічних і хімічних властивостей металу в поверхнево-активному шарі, що обумовлюється багаторазовими пружньо-пластичними деформаціями, впливом температури, окисними процесами і молекулярною взаємодією. Ці зміни спричиняють в кінцевому рахунку зношування поверхонь [7]. Взаємодія поверхонь двох елементів трибоспряження І.В. Крагельським представлено

у вигляді порушень фрикційних зв'язків у місцях контактування. Види фрикційних зв'язків залежать від відносної глибини впровадження нерівностей [8].

Аналіз схем порушення фрикційних зв'язків при взаємодії поверхонь представлено на рис.1.2.

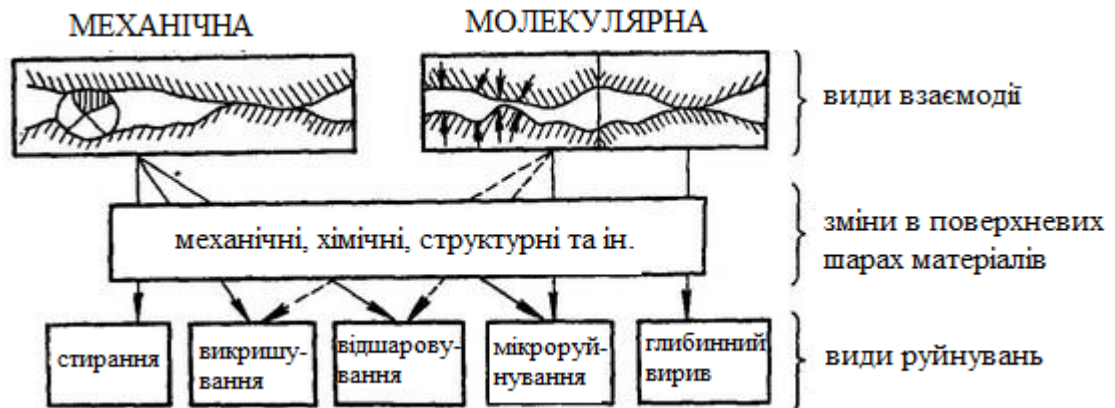


Рис. 1.2. Види руйнувань за І.В. Крагельським [9].

Експлуатаційні властивості деталей машин та механізмів в великій мірі залежать від параметрів якості робочих поверхонь. Серед цих параметрів, в першу чергу, слід відзначити мікрогеометричні характеристики (хвилястість, шорсткість, центральна висота мікронерівностей та ін.), так і фізико-механічні властивості (товщина зміцненого шару, його будова та фазовий склад) [10]. Параметри якості поверхневого шару елементів трибоспряження безпосередньо впливають на їх триботехнічні властивості. В роботі [11] встановлено зростання коефіцієнту тертя при збільшенні висотних параметрів шорсткості та зниження коефіцієнта тертя і зносу, зростання контактної витривалості при збільшенні опорної кривої профілю.

Шорсткість поверхневого шару безпосередньо впливає на довговічність пар тертя, оскільки мікронерівності виступають в якості концентраторів напружень та можуть призвести до зниження опору втоми. Досвід експлуатації машин і механізмів показав, що на інтенсивність зношування контактних поверхонь впливають тривалість

припрацювання, маслоємність, площа фактичного дотику та інші параметри, які визначаються кривою опорної поверхні (кривою Аббота) [12, 13].

Таким чином, вивчення особливостей формування фактичної площі контакту на поверхнях деталей, встановлення взаємозв'язку параметрів субструктури та напружено-деформованого стану поверхневих шарів матеріалів з їх триботехнічними характеристиками є актуальним завданням в плані розробки технологічних рекомендацій щодо формування оптимальної мікрогеометрії пар тертя з метою підвищення міжремонтного ресурсу вузлів та агрегатів.

В результаті систематичного дослідження процесів тертя та зносу деталей машин проф. Б. І. Костецький сформулював основні положення структурно-енергетичної теорії, що базується на позиціях термодинаміки необоротних процесів [14]. Відповідно до цієї теорії в поверхневих шарах матеріалу при терті і зношуванні виникають і розвиваються фізичні, хімічні та механічні процеси. Вони виникають під впливом зовнішніх механічних впливів, середовища, теплоти тертя. Найбільш істотні для інтенсифікації зносу являються процеси окислення, захоплювання, абразивні і втомні [15]. Залежно від умов тертя, одночасного впливу різних чинників складаються умови для домінування одного виду зношування, що протікає з найбільшою швидкістю.

Б. І. Костецький обґрунтував поділ усіх процесів поверхневого руйнування на теоретично і практично допустимі і недопустимі, тобто, що призводять до пошкоджуваності матеріалів. До перших відносяться механохімічний нормальний окислювальний; механохімічний нормальний знос плівок некісневого походження; механохімічна форма абразивного зносу (особливо виділяється окислювальне зношування як стійкий нормальний механохімічний процес). До других – захоплювання першого і другого роду; фреттинг-процес (схоплювання, динамічне окислення); механічна форма абразивної пошкоджуваності (різання, дряпання, пропахування); втома при коченні; інші види пошкоджуваності (корозія, ерозія, змінання) [16].

Зносостійкість при окислювальному зношуванні визначається інтенсивністю утворення і властивостями вторинних структур (ВС), виникаючих в процесі тертя і є

складною функцією вихідних властивостей матеріалів і умов роботи. В процесі тертя бажана перебудова вихідної структури матеріалу в нову фазу максимального зміцнення з орієнтацією щодо напрямку переміщення (структурна пристосованість). ВС можна охарактеризувати їх геометричними параметрами – займаною площею і глибиною, міцність - фізичними параметрами і хімічним складом [17, 18].

Система тертя являє собою не механічну, а відкриту термодинамічну систему, обмінюються енергією і речовиною з зовнішнім середовищем. Таким чином, тертя – це процес утворення енергії, а закономірності цього перетворення мають структурно-матеріалознавчу основу [19, 20].

На підставі структурно-енергетичної теорії можна чітко сформулювати мету управління зносом – забезпечення стійкості ВС, розширення діапазонів нормальних механохімічних і термохімічних процесів, зниження їх рівнів. Основою управління стає регулювання процесів за допомогою конструкторських, технологічних і експлуатаційних засобів.

Відповідно до структурно-енергетичної теорії існують три стадії зносу деталей протягом всього періоду напрацювання: початкова стадія (припрацювання) – перехід від початкового стану до сталого режиму роботи; усталена – протікає з постійною швидкістю, характерною для даних умов; посилена – стадія катастрофічного зношування.

Спільна дія нормальних і дотичних напружень в поверхневому шарі матеріалу при терті призводить до створення об'ємного напруженого стану. В таких умовах навіть високоміцнісні матеріали набувають достатню пластичність [21]. Однією з основних причин зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару при терті є нерівномірна пластична деформація. Частина енергії пластичної деформації витрачається на формування залишкових напружень, які обумовлені дією максимальних нормальних напружень на поверхні і максимальних дотичних напружень на деякій глибині.

Енергія, що поглинається при пластичній деформації, генерується в основному в напруженнях третього роду, які є наслідком порушення геометрії кристалічної ґратки. Значна частина напружень деформації ґратки зосереджена навколо дислокацій [22]. Дислокація оточена полем пружних напружень, яке взаємодіє з такими ж полями сусідніх дислокацій. Характер силового впливу на дану дислокацію від зовнішніх навантажень і від оточуючих дислокацій однаковий. Дислокація характеризується зміщенням атомів в ній самій; крім того, виникають пружні зміщення в правильній ґратці, яка оточує дислокацію. Відповідно до цього розподіляються і напруження. Іншим джерелом напружень третього роду, що охоплюють ділянки меншого, ніж у дислокацій, порядку, є атоми втілення.

Специфічною особливістю роботи матеріалів в вузлах тертя є підвищення кінетичної енергії атомів в поверхневих шарах контактуючих пар, розрив міжатомних зв'язків в результаті протікання процесів пружної і пластичної деформації. Зростання енергетичного потенціалу атомів, що проявляється в підвищенні температури поверхонь тертя, призводить до зміни фізико–механічних та інших характеристик, які були властиві матеріалу в початковому стані, і, крім того, активує ряд незворотних процесів [23].

Зародження і розвиток первинних зсувів в поверхневих шарах пар тертя, відповідно до сучасних уявлень фізичної мезомеханіки, обумовлено їх пониженою зсувною стійкістю і наявністю концентраторів напружень у вигляді мікронерівностей контактних поверхонь [24]. Ступінь деформації приповерхневих шарів і характер поширення деформації по глибині залежать від міцністних властивостей, структури металу, наявності покриття та його адгезійної сили взаємодії з матеріалом основи [25].

Глибина поширення деформаційних процесів на ділянках фактичного контакту на початковій стадії фрикційної взаємодії знаходиться в діапазоні від сотих часток до декількох мікрометрів [26]. Деформаційне зміцнення, взаємодія і перекриття окремих ділянок пластичної течії можуть призводити до поширення деформацій на глибину до 10 – 100 мкм.

Встановлення механізмів утворення вторинних структур на поверхнях елементів трибоспряжень дозволяє керувати вибором оптимальних поєднань триботехнічних властивостей контактних поверхонь і мастильних матеріалів в залежності від умов експлуатації вузлів тертя, забезпечуючи умови їх сумісності. Важливе практичне значення має питання оптимізації структурних перетворень і процесів деформаційного зміцнення в металевих матеріалах при терті з метою досягнення якомога вищого рівня зміцнення поверхні, що буде сприяти підвищенню зносостійкості елементів трибоспряжень.

Виходячи з викладеного можна сформулювати етапи вивчення зносостійкості пар тертя. З одного боку, необхідні дослідження властивостей вихідних матеріалів, а з іншого – визначення характеристик поверхневих шарів протягом усього робочого часу як функції кількості циклів фрикційного взаємодії. Реалізація уявлень структурно-енергетичної теорії при вивченні та практичному запобіганні зносу відкриває перспективи розширення діапазону зносостійкості матеріалів трибоспряжень, тим самим збільшуються тривалість терміну служби агрегату або механізму.

1.2. Аналіз методів підвищення задиристійкості і зносостійкості поверхонь фрикційного контакту.

Підвищення опору деталі руйнуванню при різних видах експлуатаційних навантажень може бути досягнуто технологічними методами об'ємного або поверхневого зміцнення. Об'ємне зміцнення підвищує статичну міцність деталей, у яких робочі напруги розподілені по перерізу більш-менш рівномірно. Для таких деталей використовують високоміцні сталі і сплави, композиційні матеріали. Однак більшість деталей працює в умовах, при яких експлуатаційне навантаження (тиск, нагрівання, дія навколишнього середовища тощо) сприймається головним чином їх поверхневим шаром. Тому зносостійкість, зародження і розвиток втомної тріщини, виникнення вогнищ корозії залежить від опору поверхневого шару руйнуванню. Для

деталей, руйнування яких починається з поверхні, розроблено велику кількість методів поверхневого зміцнення, заснованих на нанесенні покриттів або зміни стану (модифікації) поверхні [27-30].

При нанесенні покриттів зміцнення деталей досягається шляхом осадження на неї поверхні матеріалів, які за своїми властивостями відрізняються від основного металу, але найбільш повно відповідають умовам експлуатації (знос, корозія, хімічний вплив тощо).

Всі відомі методи зміцнення можна умовно розділити на 6 основних класів [31]:

1. Зміцнення зі створенням плівки на поверхні:

а) осадження хімічними реакціями (оксидування, сульфидування, фосфатування, нанесення зміцнюючого мастильного матеріалу, осадження з газової фази);

б) осадження з парів (термічне випаровування тугоплавких сполук, катодно-іонне бомбардування, пряме електронно-променеве випаровування, реактивне електронно-променеве випаровування, електронно-хімічне випаровування);

в) електролітичне осадження (хромування, нікелювання, електрофорез, нікельфосфатування, борування, борохромування, хромофосфатування);

г) напилення зносостійких сполук (плазмове напилення порошкових матеріалів, детонаційне напилення, електродугове напилення, лазерне напилення, вихрове напилення, індукційне припікання порошкових матеріалів).

2. Зміцнення зі зміною хімічного складу поверхневого шару металу:

а) дифузійне насичення (борування, ціанування, азотування, нітроцементация і т.п.)

б) хімічний і фізико-хімічний вплив (хімічна обробка, іонна імплантація, електроіскрова обробка і т.д.).

3. Зміцнення зі зміною структури поверхневого шару [32, 33]:

а) фізико-термічна обробка (лазерне гартування, плазмове гартування);

б) електрофізична обробка (електроконтактна, електроерозійна, магнітна обробка);

в) механічна (зміцнення вібрацією, фрикційно-зміцнююча обробка, дробеструменева, обробка вибухом, термомеханічна, електромеханічна);

г) наплавка легованих елементом (газовим полум'ям, електричною дугою, плазмою, лазерним променем, пучком іонів і т.д.).

4. Зміцнення зі зміною енергетичного запасу поверхневого шару [34]:

а) обробка в магнітному полі (термомагнітна обробка, імпульсним магнітним полем, магнітним полем);

б) обробка в електричному полі.

5. Зміцнення зі зміною мікрогеометрії поверхні і наклепом [35]:

а) обробка різанням (точіння, шліфування, надшвидкісне різання);

б) пластичне деформування (накочування, обкочування, розкочування, вигладжування, вібронакочування, вібровигладжування, калібрування, відцентрово-ударне зміцнення і т.д.);

в) комбіновані методи (анодно-механічне, поверхнєве легування з вигладжуванням, різання з впливом ультразвукових коливань, магнітно-абразивна обробка і т.д.).

6. Зміцнення зі зміною структури всього обсягу металу [36, 37]:

а) термообробка при позитивних температурах (гартування, відпуск, нормалізація, термомагнітна обробка та ін.);

б) криогенна обробка (гартування з обробкою холодом, термоциклювання).

Зазначені методи, направлені на зміцнення поверхневих шарів елементів трибоспряження, мають і недоліки [38-40]. При легуванні і армуванні спостерігається підвищена витрата матеріалів, так як легуючий елемент розподіляється у всьому об'ємі заготовки, а зносу піддається тільки тонкий шар контактної поверхні металу. Велика кількість легуючих елементів йде в металобрухт зі стружкою при механічній обробці та відходами з ливниковою системою, а також вигорають при виплавці. До недоліків методу обробки в магнітному полі слід віднести жолоблення деталі при загартуванні і при її високій твердості. До недоліків зміцнення деталей пластичним деформуванням

слід віднести зниження теплопровідності матеріалу в результаті пластичного деформування і тим самим зростання теплонапруженості вузла та порівняно низькі результати підвищення зносостійкості (всього 8 ... 10%). Основними недоліками об'ємної термообробки є: викривлення деталі при загартуванні; залишкові напруження і нерівномірна твердість по перетину деталі; знеуглецевлювання поверхні; утворення гартівних тріщин, особливо при великому перерізі; висока енергоємність процесу.

Не існує універсального методу зміцнення деталей, тому один і той же метод в одних умовах експлуатації може дати позитивний ефект, а в інших негативний. Тому в ряді випадків застосовують комбіноване зміцнення деталей, засноване на використанні двох або трьох методів зміцнення, кожен з яких дозволяє підсилити певну експлуатаційну характеристику одержаного зміцненого поверхневого шару. Крім того, вибір того чи іншого методу поверхневого зміцнення визначається економічними міркуваннями.

На дрібно- та середньосерійних підприємствах, де асортимент деталей широкий та часто змінюється, економічно обґрунтованим є застосування більш дешевих, зручних та мобільних процесів зміцнення та відновлення. До таких технологій, зокрема, відноситься мікроплазмоіскровий метод – електроіскрове легування. За своєю простотою та енергозбереженням ЕІЛ є найбільш пристосованим для відновлення розмірів зношених деталей машин та їх зміцнення [41]. В залежності від типу електроду можна отримати як високоміцне, зносостійке покриття, так і покриття з найменшим коефіцієнтом опору при терті. Проаналізовано, що особливо ефективно при відновленні алюмінієвих автомобільних поршнів застосування в якості електродів матеріалу із сплаву ВК8 для більшої твердості обробленої деталі, а для зменшення коефіцієнту опору використовують мідний електрод [42].

У роботі [43] встановлено, що на алюмінієвих сплавах при допомозі електроіскрового легування (ЕІЛ) електродами із сплаву Al-Sn можна отримати зносостійке покриття, яке за 5-6 раз перевищує міцність загартованої сталі.

Особливістю такого покриття є наявність у його структурі мікро- і нановолокон оксиду олова, які мають високу мікротвердість HV 1200 кг /мм².

Досліджено вплив комплексної обробки, що складається з ЕІЛ та ультразвукової ударної обробки (УЗО) на мікротвердість поверхневих шарів сплаву Al—6Mg [44]. Процес ЕІЛ мідними, титановими або вольфрамовими електродами призводить до утворення різних інтерметалічних фаз у поверхневих шарах товщиною 25—50 мкм (переважно Al_3Ti , $Al_{12}W$, Al_2Cu), що впливає на релаксаційну стійкість сплаву при циклічних навантаженнях і термічних впливах.

Незважаючи на очевидні переваги методу ЕІЛ, він має недоліки. До них можна віднести як збільшення шорсткості армованого шару, так і обмеження глибини покриття, що наноситься. Основними причинами, що обумовлюють обмеження глибини зміцненого шару при застосуванні методу ЕІЛ, є: виникнення залишкових напружень розтягу, у тому числі за рахунок утворення в легованому шарі нових фаз з різними коефіцієнтами термічного розширення, що обумовлює збільшення ймовірності виникнення тріщин в покритті [45].

Для зменшення вихідної шорсткості електроіскрових покриттів та зміни величини і знака залишкових напружень доцільно застосування технології ЕІЛ спільно з ППД, що дозволяє сформувати поверхневий шар з високою твердістю, зносостійкістю, низькою шорсткістю і підвищеною втомною міцністю [46, 47].

У роботі [48] показано, що при ЕІЛ залишкові напруження розтягу виникають у поверхневому шарі глибиною до 0,2 мм. В результаті подальшого зміцнення сформованих електроіскрових покриттів ППД обкатуванням кулькою деформаційні криві значно змінюються - у поверхневому шарі формуються напруги стиску величиною до 520 МПа та глибиною локалізації до 0,9 мм. Аналогічні якісні результати отримані у роботі [49], де експериментально встановлено, що при застосуванні ППД електроіскрових покриттів залишкові напруження розтягування (43...59 МПа) перетворюються на залишкові напруги стиску (-34...-80 МПа) на глибину покриття 79-210 мкм. Це явище відбулося внаслідок деформаційного

зміцнення, обумовленого структурними змінами (зокрема, збільшенням щільності дислокацій).

Таким чином, для підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів необхідно застосовувати певні технології поверхневого зміцнення функціональними покриттями, які б забезпечували як належний економічний рівень технологічного процесу їх формування, так і проявляли б ефективні експлуатаційні характеристики відповідно до призначення.

1.3. Методики триботехнічних випробувань та критерії оцінки зносостійкості пар тертя.

Як відомо, зносостійкість є властивістю матеріалу чинити опір зношуванню у визначених умовах тертя та оцінюється величиною, зворотною швидкості зношування або інтенсивності. Швидкість зношування (темп зносу) оцінюється як відношення зносу до часу, протягом якого він утворився, або до числа одиничних актів зношування. Інтенсивність зношування – відношення зносу до шляху тертя, на якому відбулося зношування. Тобто, в обох випадках для оцінки зносостійкості необхідно знати величину зносу. Знос – результат зношування у встановлених одиницях (довжини, об'єму, маси й ін.) за ГОСТ 23.204-78, який виявляється у вигляді відділення або залишкової деформації матеріалу [50].

У зв'язку з цим вибір одиниць зносу обумовлений конструкцією машини тертя, точніше, схемою контакту і методикою проведення випробувань, у першу чергу, методикою обробки результатів. В даний час стандартизовані дві методики і машини тертя (ГОСТ 9490-75 і ДСТУ 23.221-84) з однаковою схемою контакту – чотири кульки. Цього недостатньо для вирішення постійно зростаючих потреб трибології, хімотології, матеріалознавства, потреб машинобудування, експлуатації машин і механізмів у всіх галузях народного господарства. До того ж, чотирьохкульковим

машинам (ЧКМ, МАСТ-1 і МАСТ-2) притаманні істотні недоліки, які значно обмежують їхнє практичне використання [51, 52]:

1. Показник P_c (навантаження зварювання) характеризує деякі властивості мастильних матеріалів, специфічні для умов, які лежать за межами фактично спостерігаємих в експлуатації.

2. Показник P_c , мало доповнює оцінку якості мастильних матеріалів по узагальненому показнику зносу, а його величина для широко застосовуваних мастильних матеріалів практично змінюється в дуже незначних межах.

3. Метод оцінки міцності плівки за P_k (навантаження заїдання) розрізняє мастильні матеріали без присадок між собою не більш ніж у два рази (з присадками у 5 разів), тоді як в експлуатації їхня поведінка істотно відмінна.

4. Малі величини об'ємного зносу (не більше 0,03 мм) обмежують використання ЧКМ для диференціації мало чим відмінних за протизношувальною ефективністю присадок, які забезпечують достатньо низький рівень зносу у нормальних умовах.

Це призвело до переваги методик, машин тертя і критеріїв оцінки зносостійкості матеріалів, які вирішують поодинокі, конкретні питання [53, 54].

У структурно-енергетичній теорії тертя і зношування і теорії структурного пристосування застосовують нові енергетичні і ентропійні критерії оцінки зносостійкості. У першу чергу питома робота руйнування A_p , енергоємність системи тертя за тепловим показником ECT_Q , критична величина роботи тертя A_{KP} , кінетична S^K і потенційна (конфігураційна) S^n ентропії, які складають загальну ентропію S , ентропійний критерій деградації EKD . Досить широке використання одержали і такі енергетичні критерії як критична (гранична) щільність внутрішньої енергії U_* (для абразивного зношування), поверхнева енергія або поверхневий нагяг γ , робота виходу електрона PBE , екзоелектронна емісія EEE , контактна різниця потенціалів U_{KPP} , а також ентропійний критерій мінімуму виробництва ентропії. При цьому енергетичні і ентропійні критерії оцінки зносостійкості характеризують процеси поверхневого руйнування, обґрунтовано оцінюють умови тертя, вибір матеріалів трибоспрямижень, їх

сполучення в межах нормального зношування (без пошкоджень), визначають межі переходу до пошкоджень [55-57].

Вказані критерії не є прямими характеристиками зносостійкості матеріалів. Так, найбільш розповсюджений, найкраще вивчений і експериментально перевірений критерій — питома робота руйнування (відношення роботи сил тертя до величини зносу) є уявною характеристикою зносостійкості і залежить не тільки від поверхневої міцності матеріалу, але і від здатності трибосистеми розсіювати енергію [58].

Найбільш прямою, кількісною, структурно-енергетичною та фізико-хімічною характеристикою для оцінки зносостійкості матеріалів трибоспряжень є енергія активації поверхневого руйнування E , яка характеризує потенційний бар'єр реалізації елементарних актів руйнування [59].

Внаслідок впливу жорстких режимів експлуатації відбувається трансформація видів тертя з мастильним матеріалом: від тертя з гідродинамічним режимом мащення до тертя з граничним режимом мащення. Найбільшу практичну цінність при цьому представляє тертя з домінуванням граничного режиму мащення, так як саме при реалізації даного виду мащення при роботі механізмів виникає небезпека прояву адгезійних явищ, які надалі можуть призводити до схоплювання і заїдання, тобто до виникнення аварійних ситуацій. Природно, що в цьому випадку виникає питання про способи діагностики вузлів тертя і прогнозуванні зносу. Тому питання про кількісну оцінку зносу під час роботи машини без її зупинки і розбирання вузлів тертя набуває особливої актуальності. Критерії акустичної емісії та екзоелектронної емісії дозволяють проводити діагностику вузла тертя безпосередньо під час роботи та за відповідними показниками визначати режим, процеси та характер тертя.

Встановлена висока кореляція між коефіцієнтом тертя та середньоквадратичною напругою АЕ для сухого ковзання [60]. Таке співвідношення може дозволити передбачити коефіцієнт тертя за сигналом АЕ. Було також визначено, що робота тертя добре корелює з відповідною інтегрованою напругою АЕ з часом. В роботі [61] отримані залежності акусто-емісійних параметрів, які відповідають механізму

дисипації енергії поверхневих шарів пар тертя при переході до режиму катастрофічного зношування.

Відомо, що в процесах тертя між безпосередньо дотичними нерівностями контактуючих поверхонь утворюються і розриваються адгезійні зв'язки, колективний розрив яких є актом фізико-хімічної взаємодії, супроводжується випромінюванням пружного імпульсу і може розглядатися як акт АЕ. За наявності мастила молекули мастильного матеріалу беруть участь в адгезійній взаємодії, проте це не змінює саму природу фізико-хімічного акта АЕ. Встановлено, що в ході широкого класу фізико-хімічних процесів дійсно випромінюються сигнали АЕ рівня, що реєструється, і є хороші перспективи створення кількісних методів оцінки кінетики досліджуваних процесів за параметрами супутнього акустичного випромінювання [62]. За відсутності мастила слід очікувати випромінювання АЕ набагато вищого рівня внаслідок переважання фізико-механічного механізму АЕ у процесі деформації самого матеріалу нерівностей.

Розроблена методика обробки акустикоємісійного випромінювання і визначення швидкості зношування за реєстрацією зносу з відділенням першої частки матеріалу трибосистеми в інформаційних одиницях [байт/с], яка дозволяє визначити загальні закономірності механізмів зношування різних трибосистем, розробити критерії оцінки їх технічного стану, а також методики прогнозування ресурсу машин і механізмів [63].

В роботі [64] методом акустичної емісії (АЕ) було показано, що зношування являє собою періодичний процес, який характеризується послідовністю подій накопичення дефектів, утворення деформованого поверхневого шару і його руйнування. Реєстрація акустичних сигналів дозволяє з високою точністю визначити час подій, які характеризують пружну взаємодію мікровиступів сполучених поверхонь, утворення і руйнування адгезійних зв'язків, появу мікротріщин і відділення частинок зносу.

В роботі [65] встановлено взаємозв'язок між параметрами сигналів акустичної емісії і характером тертя і зношування сталі X120Mn12. Виявлено, що зростання

медіанної частоти акустичних сигналів обумовлено появою високочастотних складових в спектрі сигналу, які з'являються на етапі формування поверхневого шару, що також супроводжується зростанням коефіцієнта тертя. При лавиноподібному руйнуванні поверхневого шару з відділенням частинок зносу відбувається різке падіння коефіцієнта тертя, медіанної частоти і енергії акустичних сигналів.

При аналізі коефіцієнтів тертя на поверхні зі складною морфологією, виникають труднощі, пов'язані з пульсуючим, нестационарним характером енергії, що виділяється в зоні фрикційних контактів. Акустична емісія, як показують дослідження, дозволяє реєструвати зазначені особливості [66, 67]. У даній роботі були встановлені критичні тимчасові точки і відповідні їм температури початку активізації адгезійних властивостей сталі, процеси схоплювання і когезії.

Таким чином, перспективним методом трибодіагностики вузлів тертя є метод АЕ, оскільки на підставі спектрів зміни амплітуди сигналу АЕ, величини розкиду сигналів, що реєструються, і енергетичних параметрів АЕ можливо прогнозувати та оцінити процеси зношування.

1.4. Трибомоніторинг вузлів тертя акустичними методами контролю.

Серед великої різноманітності методів трибодіагностики особливе місце належить акустичним методам (рис. 1.3). До переваг акустичних методів контролю можна віднести: безінерційність по відношенню до процесу фрикційної взаємодії, незначна енергоємність, наявність добре апробованої теорії обробки сигналів і чутливої апаратури. В картині акустичних процесів відображаються всі види процесів деформації і руйнування при терті, їх характеристики дуже чутливі до впливу середовища на поверхні контакту твердих тіл і фізико-хімічних процесів на цій поверхні. Крім того, до переваг застосування даних методів відноситься можливість поєднання реєструючих приладів з обчислювальною технікою [68, 69].

Акустичні методи контролю знаходять застосування для виявлення поверхневих та внутрішніх дефектів типу несучільностей (тріщин, пір, раковин, розшарування тощо), для проведення структурного аналізу (визначення розмірів зерна, наявності домішок і неоднорідностей), а також для вимірювання товщини деталей.

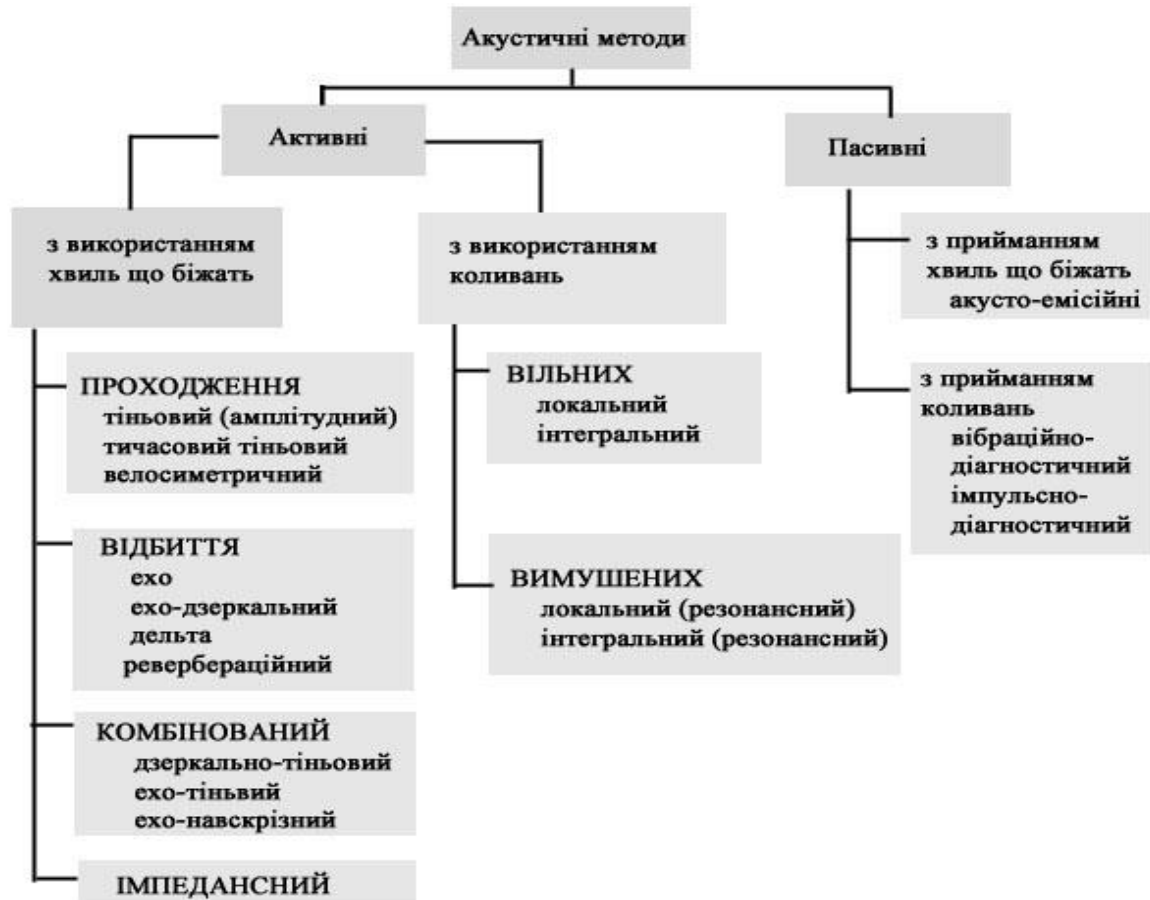


Рис. 1.3. Класифікація акустичних методів.

Найбільш інформативним і простим у використанні є метод акустичної емісії. Відповідно до існуючих уявлень та прийнятих визначень АЕ – це випромінювання матеріалом пружних хвиль, викликаних локальною динамічною перебудовою його структури. На відміну від традиційних методів неруйнівного контролю, в методі АЕ фізичне поле, що реєструється, утворюється самим матеріалом досліджуваного об’єкта й несе в собі повний обсяг інформації про перебіг процесу як у даний момент, так і в часі [70, 71].

Основні переваги методу АЕ, в порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю, наведено в табл. 1.1.

Таблиця. 1.1

Порівняння характеристик АЕ метода контролю з іншими методами неруйнівного контролю

Акустична емісія	Інші методи неруйнівного контролю
Виявляє рух/зростання дефектів	Виявляють геометричну форму дефектів
Потребують навантаження	Не потребують навантаження
Кожне навантаження унікально	Контроль відтворюваний
Чутливий до структури матеріала	Менш чутливі до матеріалу
Менш чутливий до геометрії дефекта	Більш чутливі до геометрії
Потребує менших зусиль при проведенні контролю продукції/процесів	Потребують більших зусиль при проведенні контролю продукції/процесів
Потребує доступ тільки до місць встановлення датчиків	Потребує доступ тільки до всієї поверхні об'єкта
Контролює конструкцію за один цикл навантаження	Поступове сканування ділянок конструкції
Основні проблеми: сильний вплив шуму	Основні проблеми: сильний вплив геометрії

Принциповою відмінністю методу АЕ від інших методів неруйнівного контролю є те, що за допомогою сигналів АЕ виявляються активні, а отже і найбільш небезпечні дефекти. Чутливість методу АЕ на порядок вище, ніж у звичайних методів ультразвукової дефектоскопії, тому амплітуда сигналу АЕ при підростанні тріщини на 0,01-0,1 мм в сотні разів вище, ніж зміна амплітуди ультразвукового сигналу [72].

1.4.1. Джерела акусто-емісійного випромінювання під час тертя.

Вперше метод АЕ для вивчення мікродинамічних процесів в тонких поверхневих шарах матеріалів під час тертя був застосований В.В. Запорожцем [73]. Була знайдена амплітудно-частотна модуляція контактних напружень з широкосмуговим хвильовим полем, що є результатом взаємодії поверхонь при терті, пружно-пластичної деформації локальних мікрооб'ємів і вивільнення енергії (емісії) та проявляється при руйнуванні

поверхонь тертя або релаксації пружно-деформованого стану [74]. В роботі [75] показано, що спектр коливань поверхневого шару містить ультразвукову емісійну складову і є результатом вивільнення енергії при циклічному деформуванні або фазовому зміцненні – ослабленні і руйнуванні поверхневого шару.

На сучасному етапі розвитку акусто-емісійних досліджень можна виділити наступні групи джерел АЕ в металах [76]:

- процеси дислокацій (розмноження дислокації, відриви дислокацій і їх скупчень від точок закріплення, рух дислокації, взаємодія дислокації з перешкодами, загибель дислокації);
- фазові перетворення поліморфного типу, у тому числі мартенситні;
- утворення частинок другої фази при розпаді перенасичених твердих розчинів;
- магнітомеханічні ефекти, які обумовлені зовнішнім зсувом меж магнітних доменів при зміні величини зовнішнього магнітного поля;
- руйнування, у тому числі корозійне розтріскування під напругою, і водневе відкривчування [77].

Використання послідовних наближень і методів ідеалізації дозволило пов'язати фрикційні і акустичні параметри трибосистем (табл. 1.2) [78].

Таблиця. 1.2

Зв'язок фрикційних і акустичних параметрів трибосистем

Акустичні параметри	Фрикційні характеристики
Активність N	$\dot{N} = K \frac{(P\theta)^{0,71} A_c^{0,29}}{r^{0,9} R_a^{1,6}} v$
Частота f_i ,	Розмір частинки зносу a_i : $a_i = \frac{c}{2f_i}$
Період зміни швидкості рахунку Δt	Площа руйнування S : $S \sim k \Delta t$
Сумарний рахунок N	Ваговий знос ΔG : $\Delta G \sim c_1 + c_2 N$
Розподіл огинаючого спектру АЕ $p(B)$	Розподіл частинок зносу за розміром $P(a)$: $P(a) = \left(\frac{B\gamma}{k} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{2\pi} p_1(B \cos \alpha) p_2(B \sin \alpha) d\alpha$

АЕ при терті можна розглядати на мікро- і макрорівнях. В першому випадку акустичний сигнал обумовлений явищами дислокацій, локальною перебудовою дефектів в поверхневих шарах взаємодіючих матеріалів, в другому – джерелами випромінювання є трансформації фрикційних зв'язків. Розглянемо деякі важливі моделі зазначених рівнів.

Ударна взаємодія мікронерівностей. Тертя можна розглядати як результат пружних і непружних взаємодій мікрошорсткостей твердих поверхонь, при яких в мікрообластях фактичного дотику виникає миттєвий тиск великої величини, тобто процес має яскраво виражений характер удару. Одна з найважливіших характеристик елементарного акту тертя – час, що протікає від моменту виникнення фрикційного зв'язку до його розриву, згідно оцінкам [79], складає $10^{-5} - 10^{-6}$ с. Зокрема, для кожного конкретного випадку він може бути визначений за формулою:

$$t = d/v \quad 1.1$$

де v – швидкість ковзання; d – середня величина діаметра плями дотику, яка може бути розрахована, якщо відомі форма нерівностей і закон розподілу висот і вершин.

Оцінимо швидкість деформації мікровиступів при терті. Нехай середня напруга на плямі контакту рівна пружній твердості і не залежить в першому наближенні від зближення. Тоді максимальна швидкість деформації може бути обчислена за формулою [68]:

$$\dot{\epsilon} = 0,3v/r, \quad 1.2$$

де r – радіус кривизни вершин мікронерівностей.

Пластична деформація мікровиступів. Встановлено, що в реальних умовах тертя частина мікровиступів деформується пружно, частина пластично.

Існують деякі евристичні моделі напівфеноменологічного характеру, які дозволяють оцінити параметри акустичної емісії, що виникає внаслідок пластичної деформації мікрошорсткостей взаємодіючих поверхонь [80]. В цьому випадку на мікроскопічному рівні АЕ обумовлена процесами виникнення, руху і анігіляції дефектів кристалічних ґрат твердого тіла. В той же час експериментально встановлено

[81], що акустичний сигнал від переміщення одиничної дислокації практично неможливо виділити на фоні теплових шумів кристалічних ґрат і найвірогіднішими джерелами акустичної емісії є зародження і рух великих скупчень дислокації.

Енергетичні характеристики сигналів АЕ, що активуються при пластичній деформації матеріалів, наведені в табл. 1.3. [82, 83].

Таблиця 1.3

Параметри сигналів АЕ залежно від джерел АЕ

Вид джерела АЕ	Амплітуда або енергія імпульсу АЕ	Тривалість сигналу, мкс	Ширина спектру сигналу, МГц
Джерело дислокації Франка-Рида	$(10^{-7} - 10^{-6}) G$, Па	$5-50-10^3$	1
Анігіляція дислокації завдовжки $10^{-8}-10^{-6}$ м	$4(10^{-18}-10^{-16})$	5×10^{-5}	10^2
Утворення мікротріщини	$10^{-10}-10^{-12}$	$10^{-3}-10^{-2}$	50
Зникнення двійника розміром 1×10^{-9} м ³	$10^{-2}-10^{-3}$	1×10^{-4}	—
Пластична деформація об'єму матеріалу зі стороною 1×10^{-4} м	10^{-4}	1×10^3	0,5
Енергія теплових шумів	$4,2 \times 10^{-21}$ Дж/Гц	—	Рівномірна до 10

*Примітка: G - модуль зсуву.

Дані таблиці дозволяють дати якісну оцінку акустичній енергії, яка виділяється при пластичній деформації мікровиступів шляхом використання допущення про пропорційність акустичної енергії, яка виділяється, до зміни об'єму матеріалу, який пластично деформується.

Електроадгезійні явища. Тертя можна розглядати як процес послідовного встановлення і порушення адгезійного контакту між компонентами пари тертя. При цьому на ділянках фактичного контакту цих пар виникає подвійний електричний шар, густина заряду якого особливо велика у випадку контакту різнорідних тіл [84]. У зв'язку з цим тертя можна розглядати як миттєве виникнення і порушення подвійних електричних шарів на межі розділу тіл. При руйнуванні електроадгезійних зв'язків між

матеріалами, які розрізняються за своєю електронною структурою, спостерігається складний комплекс фізичних процесів, у тому числі і акустична емісія [85].

Структурно-фазові перетворення. До числа характерних процесів, що розвиваються при контактній взаємодії фрикційних елементів, відносяться процеси структурно-фазових перетворень поверхневих шарів взаємодіючих пар. Ступінь розвитку і інтенсивність цих процесів залежать від властивостей матеріалів і температурного режиму тертя [86, 87].

При виникненні (зникненні) частинок нової фази в навколишньому середовищі розвиваються дислокаційні і зсувні компоненти зсуву, внутрішні напруги і пов'язані з ними спотворення ґрат, утворення дислокації і зернограничне ковзання і т. д., що викликає появу пружних хвиль [88]. Загальне рішення такої задачі сучасними аналітичними методами знайти неможливо. Ідеалізація властивостей фізичного джерела АЕ дозволила одержати деякі якісні оцінки при фазових перетвореннях мартенситного типу.

Утворення нових поверхонь. В основному опубліковані роботи з АЕ присвячені питанням руйнування. Це пояснюється перш за все тим, що при розповсюдженні тріщини в низькочастотному діапазоні виділяється значна пружна енергія, що полегшує її реєстрацію [89].

Численними дослідженнями показано, що параметри акустичного випромінювання відображають природу процесів руйнування, які відбуваються. Тому для отримання повної інформації про кінетику протікання цих процесів необхідна одночасна реєстрація декількох параметрів АЕ [90].

Стосовно фрикційного руйнування (зносу) твердих тіл в роботі [68] зроблена спроба встановити кореляцію між параметрами акустичної емісії і кількістю ділянок контакту, що руйнуються з відділенням частинок зносу. в якості початкових умов було прийнято: кожна ділянка контакту є джерелом акустичного випромінювання, параметри якого визначаються його площею і напруженим станом; реальними джерелами акустичної емісії можуть бути тільки ті ділянки контакту, які руйнуються з

відділенням частинок матеріалу; ефективний радіус частинки зношування співпадає з середнім діаметром контакту.

Узагальнюючи представлений експериментальний і теоретичний матеріал, який стосується джерел АЕ при фрикційній взаємодії, слід зазначити, що серед останніх найбільшою енергією володіють джерела, які активуються утворенням нових поверхонь, найменшою – виникаючі при ударній взаємодії шорсткостей.

1.4.2. Параметри акустичної емісії в трибодіагностиці.

У залежності від типу джерела елементарний сигнал АЕ може бути релаксаційного або акселераційного типу (рис. 1.4).

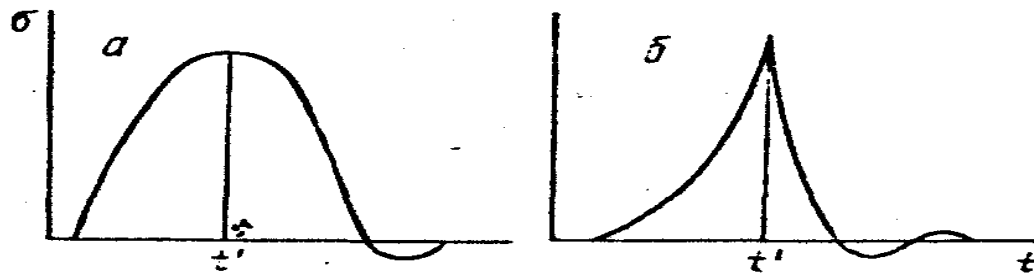


Рис. 1.4. Основні типи одиночних сигналів АЕ: *a* – релаксаційний; *б* – акселераційний.

Релаксаційний сигнал описується виразом [91]:

$$\sigma = \sigma_{\max} [1 - \exp(-t/\tau_1)\Phi^*(t) - \exp(-t/\tau_2)], \quad 1.3$$

а акселераційний –

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{\max} at^k \Phi^*(t) & \text{при } t < t' \\ \sigma_{\max} \exp(-t/\tau) & \text{при } t > t', \end{cases} \quad 1.4$$

де *a* і *k* – коефіцієнти, які забезпечують необхідну розмірність і характеризують фізичний процес ($k > 1$).

Більшість імпульсів АЕ, випромінюваних різними джерелами, мають загальні ознаки. По-перше, всі імпульси АЕ переважно однополярні; це свідчить про те, що спектр імпульсів АЕ достатньо широкий, причому його ширина визначається

тривалістю імпульсів. По-друге, максимум спектральної густини розташований на низьких частотах при збільшенні частоти, амплітуди спектральних компонентів швидко спадають до нульового значення [92].

Повний сигнал АЕ є сукупністю елементарних сигналів. Потік сигналів АЕ є випадкова послідовність імпульсів, у яких випадкові амплітуда і час появи. Розрізняють два види потоків імпульсів [93]:

- потоки імпульсів, що не перекриваються, виникають при невеликій частоті подій і реєструються незалежно один від одного (дискретна АЕ);
- потоки імпульсів, що перекриваються, коли можливе часткове накладення елементарних імпульсів один на одного (безперервна АЕ).

Проаналізуємо ступінь інформативності реєстрованих параметрів в термінах, відповідно до ГОСТ 27655–88 [94].

Число імпульсів акустичної емісії (N_{Σ}) – число зареєстрованих імпульсів дискретної АЕ за інтервал часу спостереження (параметр придатний лише для опису потоків імпульсів, що не перекриваються). Поява дискретної АЕ має місце при когезійному вириванні.

Активність акустичної емісії (Σ) – число зареєстрованих імпульсів акустичної емісії за одиницю часу. За своєю інформативністю цей параметр порівнюється з попереднім, але дає велику деталізацію в часі, що дозволяє досліджувати процес в динаміці.

Сумарний рахунок акустичної емісії (N) – число зареєстрованих перевищень імпульсами акустичної емісії встановленого рівня дискримінації (обмеження) за інтервал часу спостереження. Ця величина характеризує число подій з енергією, що перевищує деяке порогове значення.

Швидкість рахунку акустичної емісії – відношення сумарного рахунку акустичної емісії до інтервалу часу спостереження.

Останні два параметри характеризують число події з енергією, що перевищує деяке порогове значення. При цьому втрачається інформація, що відноситься до

низькоенергетичних складових процесу. Проте тут можлива реєстрація двох типів сигналів: високочастотного випадкового (осциляції) і його огибаючої.

Енергія АЕ (E) – енергія, яка виділяється джерелом АЕ і переноситься хвилями, які виникають в матеріалі. Експериментально встановлено, що енергія імпульсу дискретної АЕ складає $1,6 \cdot (10^{-9} - 10^{-5})$ Дж, а безперервної – $1,6 \cdot (10^{-19} - 10^{-18})$ Дж [95].

Енергія джерела акустичної емісії (E_c) – енергія механічних коливань, яка виділяється в місці локальної перебудови структури.

Спектральна густина. Реальний спектр акустичного випромінювання при проходженні через зразок і приймально-реєструючий тракт спотворюється. Проте деякі дослідники вважають, що за спектральною густиною можливо визначити природу акустичного випромінювання. Для зменшення спотворень необхідно мати більш широкосмугову систему прийому і реєстрації сигналів АЕ з рівномірною амплітудно-частотною характеристикою.

Окрім перерахованих вище інформативних параметрів, які достатньо просто можна одержати в аналоговому або цифровому вигляді при застосуванні в основному стандартних електронних приладів, для аналізу експериментальних результатів застосовуються параметри, які одержують шляхом розрахунків.

Застосування у якості критерія акустико-емісійної інформаційної ентропії дозволило авторам роботи [96] застосувати метод АЕ для вирішення численних практичних задач: розробити методики діагностики вузлів тертя, експрес-аналізу службових властивостей оливи та методику визначення термінів припрацювання матеріалів.

Розглянемо практичне використання методу АЕ для оцінки триботехнічних процесів.

Результати [97] показують, що в елементарних процесах тертя та зношування виявляються два типи сигналів АЕ: безперервний сигнал АЕ низької амплітуди та імпульсний сигнал АЕ високої амплітуди. Безперервний сигнал АЕ низької амплітуди виявляється за допомогою генерації ліній ковзання та елементарних актів зносу.

Сигнал АЕ високої амплітуди обумовлений утворенням переносної частинки зношування.

В роботі [98] встановлено зв'язок між механізмами зношування та частотним спектром сигналів АЕ. Сигнали АЕ, виявлені під час адгезійного зносу, показали великий пік в області високих частот (частотний пік сигналів АЕ виникає на частоті близько 1,1 МГц), що пов'язано з збільшенням кількості адгезійних зв'язків, які утворюються у фрикційному контакті та призводять до збільшення амплітуди реєстрованих сигналів АЕ. Сигнали АЕ, виявлені під час абразивного зносу, показали кілька піків в області низьких частот (частотні піки розподіляються в області від 0,25 до 1 МГц) та вплив абразивних зерен на амплітуду реєстрованих сигналів АЕ.

При вивченні впливу твердості абразивних частинок або частинок зношування на частотні спектри сигналу АЕ встановлено, що тверді частинки SiC розміром 1 мкм посилювали швидкість і генерацію піку АЕ, тоді як частинки полістиролу розміром 60 нм значно знижували дані характеристики [99].

У роботі [100] відмічається, що в процесі тертя ковзання існує безліч джерел АЕ, і можливість їх ідентифікації за формами сигналів АЕ з використанням різних математичних підходів, таких як вейвлетний або кластерний аналіз невелика. Натомість авторами запропоновано аналіз добре відомих параметрів сигналу АЕ, таких як медіанна частота та енергія. Наприклад, при дослідженні латуні (Cu (37%), Zn) встановлена кореляція між коефіцієнтом тертя та медіанною частотою сигналу АЕ, між медіанною частотою та зносом, а також між медіанною частотою та віброприскоренням [101].

У статті [53] представлена теоретична модель співвідношення акустичних викидів при терті ковзання на основі дискретності контакту з урахуванням дисперсності матеріалів. Встановлено, що швидкість ковзання, навантаження, шорсткість та інші топографічні характеристики поверхні впливають на енергію сигналу АЕ. За допомогою цієї моделі можна оцінити критичне контактне навантаження, що вкрай важливо для оцінки умов змащення в інженерних програмах.

Результати [102] показали кореляцію між коефіцієнтом тертя та напругою акустичної емісії, що дає змогу прогнозувати коефіцієнт тертя залежно від сигналу АЕ. Також було визначено, що робота тертя добре корелює з відповідною інтегрованою напруженістю АЕ (intRMS). Встановлене критичне значення швидкості ковзання, при якій може відбуватися прискорений знос, стало можливим за рахунок зміни intRMS.

Багато робіт присвячено дослідженню взаємозв'язку параметрів сигналів акустичної емісії покриттів із режимом тертя та зношування. Наприклад, у роботі [103] встановлена кореляція між параметрами акустичних сигналів, процесами руйнування твердих нанокристалічних покриттів Ti-Al-N та коефіцієнтом тертя.

Аналіз розподілу амплітудного спектру сигналів АЕ (особливо високоамплітудної складової), що реєструються при випробуваннях покриттів CrAl, CrAl/CrN та 18Cr10NiTi, дозволяє зробити висновок про функціональний стан захисних покриттів в області пружної і пластичної деформації - поява великої кількості високоамплітудних сигналів може означати про настання стадії інтенсивного розтріскування покриття [104].

Дослідження одношарових покриттів ZrN і CrN, а також багат шарових покриттів ZrN/CrN, нанесені вакуумно-дуговим методом, у різних умовах експлуатації покриттів показали, що оцінка віброприскорень та енергії АЕ виявилася досить ефективним засобом контролю зносу покриттів, а медіанна частота АЕ виявилася менш інформативною [105].

В роботі [106] зазначено, що в якості інформативних параметрів під час контролю процесів тертя алюмінієвого сплаву Д16 з покриттям ВК-95 з міддю в умовах ступеневого зростання осьового навантаження можна використовувати такі показники, як усереднену потужність результуючих сигналів АЕ, її дисперсію та стандартне відхилення.

Розглянуті параметри АЕ дозволяють детально вивчити природу процесів, що відбуваються при зміні напруженого стану матеріалу. Тому для отримання більш

повної інформації про особливості протікання цих процесів необхідна реєстрація максимального числа параметрів.

Проте реєстрація повного набору інформативних параметрів не завжди виправдана. Так, наприклад, при дослідженні перехідних процесів при терті (припрацювання) доцільно реєструвати швидкість рахунку (активність) АЕ. При встановленні виду зношування (втомне, абразивне і т. д.) самою інформативною є форма імпульсів АЕ і їх амплітудний розподіл [68]. Таким чином, у кожному конкретному випадку досліднику необхідно вирішувати проблему вибору оптимального числа інформативних параметрів.

Висновки до розділу 1.

1. 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. Однак, для підвищення якості ЕІП необхідно враховувати ступінь суцільності покриття, його мікрогеометричні та міцнісні характеристики. Комплексна оцінка якості ЕІП дозволить розробити технологічні рекомендації для їх нанесення з застосуванням багатофункціональних електродів, які забезпечать формування зносостійкого покриття.

2. 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.

3. Встановлення закономірностей кінетики формування метастабільних дисипативних структур з урахуванням енергетичних характеристик трибосистем при армуванні алюмінієвих сплавів електроіскровими покриттями дозволить керувати процесами управління зносом за рахунок створення зносостійких вторинних структур, що надасть можливість для розширення діапазону роботоздатного стану зміцнених алюмінієвих сплавів.

4. Перспективним напрямком дослідження зносостійкості ЕПП є розробка нових методик оцінки їх триботехнічних характеристик. Використання методу АЕ дозволить більш глибоко оцінити якість сформованих ЕПП з урахуванням механізмів дисипації енергії та пружно-пластичних змін в поверхневих шарах.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

2.1. Застосування алюмінієвих сплавів в якості антифрикційних матеріалів та технології їх модифікування.

Високоміцні алюмінієві сплави завдяки комплексу фізико-механічних та корозійних властивостей широко застосовуються в сучасному машинобудуванні.

Найбільший вклад у створення та впровадження алюмінієвих сплавів внесла школа Н.А. Буше. В роботі цієї школи вперше сформульований принцип сумісності пар тертя: необхідність вибору матеріалів вала та антифрикційного матеріалу відповідно до умов їх експлуатації. Для різних підшипників потрібне різне поєднання службових характеристик антифрикційних матеріалів, що призводить до необхідності створення цілої гама алюмінієвих сплавів з різною оброблюваністю, задиростійкістю, зносостійкістю і здатністю мінімально зношувати сталеве контртіло. При цьому, як правило, нові алюмінієві антифрикційні сплави застосовуються для заміни бронзи в різних вузлах тертя. Така заміна економічно обґрунтована, так як алюмінієві сплави мають в 2,5-3 рази меншу щільність, а одиниця ваги такого сплаву в середньому в 2-4 рази дешевше заміненої бронзи.

Сучасні антифрикційні матеріали на основі Al-сплавів отримують або шляхом їх легування, або шляхом формування багатофункціональних покриттів. При цьому до головних вимог, що висуваються до сформованих матеріалів, слід віднести як сприятливе поєднання антифрикційних та механічних властивостей, так і технологічність та вартість процесу [107]. Застосування поверхневої модифікації та зміцнювальних покриттів суттєво розширює використання алюмінієвих підшипникових сплавів та алюмоматричних композитів. Для підвищення експлуатаційних характеристик Al-сплавів використовують практично всі традиційні

технології модифікації поверхні та нанесення зносостійких та корозійностійких покриттів [108, 109].

Істотні дослідження щодо підвищення триботехнічних характеристик алюмінієвих сплавів пов'язані з азотуванням Al-сплавів [110], використанням лазерної техніки [111, 112], газотермічним напилюванням [113], хімічним (CVD) [114] та фізичним (PVD) осадженням [115, 116] з газової фази. Використовують для поверхневого зміцнення Al-сплавів багатоопераційні технології поліпшення властивостей покриттів [117], технологію поверхневого пластичного деформування [118], технології мікродугового оксидування [119].

Слід зазначити, що суцільним покриттям властивий такий недолік, як когезійне розтріскування та адгезійне відшарування в умовах експлуатації. Особливо вразливе високотверде покриття на низькомодульній основі. Контактні навантаження призводять до прогину покриття та його руйнування в зоні дії розтягуючих напружень.

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 [120, 121]. Метод електроіскрового легування (ЕІЛ) має наступні переваги: технологічна простота, багаторазове підвищення зносостійкості деталей при різних умовах зношування, можливість використання широкої номенклатури матеріалів покриття, набагато нижчі енергозатрати, низька вартість обладнання [122, 123].

Дослідження широкого ряду компактних електродних матеріалів при ЕІЛ сплавів АК4 і АЛ25 показало позитивний ефект при використанні електродів, які мають температуру плавлення, близьку до температури плавлення алюмінію [124]. Найбільш ефективно виявилось ЕІЛ мідним електродом при вузьких інтервалах сили робочого струму з числом проходів легуючого електрода. У роботі [125] досліджували масоперенос при ЕІЛ ряду Al-сплавів з використанням різних класів електродних матеріалів у ручному та механізованому варіантах. При цьому встановлено, що

величина ерозії алюмінієвого катода істотно залежить від природи матеріалу електрода та корелює з його температурою плавлення.

Сучасний розвиток ЕІЛ алюмінієвих сплавів направлений на застосування порошкових легуючих матеріалів, особливого значення набуло застосування композиційних багатофункціональних електродних матеріалів [126-129].

Подальші успіхи у розвитку ЕІЛ на алюмінієвих сплавах забезпечило створення покриттів дискретної структури підвищеної термомеханічної стійкості [130-132]. На відміну від суцільних покриттів, в покриттях дискретної структури виникають менші за значенням залишкові напруження [133]. При контактному навантаженні працює не вся поверхня деталі з покриттям, а лише окремі фрагменти дискретного покриття.

В дисертаційній роботі використано технологію ЕІЛ на алюмінієвому сплаві Д16 (Додаток Г). На поверхневий шар зразків з матеріалу Д16 за допомогою методу електроіскрового легування наносили дискретні покриття твердого сплаву ВК-8, пластичного матеріалу Сu та комбінованого покриття ВК-8 + Сu. Зазначені покриття певної товщини виконані в Інституті проблем міцності ім. Г.С.Писаренка Національної академії наук України (Додаток Д).

Для зменшення вихідної шорсткості електроіскрових покриттів та зміни величини та знаку залишкових напружень доцільно застосування технології ЕІЛ спільно з поверхневою пластичною деформацією (ППД), що дозволяє сформувати поверхневий шар з високою твердістю, зносостійкістю, низькою шорсткістю та підвищеною втомною міцністю. Тому після ЕІЛ проводилося поверхнєве пластичне деформування методом статичної чеканки, максимальне зусилля складало 190 МПа ($\sigma_{\tau}^{0,7}$ для Д16) [13].

2.2. Технологія нанесення електроіскрових покриттів.

Технологічний процес ЕІЛ реалізується на універсальних та спеціалізованих установках (іскрових генераторах), що належать до класу електромеханічних

пристроїв, основними вузлами яких є генератор імпульсів струму (ГІС) та електродна комутуюча система. Електрична схема генератора імпульсів (рис.2.1) складається з трансформатора 1, діодів ввімкнених за мостовою схемою 2, зарядно-разрядного блоку 3, котрий складається з блоку накопичувальних конденсаторів 4, розрядних тиристорів 5 і дроселя 6.

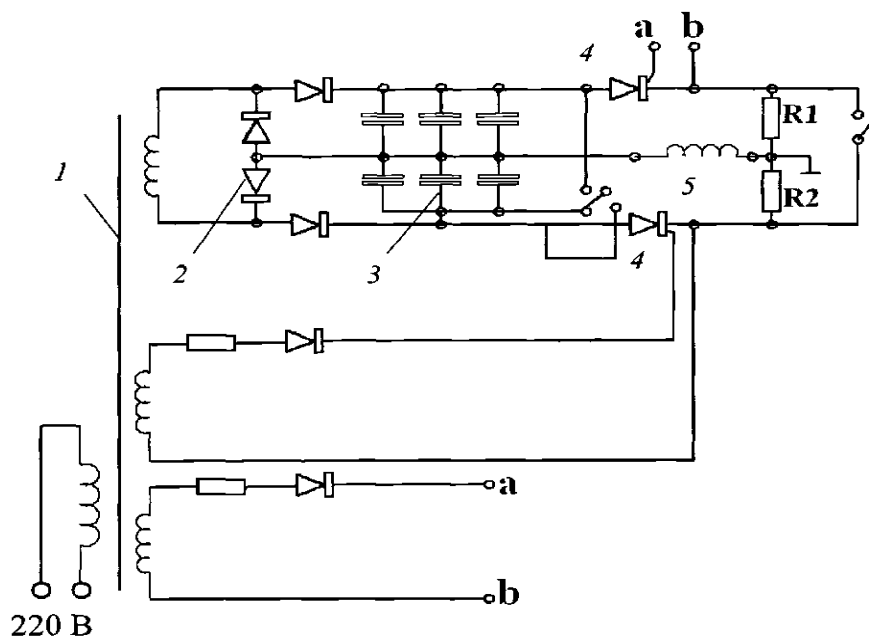


Рис. 2.1. Електрична схема генератора імпульсів.

Електрична частина установки крім генератора (рис.2.2) містить блоки керування приводами електродів-інструментів, рухом деталі, відносним переміщенням електродів та автоматичним регулюванням відстанню між електродами. В установках для формування покриттів із порошкових матеріалів крім зазначених блоків міститься блок управління дозуючими та транспортними пристроями для подачі дисперсного матеріалу в робочий проміжок.

Механічна частина установки містить електрод-інструмент, механізми кріплення і руху деталі, механізми відносного переміщення електродів, дозуючі і транспортні пристрої для подачі дисперсного матеріалу. Електрод-інструмент включає привід, механізм передачі руху електродам, струмопідведення і механізм кріплення електродів

- електродотримач. Взаємодія блоків електричної частини із вузлами механічної частини схематично представлена стрілками на рис. 2.2.

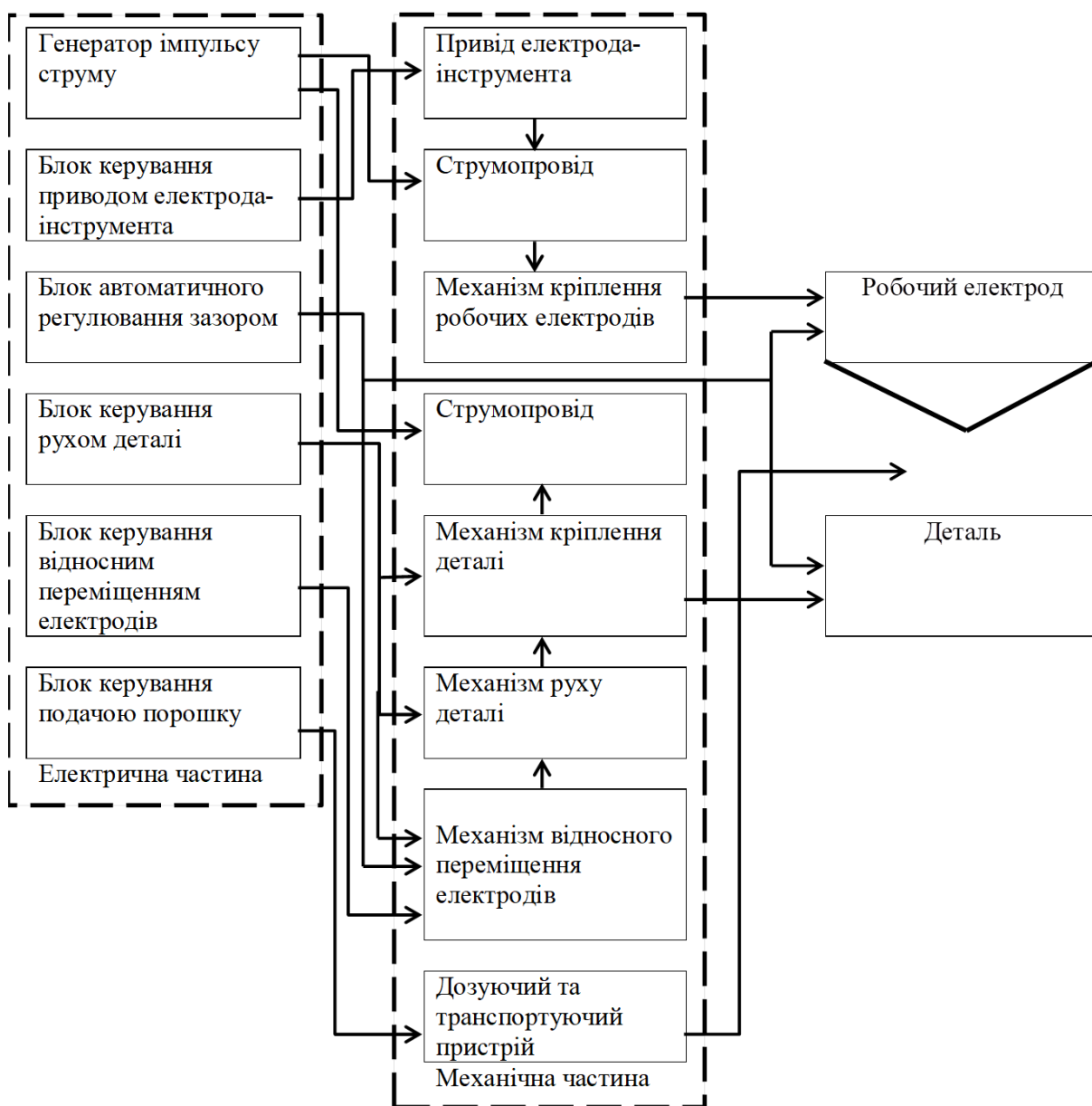


Рис. 2.2. Узагальнена структурна схема установки для ЕІЛ.

На практиці можуть зустрічатися й інші схеми компанування блоків і вузлів установок для ЕІЛ, але при цьому їх структурна схема майже завжди містить зазначені елементи.

Електроіскрове легування поверхонь тертя ґрунтується на миттєвому вивільненні електричної енергії і характеризується короткими імпульсами електричного струму, високими температурами та іонізацією міжелектродного простору. Як наслідок, відбувається зміна структури поверхневого шару металу, її подрібнення і збільшення твердості металевих поверхонь, а наявність високої іонізації міжелектродного проміжку створює сприятливі умови для протікання на металевій поверхні хімічних реакцій, які призводять до зміни складу поверхневих шарів [134, 135]. При зміцненні поверхні тертя в результаті іскрового розряду можуть виникати поверхневі шари, які складаються з твердих розчинів, хімічних сполук або відбувається дифузійне впровадження в них матеріалу електрода, в результаті чого змінюються фізико-механічні властивості поверхні тертя. Цей процес по своїй природі є дискретним і тому його найбільш доцільно використовувати для формування на поверхнях тертя зносостійких шарів дискретного типу.

Процес ЕІЛ починається зі зближення електрода-інструменту з деталлю, і при відстані між ними, що дорівнює або менше пробивного проміжку, починається розвиток імпульсного розряду, який у більшості випадків триває і завершується вже при контакті електродів. Після пробою міжелектродного проміжку за рахунок накопичувальної в конденсаторі енергії на поверхні електродів розвиваються локальні осередки плавлення та випаровування, що обумовлюють електричну ерозію електродів. Завдяки полярному ефекту переважне перенесення еродованого матеріалу анода на катод забезпечує формування на останньому поверхневого шару з певними фізико-хімічними властивостями. Після закінчення розряду через деякий проміжок часу починається відхід анода від катода, що завершується розривом електричного кола, після чого схема знову готова до роботи [136]. Розмір частинок дискретного покриття залежить від величини електричного імпульсу. При автоматичном режимі нанесення покриття за час накопичення електричного заряду зразок переміщується на проміжок між елементами покриття чим забезпечується задана щільність дискретного покриття. Параметри дискретного покриття обираємо за результатами моделювання.

Для нанесення ЕП на дюралюміній Д16 використовувались електроди твердого сплаву ВК8 та міді. Нанесення ЕП проводилось на установці “Элитон 22”, технічні характеристики якої наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики установки “Элитон 22”

Параметри	Значення
Робочий струм, А	1,2 - 2
Товщина нанесеного шару, м;	от 0,00001 до 0,0001
Продуктивність установки до м /хв.	0,0003
Живлення установки напруга, В	220
частота, Гц	50

2.3. Методологія розрахунку напружено-деформованого стану дискретних ЕП.

Одним з найбільш широко застосовуваних на практиці методів розрахунку міцності конструкцій є метод кінцевих елементів (МКЕ). При використанні МКЕ конструкція розбивається на безліч елементів простої геометричної форми (відрізки ліній, трикутники, чотирикутники, тетраедри тощо), з'єднаних між собою у вузлових точках. Для цих елементів, названих кінцевими, застосування аналітичних методів забезпечує точні або наближені рішення рівнянь, що описують їх напружено-деформований стан (НДС). На основі цих рішень складаються рівняння, що описують НДС усієї конструкції. Як правило, це системи алгебраїчних або диференціальних рівнянь другого порядку. Для вирішення рівнянь МКЕ, як і їх складання, використовуються обчислювальні машини. У світі розроблено низку програм для ЕОМ, що реалізують МКЕ. До них відносяться широко відомі програми NASTRAN, ANSYS, MARC, DINA, ЛІРА, ПРИНС та ін. Всі ці програми добре документовані та допускають самостійне використання їх широким колом фахівців.

В роботі використано пакет програм MSC.visual NASTRAN for Windows для аналізу напружено-деформованого стану ЕП – основа. Пакет програм MSC.Visual

NASTRAN for Windows включає програму моделювання конструкцій FEMAP і програму кінцево-елементного аналізу конструкцій MSC/NASTRAN.

Програма FEMAP призначена для підготовки повноцінних кінцево-елементних моделей та обробки результатів. У ній існують засоби геометричного моделювання об'єктів, у тому числі твердотільних, та можливості їх редагування. Для побудови кінцево-елементної моделі можна використовувати інструменти автоматичної генерації сіток на геометричних об'єктах. Засоби імпорту, експорту та перетворення даних забезпечують взаємодію з багатьма відомими програмами кінцево-елементного аналізу. Програма має великі можливості обробки, відображення та документування результатів аналізу.

MSC/NASTRAN є вичерпною програмою кінцево-елементного аналізу загального призначення, включаючи можливість виконання аналізу статички та динаміки конструкцій, аналізу теплопередачі та оптимізації, аналізу чутливості, вирішення завдань аеропружності. Кожен вид аналізу використовує схожі вхідні файли, що дозволяє легко перемикатися з одного виду аналізу на інший.

Процедура аналізу конструкцій методом кінцевих елементів включає такі основні етапи [137]:

- розробка геометричної моделі конструкції;
- завдання характеристик матеріалів;
- завдання типів кінцевих елементів та його властивостей (товщини, геометричних характеристик поперечного перерізу та інших.);
- створення сітки кінцевих елементів або «ручним» способом, або автоматичним, наприклад, шляхом розбиття геометричної моделі;
- перевірка коректності сітки кінцево-елементної моделі;
- завдання умов закріплення кінцево-елементної моделі;
- формування умов навантаження кінцево-елементної моделі;
- вибір виду та параметрів кінцево-елементного аналізу;
- виконання кінцево-елементного аналізу конструкції;

- аналіз можливих формальних помилок, їх усунення, повторне виконання кінцево-елементного аналізу;
- аналіз результатів розрахунку, виявлення помилок моделювання, внесення змін до моделі, повторне виконання кінцево-елементного аналізу;
- обробка та графічне оформлення результатів розрахунку.

Результати моделювання напружено деформованого стану досліджуваних зразків з ЕЛ покриттями в середовищі програми викладені в 3 розділі.

2.4. Методика трибологічних досліджень контактних поверхонь з електроіскровими покриттями.

Трибологічні дослідження на тертя і знос проводилися на удосконаленій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 (рис. 2.3), за схемою «кільце-кільце». Методика випробувань стандартизована.

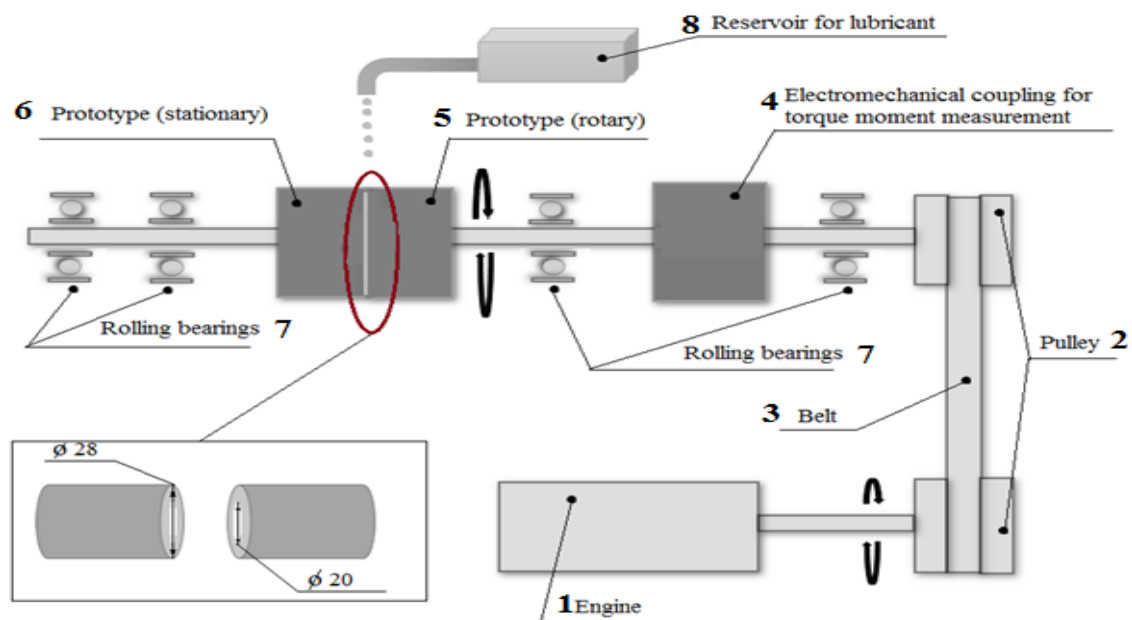


Рис. 2.3. Кінематична схема машини тертя 2070 СМТ-1: 1 – двигун, 2 – шків, 3 – ремінь, 4 – електромеханічна муфта з вимірюванням крутного моменту, 5 – дослідний зразок (обертальний), 6 – дослідний зразок (нерухомий), 7 – підшипники кочення, 8 – резервуар та пристрій для крапельної подачі мастильного матеріалу в зону тертя.

Форма і розміри зразків для модельних триботехнічних випробувань відповідали вимогам ДСТУ 30480-97 з коефіцієнтом взаємного перекриття $K_{зв} = 1$ (рис. 2.4).

До проведення випробувань зразки промивалися бензином «Калоша» ГОСТ 2603-71, сушилися при температурі 70 °С, зважувалися на вагах ВЛР-200 з точністю до $10^{\pm 5}$ грама.

Для відтворюваності результатів випробувань на знос контролювалося сполучення торцевих поверхонь за величиною контактної площі: не менше 90% робочої поверхні кожного зразка.

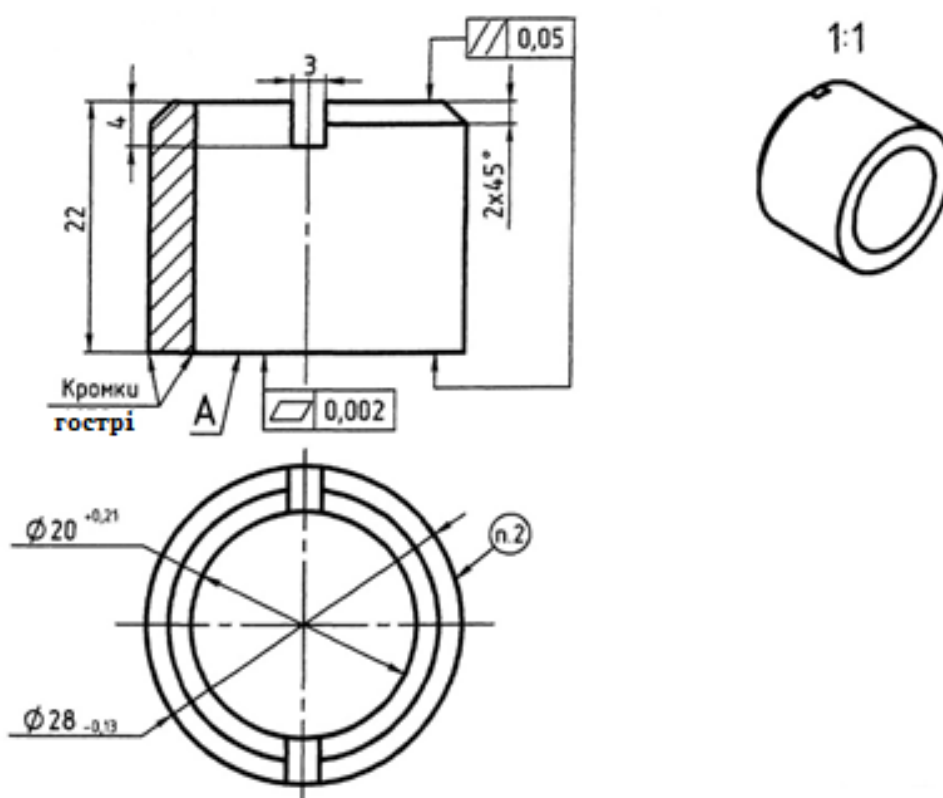


Рис. 2.4. Креслення зразку для проведення випробувань.

Дослідження проводилися за схемою кільце - кільце.

В якості мастильного середовища використовувалась олива М10Г₂К ГОСТ-8581-78 (табл. 2.2)

Властивості М10Г₂К

Найменування показника	Норма	
	вищий гатунок	перший гатунок
В'язкість кінематична мм кв./с при 100 °С	11,0+/-0,5	
Індекс в'язкості, не менше	95	85
Масова частка механічних домішок, %, не більше	0,015	
Масова частка води, не більше	следи	
Температура спалаху в відкритому тиглі, °С, не нижче	220	210
Температура застигання, °С, не вище	мінус 18	мінус 15
Корозійність на пластинах з свинцю, г/м кв, не більше	отсутствие	
Міючі властивості пза ПЗВ, бали, не більше	0,5	
Лужне число, мг КОН на 1 г оливи, не менше	6,0	
Зольність сульфатна, % не більше	1,15	
Стабільність по індукційному періоду осадотворення (ШО) протягом 50 год.	витримує	
Колір на колориметрі ЦНТ з розбавленням в співвідношенні 15:85, одиниці ЦНТ, не більше	3,0	4,0
Густина при 20 °С, г/см куб., не більше	0,900	0,905
Масова частка активних елементів, %, не менше:		
кальція	0,19	
цинка	0,05	
фосфора	0,05	
Ступінь чистоти на 100 г оливи, не більше	450	500

У процесі експериментів, відповідно до вимог ДСТУ 30480-97, реєстрували:

- момент тертя (перераховували в коефіцієнт тертя);
- температуру у зоні контакту зразків безперервно реєстрували в реальному масштабі часу випробувань в безпосередній близькості (1 мм) від зони тертя, безконтактним методом за допомогою пірометра.

Додатково в процесі випробувань реєстрували швидкість зношування в реальному масштабі часу з використанням методу акустичної емісії. Для цього було проведено модернізацію установки та розроблено інформаційно-вимірювальну систему (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Зовнішній вид модернізованої універсальної машина тертя СМТ-1.

Інформаційно-вимірювальна система модернізованої універсальної машини тертя СМТ-1 включає кілька модулів і функціональних блоків (рис. 2.6).

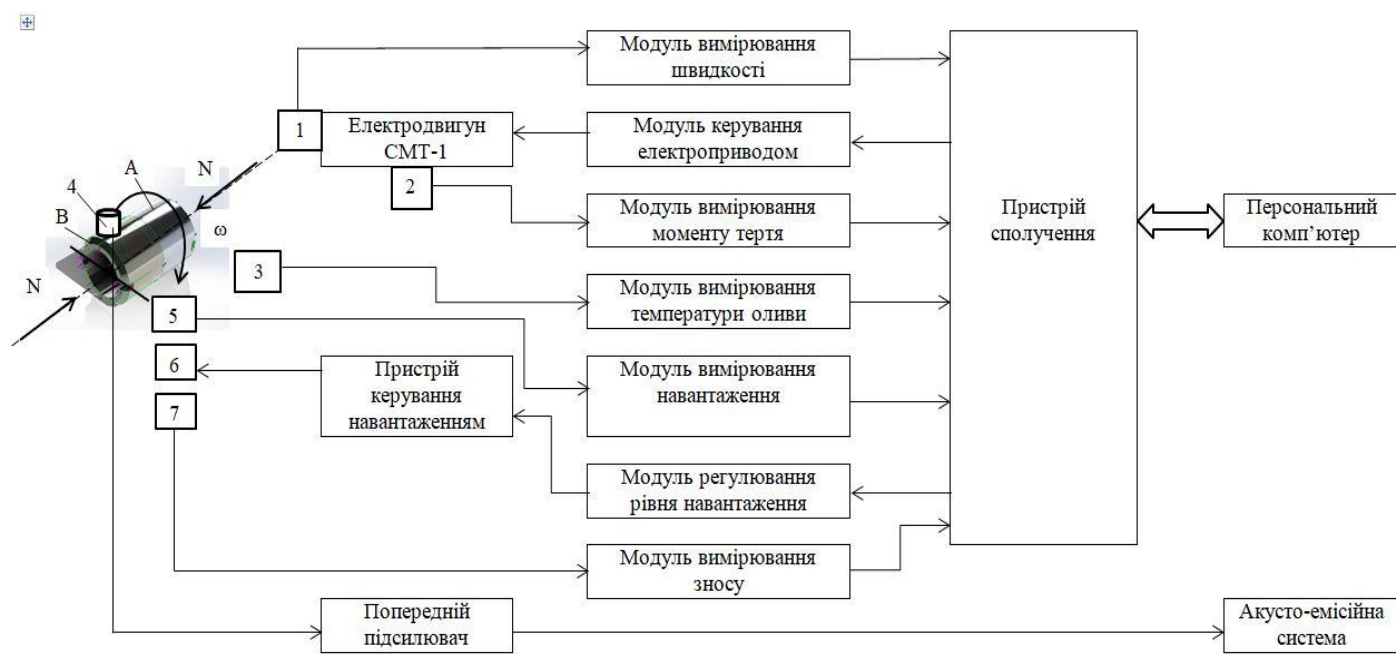


Рис. 2.6. Структурна схема установки для пари тертя у вигляді кінематичної схеми «кільце-кільце»: А – рухомий зразок; В – нерухомий зразок; 1 – датчик швидкості; 2 – датчик моменту; 3 – датчик вимірювання температури оливи; 4 – датчик акустичної емісії; 5 – тензодатчик; 6 – датчик зносу; 7 – притискаючий пристрій.

Модулі та блоки формують наступні вимірювальні канали:

- канал вимірювання та реєстрації АЕ;
- канал вимірювання та реєстрації моменту тертя;
- канал вимірювання та реєстрації зносу пар тертя;
- канал вимірювання та реєстрації температури мастильного матеріалу;
- канал вимірювання, реєстрації та контролю частоти обертання;
- канал вимірювання, реєстрації та контролю експлуатаційного навантаження.

У табл. 2.3 представлені параметри, що реєструються під час проведення трибологічних досліджень.

Таблиця 2.3

Параметри, що реєструються під час випробовувань на модернізованій установці

Параметр	Діапазон вимірювань
Момент тертя, Н	0 ... 20
Температура зони тертя, °С	0 ... 600
Температура навколишнього середовища, °С	-50...+125
Частота обертання, хв ⁻¹	20 .. 1500
Погонне навантаження, кг	0 ...200
Частота мікроконтактування, МГц	0 ...1
Розрядність АЦП каналу акустичної емісії	13
Період реєстрації рівня акустичної емісії, мс	50
Розрядність енкодера каналу вимірювання зносу	16

Розглянемо принцип дії установки під час проведення експериментальних досліджень фрикційних вузлів у процесі тертя.

За допомогою спеціальних датчиків, встановлених на машині тертя, та спеціальних модулів можливе отримання інформації про такі параметри як момент тертя, швидкість обертання, температура контакту, величина зносу, величина контактних напруг, а також проводити реєстрацію сигналів АЕ. При цьому за допомогою пристрою сполучення всі функціональні модулі пов'язані з ПК, що дає

можливість контролювати поточні значення і підтримувати необхідний рівень величин, що задаються в ПК.

Канал вимірювання та реєстрації температури оливи побудований на основі електроконтактного способу вимірювання температури (рис. 2.6). Датчик електроконтактного термометру пов'язаний з ПК за допомогою загального інформаційного каналу, який здійснює періодичне знімання та обробку інформації.

Канал вимірювання та реєстрації температури зони контакту зразків побудований на основі безконтактного способу вимірювання температури з використанням пірометра - інфрачервоного датчика вимірювання температури 3 (рис. 2.6). Датчик загального інформаційного каналу пов'язаний з ПК, який здійснює періодичне знімання та обробку інформації.

Канал вимірювання, реєстрації та контролю частоти обертання призначений для отримання інформації про поточне значення швидкості обертання та підтримки заданої комп'ютером частоти обертання. Датчик 1 швидкості встановлений на головному електроприводі машини СМТ-1 передає отриману інформацію про поточну частоту обертання на модуль вимірювання швидкості, після чого поточне значення частоти обертання потрапляє в ПК через пристрій сполучення (рис. 2.6). У свою чергу, модуль керування електроприводом підтримує задану в ПК частоту обертання.

Канал вимірювання та реєстрації моменту тертя складається з датчика моменту 2 встановленого на електродвигуні машини СМТ-1 та модуля вимірювання моменту тертя (рис. 2.6). На запит ПК модуль вимірювання моменту тертя видає значення моменту тертя від чутливого елемента в цифровій формі.

Канал вимірювання, реєстрації та контролю погонного навантаження служить для підтримки заданого в ПК рівня навантаження та контролю його поточного значення. Реєстрація контактної напруги здійснювалася з використанням тензодатчика 5, який встановлювався на притискному пристрої нерухомого зразка (рис. 2.6). Сигнали з виходу тензодатчика 5 надходять до модуля вимірювання навантаження, для перетворення у форму, необхідну для подальшої передачі в ПК. У свою чергу ПК,

використовуючи модуль регулювання рівня навантаження, який служить для підтримки заданого комп'ютером рівня навантаження та контролю його поточного значення, контролює та підтримує пристроєм керування навантаженням необхідний рівень навантаження. Для збільшення робочих напруг пристрій керування навантаженням керує притискним пристроєм 7, що забезпечує регулювання положення нерухомого зразка.

Канал вимірювання та реєстрації зносу пар тертя за допомогою датчика зносу 6 (рис. 2.6), встановленого на нерухомому зразку, на запит від комп'ютера, передає інформацію про величину зносу в ПК, через модуль вимірювання зносу. Період опитування становить 0,5 сек.

ПК відповідно до заданої програми управління через пристрій сполучення послідовно реалізує етапи випробувань. На кожному етапі контролюється його тривалість, встановлюються відповідні значення частоти обертання, температури контакту, рівня навантаження, а також проводяться необхідні вимірювання.

Результати вимірювань можуть бути відображені на екрані монітора та збережені на жорсткому диску у вигляді послідовності файлових структур для подальшого відображення, аналізу та обробки. Формат зберігання даних вибраний таким чином, що дозволяє проводити використання даних надалі для доступної обробки в різних програмах під Windows. Результати вимірювань та дані аналізу та обробки можуть бути виведені на принтер.

Окремим інформаційним каналом є канал реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії, які надходять від датчика 4 (рис. 2.6). Датчик виготовлений із п'єзокераміки ЦТС-19. Датчик 4 встановлюється на хвилеводі, має жорсткий контакт з нерухомим зразком фрикційного вузла через шар акусто-прозорого мастила. Рівень сигналу АЕ на виході датчика є недостатнім для обробки електронною апаратурою, тому проводиться його посилення на тлі перешкод з використанням попереднього підсилювача. Частотний діапазон сигналів, що реєструються, знаходиться в діапазоні 500кГц - 1МГц. З виходу підсилювача сигнал АЕ надходить в акусто-емісійну систему.

Реєстрація та обробка сигналів АЕ здійснюється комп'ютеризованою мобільною акусто-емісійною системою для дослідження та діагностики вузлів тертя.

Модернізовану універсальну машину тертя СМТ-1 побудовано за магістрально-модульним принципом, з використанням стандартних послідовних інтерфейсів, протоколів обміну комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмно-математичного забезпечення. Такий підхід дозволяє спростити експлуатацію стенду та здійснювати зміну його структури за рахунок включення/виключення стандартних та спеціалізованих модулів.

Робота з програмним пакетом, що входить до складу стенду, ґрунтується на принципі введення команд із клавіатури або завантаженні необхідних панелей інструментів. Пакет розрахований на широке коло користувачів, при цьому не потребує особливих знань у програмуванні. При цьому використовується повноекранний графічний інтерфейс з наочністю подання результатів і введення підказок по операціях, що виконуються [138, 139].

2.5. Методика реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії.

Канал реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії базується на ряді методологій, що містять у собі методологію реєстрації та перетворення первинної інформації; методологію посилення та виділення сигналів акустичної емісії; методологію збереження процесів, що реєструються у вихідному вигляді; методологію обробки сигналів акустичної емісії; методологію виведення та надання результатів аналізу; методологію управління процесами вимірювань, інформаційними потоками та контролю стану обладнання [138]. Все це призводить до необхідності обліку та оптимізації різних обмежувальних факторів, таких як обсяг інформації, яка вводиться; швидкість запровадження інформації; швидкість обробки інформації; кількість сигналів; обчислювальні алгоритми; швидкість запровадження інформації тощо.

Зниження ваги факторів, що взаємовпливають, можливе за рахунок реалізації наступної концепції [140].

По-перше, акустико-емісійний канал вирішує вузьке завдання аналізу кінетики протікання процесів самоупорядкування триботехнічних систем, з обробкою та аналізом максимально можливої кількості параметрів акустичних сигналів та їх імпульсних потоків.

По-друге, при реалізації даного каналу інформаційно-вимірювальної системи трибодіагностики використовується цифровий спосіб обробки та аналізу акустичної інформації.

По-третє, електронні засоби з жорсткими апаратними алгоритмами роботи повинні мати мінімальну конфігурацію.

По-четверте, канал реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії має бути орієнтований на максимальне використання гнучких програмних засобів, що забезпечують контроль стану обладнання, а також управління процесами вимірювань, обробки, аналізу інформації та надання її результатів.

Діаграма вимірювання швидкості зношування показано на рис. 2.7.

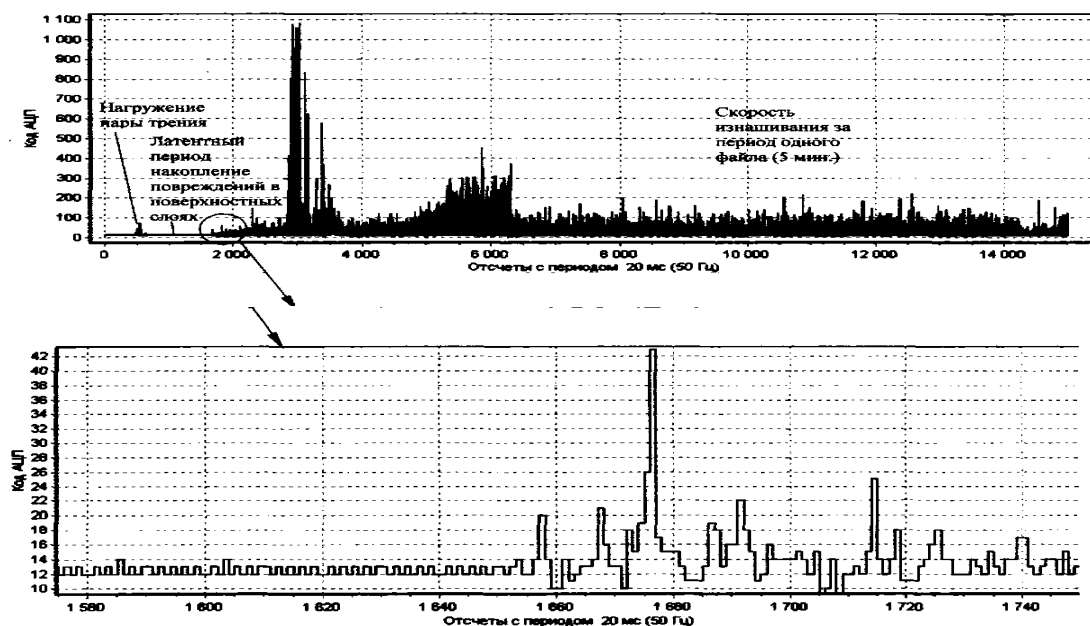


Рис. 2.7. Діаграма вимірювання швидкості зношування за перші 5 хв. роботи пари тертя

Таким чином, базовими елементами, що входять до каналу реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії інформаційно-діагностичної системи трибодіагностики, є:

- датчик акустичної емісії;
- попередній підсилювач;
- смуговий фільтр 50...900 кГц;
- підсилювач із порогом нечутливості до власних шумів машини тертя;
- випрямляч посиленого сигналу;
- блок обчислення середнього значення у ковзному вікні;
- аналогово-цифровий перетворювач;
- пристрій зв'язку з послідовним інтерфейсом.

Кожен із даних пристроїв можна розглядати як незалежний модуль, що виконує певні функції. Причому тракт посилення сигналів акустичної емісії працює за «жорстким незмінним алгоритмом», а весь процес вимірювання та обробки інформації будується на забезпеченні спільної роботи спеціалізованого модуля аналогової та попередньої цифрової обробки АР08 та персонального комп'ютера.

Зв'язок спеціалізованого модуля аналогової та попередньої цифрової обробки АР08 та ПК здійснюється за окремим послідовним інтерфейсом ЯБ 485 за допомогою програмних засобів з використанням спеціального програмного математичного забезпечення (ПМВ).

Такий підхід дозволяє робити розподіл функцій між пристроями каналу реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії 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. Розподіл функцій забезпечує поєднання різних пристроїв, спрямоване отримання максимальної вихідної інформації у первинному вигляді із можливістю наступної багаторазової вторинної обробки [141].

З точки зору отримання інформації про кінетику процесів зношування з використанням обробки сигналів акустичної емісії найбільш прийнятною є організація

безперервного режиму запису інформації. Він полягає у забезпеченні безперервного проведення вимірювань сигналів акустичної емісії в процесі зношування трибосистеми, з послідовним записом та збереженням кожного результату вимірювання на пристрої запам'ятовування (жорсткому диску ПК). Запис інформації здійснюється через оперативний пристрій [142].

У безперервному режимі роботи обсяг первинної інформації, що реєструється, визначається частотою опитування датчика акустичної емісії. При збереженні інформації у вигляді низькочастотного сигналу, з частотою опитування 25...50 Гц, обсяг даних, отриманий протягом 100 годин випробувань на тертя і зношування, становить 50...100 Мбайт. При збільшенні частоти опитування пропорційно збільшується обсяг даних і може обчислюватися десятками Гбайт, що обмежуватиметься обсягом запам'ятовування та можливістю обробки великих масивів даних обчислювальною технікою.

При цьому збереження вихідної інформації на пристрої запам'ятовування дозволяє проводити гнучку, вторинну багаторазову обробку з використанням ПМО. Такий підхід забезпечує отримання максимальної кількості параметрів акустичної емісії, що обробляються. Таким чином, важливим завданням є обґрунтований вибір частоти опитування датчика акустичної емісії та інших параметрів.

Блок схема каналу реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії інформаційно-вимірювального комплексу трибодіагностики, згідно з розглянутим вище, наведена в рис. 2.8.

Коротко розглянемо принцип роботи каналу. При реєстрації кінетики процесів трибосистеми при терті, пружні зрушення, що виникають у матеріалі, перетворюються датчиком акустичної емісії, виконаним з п'єзокераміки ЦТС-19, у слабкий електричний сигнал (1...10мВ). Аналіз спектра сигналу за допомогою запам'ятовує осцилографу Rigol показує, що основна енергія акустико-емісійного випромінювання зосереджена в діапазоні 50 ... 900 кГц. Далі слабкий сигнал датчика акустичної емісії посилюється ширококутовим попереднім підсилювачем 2.

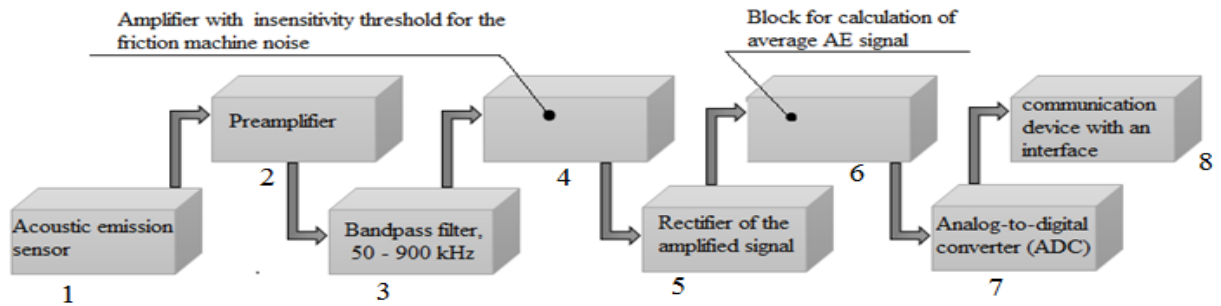


Рис. 2.8. Структура каналу реєстрації та обробки акустичної емісії в інформаційно-вимірювальному комплексі трибодіагностики з оптимізацією параметрів: 1 – датчик акустичної емісії; 2 – попередній підсилювач; 3 – смуговий фільтр, 50...900кГц; 4 – підсилювач з порогом нечутливості до власних шумів тертя машини; 5 – випрямляч посиленого сигналу; 6 – блок обчислення середнього значення в ковзному вікні; 7 – АЦП; 8 – пристрій зв'язку із послідовним інтерфейсом.

Фільтр 3 має смугу пропускання, в якому меншою мірою позначаються власні шуми машини тертя, що є складовою інформаційно-вимірювального комплексу трибодіагностики. Поріг нечутливості каскаду 4 встановлюється так, щоб реєструвати сигнал акустичної емісії, який виникає в процесі тертя.

Випрямляч 5 перетворить двополярний сигнал на однополярний для подальшого формування обгинальної (інтеграція) в блоці 6. Отриманий низькочастотний сигнал, який несе інформацію про зміну рівня акустичної емісії, перетворюється АЦП 7 на послідовність цифрових відліків. Ці відліки з модуля 7 надходять модуль 8, що визначає період аналого-цифрового перетворення модулем 7, і забезпечує зв'язок з блоком управління, обробки і реєстрації.

Управління всім процесом вимірювань здійснюється ПМВ, реалізованим у вигляді пакета прикладних програм. ПМО забезпечує також фільтрацію даних, їх обробку, збереження отриманих результатів у вигляді файлових структур на логічному рівні побудови УЗ, виведення текстової та графічної інформації на екран монітора інформаційно-вимірювального комплексу трибодіагностики або друкуючий пристрій.

ПМО підтримує роботу процесора та трансформує безперервну, незалежну роботу окремих елементів каналу вимірювання та обробки сигналів у строгу послідовність операцій, що виконуються на різних каналах. Наявність вихідної інформації про вхідний процес дозволяє використовувати гнучкі алгоритми її фільтрації, а також застосовувати гнучку роздільну обробку в залежності від механізму самоупорядкування трибосистеми.

При цьому роздільна здатність і точність вимірювань на ампліудно-часових параметрах визначається роздільною здатністю АЦП, а обсяг інформації, що вводиться, обмежується обсягом накопичувача, який використовується для запису акустико-емісійної інформації, що реєструється [143].

2.6. Методи дослідження механо-фізико-хімічних характеристик пар тертя.

Параметри профілю мікрорельєфу поверхні визначали за міжнародним стандартом DIN 4776 за допомогою профілометра Mitutoyo Surftest SJ-201P. На основі профілограм досліджуваних ЕПП побудовані криві Аббота та проведено аналіз основних показників профілю поверхні.

Мікротвердість поверхневих шарів металу і знос вимірювалися на багатофункціональному приладі «Мікрон-гамма» [144-146], призначеному для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів методом безперервного вдавлювання індентора.

Після проведення трибологічних досліджень поверхню зразків досліджували методами растрової електронної мікроскопії з визначенням хімічного складу поверхневого складу, що утворився під час тертя.

Растровий мікроскоп формує зображення об'єкта при скануванні його поверхні електронним зондом. Це один із найбільш універсальних та ефективних приладів для дослідження структурного стану матеріалів на макро-, мезо- та мікромасштабних рівнях. Цей вид досліджень є найважливішим методом контролю якості металевих

матеріалів, оскільки дозволяє оцінити характер руйнування матеріалів, виявити ступінь прояву їхньої в'язкості, виявити структурні особливості, що сприяють поширенню тріщин [147].

Основними системами та пристроями растрового електронного мікроскопа є: електронно-оптична система, що формує електронний зонд та забезпечує його сканування поверхнею зразка; вакуумна автоматизована система та пристрої точної механіки (шлюзи, утримувачі зразків, пристрої різноманітного механічного впливу на зразки тощо) (рис. 2.9).

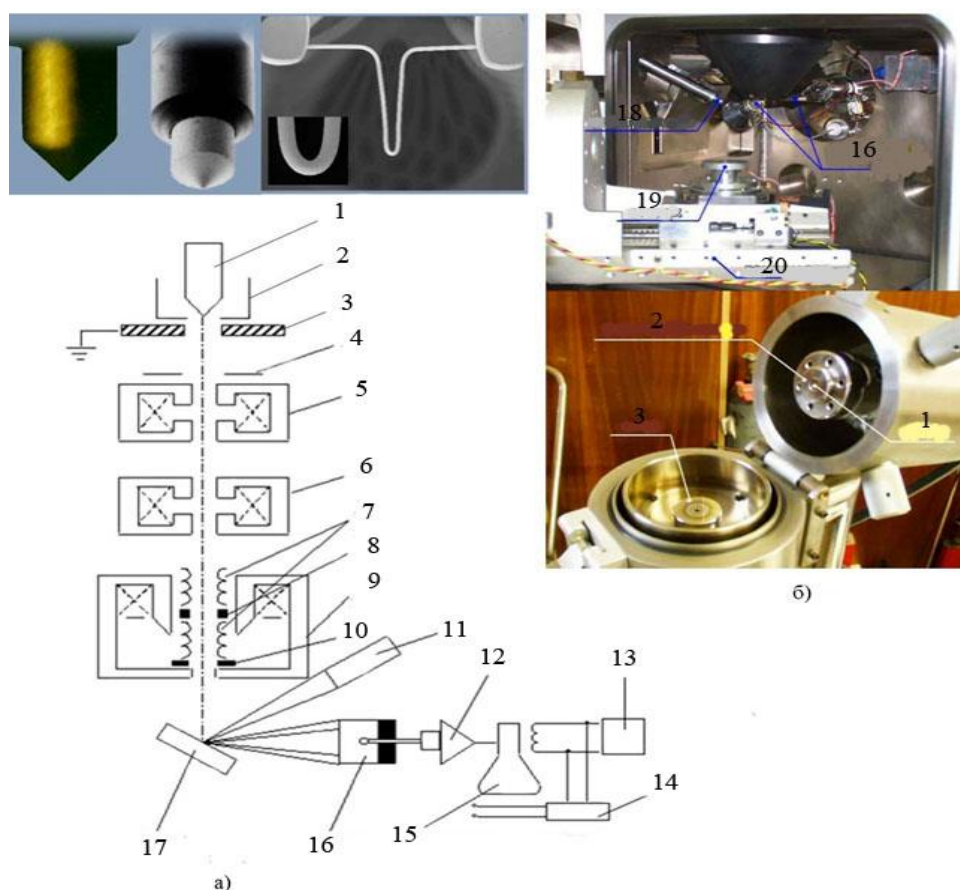


Рис. 2.9. Схема (а) і вузли (б) растрового електронного мікроскопу: 1 – катод; 2 – циліндр Венельта; 3 – анод; 4, 10 – діафрагма; 5, 6 – електромагнітна лінза; 7 – електромагнітні відхиляючі катушки; 8 – стигматор; 9 – лінза об'єктиву; 11 – детектор рентгенівського випромінювання; 12 – підсилювач; 13 – генератор розгортки; 14 – блок керування збільшенням; 15 – електронно-променева трубка; 16 – детектор вторинних електронів; 17 – зразок; 18 – столик; 19 – спектрометр; 20 – гоніометр.

До складу електронно-оптичної системи входять електронна гармата, електромагнітні лінзи, діафрагма та котушки системи, що відхиляє. Електронна гармата, що є джерелом електронів, складається з катода, фокусуєчого електрода та анода. Анод заземлений, а катод і фокусуєчий електрод з'єднані з джерелом високої напруги (зазвичай 10...30 кВ, іноді 1,5 кВ). До складу електронно-оптичної системи входять електронна гармата, електромагнітні лінзи, діафрагма та котушки системи, що відхиляє. Електронна гармата, що є джерелом електронів, складається з катода, фокусуєчого електрода та анода. Анод заземлений, а катод і фокусуєчий електрод з'єднані з джерелом високої напруги (зазвичай 10...30 кВ, іноді 1,5 кВ).

Перевага растрової електронної мікроскопії полягає в отриманні наочних «об'ємних» зображень у дуже широкому спектрі збільшення. Дані фрактографічних досліджень дозволяють судити про вплив структурного стану на характер пластичної деформації та руйнування досліджуваних матеріалів.

Додатковою перевагою є можливість хімічного аналізу. Рентгеноспектральний мікроаналіз дозволяє отримувати інформацію про елементний склад зразка – як про концентрацію елементів, так і про їх просторовий розподіл.

Хімічний аналіз здійснюється з використанням методу рентгенівського мікроаналізу.

Висновки до розділу 2.

1. Доведено переваги застосування методу електроіскрового легування для термочутливих матеріалів, до яких відносяться алюмінієві сплави. З метою створення оптимальної мікрогеометрії та знаку залишкових напружень електроіскрових покриттів обрано технологію ЕІЛ, при якій формуються ЕП дискретного типу, з наступною обробкою сформованих покриттів ППД, що дозволить сформувати поверхневий шар з високою твердістю, зносостійкістю, низькою шорсткістю та підвищеною втомною міцністю.

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

3. 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.

4. Для визначення граничного погонного навантаження сформованих ЕП на дюралюмінії Д16 доцільно провести лабораторні випробування в умовах ступеневого підвищення навантаження, що дозволить оцінити та спрогнозувати локалізацію процесів руйнування та деформування ЕП-основа при терті з позицій механо-деформаційних змін в основі та на поверхні досліджуваних пар тертя.

5. Необхідність оцінки параметрів профілю мікрорельєфу поверхні дюралюмінію з ЕП обумовлена визначенням основних показників кривих Аббота, на основі яких можна оцінити несучу здатність та визначити розподіл навантаження в контакті, проаналізувати питому маслоємність поверхні та спрогнозувати з урахуванням зазначених показників зносостійкість сформованих дискретних ЕП.

6. Застосування сучасних методик металофізичних досліджень та оцінки хімічного складу поверхонь тертя дозволить встановити механізми формування зносостійких дисипативних структур, оцінити рівень структурної пристосованості дискретних ЕП при терті.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТРИБОСПРЯЖЕННЯ

3.1. Моделювання нанесення електроіскрових покриттів різної щільності.

Метою проведеного моделювання є оцінка щільності та товщини покриття при відновлюванні деталей машин методом ЕІЛ. Для моделювання найбільш доцільно використовувати методи скінченно-елементного аналізу, які реалізовані в сучасних програмних комплексах, таких як Nastran та Ansys. Моделювання проведено з застосуванням програмного комплексу Nastran, оскільки він дуже гнучкий, та адаптований програмний продукт для розгляду конкретного роду задач. Для розрахунку необхідні геометричні параметри покриття та основи, їх фізичні властивості, величина і напрямок дії навантаження, а також схема закріплення основи. В якості матеріалу основи використовували дюралюміній Д16, в якості покриття застосовували твердий сплав ВК8 та мідь, фізико-механічні властивості яких наведені в табл. 3.1 [148, 149].

Таблиця 3.1

Фізико-механічні властивості дюралюмінію Д16, сплаву ВК8 та Сu

Характеристика	Д16	ВК8	Cu
Густина матеріалу, кг/м ³	2800	14600	8940
Коефіцієнт лінійного розширення, $\cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	23	4,5	16,7
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	170	54	401
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1000	150	385
Модуль Юнга, $\cdot 10^{11}$ Па	0,71	6,0	1,15
Модуль зсуву, $\cdot 10^{11}$ Па	0,27	2,5	4,24
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,196	0,33

Моделювання розпочинається з побудови простих примітивів у вигляді кривих ліній та об'ємних фігур. Після того, як побудували твердотільну модель в просторі,

розбиваємо її на скінченні елементи, які можуть бути з проміжними вузлами для більш точного розрахунку, або без (рис. 3.1).

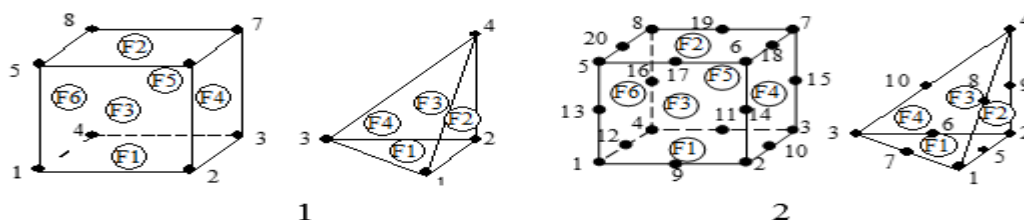


Рис. 3.1. Тривимірні скінченні елементи з нумерацією вузлів і поверхонь: 1 – першого (лінійного) порядку апроксимації; 2 – другого (параболічного) порядку апроксимації.

При розрахунках специфіка програми дозволяє швидко змінювати різні геометричні параметри та величину навантаження композиції основа-покриття, такі як: a , b , d , h , L , W , H , q , T (рис. 3.2). Але основною характеристикою електроіскрового покриття є його щільність S на основі (відношення робочої площі деталі до площі електроіскрового покриття) та його товщина h . За допомогою розрахунків визначимо оптимальну щільність та товщину покриття.

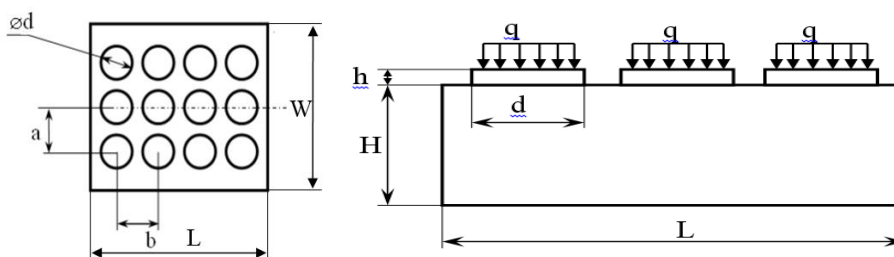


Рис. 3.2. Схематичне зображення розрахункової моделі з електроіскровим покриттям з прикладеним розподіленим навантаженням та робочою температурою.

При розбитті моделі на кінцеві елементи необхідно збільшити густину сітки в тих місцях, де можливий великий градієнт напружень. Необхідно також враховувати кількість елементів моделі, оскільки час розрахунків, при збільшенні числа скінчених елементів, зростає за параболою.

В моделюванні прикладене одиничне навантаження, розподілене на вершині покриття, а закріплення зроблене по всій нижній площині. В результаті розрахунків отримаємо розподіл еквівалентних напружень, які визначаються за формулою:

$$\sigma_{екв} = \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, - нормальні напруження, Па; $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$ - дотичні напруження, Па.

Геометричні розміри покриття в моделі змінюються, незмінною залишається площа основи. На рис. 3.3. представлена модель з щільністю покриття 38,4%. При моделюванні аналізувалась щільність покриття основи від 20 до 80%.

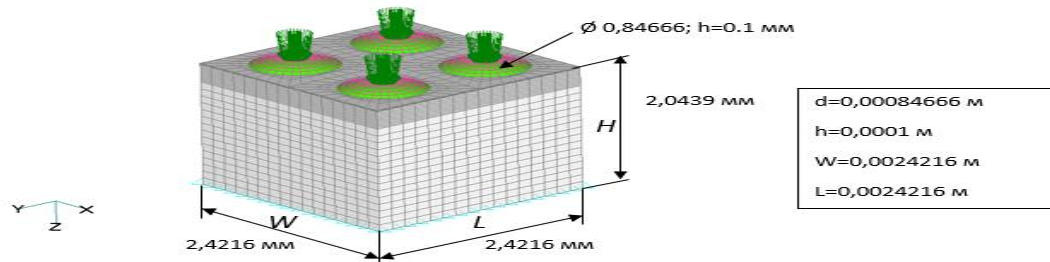


Рис. 3.3. Кінцево-елементна модель з щільністю покриття основи 38,4% методом ЕЛ.

Кінцево-елементна модель зразка з напружено-деформованим станом при дії розподіленого одиничного навантаження, представлена на рис. 3.4. Модель складається із 38114 вузлів та 38016 елементів.

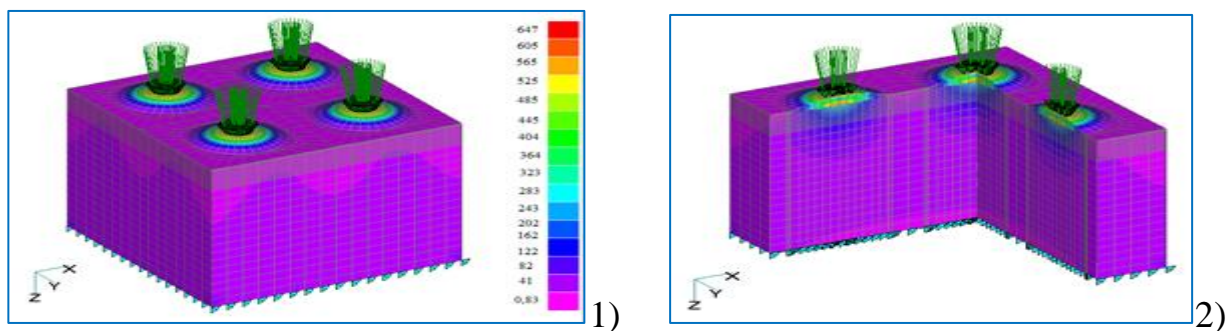
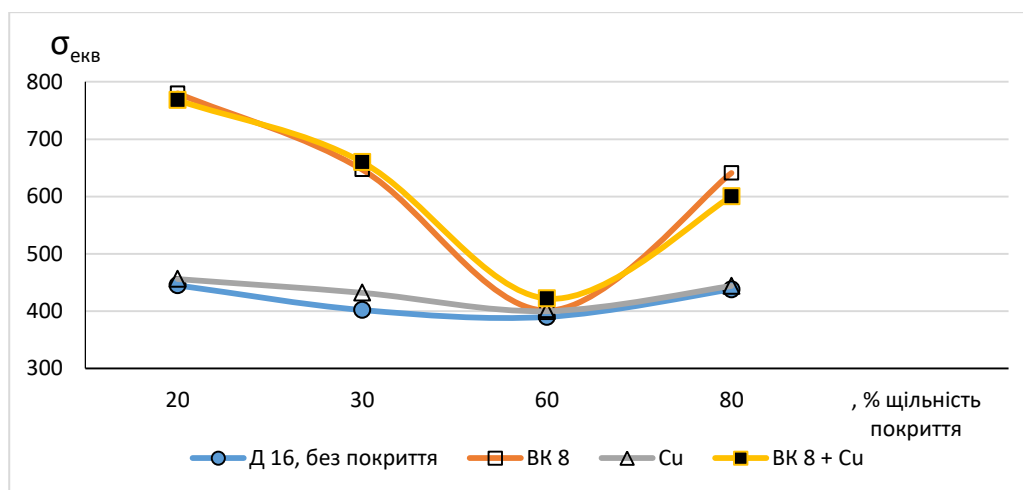


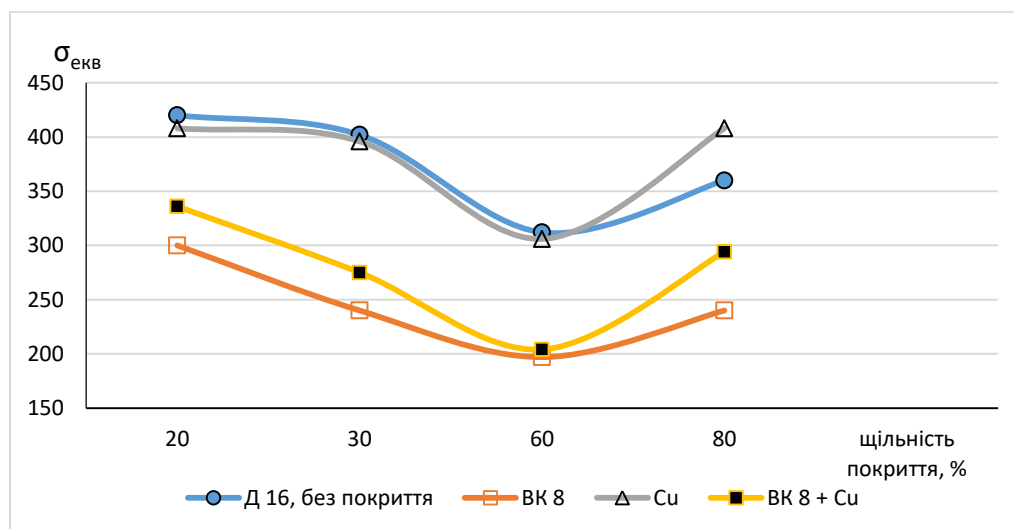
Рис. 3.4. Поля еквівалентних напружень від дії одиничного навантаження:

1 – повна модель, 2 – розріз моделі.

Проведене моделювання розподілу еквівалентних напружень на одиничний елемент покриття при навантаженні 600 Н на обрану в моделюванні площу поверхні показало залежність $\sigma_{\text{екв}}$ від щільності покриття основи. Важливим етапом в процесі моделювання є оцінка розподілу $\sigma_{\text{екв}}$ як в покритті, так і в основі, під ділянкою нанесення покриття (рис. 3.5, 3.6).



а)



б)

Рис. 3.5. Залежність розподілу еквівалентних напружень від щільності покриття: а – в елементі ЕІЛ-покриття; б – в основі, під елементом покриття.

Аналіз представлених результатів щодо розподілу $\sigma_{\text{екв}}$ як в елементі покриття, так і в основі, показав наявність мінімального екстремуму $\sigma_{\text{екв}}$ в інтервалі, що відповідає щільності нанесення покриття на рівні 55 – 65%.

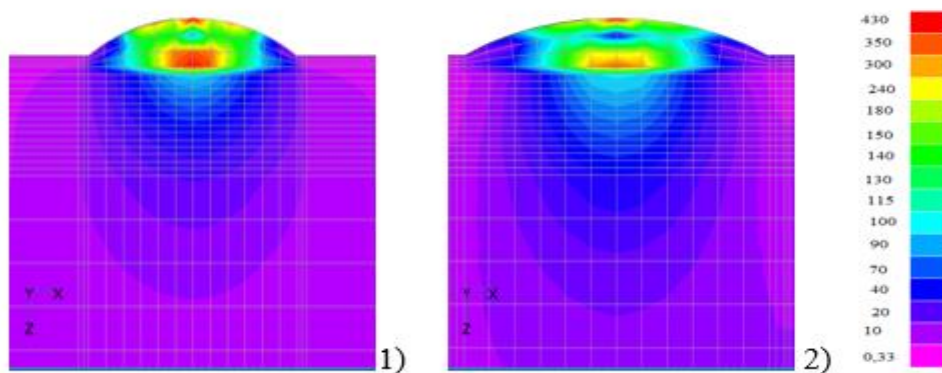


Рис. 3.6. Характер розподілу еквівалентних напружень в одиничному елементі для покриття з міді щільністю: 1 – 20%; 2 – 60%.

При зростанні щільності покриття з 20 до 60 % для матеріалів ВК-8, Сu, ВК-8+Сu максимальні значення $\sigma_{\text{екв}}$ в одиничному покритті знижуються відповідно в 1,95 : 1,14 : 1,81 раз, а в основі зменшення $\sigma_{\text{екв}}$ становить 1,52 : 1,33 : 1,65 раз відповідно. Подальше підвищення щільності нанесення досліджуваних покриттів призводить до зростання $\sigma_{\text{екв}}$ як в одиничному елементі покриття, так і в основі. Насамперед, це пов'язано з підвищенням рівня максимальних напружень за рахунок зростання залишкових напружень в покритті та дотичних напружень в площині адгезійного контакту. В роботі [150] зазначено переваги дискретних покриттів, які полягають в підвищенні структурно-енергетичної пристосованості при терті за рахунок оптимальної геометрії, зниження концентрації напружень, зменшення тріщиноутворення.

3.2. Вплив щільності електроіскрових покриттів на їх зносостійкість.

Проаналізуємо протизношувальні характеристики досліджуваних покриттів та параметр усередненої потужності акустичної емісії залежно від щільності нанесення покриття.

Незалежно від типу покриття встановлена загальна закономірність зміни їх зносу – мінімальний екстремум залежності зносу ЕП відповідає щільності його нанесення на рівні 55 – 65 % (рис. 3.7).

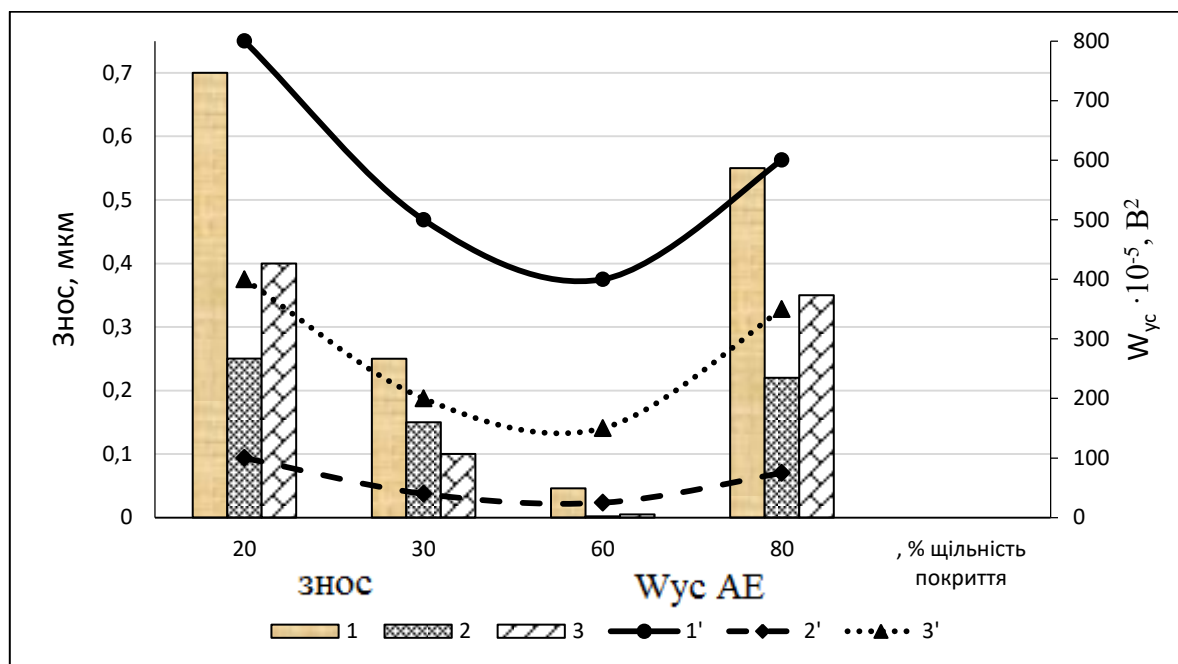


Рис. 3.7. Залежність зносу та усередненої потужності акустичної емісії (W_{yc}) армованого Д16 від щільності нанесення електроіскрового покриття: 1, 1' – ВК-8; 2, 2' – Cu; 3, 3' – ВК-8+ Cu.

При збільшенні щільності покриття з 20 до 60% знос для Д16+ВК-8, Д16+Cu, Д16+ВК-8+Cu зменшується в 15 : 125 : 80 разів відповідно. Якщо порівнювати одержані дані зносу досліджуваних ЕП неармованим покриттям основи Д16, для якого встановлений знос на рівні 0,01 мкм, то нанесення на дюралюміній ВК-8 призводить до зростання зносу контактної поверхні в 4,6 рази, армування основи покриттям Cu та комбінованим покриттям ВК-8+Cu забезпечує зниження зносу в 5 та 2 рази відповідно. Приведені показники зносу відповідають щільності нанесеного покриття 60%.

В проведених експериментальних дослідженнях встановлена кореляція таких параметрів, як знос та усереднена потужність АЕ (рис. 3.7). По-перше, залежність зміни W_{yc} від щільності покриття, незалежно від його типу, характеризується

аналогічним мінімальним екстремумом для щільності покриття 55 – 65%. По-друге, збільшення щільності покриття з 20 до 60% обумовлює зниження параметру W_{yc} в 2 : 4 : 2,6 раз відповідно для покриття ВК-8, Cu, ВК-8+Cu. По-третє, в порівнянні з вихідним матеріалом Д-16, для покриттів зі щільністю 60% встановлено збільшення параметру W_{yc} в 2 рази для покриття ВК-8 і зменшення W_{yc} в 8 і 1,33 рази для покриттів Cu і ВК-8+Cu відповідно.

Таким чином, оптимальний роботоздатний стан досліджуваних ЕП, який характеризується мінімальними показниками зносу та усередненої потужності АЕ, характерний для покриття, яке наноситься дискретно, зі щільністю 55 – 65%. Обґрунтування діапазону роботоздатного стану ЕП залежно від щільності їх нанесення можна представити узагальненням прояву наступних станів (рис. 3.8):

I – підвищений напружено-деформований стан елементів покриття за рахунок збільшення контактного навантаження внаслідок зниження фактичної площі контакту, що обумовлює підвищений знос покриття та інтенсифікацію АЕ;

II – режим ефективної роботоздатності покриття, який забезпечується зниженням рівня максимальних напружень за рахунок оптимізації дискретності покриття, розподілу контактних навантажень, формування оптимальної геометрії поверхні;

III – зростання напружено-деформованого стану покриття та основи за рахунок зменшення відстані між одиничними елементами покриття, перекриття площ розповсюдження залишкових макронапружень між сусідніми елементами, що в сукупності з контактними напруженнями та дотичними напруженнями при терті призводить до створення локальних концентраторів напружень, зменшення релаксаційних процесів та зростання інтенсивності зношування і АЕ.

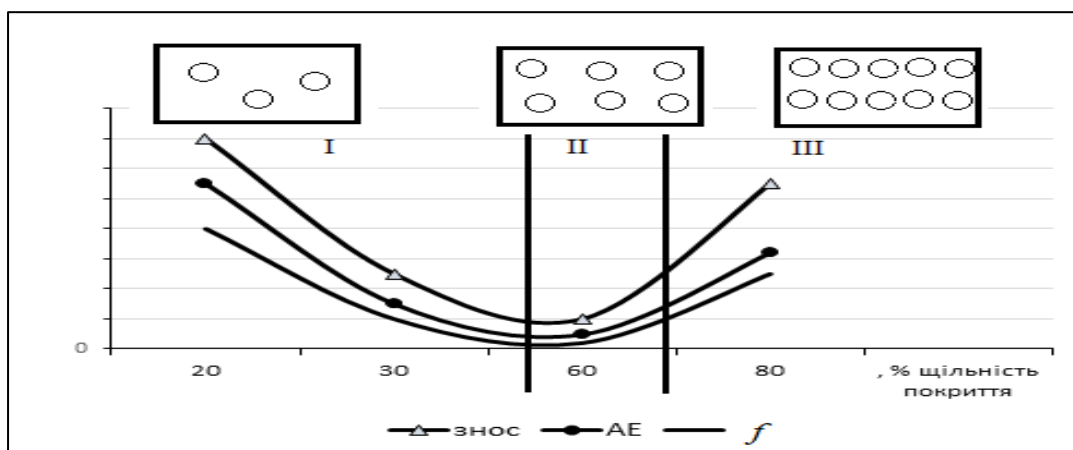


Рис. 3.8. Узагальнена схема зміни триботехнічних параметрів дискретних ЕІП.

Проаналізуємо механізми зношування досліджуваних покриттів для встановленої оптимальної щільності їх нанесення. В парі тертя 30ХГСА – Д16+покриття найбільший знос характерний для контактної поверхні Д16+ВК-8 (рис. 3.9).

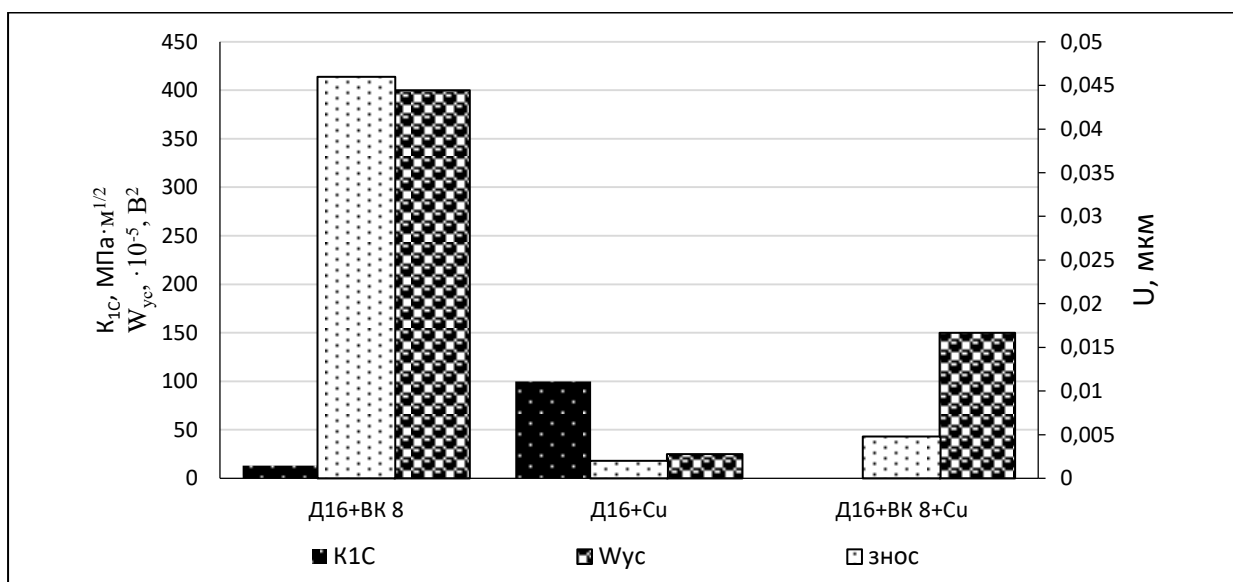


Рис. 3.9. Знос (U), усереднена потужність АЕ (W_{yc}), в'язкість руйнування (K_{1C}) Д16 з дискретними електроіскровими покриттями щільністю 60%.

Насамперед, причина підвищення зносу армованої ВК-8 поверхні полягає в механо-фізико-хімічних властивостях досліджуваного покриття. В твердого сплаву ВК-8 низький вміст кобальту, що обумовлює низьку пластичність сплаву. Це, в свою

чергу, є основною причиною щодо зниження здатності даного покриття до релаксації напружень при терті. Згідно реолого-кінетичній концепції [151], існує зв'язок процесів руйнування та деформування при терті. Для сплаву ВК-8 в'язкість руйнування (рис. 3.9), яка характеризує здатність матеріалу створювати опір щодо розвитку тріщин, дуже низька – $13,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ [152]. Це свідчить про те, що для ЕП твердого сплаву ВК-8 при терті внаслідок пластичного деформування домінує процес крихкого руйнування з утворенням твердих часток зносу, переважно карбиду вольфраму. Високі показники усередненої потужності акустичної емісії впродовж всього етапу досліджень свідчать про те, що процеси структурної пристосованості знаходяться на низькому рівні. Це також підтверджується максимальними показниками зносу контактної поверхні Д16+ВК-8, в порівнянні з іншими досліджуваними типами покриття. Аналогічні результати одержані в роботі [153], де зазначено, що високоміцний та високозносотійкий сплав ВК-8 не забезпечує необхідного ресурсу зміцнених деталей внаслідок його низької пластичності.

Нанесення на Д16 мідного ЕП не забезпечує вимоги щодо міцності покриття. Незважаючи на низький рівень зносу, високу в'язкість руйнування – $100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ [154], одержане при моделюванні значення $\sigma_{\text{екв}}$ при нанесенні покриття свідчить про те, що напружено-деформований стан покриття і основи однаковий. Реологічно-кінетична модель руйнування Д16+Cu може бути представлена наступним чином. При однаковому НДС покриття – основа показник в'язкості руйнування Д16 втричі менше, ніж в Cu [155]. При терті, під дією нормальних та тангенціальних напружень, інтенсивніші структурно-реологічні зміни будуть відбуватися в основі, під покриттям. Таким чином, на фоні низьких показників усередненої потужності АЕ, мінімального зносу пластичного покриття, домінують приховані процеси механо-деформаційних змін в основі, для прояву яких необхідний більш тривалий час, ніж час, який був в представленою експериментальному дослідженні.

До переваг армування Д16 комбінованим електроіскровим покриттям ВК-8+Cu можна віднести наступне. По-перше, за результатами моделювання НДС, $\sigma_{\text{екв}}$ в

одиначному елементі покриття зростає на 30 МПа, а в основі, під покриттям, знижується на 100 МПа, в порівнянні з неармованою поверхнею Д16, що свідчить про локалізацію нормальних напружень переважно в комбінованому покритті. По-друге, нанесення пластичного матеріалу міді на твердий сплав ВК-8 забезпечує ефективну комбінацію реологічних показників зазначених матеріалів, яка сприяє ефективній релаксації напружень при терті. Зазначені процеси обумовлюють високу зносостійкість комбінованого покриття.

Таким чином, при виборі зносостійкого ЕІП першочергово необхідно визначити оптимальну щільність покриття, проаналізувати НДС покриття-основа та встановити можливий реолого-кінетичний зв'язок процесів руйнування та деформування при терті. Врахування зазначених аспектів дозволить підвищити надійність зміцнених деталей на стадії експлуатації.

3.3. Мікрогеометричні характеристики електроіскрових покриттів в вихідному стані.

Експлуатаційні властивості деталей машин та механізмів в великій мірі залежать від параметрів якості робочих поверхонь. Серед цих параметрів, в першу чергу, слід відзначити мікрогеометричні характеристики (хвилястість, шорсткість, центральна висота мікронерівностей та ін.), так і фізико-механічні властивості (товщина зміцненого шару, його будова та фазовий склад) [13].

Параметри якості поверхневого шару елементів трибоспряження безпосередньо впливають на їх експлуатаційні властивості. В роботі [156] встановлено зростання коефіцієнту тертя при збільшенні висотних параметрів шорсткості та зниження коефіцієнта тертя і зносу, зростання контактної витривалості при збільшенні опорної кривої профілю.

Шорсткість поверхневого шару безпосередньо впливає на довговічність пар тертя, оскільки мікронерівності виступають в якості концентраторів напружень та

можуть призвести до зниження опору втоми. Досвід експлуатації машин і механізмів показав, що на інтенсивність зношування контактних поверхонь впливають тривалість припрацювання, маслоємність, площа фактичного дотику та інші параметри, які визначаються кривою опорної поверхні (кривою Аббота) [157].

Проведена оцінка мікрогеометричних параметрів дискретних ЕП при використанні комбінованої технології армування дюралюмінію Д16, яка включає електроіскрове легування з подальшою обробкою утворених покриттів поверхневим пластичним деформуванням (ППД). Використання комбінованої технології проведено з метою підвищення триботехнічних властивостей ЕП шляхом зміни залишкових напружень розтягу в сформованих ЕП покриттях на залишкові напруження стиску при ППД [158].

Для моделювання щільності нанесення електроіскрового покриття, оцінки його напружено-деформованого стану (НДС) використано метод скінченно-елементного аналізу, який реалізований в програмному комплексі Nastran. Досліджувались дискретні покриття твердого сплаву ВК-8, пластичного матеріалу Сu та комбінованого покриття ВК-8 + Сu, які наносились зі щільністю 60% на дюралюміній Д16. При моделюванні НДС дискретних покриттів встановлені залишкові напруження розтягу на поверхні одиничного покриття, які становлять 99, 17, 57 МПа відповідно для покриттів ВК-8, Сu, ВК-8 + Сu. Тому після ЕІЛ проводили ППД методом статичної чеканки, максимальне зусилля складало 190 МПа ($\sigma_t^{0,7}$ для Д16).

Використання комбінованої технології проведено з метою підвищення триботехнічних властивостей ЕП шляхом зміни залишкових напружень розтягу в сформованих електроіскрових покриттях на залишкові напруження стиску після ППД (таблиця 3.2, рис. 3.10).

Характер розподілу головних нормальних напружень електроіскрове покриття – основа після ЕІЛ та подальшої обробки сформованих покриттів ППД

Матеріал покриття	Розподіл головних нормальних напружень, σ_z , МПа					
	На поверхні ЕІП		На межі покриття – основа (Д16)		В основі (Д16), на глибині 150 мкм	
	ЕІЛ	ЕІЛ+ППД	ЕІЛ	ЕІЛ+ППД	ЕІЛ	ЕІЛ+ППД
ВК-8	99	-20	47	37	2	-2
Cu	17	-97	5	-4	-2	-7
ВК-8 + Cu	57	-93	27	17	2	-20

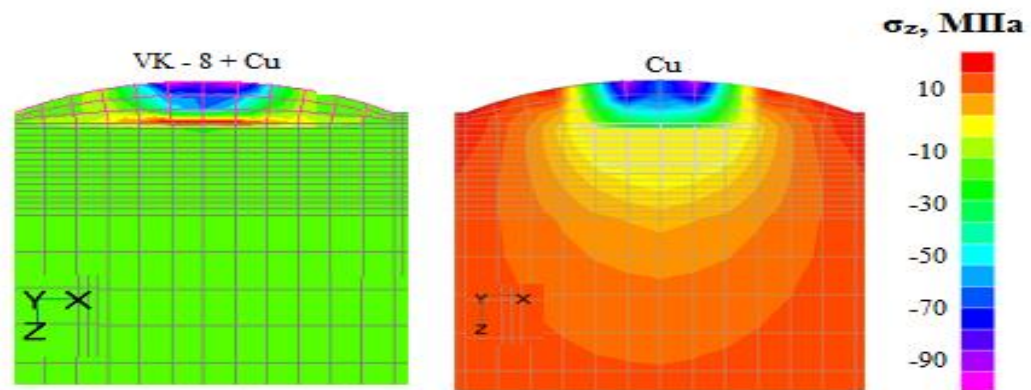
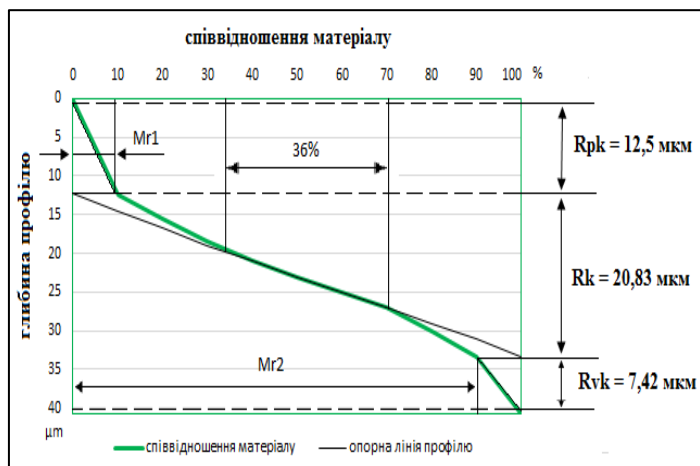
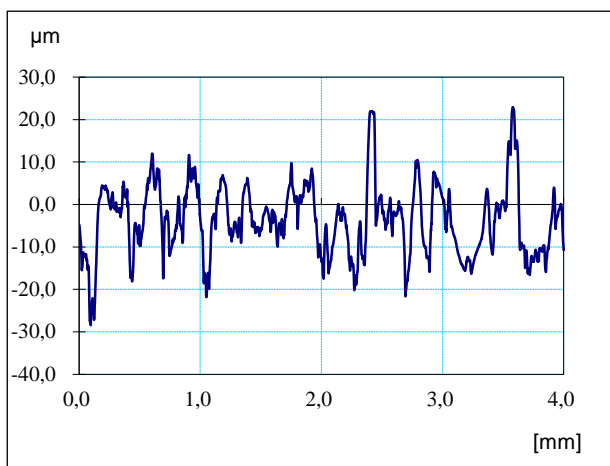
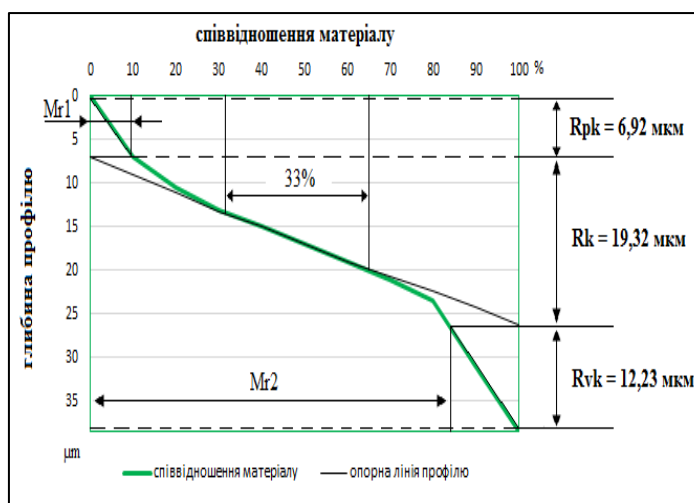
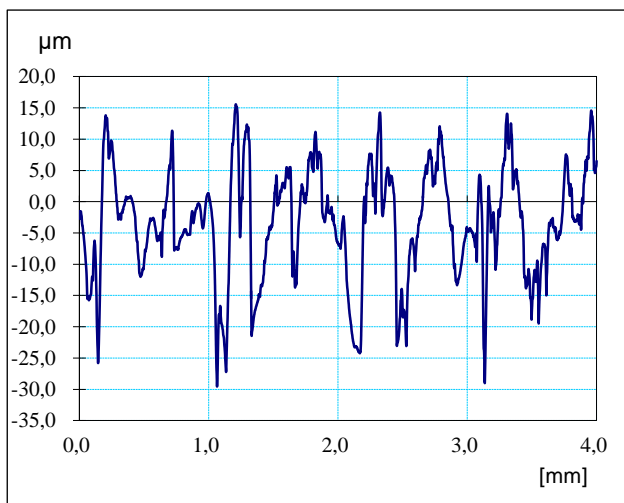


Рис. 3.10. Розподіл головних нормальних напружень електроіскрове покриття – основа при використанні комбінованої технології армування дюралюмінію Д16.

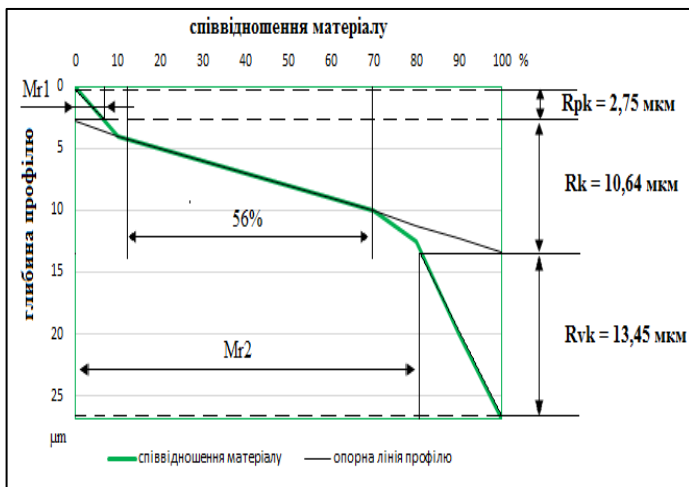
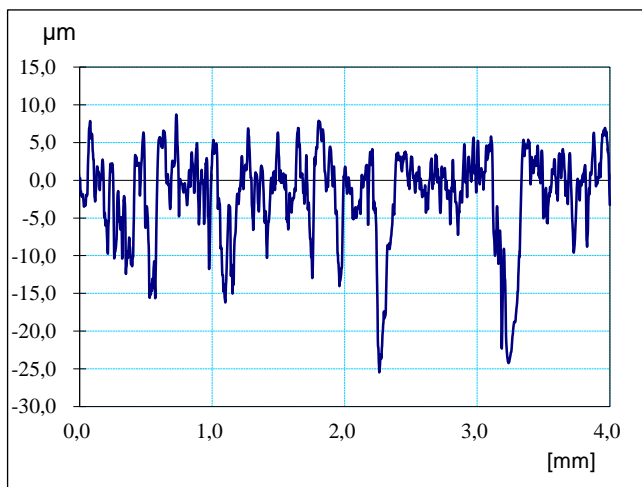
Параметри профілю мікрорельєфу поверхні визначали за міжнародним стандартом DIN 4776 [159]. На основі профілограм досліджуваних ЕІП побудовані криві Аббота та проведений аналіз основних показників профілю поверхні (рис. 3.11, табл. 3.3).



1)



2)



3)

Рис. 3.11. Профілограми поверхонь ЕП та функціональні параметри профілю шорсткості за кривою Аббота: 1 – ВК-8, 2 – Cu, 3 – ВК-8 + Cu.

Функціональні параметри профілю шорсткості мікрорельєфу поверхні

Параметри профілю шорсткості поверхні	Тип електроіскрового покриття		
	ВК-8	Cu	ВК-8 + Cu
R_{pk} – середня арифметична висота виступів верхньої частини профілю, мкм	12,15	6,92	2,75
R_k – середня арифметична глибина серцевини мікронерівностей профілю, мкм	20,83	19,32	10,64
Rvk – середня арифметична глибина впадин профілю, мкм	7,42	12,23	13,45
Ra – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм	6,29	6,53	4,2
$Mr1$ – співвідношення матеріалу, що визначає верхню межу шорсткості серцевини, %	8	10	7
$Mr2$ – співвідношення матеріалу, що визначає нижню межу шорсткості серцевини, %	89	83	81
Центральна частина середньої відносної опорної довжини профілю, %	36	33	56
Q – питома маслоємність поверхні, $\text{мм}^3/\text{см}^3$	0,041	0,104	0,128

Важливим етапом початкової експлуатації деталей машин є тривалість періоду припрацювання. Саме на цьому етапі першочерговою умовою контактування елементів трибоспряження є зростання фактичної площі контакту. Зменшити період припрацювання можливо за рахунок мінімізації частки профілю профілограми, яка приходить на частку виступів верхньої частини профілю. Згідно даним табл. 3.3, для комбінованого покриття ВК-8 + Cu параметр R_{pk} становить 2,75 мкм, що свідчить про найефективнішу здатність даного типу покриття до скорочення періоду припрацювання.

Параметр R_k дозволяє спрогнозувати експлуатаційні властивості поверхні та безпосередньо впливає на термін служби елементів трибоспряження, оскільки дана ділянка серцевини мікронерівностей профілю визначає несучу здатність та розподіл навантаження в контакті. Оскільки комбіноване покриття ВК-8 + Cu характеризується зменшенням даного параметру, в середньому в 2 рази, в порівнянні з іншими досліджуваними ЕПП, можливо спрогнозувати про його високу ефективність після

формування мікрорельєфу з застосуванням комбінованої технології ЕІЛ та ППД. Співпадання області максимального збільшення матеріалу профілю мікрорельєфу поверхні на кривій Аббота та опорної лінії профілю шорсткості поверхні для покриттів ВК-8, Сu, ВК-8 + Сu становить 36 : 33 : 56 % відповідно (рис. 3.11). Згідно методики оцінки даного показника за стандартом DIN 4776, рекомендовані його значення на рівні 40%. Лише для покриття ВК-8 + Сu встановлено збільшення даного параметра в 1,4 рази, в порівнянні з нормованим значенням. Одержані результати свідчать про те, що комбіноване покриття ВК-8 + Сu в вихідному стані характеризується максимальним збільшенням матеріалу в серцевинній ділянці профілю поверхні, що є визначальним при прогнозуванні ресурсу контактної поверхні.

Важливим параметром за кривою Аббота є середня арифметична глибина впадин профілю, яка визначає маслоємність триботехнічної поверхні. Питому маслоємність поверхні розраховували за формулою [160, 161]:

$$Q = \frac{R_{vk}}{20} \left(1 - \frac{M_{r2}}{100\%}\right), \quad (3.2)$$

де R_{vk} – середня арифметична глибина впадин профілю, мкм; M_{r2} – співвідношення матеріалу, що визначає нижню межу шорсткості серцевини, %.

Згідно табл. 3.3, для комбінованого ЕІП ВК-8 + Сu розрахункові значення питомої маслоємності в 3,12 і в 1,23 рази перевищують аналогічний параметр, встановлений для покриттів ВК-8 та Сu відповідно. Параметр Q безпосередньо впливає на антифрикційні характеристики досліджуваних покриттів: для ВК-8, Сu, ВК-8 + Сu коефіцієнт тертя в контакті становить відповідно 0,17 : 0,13 : 0,11. Отже, ЕІП ВК-8 + Сu за показником профілю мікрорельєфу поверхні R_{vk} буде характеризуватися ефективними змащувальними та антифрикційними властивостями, що являється необхідною умовою для підвищення довговічності триботехнічної пари за умов її роботи в мастильному середовищі.

3.4. Аналіз міцнісних характеристик електроіскрових покриттів.

Важливе практичне значення має процес формування зносостійких електроіскрових покриттів, що забезпечують реалізацію позитивного градієнту механічних властивостей по глибині з метою створення передумов для оптимальної структурної пристосованості елементів трибоспряження. Тому наступний етап роботи полягав в оцінці міцнісних характеристик зносостійких електроіскрових покриттів при терті.

Мікротвердість поверхневих шарів металу і знос вимірювалися на багатофункціональному приладі «Мікрон-гамма» [162-164], призначеному для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів методом безперервного вдавлювання індентора.

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.

Глибина впровадження індентора при склерометрії – основний параметр, за яким можливо встановити об'єм приповерхневих шарів металу, які реагують на вдавлювання індентора. Результати даного аналізу після структурної пристосованості поверхневих шарів металу при терті представлені на рис. 3.12.

Формування електроіскрових покриттів з Cu, ВК8+Cu, ВК8 забезпечує зниження розповсюдження деформаційних процесів в приповерхневих шарах металу по глибині на 20%, 70% та 95% відповідно.

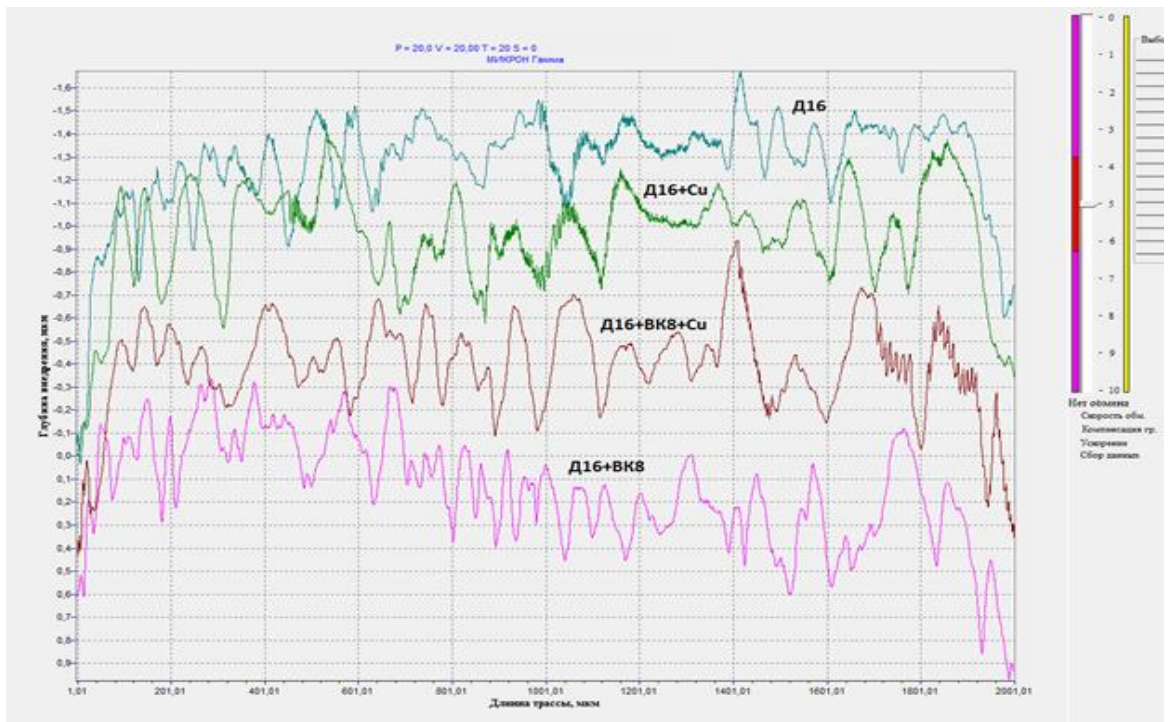


Рис. 3.12. Глибина вдавлювання індентора при склерометрії електроіскрових покриттів на дюралюмінії Д16.

Як для дюралюмінію без покриття, так і для покриттів Cu і BK8+Cu встановлено утворення неоднорідного деформаційного мікрорельєфу, що проявляється в нерівномірному розподілі тонких слідів ковзання в зонах з дрібнозернистою структурою. Якщо для Д16 та Д16+Cu ступінь неоднорідної пластичної деформації становить до 80% довжини траси сканування індентора, то для Д16+BK8+Cu цей показник зменшується на 30%. Лише для твердого покриття BK8 не встановлено прояву неоднорідної пластичної деформації, що обумовлено його високою твердістю та опором діючим нормальним та дотичним напруженням в зоні фрикційного контакту.

Деформаційно-міцнісні характеристики приповерхневих шарів металу відіграють ведучу роль в забезпеченні зносостійкості контактних поверхонь, оскільки прискорення / уповільнення формування дислокаційної структури при терті обумовлено активацією пар тертя.

Розглянемо зміну мікротвердості поверхневих та приповерхневих шарів досліджуваних поверхонь після наробітки 240 хв. в режимі ковзання (табл. 3.4., рис. 3.13).

Таблиця 3.4

Мікротвердість та лінійний знос досліджуваних поверхонь

Тип покриття	Мікротвердість вихідної поверхні, H_{20} , МПа	Мікротвердість поверхні після тертя, H_{20} , МПа	Знос, мкм
Д16	850	390 (зміцнення)	0,01
Д16+Cu	700	755 (зміцнення)	0,002
Д16+ВК 8	17000	18920 (зміцнення)	0,046
Д16+ВК 8+Cu	6000	4730 (зміцнення)	0,0048

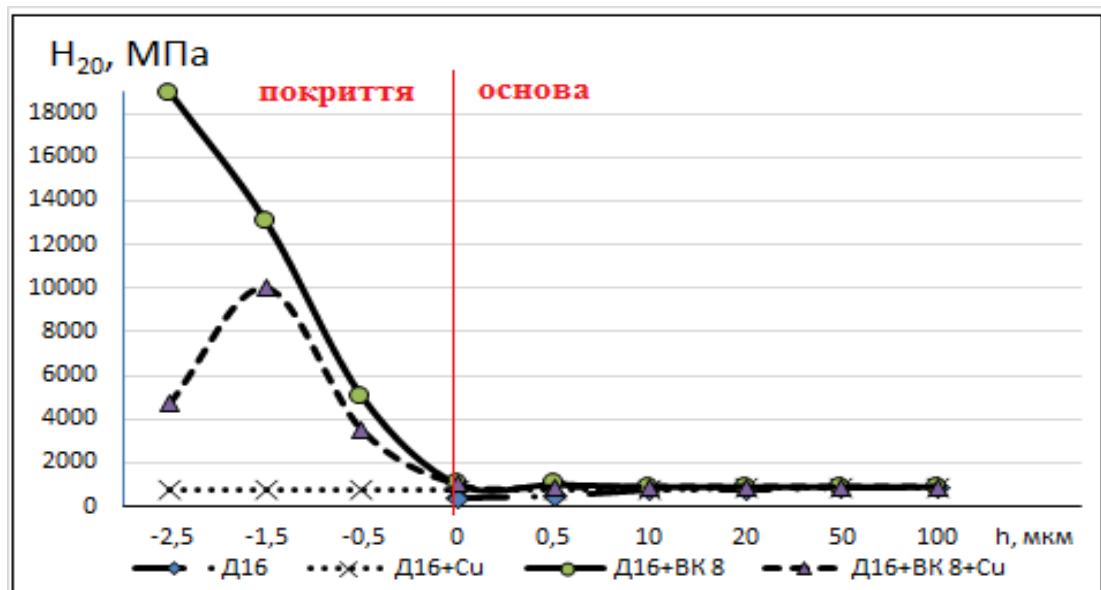


Рис. 3.13. Мікротвердість приповерхневих шарів металу по глибині (від'ємні значення відповідають покриттю, позитивні - основі).

Тільки для неармованої поверхні Д16 встановлено зниження мікротвердості поверхневих шарів при терті в 2,18 разів. Зміцнення проявляється не тільки в поверхневих шарах металу, а розповсюджується на глибину до 30 мкм, що є головною передумовою для зниження зносостійкості. Механізм даного процесу полягає в зниженні опору локальному пластичному деформуванню в фрикційному контакті,

інтенсифікації енергетичних трибопроцесів та утворенні розрихленого поверхневого шару металу з появою субмікроскопічних дефектів.

Формування електроіскрового покриття з міді забезпечує реалізацію позитивного градієнту механічних властивостей металу по глибині. Деформаційні процеси локалізуються переважно в покритті, однак сформоване м'яке покриття не забезпечує повного захисту матеріалу основи. Незважаючи на те, що зона розповсюдження пластичних деформацій в основі зменшується в 2 рази, глибина їх локалізації становить до 15 мкм.

Тверде електроіскрове покриття ВК8 забезпечує зростання мікротвердості поверхневих шарів металу в 20 разів. Однак, наявність негативного градієнту механічних властивостей по глибині знижує його зносостійкість, в середньому, в 4 рази, в порівнянні з Д16. В процесі тертя сформоване покриття ВК8 зміцнюється, що призводить до зростання напруженого стану в покритті та є головною передумовою до зниження інтенсивності релаксаційних процесів в активованих тертям поверхневих шарах металу.

При формуванні комбінованого електроіскрового покриття ВК8+Cu усуваються недоліки, які зазначені вище 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. 3.14).

Суцільність комбінованого покриття ВК8+Cu зростає в 2 рази, в порівнянні з покриттям ВК8, за рахунок заповнення несуцільностей твердого покриття ВК8 міддю,

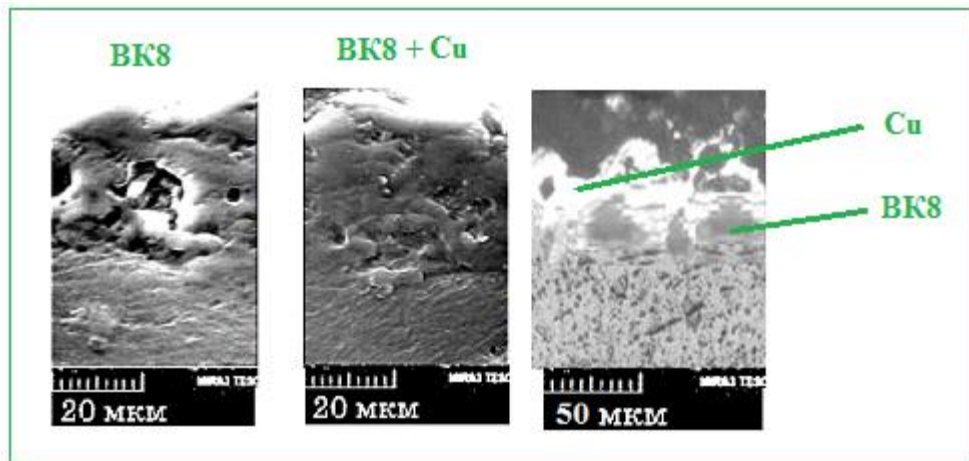


Рис. 3.14. Оптично-мікроскопічні зображення поперечних перерізів зразків дюралюмінію Д16 з електроіскровими покриттями після трибологічних випробувань.

що сприяє локалізації нормальних та тангенціальних напружень в м'якій складовій комбінованого покриття.

Таким чином, аналіз досліджуваних електроіскрових покриттів показав переваги комбінованого покриття з твердого (BK8) та м'якого (Cu) матеріалів, яке забезпечує підвищення зносостійкості армованої поверхні дюралюмінію Д16 за рахунок позитивного градієнту механічних властивостей по глибині та ефективного опору щодо розповсюдження пластичних деформацій в матеріал основи.

Висновки до розділу 3.

1. 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 BK-8, Cu, BK-8+Cu обумовлює зниження еквівалентних напружень в одиночному покритті відповідно для зазначених матеріалів 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 рівня максимальних напружень за

рахунок зростання залишкових напружень в покритті та дотичних напружень в площині адгезійного контакту.

2. Визначено оптимальний роботоздатний стан дискретних ЕПП 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.

3. 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 $100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

4. Аналіз реолого-кінетичного механізму зношування ЕПП 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.

5. Побудовані криві Аббота та визначені параметри, які найбільше впливають на зносостійкість ЕПП: 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 контакті; збільшення середньої арифметичної глибини впадин профілю є головною передумовою щодо підвищення питомої маслоємності поверхні та забезпечення ефективних змащувальних та антифрикційних властивостей трибоконтракту.

6. 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.

7. Проведена оцінка міцністних 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. Залежно від твердості матеріалу електроіскрового покриття забезпечується зниження розповсюдження деформаційних процесів в приповерхневих шарах матеріалу основи по глибині від 20 до 95%. 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.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ З РЕЄСТРАЦІЄЮ ТА ОБРОБКОЮ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Мета досліджень даного розділу полягала в визначенні ефективності застосування методу акустичної емісії (АЕ) для дослідження процесів структурної пристосованості контактних поверхонь при терті.

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 ЕІЛ нанесено сплав ВК8, мідь (Cu) та комбіноване покриття сплав ВК-8+Cu. Зазначені електроіскрові покриття наносились дискретно, зі щільністю 55 – 65%.

Умови експерименту: один з зразків обертається з частотою 400 хв^{-1} , а інший (нерухомий) встановлюють співвісно, притискають один до одного торцевими поверхнями з вісьовим навантаженням 600 Н; в якості мастильного матеріалу використовувалася моторна олива М10Г₂к (ГОСТ-8581-78).

Дослідження контактних поверхонь відбувалось за наступною схемою: кожний зразок зі сталі 30ХГСА та дюралюмінію Д16 (неармованого або армованого ЕІЛ) досліджувалися в якості рухомого та нерухомого елемента. Рухомий елемент в трибоспряженні позначається першим, нерухомий – другим. Наприклад, в парі тертя Д16+ВК8 – 30ХГСА рухомим елементом був модельний зразок з дюралюмінію Д16, поверхня якого зміцнена сплавом ВК8, в парі тертя 30ХГСА – Д16+ВК8 рухомим елементом був модельний зразок зі сталі 30ХГСА. Відповідно, другі елементи в зазначених парах тертя були нерухомими.

4.1. Закономірності зміни триботехнічних параметрів та сигналів акустичної емісії при випробуваннях пари тертя 30ХГСА - Д16 на зносостійкість.

Аналіз зміни середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту у часі у ході випробувань пари тертя Д16 - 30ХГСА на зносостійкість показав, що при величині прикладеного навантаження 600 Н має місце суттєве збільшення температури (рис. 4.1) та її стабілізація на 84 хв випробувань на рівні 45-46 °С [165]. Це, імовірно, пов'язано з інтенсивними процесами дисипації енергії на етапі припрацювання, що супроводжується значним виділенням теплової енергії.

Аналіз зміни коефіцієнту тертя у часі (рис. 4.1) показав, що закінчення процесу припрацювання настає вже на 24 хв випробувань. При цьому величина коефіцієнту тертя дорівнює 0,08 та залишається постійною протягом всього подальшого періоду випробувань. Таким чином перехід трибосистеми до сталого режиму зношування фіксується за зміною моменту тертя раніше, ніж за середньою температурою фрикційного контакту.

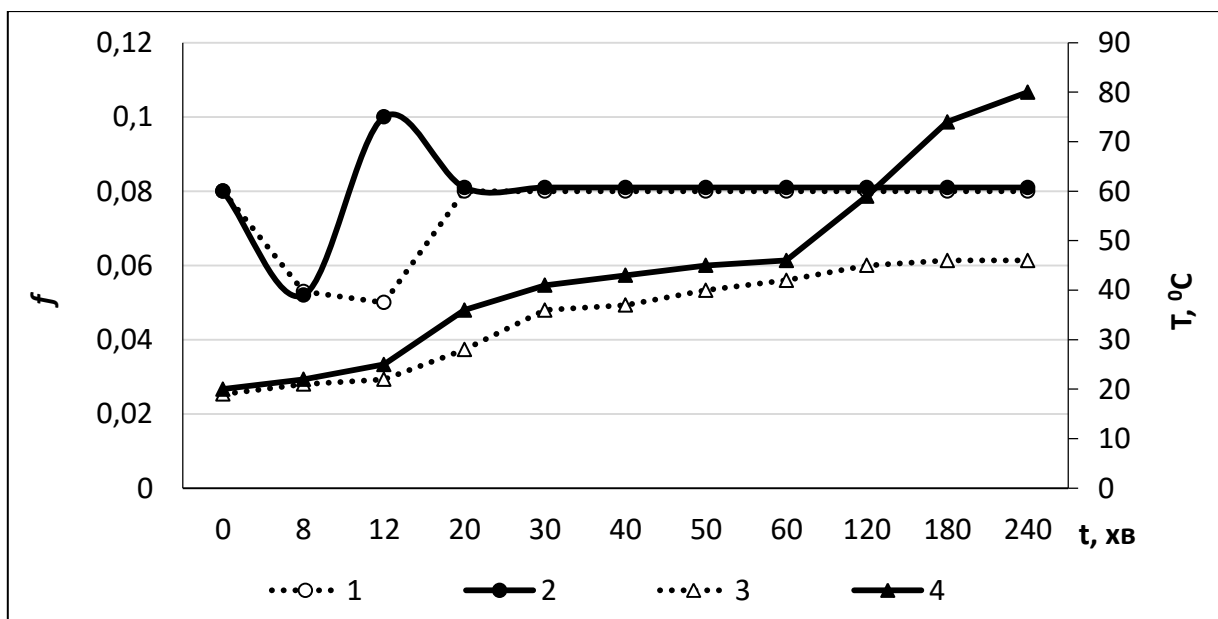


Рис. 4.1. Зміна коефіцієнту тертя і температури в зоні контактування трибосистеми від часу для пари Д16 – 30ХГСА (1 – коефіцієнт тертя, 3 – температура) та для пари 30ХГСА – Д16 (2 – коефіцієнт тертя, 4 – температура).

Характер зміни усередненої потужності акустичної емісії у часі (час усереднення 20 мс) наведений на рис. 4.2. Детальний аналіз зміни акусто-емісійного випромінювання у часі показав наявність двох характерних ділянок: період припрацювання тривалістю 0...250 с випробувань (рис. 4.3а) та період сталого зношування 250...14000 с випробувань (рис. 4.3б).

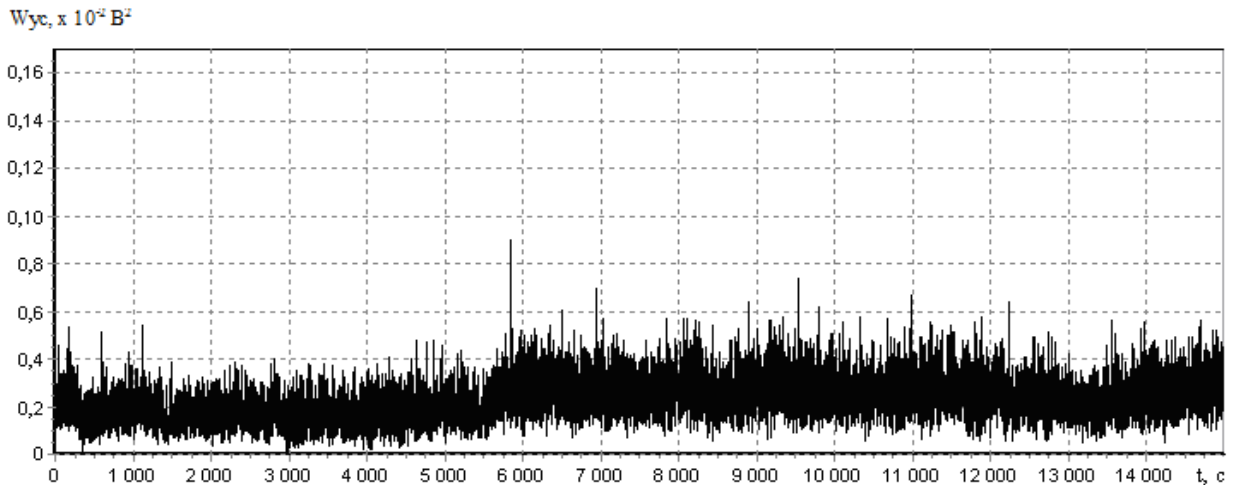


Рис. 4.2. Характер зміни усередненої потужності сигналів АЕ у часі (секунди) для трибосистеми Д16 – 30ХГСА.

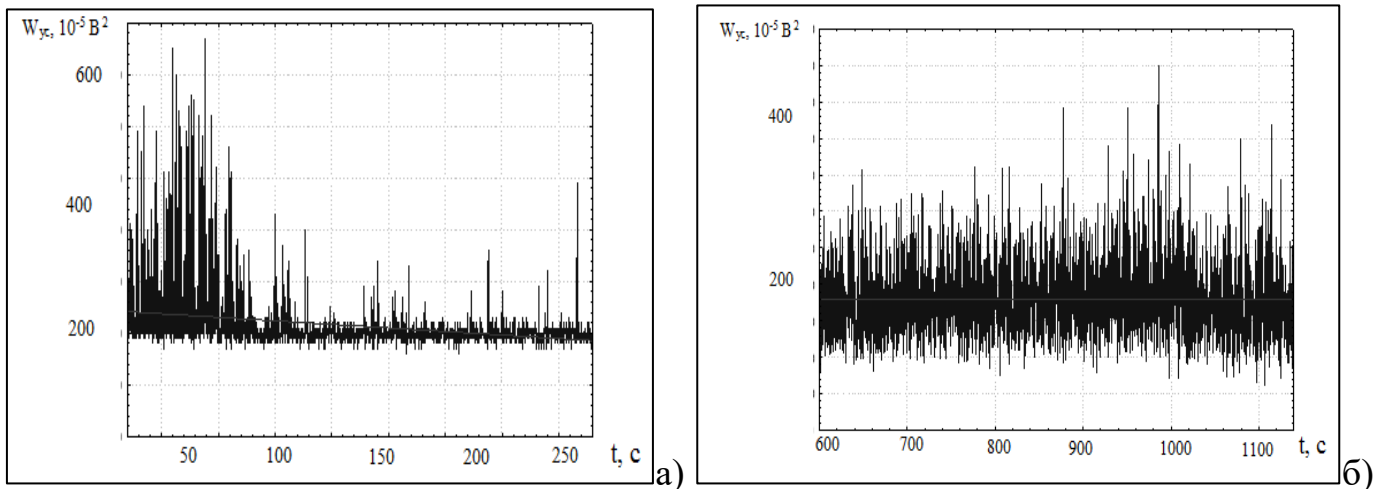


Рис. 4.3. Діаграми зміни усередненої потужності АЕ у часі (секунди) на різних етапах роботи трибосистеми Д16 – 30ХГСА.

Аналіз діаграми акусто-емісійного випромінювання на інтервалі 0...250 с наведений на рис. 4.3а, показує, що в інтервалі випробувань 0...175 с має місце значне

збільшення усередненої потужності АЕ з $W_{yc}=200 \times 10^{-5} \text{ В}^2$ до $W_{yc}=750 \times 10^{-5} \text{ В}^2$. В подальшому з 175 с до 225 с спостерігається падіння усередненої потужності АЕ з $W_{yc}=750 \times 10^{-5} \text{ В}^2$ до $(200 \dots 220) \times 10^{-5} \text{ В}^2$. Враховуючи те, що усереднена потужність акустичної емісії корелює з інтенсивністю зношування, можливо припустити про відповідну зміну інтенсивності зношування в трибологічному контакті.

Слід відмити, що закінчення періоду припрацювання фіксується за зміною усередненої потужності АЕ значно раніше, ніж за зміною коефіцієнта тертя та середньої температури фрикційного контакту приблизно на 4 хв 30 с випробувань, що свідчить про більшу точність та меншу інерційність вимірювання періоду припрацювання за допомогою методу акустичної емісії.

Таким чином, інтервал 0...225 с відноситься до етапу припрацювання трибосистеми, що характеризується значним збільшенням інтенсивності зношування та подальшим її зменшенням до деякого рівня, характерного для механізму нормального механо-хімічного зношування при навантаженні у 600 Н. Слід відміти, що характер зміни усередненої потужності АЕ у часі (рис. 4.3а) повністю співпадає з класичною діаграмою зносу на етапі припрацювання [1].

Аналіз зміни середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту при випробуванні пари тертя 30ХГСА – Д16 (рухомий трибоелемент – сталь 30ХГСА) на зносостійкість показав, що при величині прикладеного навантаження 600 Н фіксується поступове постійне збільшення температури (рис. 4.1) до $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ на 200 хв випробувань.

Аналіз зміни коефіцієнту тертя у часі для пари 30ХГСА – Д16 (рис. 4.1) показав, що закінчення процесу припрацювання аналогічно трибоспряженню Д16 – 30ХГСА та фіксується вже на 24 хв випробувань, при цьому коефіцієнт тертя становить 0,08 та залишається постійним протягом наступного періоду випробувань. Таким чином перехід трибосистеми до сталого режиму зношування фіксуються за зміною моменту тертя раніше, ніж за середньою температурою фрикційного контакту.

Характер зміни усередненої потужності акустичної емісії у часі для пари 30ХГСА – Д16 наведений на рис. 4.4. Зміна акусто-емісійного випромінювання у часі

для даної пари тертя також характеризується наявністю двох характерних ділянок: періоду припрацювання: 0...150 с та подальшого періоду сталого зношування 150...14000 с випробувань.

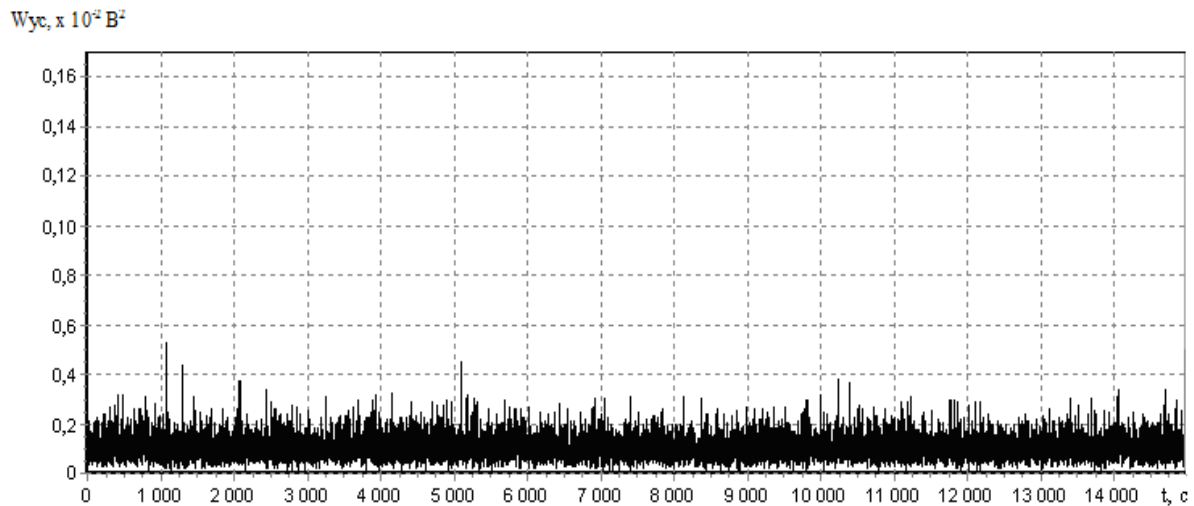


Рис. 4.4. Характер зміни усередненої потужності сигналів АЕ у часі (секунди) для трибосистеми 30ХГСА – Д16.

Аналіз діаграми акусто-емісійного випромінювання на інтервалі 0...150 с показує, що з 0 с до 50 с інтервалу випробувань фіксується незначне збільшення усередненої потужності АЕ з $W_{yc} = 150 \times 10^{-5} \text{ B}^2$ до $W_{yc} = 350 \times 10^{-5} \text{ B}^2$. В подальшому з 50 с до 150 с зареєстровано незначне падіння усередненої потужності АЕ з $W_{yc} = 350 \times 10^{-5} \text{ B}^2$ до $120 \times 10^{-5} \text{ B}^2$. Враховуючи те, що усереднена потужність акустичної емісії корелює з інтенсивністю зношування, можна казати про встановлений часовий відрізок зміни інтенсивності зношування в період припрацювання та перехід трибосистеми до сталого окисного зношування. Таким чином, встановлено подібність процесів припрацювання та сталого зношування для обох досліджуваних пар тертя.

Слід відмітити, що завершення етапу припрацювання фіксується за зміною усередненою потужності АЕ значно раніше, ніж за зміною коефіцієнта тертя та середньої температури фрикційного контакту приблизно на 2-3 хвилині випробувань. Отже, період припрацювання для пари 30ХГСА – Д16 скорочується, в порівнянні з трибосистемою Д16 – 30ХГСА.

Скорочення періоду припрацювання по зміні усередненої потужності АЕ для пари 30ХГСА – Д16, в середньому, в 1,7 рази, в порівнянні з парою Д16 – 30ХГСА, обумовлено інтенсифікацією механо-фізико-хімічних процесів при зростанні температури в триботехнічному контакті. Це забезпечує перехід трибосистеми в стан структурної пристосованості з мінімальною дисипацією енергії, що проявляється в зниженні параметру усередненої потужності АЕ, в середньому, в 2 рази на етапі сталого зношування контактних поверхонь. Що стосується визначення кінця припрацювання за результатами вимірювання температури, то при переході до нормального окисного зношування має місце не падіння температури, а сповільнення швидкості її зростання (рис. 4.1).

Приклад діаграми акусто-емісійного випромінювання на сталій ділянці зношування 30ХГСА-Д16 наведений на рис. 4.5. Аналіз діаграми АЕ свідчить про стабільність середніх значень усередненої потужності акустичної емісії $W_{yc,sp.} \approx 100-120 \times 10^{-5} B^2$ протягом всього періоду сталого зношування. При цьому періодично фіксувалися короткочасні значні сплески усередненої потужності сигналів акустичної емісії W_{yc} до $180-200 \times 10^{-5} B^2$.

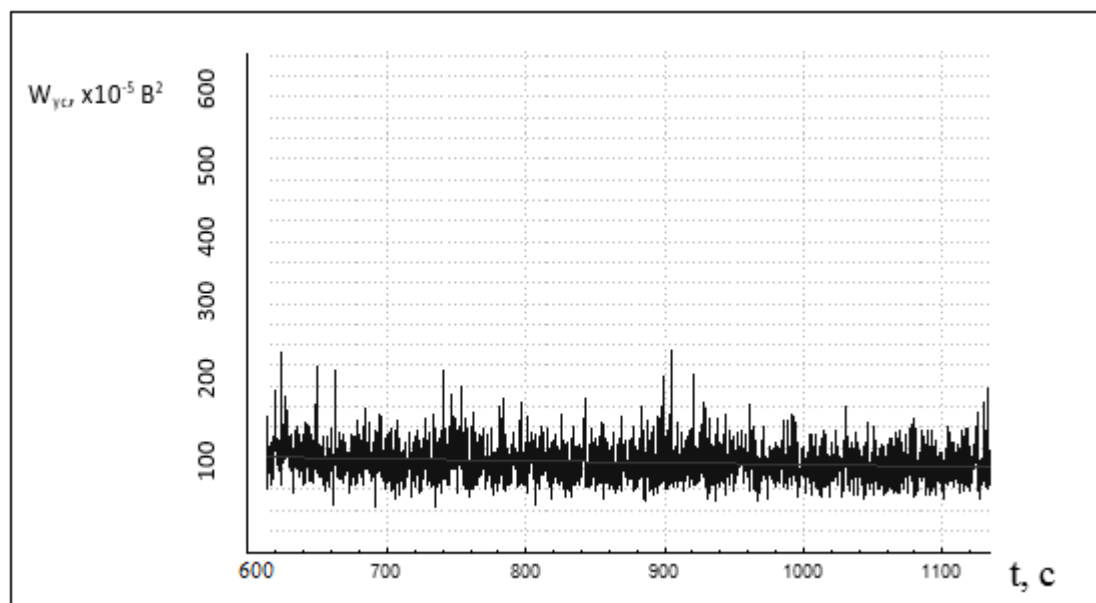


Рис. 4.5. Діаграма зміни усередненої потужності АЕ у часі (секунди) для трибосистеми 30ХГСА – Д16, інтервал 600...1100 с.

Проаналізуємо кінетику зміни теплових процесів для досліджуваних пар тертя. Оскільки швидкість подачі / відводу мастильного матеріалу в зону триботехнічного контакту була сталою, тому можна прийняти *const* функцію оливи М10Г₂к щодо відведення тепла з зони тертя. Інтенсивність тепловиділення в зоні тертя залежить від потужності тертя і визначається співвідношенням [166]:

$$Q_{\text{вид}} = f \cdot N_l \cdot V_{\text{ковз}}, \quad (4.1)$$

де f – коефіцієнт тертя; N_l – погонне навантаження; $V_{\text{ковз}}$ – швидкість ковзання.

В проведених дослідженнях щодо оцінки триботехнічних властивостей пар тертя Д16 – 30ХГСА та 30ХГСА – Д16 інтенсивність тепловиділення однакова і становить 0,04 Дж/(мм²·с).

Отже, даний параметр не відображає в повній мірі кінетику теплових процесів, які відбуваються в зоні триботехнічного контакту, оскільки середня температура зростає майже вдвічі для пари 30ХГСА – Д16, в порівнянні з парою Д16 – 30ХГСА.

Проаналізуємо приріст температури залежно від швидкості ковзання та коефіцієнта температуропровідності, тобто від числа P_e (число Пекле). Число P_e характеризує відношення теплоємності потоку осьового напрямку до теплового потоку R поперечному напрямі:

$$P_e = \frac{V_{\text{ковз}} \cdot l}{a_t} = \frac{\rho \cdot c \cdot V_{\text{ковз}} \cdot l}{\lambda}, \quad (4.2)$$

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

Оскільки в кінематичній схемі проведених досліджень один зразок був нерухомий ($V_{\text{ковз}} = 0$), тому критерій P_e розраховували для рухомого зразка. За формулою (4.2) для досліджуваних трибоспряжень критерій P_e становить 72,74 для пари Д16 – 30ХГСА (рухомий трибоелемент – Д16) та 452,5 для пари 30ХГСА – Д16 (рухомий трибоелемент – 30ХГСА).

Таким чином, із збільшенням критерію P_e для пари тертя 30ХГСА – Д16 температура контактних поверхонь нелінійно зростає. Насамперед це обумовлено як підвищенням генерованої при терті теплоти (внаслідок того, що коефіцієнт теплопровідності сталі 30ХГСА, в середньому, в 4 рази нижче, ніж в дюралюмінію Д-16), так і зменшенням кількості теплоти, яка дифундує вглиб металу. Внаслідок зазначених процесів при терті формується поверхневий шар, в якому накопичується теплота.

Це призводить до інтенсифікації процесів структурної пристосованості, зниження усередненої потужності АЕ та зменшення загального вагового зносу для пари 30ХГСА – Д16, порівняно з парою Д16 – 30ХГСА (оцінка зносу наведена в п.4.4).

4.2. Триботехнічні характеристики контакту та акустична емісія для трибоспряження сталь 30ХГСА та дюралюміній Д16 з електроіскровим покриттям ВК8.

Результати випробувань трибосистеми Д16+ВК8 – 30ХГСА (рухомий елемент – зразок Д16+ВК8) на зносостійкість при постійному навантаженні $P = 600$ Н показали нормальну роботоздатність трибосистеми на всьому етапі спостережень.

Аналіз зміни антифрикційних властивостей трибологічного контакту у часі (рис. 4.6) показав, що час припрацювання, зафіксований за зміною коефіцієнту тертя для трибосистеми Д16+ВК8 – 30ХГСА складав біля 20 хв. При цьому до 12 хв випробувань зафіксовано зростання даного параметру до рівня 0,19 далі спостерігалось його поступове зниження до рівня 0,17. Під час припрацювання спостерігалось зростання середньої температури в зоні трибологічного контакту до 45 °С. При цьому після закінчення припрацювання, на етапі сталої роботи трибосистеми зростання середньої температури в зоні трибологічного контакту продовжувалось, але проявлялось уповільнення швидкості зростання середньої температури у середньому в 4 рази (рис. 4.6).

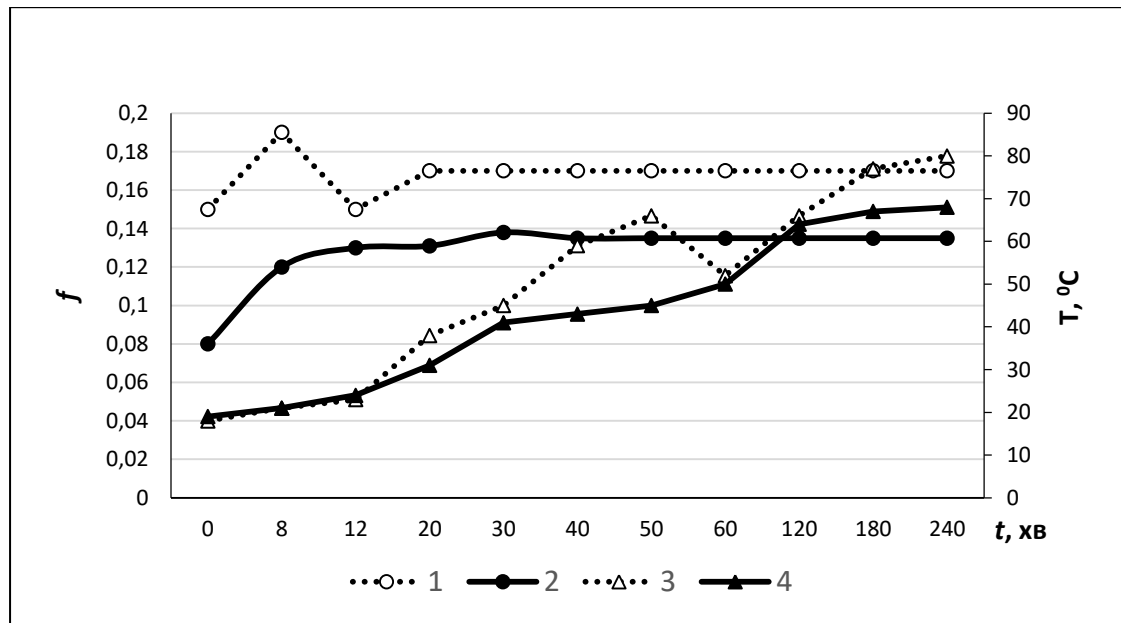


Рис. 4.6. Зміна коефіцієнту тертя і температури в зоні контактування елементів трибоспряження від часу: для пари Д16+ВК8 – 30ХГСА (1 – коефіцієнт тертя, 3 – температура), для пари 30ХГСА – Д16+ВК8 (2 – коефіцієнт тертя, 4 – температура).

Характер зміни усередненої потужності акустичної емісії протягом цього часу спостережень наведений на рис. 4.7. Більш детальний аналіз зміни акусто-емісійного випромінювання у часі для трибосистеми Д16+ВК8 – 30ХГСА на ділянці сталого зношування на інтервалі 3000...3500 с випробувань наведений на рис. 4.8.

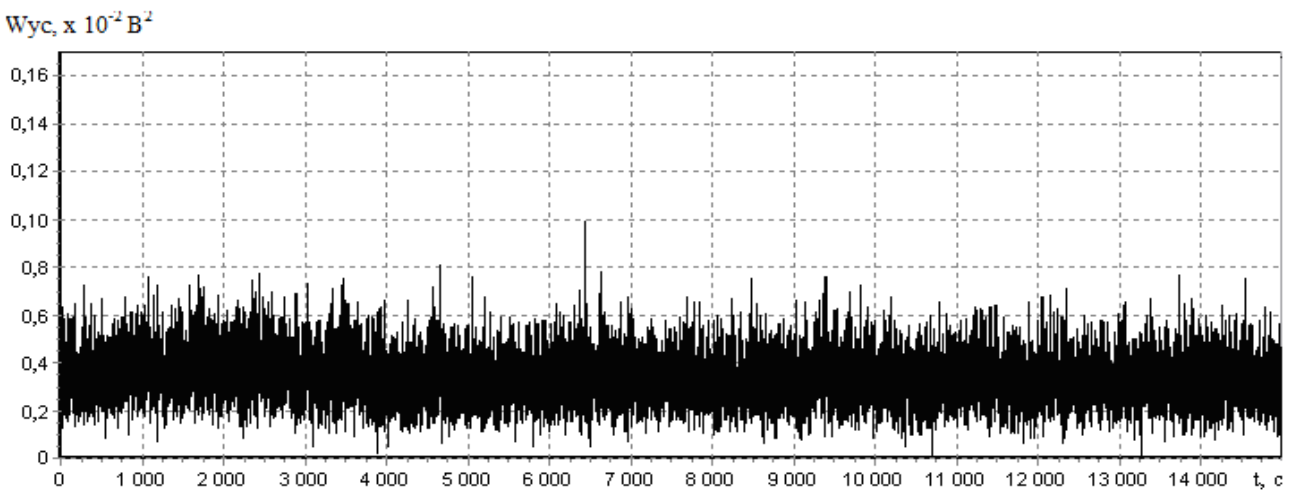


Рис. 4.7. Характер зміни усередненої потужності сигналів АЕ у часі (секунди), трибосистема Д16+ВК8 – 30ХГСА.

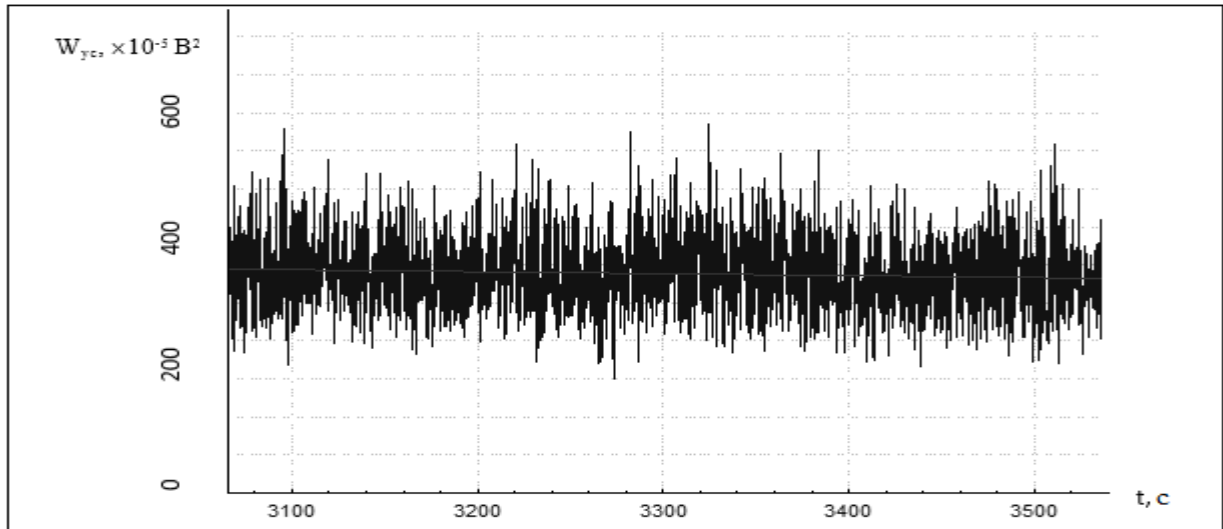


Рис. 4.8. Характер зміни усередненої потужності сигналів АЕ у часі (секунди) на етапі сталої роботи трибосистеми Д16+ВК8 – 30ХГСА.

Статистичний аналіз зміни акусто-емісійного випромінювання в інтервалі 3000...3500с напрацювання показав, що протягом обраного періоду часу гістограма розподілу усередненої потужності АЕ, має нормальний характер розподілу та залишається такою як на етапі припрацювання трибоелементів, так і на етапі сталої роботи пар тертя (рис. 4.9). При цьому, за нормальним законом розподілу, математичне очікування параметру усередненої потужності сигналів АЕ становить $W_{yc.} \approx (380...420) \times 10^{-5} B^2$, середньоквадратичне відхилення складає $75 \times 10^{-5} B^2$.

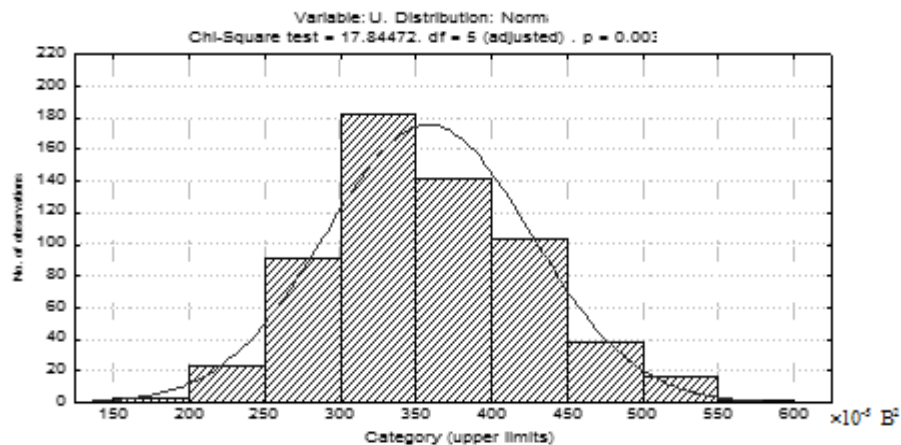


Рис. 4.9. Гістограма усередненої потужності сигналів АЕ для трибосистеми Д16+ВК8 – 30ХГСА за нормальним законом розподілу (інтервал 3000...3500 с).

Надалі проведено випробування даної триботехнічної пари в аналогічних умовах, але зі зміною рухомого елемента трибосистеми. Результати випробувань трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8 (рухомий елемент – зразок 30ХГСА) також показали нормальну працездатність, не спостерігався перехід трибосистеми до задиру при прикладенні навантаження $P = 600$ Н.

Аналіз зміни середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту у часі виявив три характерних ділянки 0...24 хв, 24...120 хв та 120...240 хв (рис. 4.6). При цьому період припрацювання трибосистеми 0...24 хв характеризується значним зростанням середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту від 19 до 43 °С. Період 24...120 хв характеризується зменшенням швидкості зростання середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту з 43 °С до 67 °С. У подальшому середня температура поверхні в зоні трибологічного контакту залишається практично постійною на рівні $\approx 67-68$ °С. Таким чином, можливо передбачити, що в трибологічному контакті проявляються різні швидкості дисипації енергії, що виділяється при терті поверхонь в фрикційному контакті.

Коефіцієнт тертя після закінчення етапу припрацювання трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8 залишається постійним і становить 0,135, що в 1,3 рази менше середніх значень коефіцієнту тертя для пари Д16+ВК8 – 30ХГСА (рис. 4.6). Таким чином експериментально підтверджено, що трибосистема 30ХГСА – Д16+ВК8 характеризується кращими антифрикційними властивостями.

Проаналізуємо механізми дисипації енергії в трибологічному контакті при нанесенні зносостійкого покриття ВК-8 на поверхню Д16. По-перше, збільшується інтенсивність тепловиділення в фрикційному контакті. Для пари тертя Д16+ВК8 – 30ХГСА даний параметр зростає в 2 рази, для пари тертя 30ХГСА – Д16+ВК8 – в 1,27 разів, в порівнянні з еталонними зразками. По-друге, в 2,46 рази зростає критерій Пекле Pe для пари тертя Д16+ВК8 – 30ХГСА після нанесення покриття сплаву ВК-8. Для пари тертя 30ХГСА – Д16+ВК8 критерій Pe не змінюється, тому що розрахунки проводились для рухомої поверхні, в даному випадку – для сталі 30ХГСА. Слід

зазначити, що зростання енергетичного балансу трибосистеми в цілому призводить до підвищення зносостійкості елементів трибоспряження. Отже, збільшення енергії в трибосистемі, де поверхня Д16 армована ВК8, при терті призводить до зростання механо-хімічної активації поверхневих шарів металу, яка обумовлює формування зносостійких вторинних структур.

Характер зміни усередненої потужності акустичної емісії у часі для пари тертя 30ХГСА – Д16+ВК8 наведений на рис. 4.10.

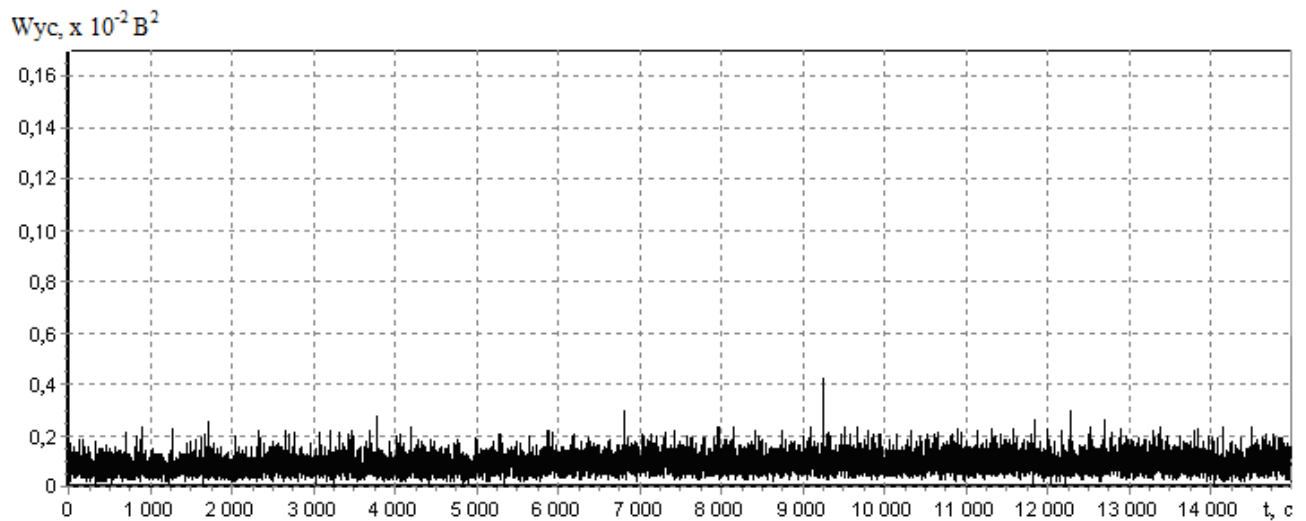


Рис. 4.10. Кінетика зміни усередненої потужності сигналів АЕ при напрацюванні для трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8.

Аналіз діаграми акусто-емісійного випромінювання при випробуваннях трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8 на зносостійкість показав наявність окремих поодиноких періодичних сплесків усередненої потужності акустичної емісії до $250 \times 10^{-5} \text{ В}^2$. Однак, на всіх етапах роботи трибосистеми $W_{yc} \approx (110 \dots 120) \times 10^{-5} \text{ В}^2$.

Порівняльний аналіз усередненої потужності АЕ для еталонних зразків та пари тертя при нанесенні покриття ВК-8 на поверхню Д16 виявив наступні закономірності. По-перше, наявність армованої поверхні Д16 з покриттям сплаву ВК-8 забезпечує стабільність параметру W_{yc} як на етапі припрацювання контактних поверхонь (для пар тертя Д16+ВК8 – 30ХГСА та 30ХГСА – Д16+ВК8), так і на етапі подальшої роботи

трибоелементів. Зниження усередненої потужності АЕ, в середньому в 2 рази, на етапі припрацювання свідчить про те, що структурна пристосованість трибоелементів відбувається з меншими напружено-деформованими змінами. Реалізації та прояву цього механізму сприяє підвищення твердості поверхні Д16 за рахунок нанесення методом електроіскрового легування сплаву ВК-8, який характеризується високою твердістю ($HRC \approx 87$) за рахунок карбідів вольфраму.

По-друге, на етапі нормальної роботоздатності елементів трибоспряження характер W_{yc} для пари тертя Д16+ВК8 – 30ХГСА при нанесенні покриття ВК-8, в середньому в 2 рази більше, а для пари тертя 30ХГСА – Д16+ВК8 показники W_{yc} ідентичні еталонним зразкам. Однак, для обох досліджуваних трибосистем з армованою поверхнею дюралюмінію покриттям сплаву ВК-8 характерні поодинокі сплески параметру W_{yc} , які перевищують сталі показники в 1,5-2 рази. Насамперед, 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 кДж/м^2 , що, в середньому, в 10 разів менше, ніж в еталонному сплаві Д16. Отже, зростання фону внутрішнього тертя може бути обумовлено підвищенням густини дефектів, які є концентратами крихкого руйнування, що проявляється в відшаруванні окисних плівок і фіксується поодинокими сплесками параметру усередненої потужності АЕ.

4.3. Аналіз триботехнічних характеристик контакту та оцінка сигналів акустичної емісії пари тертя сталі 30ХГСА та дюралюмінію Д16 з дискретним покриттям міді.

Умови експерименту аналогічні умовам еталонних зразків сталі 30ХГСА та неармованого дюралюмінію Д16. Пара тертя Д16+Cu – 30ХГСА (рухомий зразок –

дюралюміній Д16 з дискретним покриттям міді) 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. 4.11). 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 ≈ 84 °С. Таким чином, підвищення температури свідчить про значну інтенсивність дисипації енергії, що виділяється при терті поверхонь фрикційного контакту.

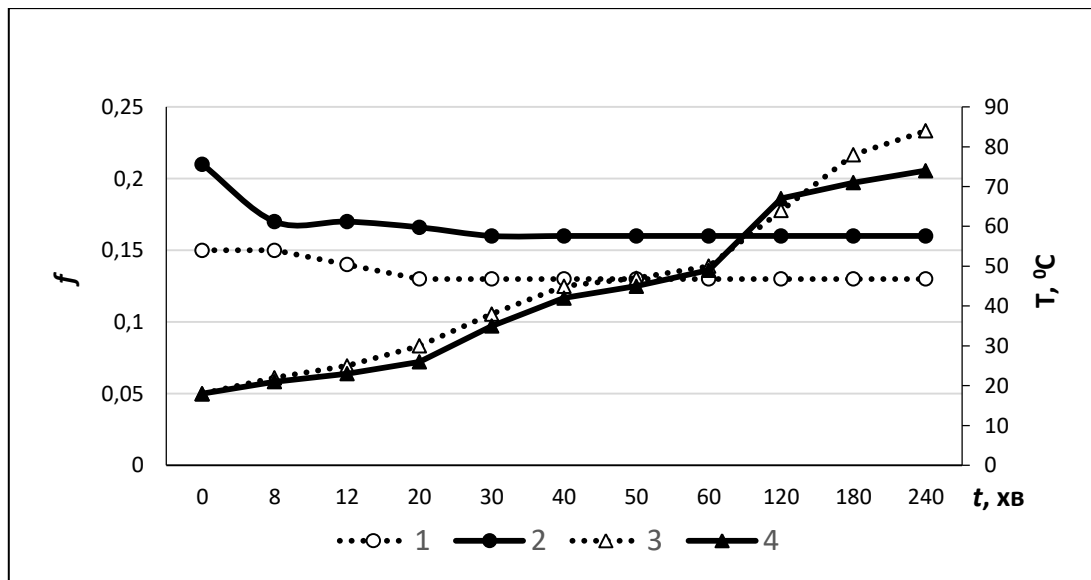


Рис. 4.11. Зміна коефіцієнту тертя і температури в зоні контактування трибосистем Д16+Cu – 30ХГСА (1 – коефіцієнт тертя, 3 – температура) та 30ХГСА – Д16 + Cu (2 – коефіцієнт тертя, 4 – температура).

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, що менше середніх значень коефіцієнту тертя

для аналогічної трибосистеми, де в якості дискретного покриття на дюралюмінію Д16 застосовувався сплав ВК-8.

Характер зміни усередненої потужності акустичної емісії наведений на рис. 4.12.

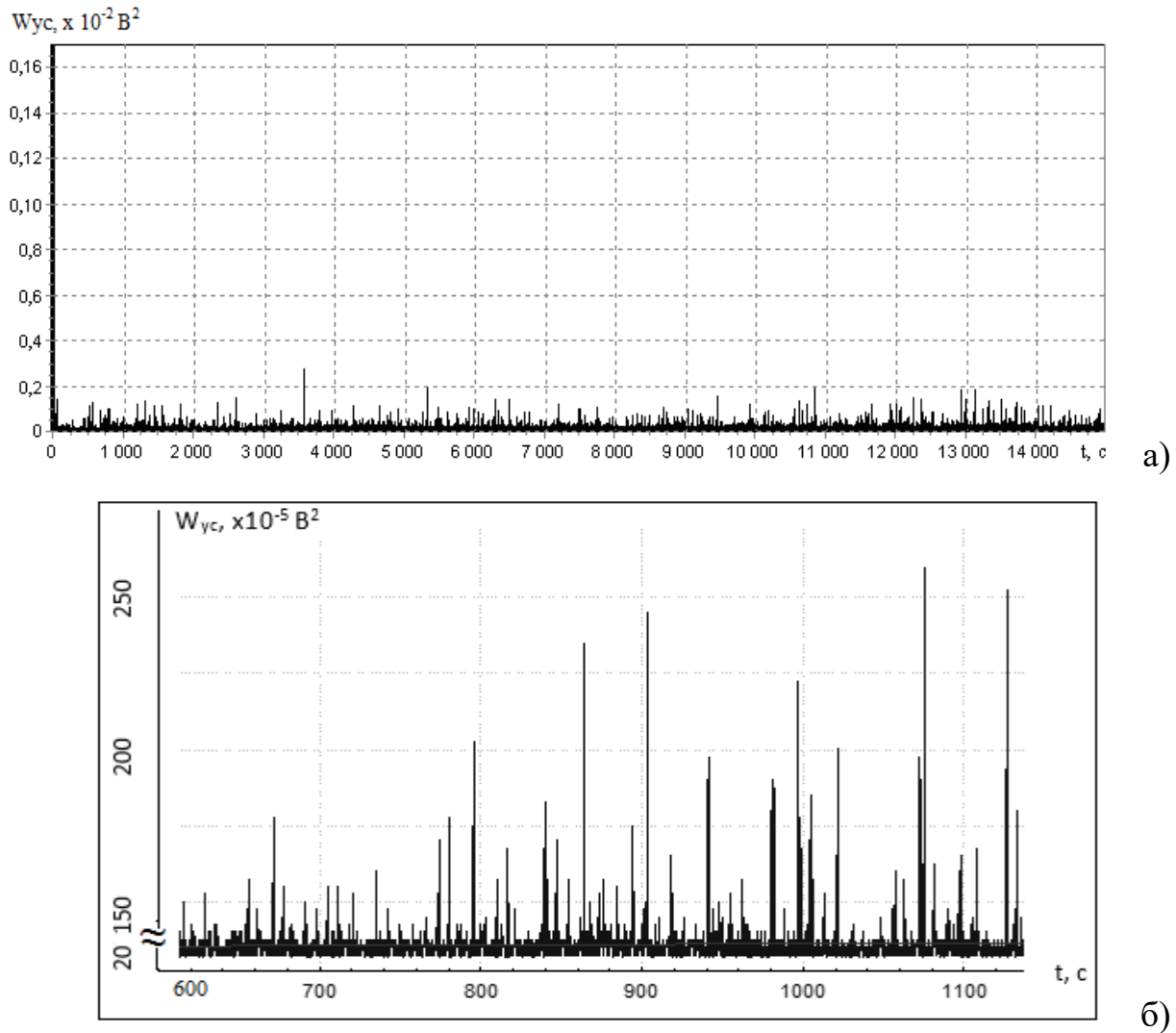


Рис. 4.12. Характер зміни усередненої потужності сигналів АЕ у часі для трибосистеми Д16+Cu – 30ХГСА: а) – загальний час напрацювання, б) – період напрацювання 600...1100 с.

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 короткочасних значних сплесків до $(150...200) \times 10^{-5} \text{ B}^2$.

Розподіл значень усередненої потужності сигналів акустичної емісії у часі за весь період випробувань має нормальний закон розподілу параметру W_{yc} з математичним очікуванням $30 \times 10^{-5} \text{ В}^2$ (рис. 4.13).

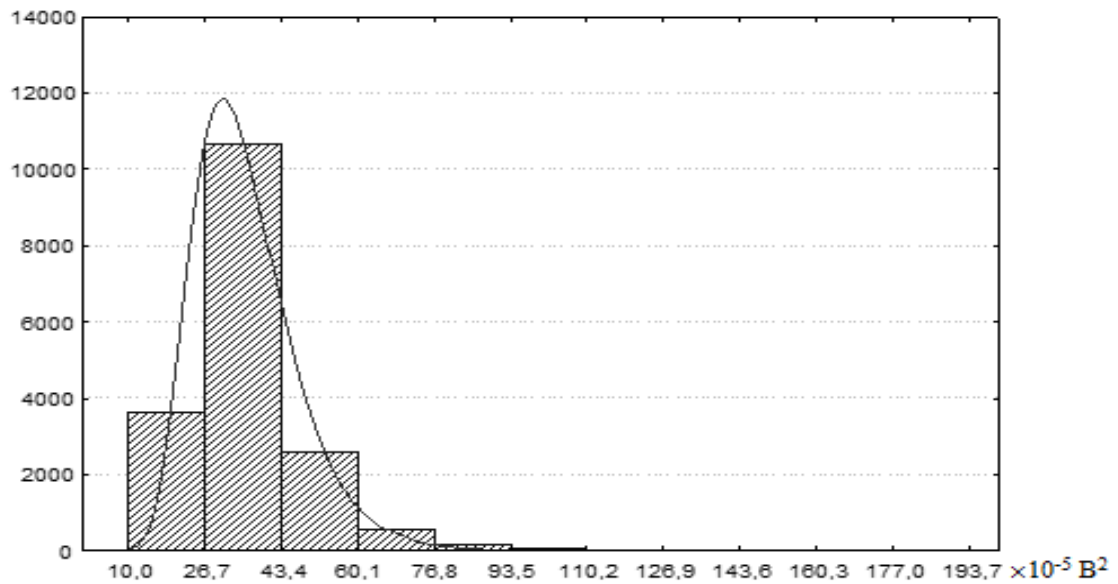


Рис. 4.13. Гістограма розподілу усередненої потужності сигналів АЕ трибосистеми Д16+Cu – 30ХГСА за весь період випробувань.

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. 4.12). При цьому, для періоду припрацювання трибосистеми 0...30 хв характерно значне зростання середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту - від 18°C до 42°C . Період 30...90 хв характеризується зменшенням швидкості зростання середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту, даний параметр підвищується з 42°C до 62°C .

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. 4.11).

Проаналізуємо зміну енергетичного балансу трибосистеми при нанесенні методом ЕІЛ міді на поверхню дюралюмінію Д16. 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 ($\lambda = 401 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) і коефіцієнту температуропровідності ($a_t = 1,165 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$), 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 [167-170] 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 рухомим 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 сталеву поверхню. Вплив даних процесів на зносостійкість контактних поверхонь розглянуто нижче.

Аналіз зміни акусто-емісійного випромінювання у часі для трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu показав наявність незначного збільшення як середніх значень усередненої потужності сигналів акустичної емісії до $W_{yc} \approx (50...70) \cdot 10^{-5} \text{ В}^2$, так і дисперсії зміни цього параметру $\sigma = 0,82 \cdot 10^{-5}$, порівняно з трибосистемою Д16+Cu – 30ХГСА (рис. 4.14).

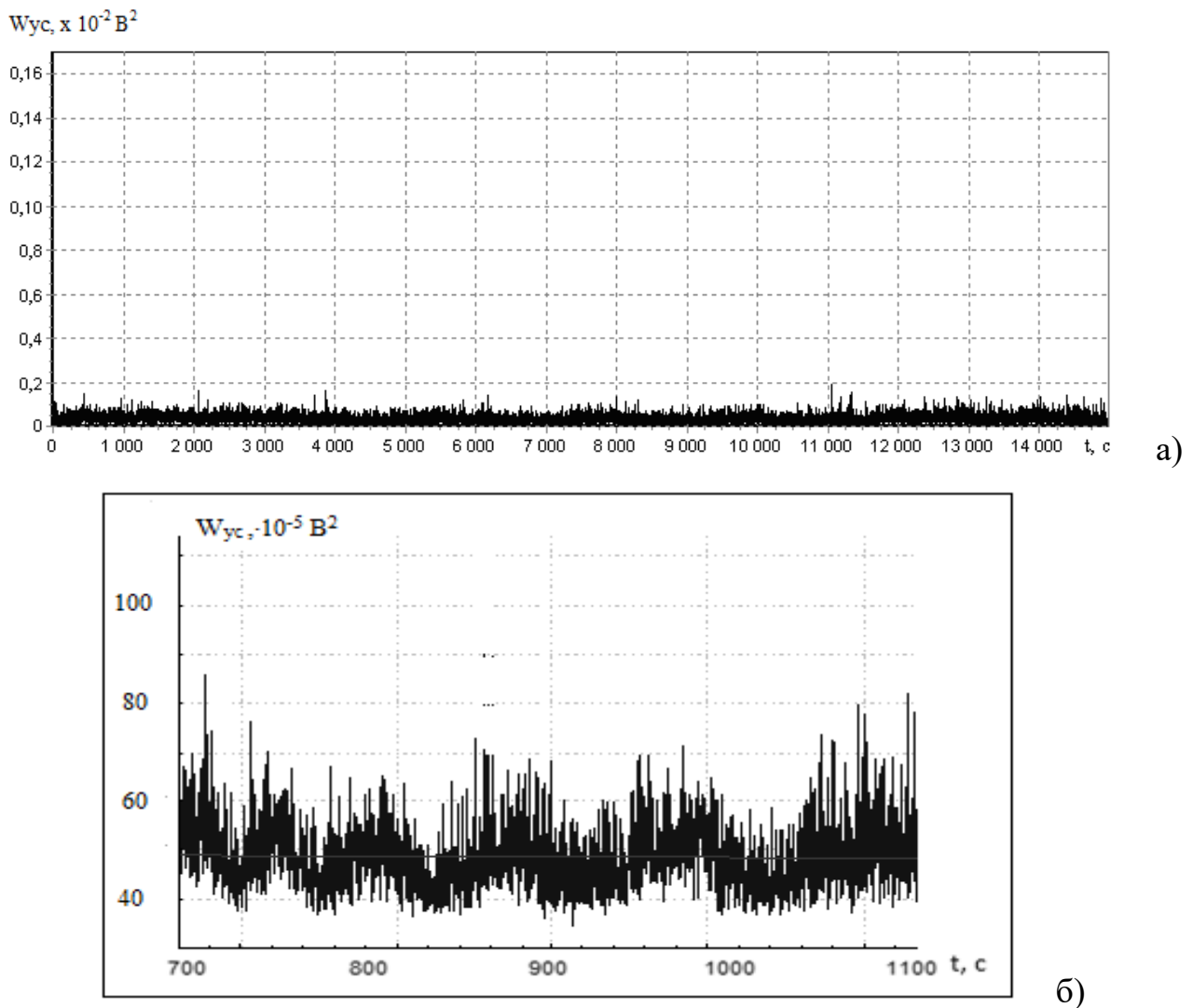


Рис. 4.14. Характер зміни усередненої потужності сигналів АЕ у часі для трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu: а) – загальний час напрацювання, б) – період напрацювання 700...1100 с.

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. 4.14б).

Це, імовірно, свідчить, про наявність флуктуацій напружено-деформованого стану поверхонь фрикційного контакту трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu, для яких характерна зміна приросту виробництва надлишкової ентропії $(\delta^2S)_{TC}$ в часі [171-173].

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 сталевною поверхнею 30ХГСА параметр W_{yc} знижується в 5 разів та в 2 рази на етапах припрацювання і нормальної подальшої роботи відповідно. 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 Д16. Основним чинником, який сприяє цьому процесу, є те, що ударна в'язкість міді становить 1700 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. Якщо ще врахувати закономірності, які встановлені вище і стосуються процесів релаксації температурних напружень, то проявляється чітка кореляційна залежність напружено-деформованого стану поверхневих шарів в фрикційному контакті від фізико-

механічних властивостей металу. До основних з них відносяться ударна в'язкість, коефіцієнти теплопровідності та температуропровідності. Саме за рахунок вибору покриття для електроіскрового легування контактних поверхонь можливо забезпечити формування вторинних структур певного типу при терті, які будуть характеризуватися високою зносостійкістю.

4.4. Оцінка інтенсивності зношування контактних поверхонь при армуванні дюралюмінію електроіскровими покриттями.

Важливою умовою процесу структурної пристосованості трибоелементів є реалізація зовнішнього тертя. Зовнішнє тертя проявляється при домінуванні таких механо-фізико-хімічних процесів, які обумовлюють високі антифрикційні характеристики контакту та характеризуються низькими швидкостями руйнування поверхневих та приповерхневих шарів металу. Згідно [174, 175], допустимим та поширеним при роботі деталей машин є процес окисного зношування, який виникає при терті ковзання в умовах граничного режиму мастильної дії та характеризується неперервним процесом утворення та руйнування на поверхнях тертя тонких плівок окислів.

Аналіз фрактографічних досліджень дослідних зразків сталі 30ХГСА, Д16, Д16+ВК8 та Д16+Сu показав, що поверхні тертя без видимих ознак схоплювання та подряпин, що дає підставу припустити про домінування в контакті корозійно-механічного, і зокрема, окисного зношування.

Для еталонного зразка поверхні сталі 30ХГСА (рухомого та нерухомого трибоелементу) характерні чітко означені доріжки тертя, на яких проявляються ділянки відшарування тонких окисних плівок, які періодично утворюються / руйнуються при терті (рис. 4.15).

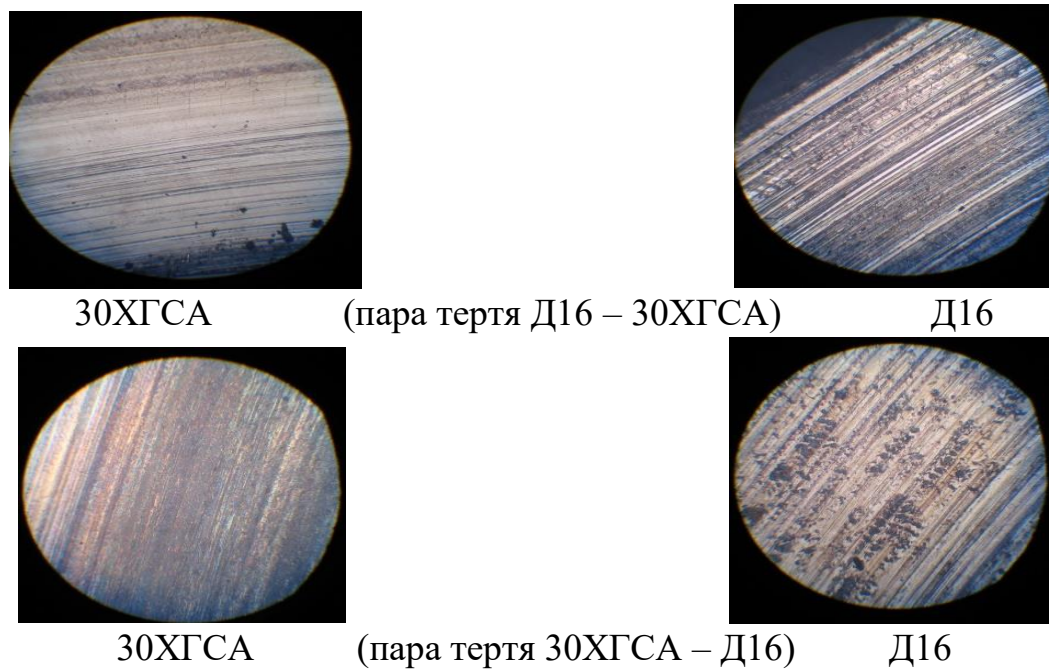


Рис. 4.15. Поверхні пар тертя після напрацювання 240 хвилин (x478).

Еталонні зразки характеризуються більшим зношуванням нерухомого трибоелементу: в парі тертя Д16 – 30XГСА це сталь 30XГСА, в парі 30XГСА – Д16 – дюралюміній Д16 (рис. 4.16)

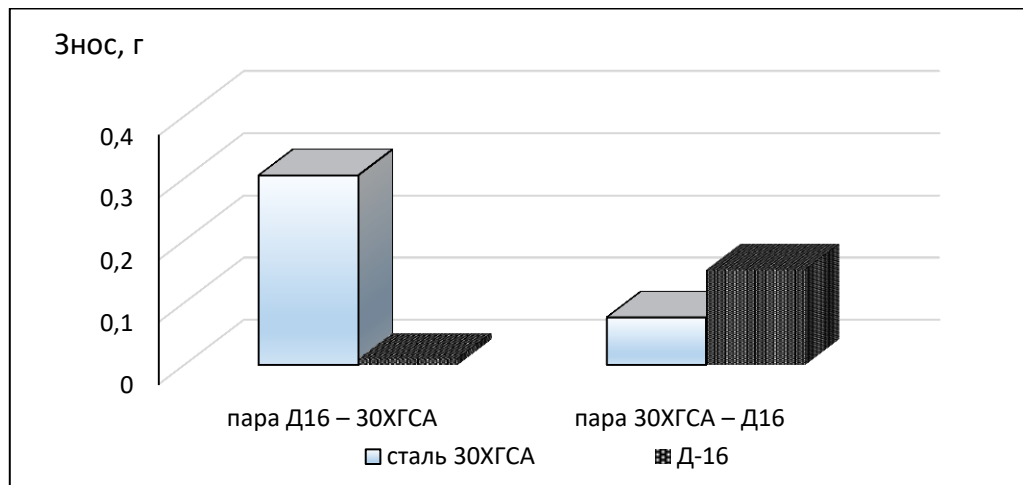


Рис. 4.16. Ваговий знос елементів трибосистеми після напрацювання 240 хвилин.

Швидкість зношування рухомих трибоелементів сталі 30XГСА та дюралюмінію Д16 знижується, в середньому, в 4 та 15 разів відповідно, та становить $3,28 \cdot 10^{-4}$ г/хв

(сталь 30ХГСА) і $4,29 \cdot 10^{-5}$ г/хв (дюралюміній Д16) в порівнянні з умовами, де ці трибоелементи нерухомі.

При армуванні поверхні дюралюмінію Д16 електроіскровим покриттям сплаву ВК-8 відбуваються наступні зміни. По-перше знижується кількість ділянок відшарування на поверхні сталі 30ХГСА (в рухомому та нерухомому зразках) (рис.4.17).

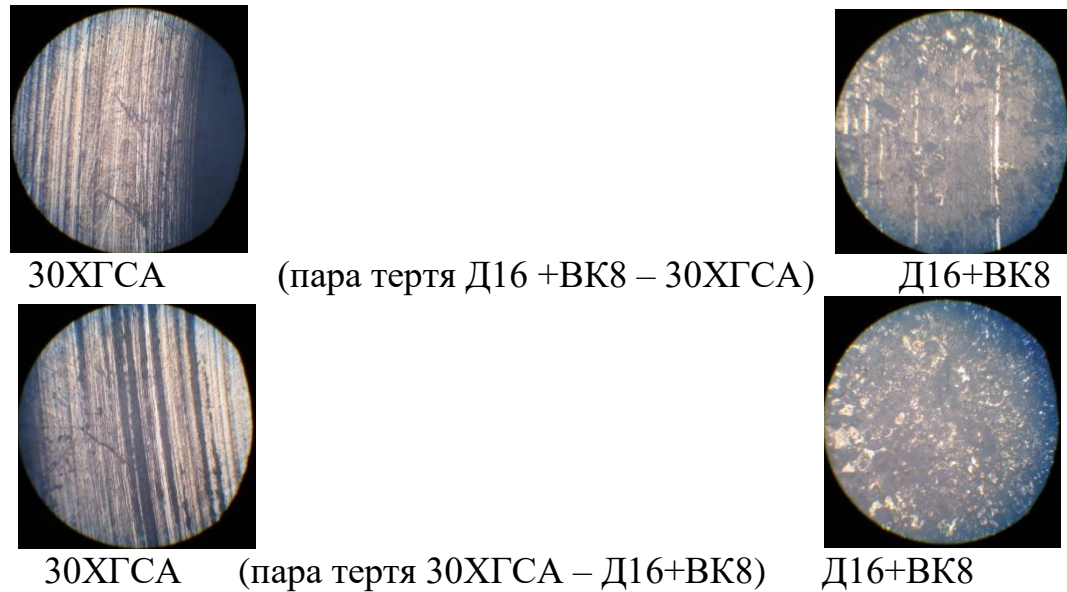


Рис. 4.17. Фрактографія поверхонь після напрацювання 240 хвилин ($\times 478$).

По-друге, встановлено суттєве зменшення вагового зносу рухомого та нерухомого зразків сталі 30ХГСА у порівнянні з еталонними зразками (рис. 4.18).

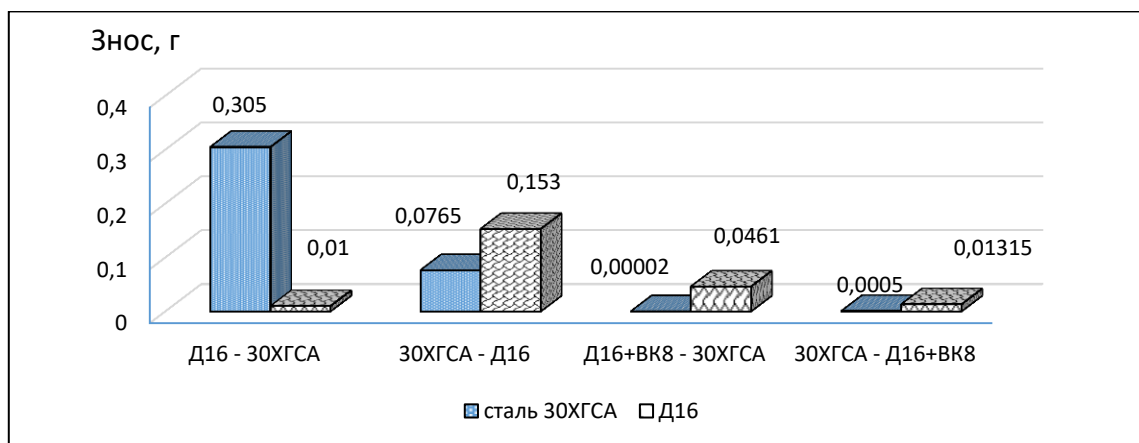


Рис. 4.18. Ваговий знос контактних поверхонь при нанесенні електроіскрового покриття сплаву ВК-8 на поверхню Д16.

При роботі сталі 30ХГСА в парі з армованою поверхнею Д16+ВК8 швидкість її зношування зменшується в 15 та 5,8 рази для нерухомого та рухомого зразка відповідно, значення показників швидкості зношування становлять $8,58 \cdot 10^{-7}$ г/хв (для нерухомого зразка) та $5,64 \cdot 10^{-5}$ г/хв (для рухомого зразка). По-третє швидкість зношування армованої поверхні Д16+ВК8 становить $1,98 \cdot 10^{-7}$ г/хв та $2,14 \cdot 10^{-6}$ г/хв для рухомого та нерухомого трибоелементу відповідно. Нанесення твердого сплаву ВК8 обумовлює зростання швидкості зношування для рухомого трибоелементу в 4,6 рази та зниження цього параметру для нерухомого зразка, в середньому в 300 разів.

Нанесення на поверхню Д16 покриття з міді методом ЕІЛ забезпечує значне зростання зносостійкості контактних поверхонь. Характерною ознакою контактних поверхонь при напрацюванні є те, що візуально не чітко проявляється доріжка тертя, особливо на сталевій поверхні (рис. 4.19)

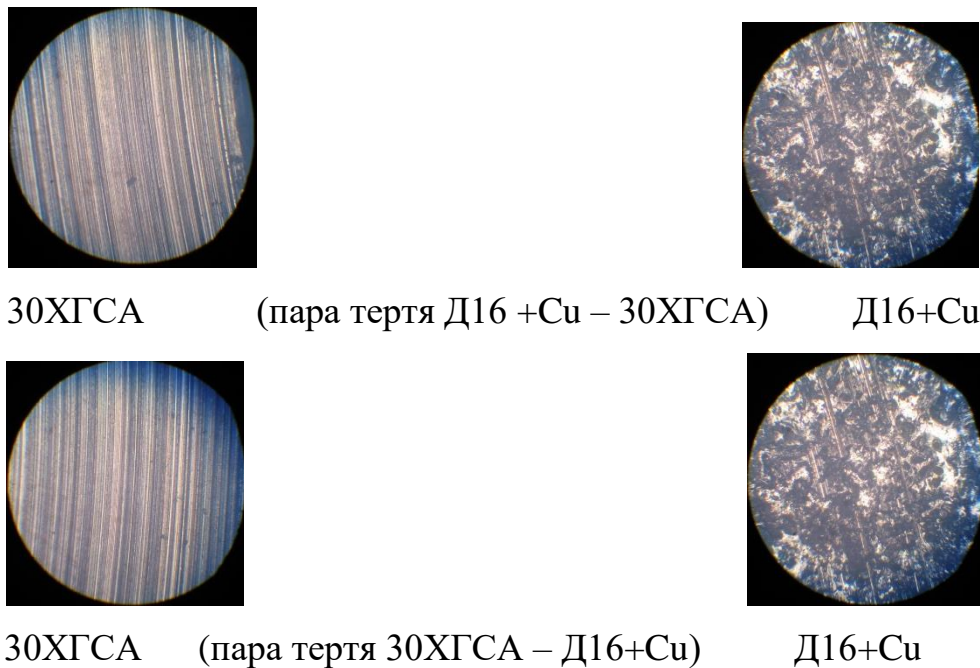


Рис. 4.19. Фрактографія контактних поверхонь при напрацюванні 240 хв ($\times 478$).

На сталевій поверхні зафіксовані поодинокі зони відшарування глибиною 0,01-0,025 мм. Армування поверхні дюралюмінію Д16 за рахунок нанесення покриття з міді забезпечує зниження вагового зносу елементів трибоспряження (рис. 4.20).

Швидкість зношування сталі 30ХГСА при терті в парі дюралюмінієм з мідним покриттям становить $3,0 \cdot 10^{-6}$ г/хв (зразок сталі 30ХГСА нерухомий) та $1,12 \cdot 10^{-5}$ г/хв (зразок сталі 30ХГСА рухомий), що в 430 та 29 разів менше, в порівнянні з еталонним

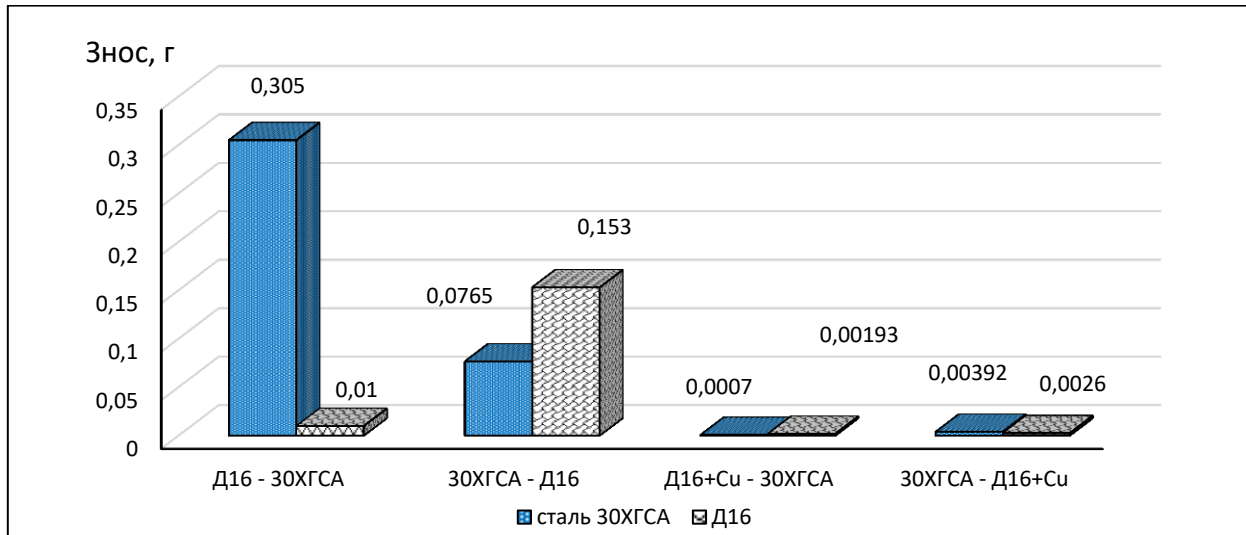


Рис. 4.20. Ваговий знос пар тертя при армуванні поверхні Д16 покриттям з міді.

зразками відповідно. Швидкість зношування Д16+Cu, в порівнянні з неармованою еталонною поверхнею Д16 знижується в 5 (зразок Д16+Cu рухомий) та 39 (зразок Д16+Cu нерухомий) разів та становить відповідно $8,28 \cdot 10^{-6}$ г/хв та $1,67 \cdot 10^{-5}$ г/хв.

Проаналізуємо механізми зношування досліджуваних контактних поверхонь. Якщо припустити, що найбільша швидкість зношування пар тертя характерна для періоду припрацювання, а при подальшому напрацюванні даний параметр стабілізується та знаходиться в межах, зазначених вище, то введемо середнє значення усередненої потужності акустичної емісії W_{yc}^* :

$$W_{yc}^* = \frac{W_{yc}' + W_{yc}''}{2}, \quad (4.3)$$

де W_{yc}' - усереднена потужність акустичної емісії в період припрацювання контактних поверхонь; W_{yc}'' - усереднена потужність акустичної емісії на етапі сталої роботи елементів трибосистеми.

Простежується чітка кореляційна залежність вагового зносу пар тертя за весь досліджуваний період напрацювання (240 хвилин) від параметру W_{yc}^* як для пар тертя з рухомим трибоелементом неармованого/армованого Д16, так і для пар тертя з рухомим трибоелементом сталі 30ХГСА (рис 4.21).

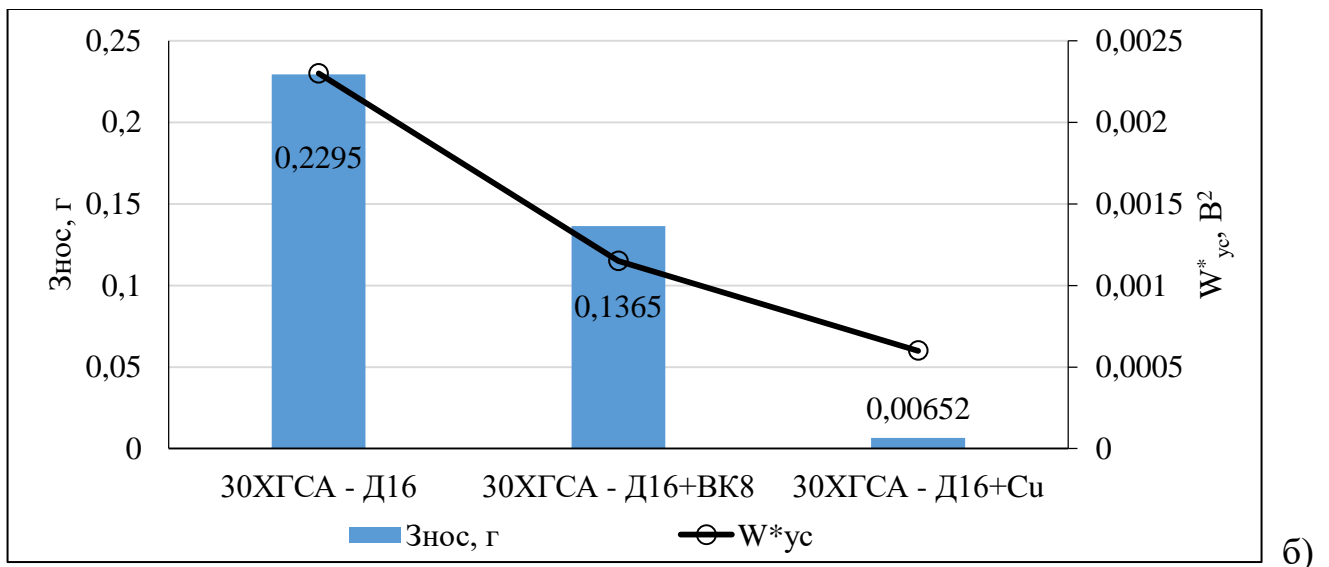
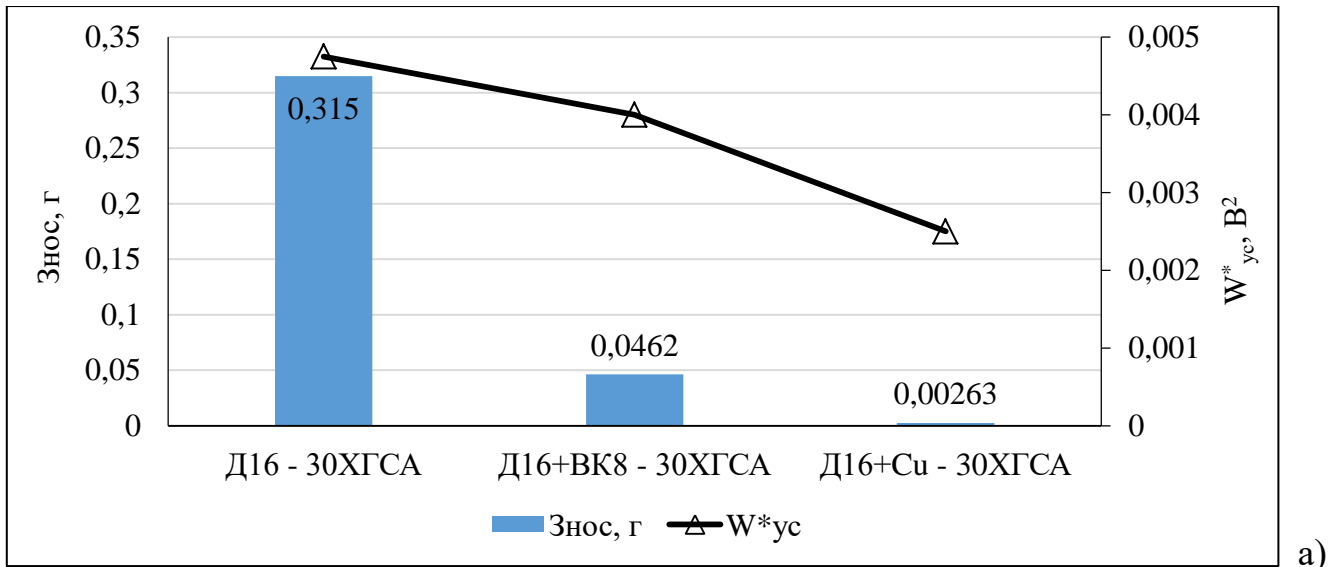


Рис. 4.21. Взаємозв'язок параметру усередненої потужності акустичної емісії (W_{yc}^*) та вагового зносу контактних поверхонь при напрацюванні 240 хвилин: а – пари тертя з рухомим трибоелементом неармованого/армованого дюралюмінію Д16; б – пари тертя з рухомим трибоелементом сталі 30ХГСА.

Армування поверхневих шарів дюралюмінію Д16 за рахунок нанесення дискретних електроіскрових покриттів зменшує напружено-деформований стан при терті та забезпечує прискорення структурної пристосованості. Особливо чітко це проявляється на етапі припрацювання контактних поверхонь, де параметр усередненої потужності АЕ значно знижується, в порівнянні з еталонними зразками. Як для покриття ВК8, так і для покриття Сu 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. Костецький Б.І. прирівнює показник потужності тертя до питомої роботи тертя [15], яка безперечно впливає на процеси структурної пристосованості елементів трибоспряження за рахунок термічної активації при терті.

Отже, підвищення структурно-термічної активації контактних поверхонь за рахунок їх армування шляхом нанесення електроіскрових покриттів в процесі тертя призводить до інтенсифікації механо-фізико-хімічних процесів в умовах граничного мащення, що, в цілому, підвищує зносостійкість контактних поверхонь. 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 II типу, які характеризується 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 на внутрішній частині зразків Д16, Д16+ВК8, Д16+Сu встановив, що концентрація кисню відповідно для зазначених зразків знаходиться в межах 0,64; 9,87;

0,78 %, що свідчить про активну участь кисню в утворенні вторинних структур при активації контактних поверхонь при терті.

Для прогнозування інтенсивності зношування контактних поверхонь при терті важливо встановити механізми руйнування та визначити критерій міцності [176, 177]. Проведений аналіз дослідних зразків за кінетикою зміни триботехнічних показників та усередненої потужності АЕ дозволяє виділити основні чинники, які впливають на інтенсивність зношування контактних поверхонь. До таких чинників відносять критерій Pe , коефіцієнт тертя f , ударна в'язкість (KCU). За параметром ударної в'язкості в емпіричних залежностях спрогнозовано знатність матеріалу поглинати механічну енергію процесів деформації та руйнування при терті. Критерій, за зміною якого можливо спрогнозувати інтенсивність механо-деструкційних процесів в поверхневих шарах металу при терті, є параметр усередненої потужності акустичної емісії.

В роботі одержані емпіричні залежності загальної інтенсивності зношування трибосистеми (I , г/м):

– для пар тертя з рухомим трибоелементом неармованого/армованого (нанесення електроіскрового покриття та подальша обробка ППД) дюралюмінію Д16:

$$I = \frac{W_{ус}^*}{Pe \cdot f \cdot KCU_{Д16/покриття}^{0,3}}, \quad (4.4)$$

де $W_{ус}^*$ – середнє значення усередненої потужності акустичної емісії; f – коефіцієнт тертя, KCU – ударна в'язкість, Pe – критерій Пекле:

$$Pe = \frac{V_{ковз} \cdot N_l}{a_t}, \quad (4.5)$$

де $V_{ковз}$ – швидкість ковзання; N_l – погонне навантаження; a_t – коефіцієнт температуро-провідності;

– для пар тертя з рухомим трибоелементом сталі 30ХГСА:

$$I = \frac{W_{ус}^*}{Pe^{0,33} \cdot f \cdot KCU_{сталі}^{0,33} \cdot KCU_{Д16/покриття}^{0,3}}. \quad (4.6)$$

Таким чином, за наведеними формулами можливо спрогнозувати інтенсивність зношування трибоелементів, оцінивши на стадії припрацювання та сталої роботи пар тертя триботехнічні параметри та усереднену потужність акустичної емісії (рис. 4.22).

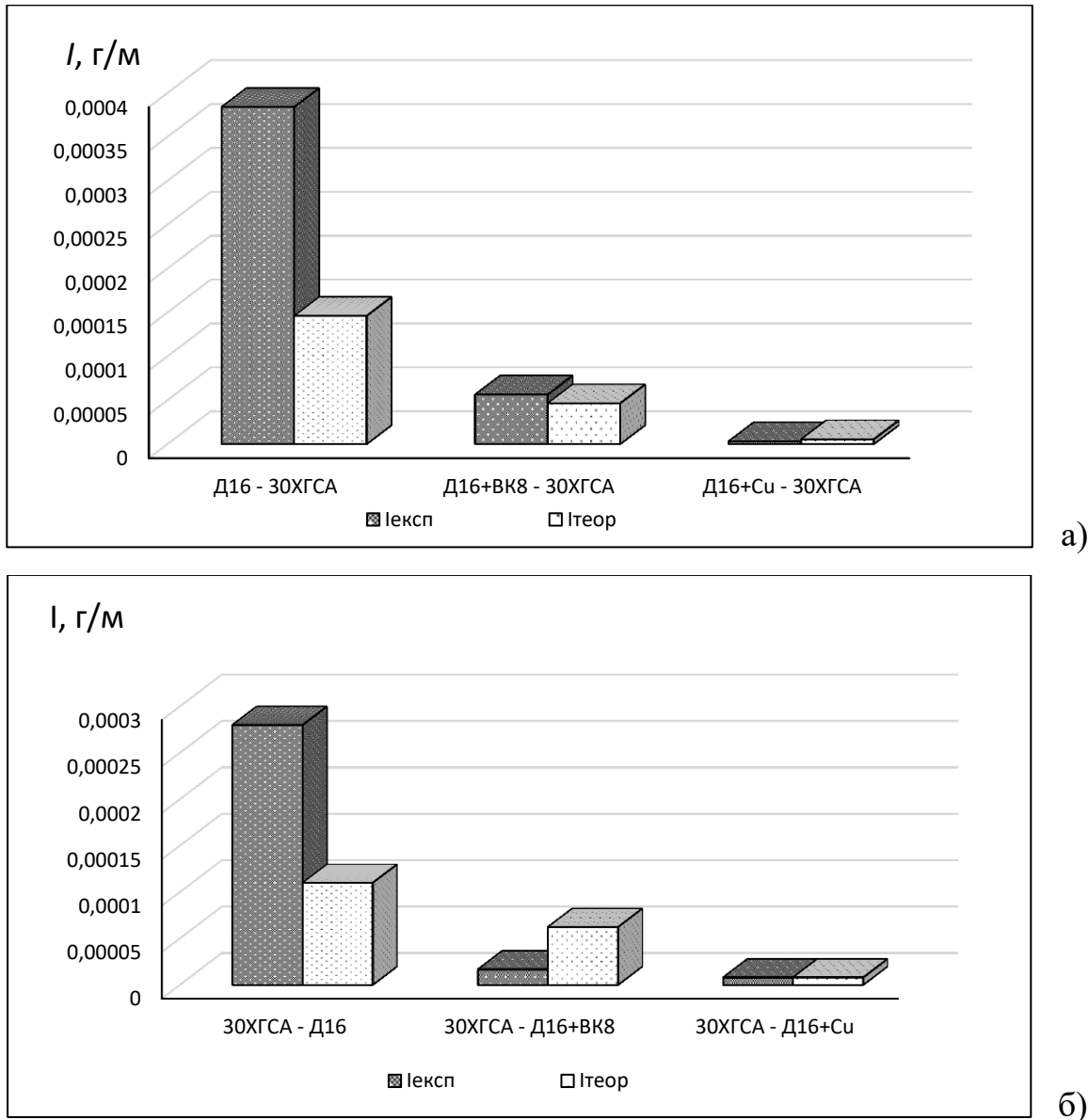


Рис. 4.22. Інтенсивність зношування пар тертя, встановлена в експерименті, ($I_{\text{експ}}$) та розрахована за формулами (4.4) і (4.6): а – пари тертя з рухомим трибоелементом неармованого/армованого дюралюмінію Д16; б – пари тертя з рухомим трибоелементом сталі 30ХГСА.

Одержані в роботі емпіричні залежності інтенсивності зношування можуть використовуватись в якості однієї з характеристик для приблизних розрахунків зношування електроіскрових покриттів при нормальних умовах експлуатації.

Висновки до розділу 4.

1. За кінетикою зміни усередненої потужності АЕ можливо встановити закінчення періоду припрацювання значно раніше, ніж за зміною коефіцієнта тертя та середньої температури фрикційного контакту, що свідчить про більшу точність та меншу інерційність вимірювання періоду припрацювання за допомогою методу акустичної емісії.

2. Інтенсифікація процесів структурної пристосованості та скорочення періоду припрацювання в 1,7 разів для пари 30ХГСА – Д16 (рухомий трибоелемент - 30ХГСА) обумовлена збільшенням критерію P_e в 6 разів, підвищенням генерованої при терті теплоти в тонкому приповерхневому шарі внаслідок того, що коефіцієнт теплопровідності сталі 30ХГСА, в середньому, в 4 рази нижче, ніж в дюралюмінію Д16. Це призводить до зменшення кількості теплоти, яка дифундує вглиб металу, інтенсифікації механо-фізико-хімічних процесів в поверхневих шарах металу та підвищення зносостійкості пари 30ХГСА – Д16, в порівнянні з парою Д16 – 30ХГСА.

3. Ваговий знос трибоелементів корелює з параметром усередненої потужності АЕ як в період припрацювання, так і на ділянці сталої роботи пар тертя: для пари 30ХГСА – Д16 загальний ваговий знос контактних поверхонь знижується в 1,37 разів, при цьому усереднена потужність АЕ в період припрацювання і на ділянці сталої роботи пар тертя знижується відповідно 1,36 і 1,7 раз, в порівнянні з парою Д16 – 30ХГСА.

4. Наявність армованої поверхні Д16 з покриттям 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.

5. Встановлено зменшення швидкості зношування сталі 30ХГСА в 15 та 5,8 рази для пар тертя Д16+ВК8 – 30ХГСА і 30ХГСА - Д16+ВК8 відповідно за умов використання в якості контртіла при терті дюралюмінію Д16 з електроіскровим покриттям сплаву ВК8, в порівнянні з неармованою поверхнею Д16.

6. Зафіксовано зростання швидкості зношування рухомої армованої поверхні дюралюмінію Д16+ВК8 в 4,6 рази (пара тертя Д16+ВК8 – 30ХГСА) та зниження цього параметру в 300 разів для пари 30ХГСА - Д16+ВК8, де зразок Д16+ВК8 був нерухомий.

7. За рахунок зростання потужності тертя в 1,27 - 2 рази в процесі структурної пристосованості контактних поверхонь з електроіскровим покриттям інтенсифікується термічна активація поверхневих шарів металу та проявляється домінуюча роль кисню в утворенні зносостійких вторинних структур.

8. ЕІП 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 за рахунок наявності м'якого покриття міді на поверхні Д16. Механізм зниження напружено-деформованого стану в поверхневих шарах при терті при нанесенні покриття з Сu полягає в високій здатності міді поглинати механічну енергію в процесі деформації та руйнування при терті (ударна в'язкість міді становить 1700 кДж/м^2 , що, в середньому у 5,8 рази більше за ударну в'язкість дюралюмінію).

9. Підвищення структурно-термічної активації контактних поверхонь з ЕІП в процесі тертя призводить до інтенсифікації механо-фізико-хімічних процесів в умовах граничного мащення, що підвищує зносостійкість контактних поверхонь. Механізм підвищення зносостійкості полягає в збільшенні швидкості протікання фізико-хімічних процесів, які обумовлюють утворення вторинних структур за участю кисню та активованих молекул мастильного матеріалу.

10. Одержані емпіричні залежності загальної інтенсивності зношування трибосистем сталь – неармований/армований (нанесення електроіскрового покриття та подальша обробка ППД) дюралюміній Д16 від параметру усередненої потужності акустичної емісії, критерію Pe , коефіцієнту тертя, ударної в'язкості, що дозволяє оцінити на стадії лабораторних досліджень ефективність ЕП.

РОЗДІЛ 5

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТРИБОСИСТЕМИ ЗА ПАРАМЕТРАМИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

5.1. Визначення критеріїв переходу трибосистеми до катастрофічного зношування.

При аналізі трибосистеми важливою умовою її роботоздатного стану є утворення метастабільних дисипативних структур в процесі структурної пристосованості елементів трибоспряження до певних експлуатаційних режимів. На кінетику формування таких структур впливають багато чинників, до яких можна віднести навантажувально-швидкісні, сумісність матеріалів контактних поверхонь, домінування певного режиму мащення, температура в триботехнічному контакті.

Мета проведених досліджень полягала в встановленні механізмів задиристійкості елементів трибоспряження та оцінка сигналів АЕ в умовах ступеневого підвищення навантаження при переході трибосистеми від нормальної до катастрофічної стадії зношування.

Для досліджень були обрані зразки зі сталі 30ХГСА та неармованого і армованого дюралюмінію Д16. Поверхневий шар зразків з матеріалу Д16 армувався шляхом нанесення комбінованого дискретного покриття твердого сплаву ВК8 і міді за допомогою методу електроіскрового легування. Щільність дискретного покриття становила 55 – 65%. Товщина комбінованого покриття складає 2...2,5 мкм. Зазначені покриття певної товщини виконані в Інституті проблем міцності ім. Г.С.Писаренко Національної академії наук України. 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 неармованого/армованого дюралюмінію Д16: Д16+ВК8+Cu / Д16 (рухомий) – 30ХГСА (нерухомий);
- за другою схемою зразок з неармованого/армованого 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:

- 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.

Умови проведення випробувань: тертя досліджуваних контактних поверхонь проходило при домінуванні граничного режиму мащення в контакті, 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 і

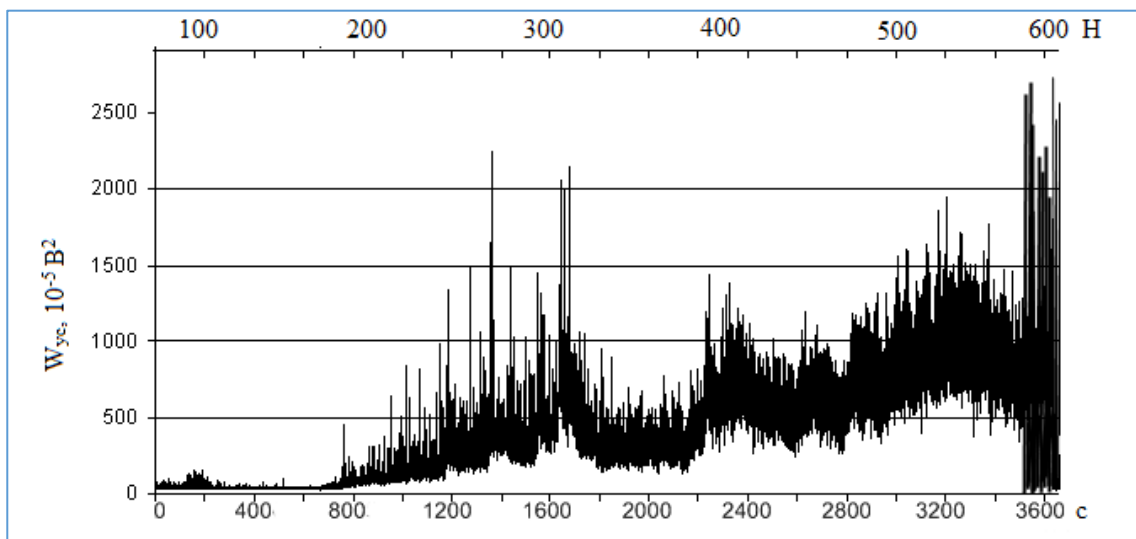
зношуванні і вимірювання інтенсивності зношування із застосуванням методу АЕ викладена в роботах [135, 143].

Одержані результати усередної потужності сигналів АЕ (W_{yc}) та величини її розкиду ($W_{yc} \pm$) для досліджуваних трибосистем наведені в табл. 5.1 та на рис. 5.1.

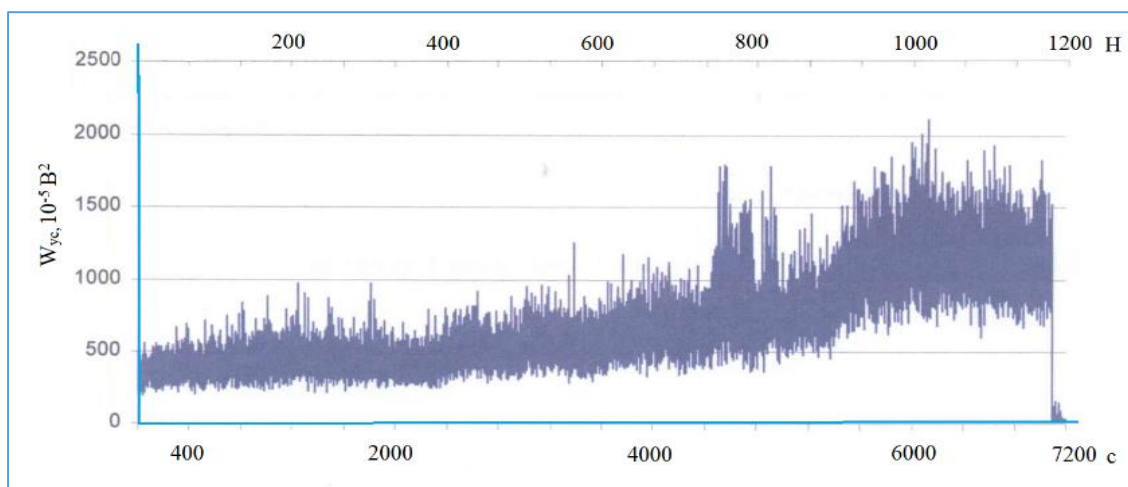
Таблиця 5.1

Параметри АЕ в умовах ступеневого підвищення навантаження

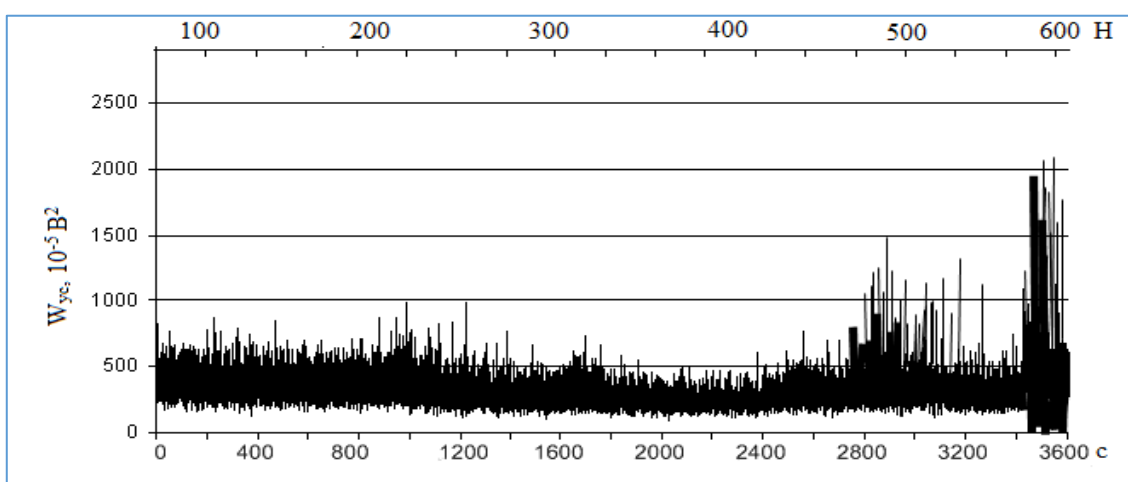
Параметр	Навантаження, Н						
	100	200	400	600	800	1000	1200
	Д16 – 30ХГСА (рухомий трибоелемент Д16)						
W_{yc}, B^2	0,0015	0,00425	0,00925	0,0141	-	-	-
$W_{yc} \pm, B^2$	0,0005	0,00275	0,00575	0,0139	-	-	-
	Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА (рухомий трибоелемент Д16+ВК8+Cu)						
W_{yc}, B^2	0,004	0,0065	0,005	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



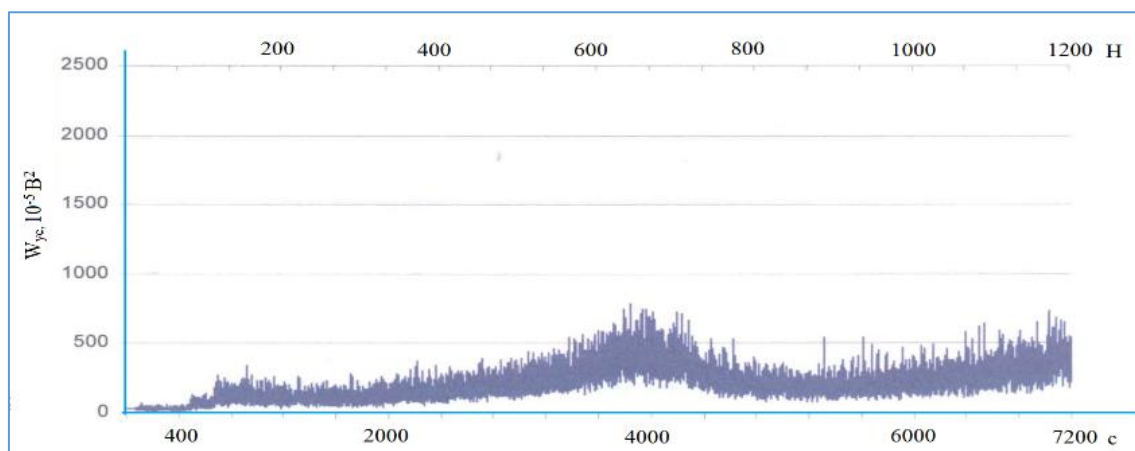
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.1. 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).

Аналіз усередної потужності сигналів АЕ заснований на принципах, що джерелом АЕ є пластична деформація, а робота, яка витрачається на пластичну деформацію, корелює з енергетичними характеристиками АЕ [178-181].

Встановлено, що для пари тертя з неармованим 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.

Кінетика зміни сигналів АЕ корелює з інтенсивністю зношування досліджуваних трибосистем. Для Д16 – 30ХГСА зростання усередненої потужності сигналів АЕ встановлено в 9,4 разів, а величина їх розкиду збільшується в 27,8 разів при ступеневому підвищенні навантаження від 100 до 600Н. Менш повільно, як і інтенсивність зношування, зростають сигнали АЕ для трибосистеми 30ХГСА – Д16: W_{yc} збільшується в 2,1 рази, а $W_{yc\pm}$ в 4,2 рази при зростанні навантаження від 100 до 600Н.

Оскільки виникнення сигналів АЕ обумовлено певним напружено-деформованим станом контактних поверхонь, в роботі проведено оцінка глибини локалізації еквівалентних напружень за Мізесом в програмному забезпеченні SolidWorks. В якості матеріалів для моделювання елементів трибоспряження обрано аналог дюралюмінію Д16 – сплав марки 2024 (стандарт AISI США), аналог сталі 30ХГСА – сталь марки 41CrMo4 (стандарт DIN17212, Німеччина).

На основі одержаних результатів моделювання встановлено, що величина максимальних еквівалентних напружень за Мізесом в поверхневих шарах неармованого дюралюмінію Д16 не залежить від кінематики контакту (рухомий чи нерухомий трибоелемент Д16 в досліджуваному трибоспряженні з контртілом сталі

30ХГСА) та становить 10 : 31 : 62 МПа відповідно для навантаження 100, 300 і 600 Н (додаток А). Однак, кінематика контакту суттєво впливає на глибину розповсюдження напружено-деформованого стану в приповерхневих шарах дюралюмінію Д16, яка, в середньому, в 1,3 рази вища для пари тертя Д16 – 30ХГСА (табл. 5.2, Додаток А).

Таблиця 5.2

Глибина локалізації напружено-деформованого стану в приповерхневих шарах дюралюмінію Д16

Параметр	Навантаження, Н		
	100	300	600
Глибина локалізації для рухомого трибоелементу, мкм	0.21	0.64	1.27
Глибина локалізації для нерухомого трибоелементу, мкм	0.17	0.5	1.0

Як зазначалось вище, саме для цієї трибосистеми встановлені більші показники інтенсивності зношування та сигналів АЕ. За результатами моделювання визначено, що в умовах ступеневого зростання навантаження з 100 до 600 Н глибина локалізації НДС зростає в 6 разів для рухомого/нерухомого трибоелементу Д16. Таким чином, збільшення навантаження в фрикційному контакті призводить до інтенсифікації пластичних деформацій, зародженню та розвитку дефектів, що реєструється появою сигналів АЕ з великими амплітудами та величинами їх розкиду, які безпосередньо свідчать про перехід трибосистеми до катастрофічного зношування.

Проведено оцінку числових енергетичних показників при переході трибосистеми від нормального до катастрофічного зношування на основі уявлення що енергія пластичної деформації, згідно [182, 183], корелює з амплітудними характеристиками сигналів АЕ за співвідношеннями:

$$E = \int_0^t |U(t)^2| dt, \quad (5.1)$$

де U – амплітуда результуючого сигналу АЕ, t – час.

Встановлено, що для трибосистеми Д16 – 30ХГСА при кожному ступеневому підвищенні навантаження відбувається різке зростання енергії в 4...12 разів, що

свідчить про інтенсивні пластичні деформаційні процеси в приповерхневих та поверхневих шарах пар тертя (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

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}

Візьмемо за основу числові значення енергії для сигналів, що відповідають різним типам руйнування, наведені в роботі [184]: процеси пластичної деформації характеризуються виділенням енергії порядку $10^{-11} \dots 10^{-7}$ Дж, а процеси руйнування супроводжуються великою кількістю імпульсів з енергією порядку $10^{-6} \dots 10^{-1}$ Дж.

Таким чином, для трибосистеми Д16 – 30ХГСА перехід до катастрофічного зношування відбувається при зростанні навантаження 400 Н і вище, що реєструється інтенсифікацією сигналів АУ, зростанням усередненої потужності сигналів АЕ, величини їх розкиду, збільшенням енергії руйнування до $1,6 \cdot 10^{-5}$ при схоплюванні пар тертя. Для трибосистеми 30ХГСА – Д16, яка характеризується більшою зносостійкістю, до 600 Н енергія пластичної деформації знаходиться в середньому на рівні $1,1 \cdot 10^{-7}$ Дж, домінують процеси структурної пристосованості, утворення метастабільних вторинних структур, реалізуються механізми нормального зношування. При 600 Н відбувається зростання енергетичних показників в 60 разів, що свідчить про перехід трибосистеми до катастрофічного зношування, яке також реєструється за аналогічними змінами сигналів АЕ, зазначеними для трибосистеми Д16 – 30ХГСА.

Для підвищення задиристійкості трибосистем та розширення навантажувального діапазону їх роботоздатного стану проведено армування дюралюмінію Д16 дискретним комбінованим покриттям сплаву ВК-8 та міді.

Для трибосистем Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА та 30ХГСА – Д16+ВК-8+Cu встановлено збільшення вдвічі діапазону навантаження до прояву перших ознак схоплювання, які проявляються при ступеневому підвищенні навантаження до 1200 Н. Інтенсивність зношування трибосистем з армованим комбінованим ЕП на дюралюмінію Д16 при 600 Н знижується, в порівнянні з трибосистемами з неармованим Д16, в 5,5 разів та в 6,5 разів відповідно для пар тертя, де трибоелемент Д16+ВК8+Cu рухомий та нерухомий (рис. 5.2).

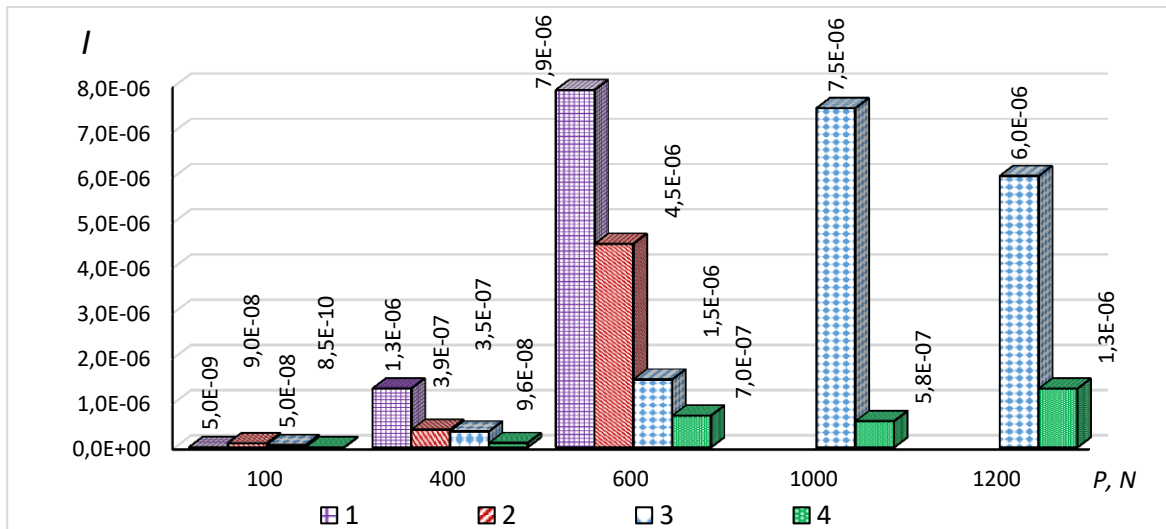


Рис. 5.2. Інтенсивність зношування (I) трибосистем в умовах ступеневого підвищення навантаження (P): 1 – трибосистема Д16 – 30ХГСА; 2 – трибосистема 30ХГСА – Д16; 3 – Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА; 4 – 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu.

Подальше зростання навантаження до 1200 Н призводить до підвищення інтенсивності зношування в 4 та в 1,9 раз для трибосистем з рухомим та нерухомим трибоелементом Д16+ВК8+Cu відповідно.

Одержані розрахункові 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 $(6,5...9,2)10^{-6}$ Дж, що відповідає, як зазначено вище, енергії руйнування (табл. 5.3). Однак в процесі експерименту не спостерігалось схоплювання і задирів контактних поверхонь. Імовірно, 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 [185]. 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 зменшуються в 2-4 рази (табл. 5.1).

Основною передумовою зменшення ступеня пластичних деформацій в фрикційному контакті 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.

Результати моделювання щодо глибини локалізації пластичних деформацій, проведені з застосуванням програмного забезпечення SolidWorks, свідчать про зменшення цього параметру, в середньому, в 2 рази для трибоелементу Д16+ВК8+Cu, в порівнянні з неармованою поверхнею Д16 (рис. 5.3, Додаток А).

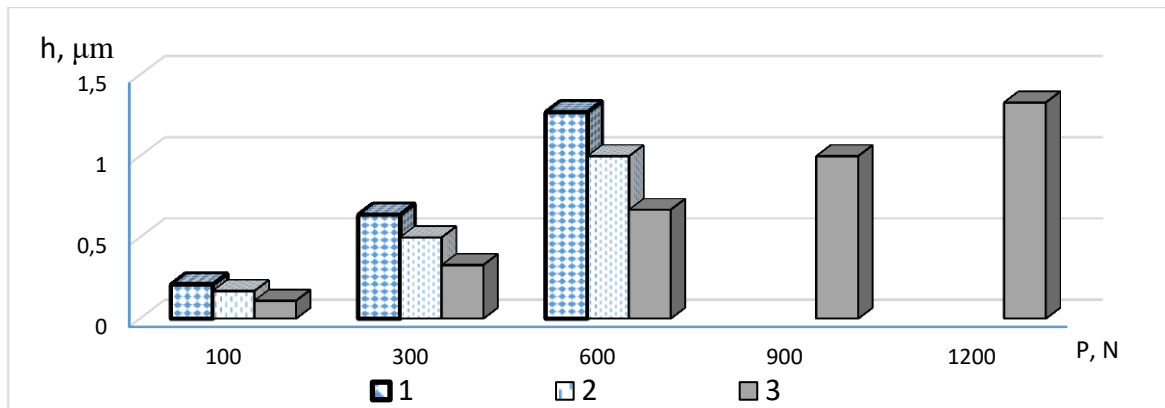


Рис. 5.3. Результати моделювання впливу навантаження (P) на глибину локалізації напружено-деформованого стану приповерхневих шарів (h): 1 – Д16 (рухомий трибоелемент), 2 – Д16 (нерухомий трибоелемент), 3 – Д16+ВК8+Cu (рухомий та нерухомий трибоелемент).

Таким чином, армування дюралюмінію Д16 дискретним комбінованим покриттям забезпечує перерозподіл напружень в сформованому покритті за рахунок формування зносостійких дисипативних структур, що обумовлює підвищення зносостійкості трибосистеми та розширення діапазону її роботоздатного стану в умовах ступеневого підвищення навантаження.

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. 5.4, 5.5):

$$I = \left(\frac{N}{l} \cdot W_{yc} \cdot W_{yc \pm}^{0,5} \cdot t^{0,5}\right) / L \quad (5.2)$$

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

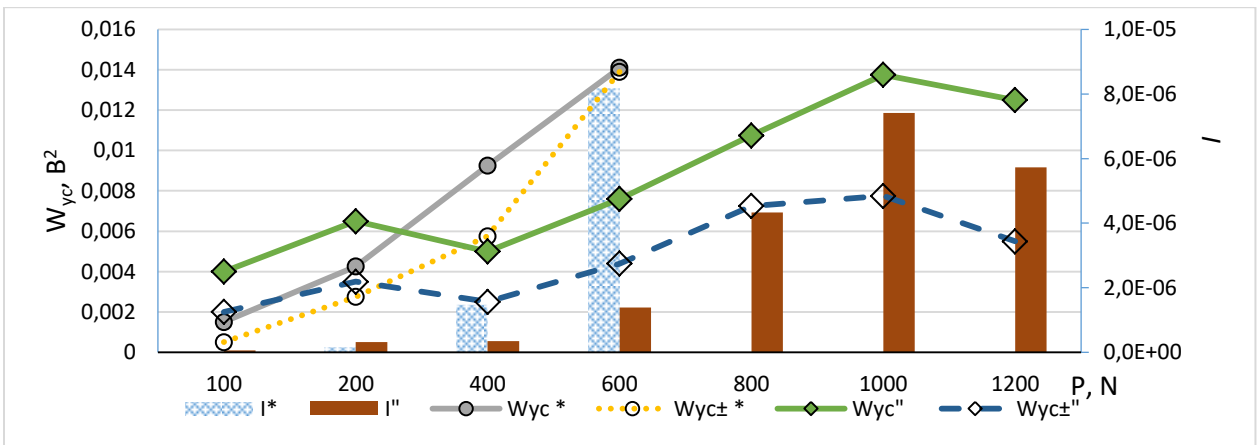
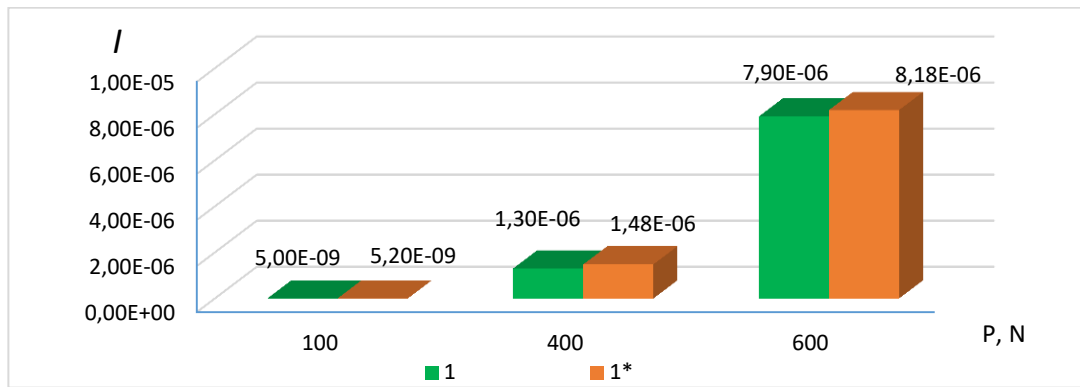
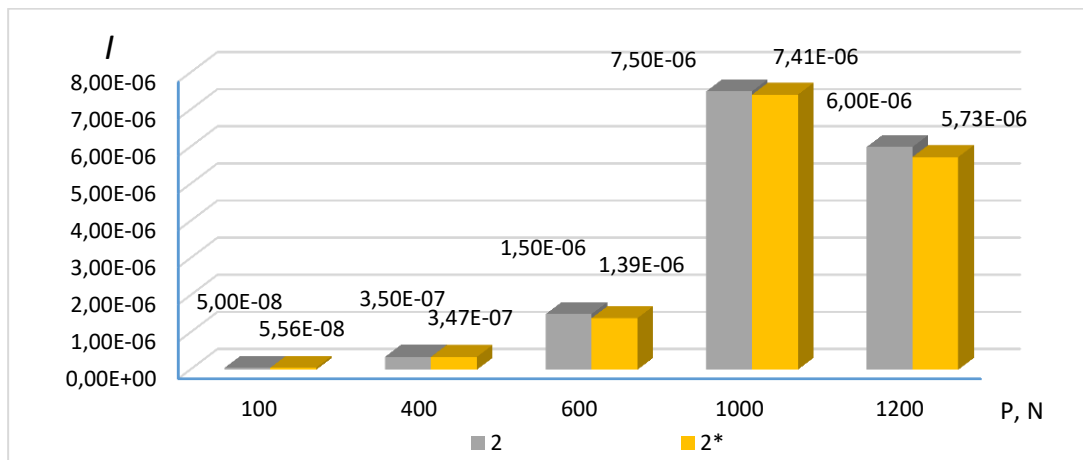


Рис. 5.4. Розрахункові залежності інтенсивності зношування (I) від усередненої потужності сигналів АЕ (W_{yc}) та величини її розкиду ($W_{yc} \pm$): * – трибосистема Д16 – 30ХГСА; '' – трибосистема Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА.



а)



б)

Рис. 5.5. Експериментальні та емпіричні показники інтенсивності зношування (I): а) – для трибосистеми Д16 – 30ХГСА (1 – експериментальні значення, 1* – за формулою (5.2)); б) – для трибосистеми Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА (2 – експериментальні значення, 2* – за формулою (5.2)).

Розбіжність між експериментальними значеннями інтенсивності зношування досліджуваних трибосистем та значеннями, одержаними за формулою (5.2), 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 трибоспряджень визначати межу переходу від нормального до катастрофічного зношування трибосистеми.

5.2. Формування зносостійких дисипативних структур дискретним комбінованим електроіскровим покриттям.

Мета даного етапу досліджень полягала в визначенні механізмів підвищення зносостійкості дюралюмінію Д16 з електроіскровим дискретним комбінованим покриттям сплаву ВК-8 та міді.

Досліджувались контактні поверхні трибосистем 30ХГСА – Д16 та 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu після тертя в умовах ступеневого підвищення навантаження від 400 до 800 Н, крок підвищення – 100 Н, час роботи трибоелементів на кожному ступені навантаження – 10 хв.

Металофізичні дослідження проводились на мікроскопі-інтерферометрі Лінника МП-4. Фрактографічні дослідження проводилися з використанням методу растрової електронної мікроскопії (РЕМ) на мікроскопі – мікроаналізаторі CamScan 4DV з використанням системи рентгенівського дисперсійного аналізу – Link 860.

Визначення хімічного складу поверхонь тертя проводилося наступними основними методами:

- за методикою якісного визначення хімічного складу, що дозволяє визначити різницю залежно від окремих елементів;
- за методикою кількісного визначення вмісту хімічних елементів (ZAF 4/FLS);

– за методикою напівкількісного розподілу елементів за площею (програма "Digimap").

В створеній схемі експерименту процеси тертя протікають в нерівноважних умовах, до яких можна віднести зростання навантаження, підвищення температури мастильного матеріалу в зоні фрикційного контакту. Дані чинники обумовлюють зміну напружено-деформаційного стану контактних поверхонь та призводять до інтенсифікації поглинання енергії поверхневим шаром трибоелементів. Поглинута трибосистемою внутрішня енергія спричинює її вихід з рівноважного стану за двома механізмами – або ініціюються руйнівні процеси та зростає інтенсивність зношування, або реалізується алгоритм акумуляції первинної енергії у вторинних дисипативних структурах при самоорганізації трибосистеми, що забезпечує зниження швидкості зношування.

В таблиці 5.4 наведено експериментальні результати зміни коефіцієнту тертя, режиму мащення, температури та швидкості зношування для досліджуваних трибосистем з рухомих трибоелементом сталь 30ХГСА.

Таблиця 5.4

Триботехнічні характеристики контакту в умовах ступеневого підвищення навантаження

Показники	Навантаження, Н		
	400	600	800
	30ХГСА – Д16		
Коефіцієнт тертя (f)	0.1	0.1...0.3	–
Режим мащення (λ)	1.1 (граничний)	0.5 (напівсухий)	–
Температура, $^{\circ}\text{C}$	43	92	–
Швидкість зношування, г/хв	$2.52 \cdot 10^{-5}$	$2.83 \cdot 10^{-4} \dots 3.9 \cdot 10^{-3}$	–
	30ХГСА – Д16+ВК-8+Cu		
Коефіцієнт тертя (f)	0.17	0.17	0.17
Режим мащення (λ)	3.2 (еластогідродинамічний)	2.8 (змішаний)	2.5 (змішаний)
Температура, $^{\circ}\text{C}$	30	64	74
Швидкість зношування, г/хв	$5.7 \cdot 10^{-6}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$5.3 \cdot 10^{-5}$

Для трибосистеми 30ХГСА – Д16 в умовах ступеневого підвищення навантаження зафіксовано зниження антифрикційних характеристик контакту внаслідок переходу від граничного до напівсухого режиму мащення, що призводить до різкого зростання температури в фрикційному контакті, мікросхоплюванню, інтенсифікації зношування елементів трибоспряження. При 600Н на 8-й хвилині напрацювання спостерігається зростання коефіцієнту тертя в 3 рази, швидкості зношування в 13 разів, підвищення шуму внаслідок утворення / розриву мікроділянок схоплювання контактних поверхонь.

Армування дюралюмінію Д-16 дискретним комбінованим покриттям твердого сплаву ВК-8 та міддю, забезпечує розширення діапазону навантаження, при якому трибосистема 30ХГСА – Д16+ВК8+Сu зберігає нормальний роботоздатний стан. Одним з основних механізмів цього процесу є підвищення несучої здатності мастильного шару – в трибоконтаті домінують еластогідродинамічний або змішаний режими мащення. Утворений мастильний шар в фрикційному контакті забезпечує зниження приросту температури в зоні контактування елементів трибосистем, а надійне розділення пар тертя шаром мастильного матеріалу обумовлює ефективне зниження швидкості зношування контактних поверхонь. Згідно [185, 186], однією з основних передумов зниження швидкості зношування являється самоорганізація в трибосистемах, яка супроводжується утворенням дисипативних структур.

Розглянемо формування дисипативних структур в досліджуваних трибосистемах. Внаслідок активації поверхневих шарів контактних поверхонь при терті відбувається структурна пристосованість, яка полягає у формуванні метастабільних дисипативних структур, що спричинюється інтенсифікацією окислювальних процесів та утворенням хімічномодифікованих граничних плівок з компонентів мастильного матеріалу (табл. 5.5 – 5.7).

Аналіз хімічного складу поверхневих шарів трибосистеми 30ХГСА – Д16 після тертя свідчить про збільшення концентрації кисню в 2.6 рази для трибоелементу Д16, для сталі 30ХГСА не встановлено суттєвих змін. Також поверхневі шари даної

трибосистеми насичуються в процесі тертя вуглецем, сіркою та фосфором в концентраціях 0.14...0.28 %, в порівнянні з вихідним станом.

Таблиця 5.5

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 (поверхня після тертя)	2.24	1.11	0.33	90.62	0.66	4.4	0.27	0.38

Таблиця 5.6

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

Таблиця 5.7

Хімічний склад поверхневих шарів сплаву Д16 з електроіскровим покриттям

Матеріал	Хімічний склад поверхні, %						
	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 (поверхня після тертя)	3.46	0.10	0.29	64.16	1.57	29.80	0.62

Припускаємо про реалізацію наступного механізму утворення дисипативних структур даною трибосистемою. В результаті механо-температурної активації поверхневих шарів трибоелементів при терті та активованих внаслідок дії градієнту швидкості зсуву компонентів моторної оливи М10Г₂к відбувається формування граничних плівок мастильного матеріалу різної природи. Олива М10Г₂к в якості базової основи містить дистилатну та залишкову фракції, які одержують з сірчаных

нафт. Зольна антиокислювальна присадка диалкілдитіофосфат цинку надає оливі високі протизношувальні та антикорозійні властивості. Ефективні миючо-диспергуючі властивості оливи обумовлені наявністю сульфонатної присадки (табл. 5.8).

Таблиця 5.8

Склад моторної оливи М10Г2к

Компоненти	Масова частка, %
Олива дистильована мінеральна	80 - 90
Олива залишкова депарафінована	0 - 5
Диалкілдитіофосфат цинку	0.5 - 1
Кальцієві солі С10-60 алкилових похідних бензосульфонової кислоти C_{32} . $_{132}H_{52-252}CaO_6S_2$	0.1 - 0.5

Отже, досліджуваний мастильний матеріал є джерелом активних компонентів при насиченні поверхневих шарів фрикційного контакту 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 Д-16, згідно [187], може досягати 10...12 ГПа, дані частки зносу виступають в якості твердого абразиву для поверхні сталі 30ХГСА з мікротвердістю поверхневих шарів на рівні 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.

Ознаками катастрофічного зношування є руйнування граничних шарів мастильного матеріалу, утворення ділянок мікросхоплювання в фрикційному контакті з наступним мікроруйнуванням та когезійним відривом в зоні приповерхневих шарів дюралюмінію Д16, що свідчить про перехід до внутрішнього тертя (рис 5.6).

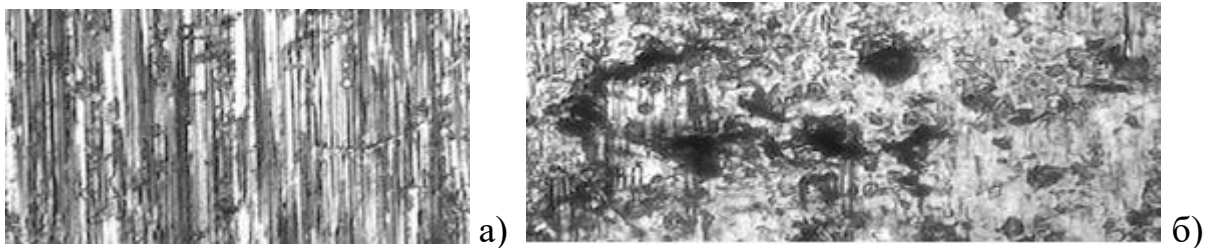


Рис 5.6. Поверхня дюралюмінію Д16: а) – вихідна поверхня, б) – після напрацювання в умовах ступеневого навантаження (x478).

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 не активованих тертям 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. На 10% площі тертя трибоелементу сталі 30ХГСА виявлено частки зносу контртіла Д16+ВК8+Cu (табл. 5.6, рис. 5.7).

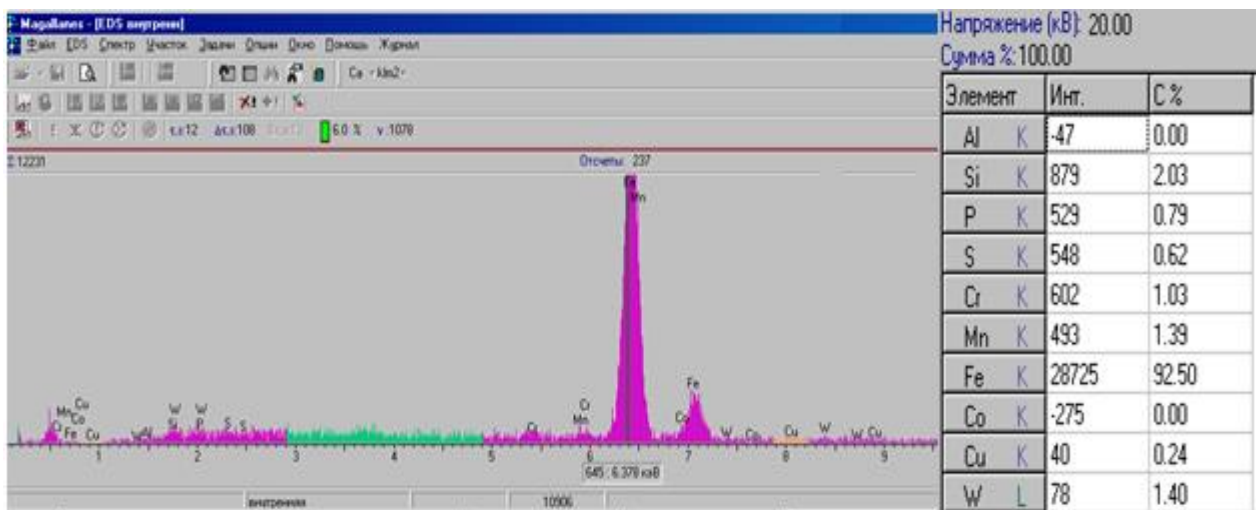


Рис. 5.7. Хімічний аналіз поверхні сталі 30ХГСА після напрацювання в умовах ступеневого підвищення навантаження (контртіло – армований дюралюміній Д16).

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 [188]. Водночас активуються механохімічні процеси окислення поверхневих шарів сталі 30ХГСА, які забезпечують формування зносостійких метастабільних структур. Утворені дисипативні структури забезпечують зниження впливу зовнішніх чинників шляхом реалізації принципу найменшої дії [189]. 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.

Таким чином, армування дюралюмінію Д16 комбінованим електроіскровим покриттям обумовлює збільшення вдвічі навантажувального діапазону застосування дюралюмінію, що дозволить розширити сферу експлуатації даного сплаву для деталей, які працюють в умовах ковзання.

5.3. Регресійний аналіз оцінки впливу домінуючих чинників на знос дискретних електроіскрових покриттів.

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. Статистичні залежності описуються математичними моделями процесу, тобто регресійними виразами, що пов'язують незалежні значення X (фактори) із залежною змінною Y (результативна ознака, функція мети, відгук). Модель по можливості має бути простою та адекватною. Суть регресійного аналізу зводиться до встановлення рівняння регресії, тобто виду кривої між випадковими величинами (аргументами X та функцією Y), оцінкою тісноти зв'язків між ними, достовірності та адекватності результатів вимірювань [190].

Рівняння множинної регресії може бути представлене у вигляді:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (5.3)$$

де Y – залежна (пояснювальна) змінна; $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ – вектор незалежних (пояснюючих) змінних; β – вектор параметрів (підлягають визначенню); ε – випадкова помилка (відхилення).

З приводу ε робляться різні припущення, які, однак, найчастіше зводяться до нормальності розподілу з нульовим вектором математичного очікування та кореляційною матрицею σ .

Теоретичне лінійне рівняння множинної регресії має вигляд:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon \quad (5.4)$$

де β_0 – вільний член, що визначає значення Y , у разі, коли всі пояснюючі змінні X_j дорівнюють 0.

Коефіцієнти β знаходяться методом найменших квадратів (МНК). Перш ніж перейти до визначення знаходження оцінок коефіцієнтів регресії, необхідно перевірити низку передумов МНК:

1. Математичне очікування випадкового відхилення ε_i дорівнює 0 для всіх спостережень:

$$M(\varepsilon_i) = 0. \quad (5.5)$$

2. Гомоскедастичність (постійність дисперсій відхилень). Дисперсія випадкових відхилень ε_i постійна:

$$D(\varepsilon_i) = D(\varepsilon_j) = S^2, \quad (5.6)$$

для любых i та j .

3. Відсутня автокореляція.

4. Випадкове відхилення має бути незалежно від пояснюючих змінних: $Y_{\text{eixi}} = 0$.

5. Модель є лінійною відносно параметрів.

6. Відсутня мультиколінеарність. Між пояснювальними змінними відсутня сильна лінійна залежність.

7. Помилки ε_i мають нормальний розподіл. Виконуваність цієї передумови важлива для перевірки статистичних гіпотез та побудови довірчих інтервалів.

При виконанні передумов МНК щодо помилок ε_i , оцінки b_0, b_1, \dots, b_m параметрів $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ множинної лінійної регресії МНК є незміщеними, ефективними і обґрунтованими (тобто Best Linear Unbiased Estimator - BLUE-оцінками).

Для опису математичної моделі зношування неармованого дюралюмінію Д16 та армованого шляхом нанесення ЕПІ сплаву ВК8 та міді приймемо, що на знос впливають наступні чинники: еквівалентні напруження в покритті ($\sigma_{\text{екв,покр}}$), еквівалентні напруження в основі під покриттям ($\sigma_{\text{екв,осн}}$), температура мастильного матеріалу (T), коефіцієнт тертя (f), усереднена потужність акустичної емісії, яка характеризує інтенсивність протікання пружно-пластичних деформацій, що було встановлено в експериментальних дослідженнях ($W_{\text{ус}}$), мікротвердість вихідної поверхні ($H_{20(\text{вих})}$), мікротвердість поверхні після тертя ($H_{20(\text{терт})}$) (табл. 5.9).

Таблиця 5.9

Усереднені статистичні дані залежної та незалежних змінних для множинної регресії

Матеріал	Залежна змінна	Незалежна змінна						
		Знос, мкм	$\sigma_{\text{екв,покр}}$, МПа	$\sigma_{\text{екв,осн}}$, МПа	T , °C	f	$W_{\text{ус}}, 10^{-5}, \text{В}^2$	$H_{20(\text{вих})}$, МПа
Д 16, без покриття	0,01	390	312	80	0,081	220	850	390
Д 16+ВК 8	0,046	401	197	68	0,135	400	17000	18920
Д 16+Cu	0,002	400	306	74	0,16	25	700	755
Д 16+ВК 8+Cu	0,0048	422	204	80	0,15	150	6000	4730

Перейдемо від двох значень мікротвердості $H_{20(\text{вих})}$ та $H_{20(\text{терт})}$, до однієї – дельти, тобто різниці між початковою та кінцевою мікротвердістю $\Delta H_{20} = H_{20(\text{терт})} - H_{20(\text{вих})}$, якщо результат від'ємний – це знеміцнення, якщо додатний – зміцнення.

Таблиця 5.9 спрощується до наступного вигляду (табл. 5.10):

Таблиця 5.10

Усереднені статистичні дані залежної та незалежних змінних для множинної регресії

Матеріал	Залежна змінна	Незалежна змінна					
	Знос, мкм	$\sigma_{\text{екв,покр}}$, МПа	$\sigma_{\text{екв,осн}}$, МПа	T, °C	f	$W_{\text{ус}}, 10^{-5}, \text{В}^2$	ΔH_{20} , МПа
Д 16, без покриття	0,01	390	312	80	0,081	220	-460
Д 16+ВК 8	0,046	401	197	68	0,135	400	1920
Д 16+Cu	0,002	400	306	74	0,16	25	55
Д 16+ВК 8+Cu	0,0048	422	204	80	0,15	150	-1270

На основі первинного статистичного аналізу обчислено для кожної змінної (табл. 5.11):

– середнє значення

$$\bar{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ki}, \quad (5.7)$$

де N – кількість точок, x_{ki} – i -те значення k -тої ознаки;

– дисперсію

$$D_{x_k} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{ki} - \bar{x}_k)^2; \quad (5.8)$$

– середнє квадратичне відхилення

$$\sigma_{x_k} = \sqrt{D_{x_k}}. \quad (5.9)$$

З використанням цих оцінок розраховуються попарні коефіцієнти кореляції та будується кореляційна матриця, яка обчислюється наступним чином:

$$r_{x,y} = \frac{N}{N-1} \frac{\overline{xy} - \bar{x} * \bar{y}}{\sigma_x * \sigma_y}, \quad (5.10)$$

де $\overline{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i * y_i$, а x та y – пара ознак із вищезазначених змінних.

Результати первинного статистичного аналізу

№	Ознака k	Середнє значення \bar{x}	Дисперсія D_x	Середнє квадратичне відхилення σ_x
1	Знос	0,016	0,0004	0,02
2	Еквівалентні напруження в покритті	403,25	180,917	13,451
3	Еквівалентні напруження в основі під покриттям	254,75	3938,25	62,755
4	Температура мастильного матеріалу	75,5	33	5,745
5	Коефіцієнт тертя	0,132	0,001	0,035
6	Усереднена потужність акустичної емісії	198,75	24506,25	156,545
7	Зміна мікротвердості поверхні	61,25	1832972,917	1353,873

Після розрахунку отримана наступна кореляційна матриця (яка є симетричною відносно основної діагоналі) (табл. 5.12).

Таблиця 5.12

Парні коефіцієнти кореляції між досліджуваними змінними

Змінна	1 (Знос)	2 ($\sigma_{\text{екв,покр}}$)	3 ($\sigma_{\text{екв,осн}}$)	4 (Т)	5 (f)	6 (W_{yc})	7 (ΔH_{20})
1 (Знос)	1	-0,185	-0,577	-0,798	-0,092	0,925	0,889
2 ($\sigma_{\text{екв,покр}}$)	-0,185	1	-0,69	0,201	0,645	-0,172	-0,407
3 ($\sigma_{\text{екв,осн}}$)	-0,577	-0,69	1	0,356	-0,388	-0,571	-0,274
4 (Т)	-0,798	0,201	0,356	1	-0,351	-0,509	-0,954
5 (f)	-0,092	0,645	-0,388	-0,351	1	-0,376	0,056
6 (W_{yc})	0,925	-0,172	-0,571	-0,509	-0,376	1	0,675
7 (ΔH_{20})	0,889	-0,407	-0,274	-0,954	0,056	0,675	1

Оскільки незалежною змінною є «ознака 1», тобто знос поверхні, тому обираємо перший рядок / стовпчик матриці. Коефіцієнт множинної кореляції розраховується відносно обраної основної «ознаки 1» і показує залежність цієї ознаки від множини усіх інших:

$$r_{x_k * x_1 \dots x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n} = \sqrt{1 - \frac{|R|}{|R_{k,k}|}}, \quad (5.11)$$

де $|R|$ – визначник кореляційної матриці, $|R_{k,k}|$ – визначник цієї матриці без k -тих ряду та стовпця.

Для даної кореляційної матриці $r_{x_1 * x_2, \dots, x_n} = 0.719$.

Оскільки в матриці присутні значення парних кореляцій, які близькі до нуля, припускаємо, що певні незалежні змінні мало впливають на зміну зносу як обраної основної характеристики. Тому було прийнято рішення про відмову від ознак, для яких парний коефіцієнт кореляції із першою ознакою (зносом) за модулем є меншим за 0.6. В результаті цього отримано нову вибірку (табл. 5.13, 5.14).

Таблиця 5.13

Усереднені статистичні дані залежної та незалежних змінних з високим парним коефіцієнтом кореляції

Матеріал	Залежна змінна Знос, мкм	Незалежна змінна		
		Т, °С	W _{yc} , 10 ⁻⁵ , В ²	ΔН ₂₀ , МПа
Д 16, без покриття	0,01	80	220	-460
Д 16+ВК 8	0,046	68	400	1920
Д 16+Cu	0,002	74	25	55
Д 16+ВК 8+Cu	0,0048	80	150	-1270

Таблиця 5.14

Кореляційна матриця для досліджуваних змінних

Змінна	1 (Знос)	2 (Т)	3 (W _{yc})	4 (ΔН ₂₀)
1 (Знос)	1	-0,798	0,925	0,889
2 (Т)	-0,798	1	-0,509	-0,954
3 (W _{yc})	0,925	-0,509	1	0,675
4 (ΔН ₂₀)	0,889	-0,954	0,675	1

В умовах даної вибірки множинний коефіцієнт кореляції відносно першої основної ознаки (зносу) дорівнює $r_{x_1 * x_2, \dots, x_n} = 0.866$, що є більш прийнятним за попередній.

Найпростіша форма оцінки стохастичного зв'язку – лінійний регресійний аналіз. Тобто, відтворивши регресію, і показавши адекватність відтвореної моделі, можна стверджувати, що дані, що отримані в результаті експерименту є адекватними для багатовимірної регресії

Після проведення усіх розрахунків отримаємо емпіричне рівняння множинної регресії, де знос (*I*) неармованого/армованого дюралюмінію Д16 можливо спрогнозувати на основі кінетики зміни температури в фрикційному контакті (Т),

усередненої потужності сигналів АЕ (W_{yc}) та зміни мікротвердості поверхні при напрацюванні (ΔH_{20}):

$$I = a_0 - a_1 * T + a_2 * W_{yc} + a_3 * \Delta H_{20}. \quad (5.12)$$

По модулю, усі статистики коефіцієнтів є меншими за квантиль (табл. 5.15), а отже є значущими, що свідчить про адекватність моделі регресії, а отже і про адекватність експерименту.

Таблиця 5.15

Показники адекватності моделі регресії

Коефіцієнт детермінації	0,75			
Коефіцієнти регресії	a_0	a_1	a_2	a_3
	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		

Висновки до розділу 5.

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, збільшення енергії руйнування до $(0.88 \dots 1.6) \cdot 10^{-5}$ Дж, що проявляється в схоплюванні контактних поверхонь.

2. Армування 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.

3. 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.

4. 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.

5. В умовах ступеневого зростання навантаження в діапазоні 100...600 Н для трибосистеми 30ХГСА – Д16 домінує граничний або напівсухий режим мащення, нерівноважні умови інтенсифікують руйнівні процеси та підвищують швидкість зношування пар тертя.

6. Армування дюралюмінію Д16 комбінованим ЕП ВК8+Cu забезпечує розширення роботоздатного стану алюмінієвого сплаву в навантажувальному діапазоні 100...1200 Н, в трибоконтакті домінує еластогідродинамічний або змішаний режим мащення.

7. Метастабільні дисипативні структури трибосистеми 30ХГСА – Д16 характеризуються незначним насиченням активних елементів кисню, вуглецю, сірки та фосфору в концентрації від 0,14 до 1,4 % внаслідок структурної пристосованості, однак при переході до напівсухого режиму мащення відбувається деструкція граничних плівок мастильного матеріалу, інтенсифікація механохімічного окислення активованих поверхневих шарів дюралюмінію Д16 з подальшим відшаровуванням окисної плівки та зростанням швидкості зношування.

8. Ефективна структурна пристосованість трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu обумовлена формуванням граничних шарів мастильного матеріалу, наявністю резерву мастильного матеріалу внаслідок дискретності покриття.

9. Збільшення активних елементів кисню, сірки та фосфору в 2,9...15 разів в поверхневих шарах пар тертя трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu свідчить про формування зносостійких дисипативних структур, що проявляється в зменшенні

швидкості зношування в 7 разів до 600 Н, в порівнянні з трибосистемою 30ХГСА – Д16, та нормальною роботою в умовах ступеневого підвищення навантаження до 1200 Н.

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

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Визначено роботоздатний стан дискретних ЕПП зі щільністю 20...80 %. Мінімальні показники зносу та усередненої потужності АЕ, характерні для ЕПП 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 ЕПП – 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 мікросхоплюванняв фрикційному контакті та переходом до внутрішнього тертя.

5. Армування дюралюмінію Д16 електроіскровим покриттям ВК8+Си 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+Си 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 неармованого/армованого електроіскровим покриттям ВК8+Си дюралюмінію Д16.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дмитриченко М.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.О. Триботехніка та основи надійності машин: Навч. посіб. Київ: Інформавтодр, 2006. 216 с.
2. Трибологія: підручник / Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Пашечко М.І., Корбут Є.В. Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”. 2009. 410 с.
3. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: Навч. посіб. Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
4. Нікулін О.В. Триботехніка та основи надійності машин: конспект лекцій. Кам'янське: ДДТУ, 2017 р. – 84 с.
5. Kragelsky I.V., Demkin N.B. Contact area of rough surfaces Das kontaktgebiet rauher oberflächen. *Wear*. 1960. Vol. 3, Iss. 3. P. 170-187.
6. Matveevsky R.M., Buyanovsky I.A. Temperature kinetic aspect of friction and wear under boundary lubrication // Proc. JSLE International Tribology conference, Tokyo, Japan, 1985. P. 339-344.
7. Matveevskii R.M., Sinaisky V.M., Buyanovsky LA. Contributions to the Influence of Retained Austenite Content in Steels on the Temperature Stability of Boundary Lubrication Layers in Friction. *Journal of Lubrication Technology* (Trans. ASME). 1975. No 2. P. 521-525.
8. Kragelsky I. V. Friction and Wear. Butterworths, 1982. 346 p.
9. Kragelsky I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. Friction and Wear: Calculation Methods. Elsevier, 2013. 474 p.
10. Nikolenko S. V., Verkhoturov A. D., Syui N. A., Kuz'michev E. N. Influence of electrospark discharge parameters on roughness and microabrasive wear of steel 45 surface after ESA by TiC-based electrodes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016. vol. 52. P. 342-349.

11. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D., Syui, N.A. Generation and study of new electrode materials with self-fluxing additives to improve the efficiency of mechanical electrospark alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. 51. P. 38-45.
12. Suwas S., Bhowmik A., Biswas S. Ultra-fine grain materials by severe plastic deformation: application to steels. *Microstructure and Texture in Steels and Other Materials*. London: New York: Springer. 2009. Ch. 19. P. 325-344.
13. Tokaruk V.V., Mikosianchyk 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.
14. Bershadsky L.I., Iosebidze D.S., Kutelia E.R. Tribosynthesis of graphite-diamond films and its employment for obtaining structurally adaptive coatings . *Thin Solid Films*. 1991. Vol. 204, Iss. 2. P. 275-283.
15. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий и др. Киев: Техника, 1976. 296 с.
16. Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Kovalev A.V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International*. 2006. Vol. 38, Iss. 11-12. P. 910-921.
17. Buyanovskii I. A., Ignatyeva Z. V., Levchenko V. A., Matveenکو V. N. Orientation ordering of boundary layers and lubricity of oils . *Journal of Friction and Wear*. 2008. vol. 29. P. 282-287.
18. Matveevsky R.M. Friction power as a criterion of seizure with sliding lubricated contact. *Wear*. 1992. vol. 155. P. 1-5.
19. Lyashenko I.A. Description of the stationary structural states of a boundary lubricant making use of the relation between the density-modulation and excess-volume order parameters. *Ukrainian Journal of Physics*. 2021. 66 (11). P. 993-1008.
20. Lyashenko I.A., Filippov A.E., Popov M.V., Popov V.L. Effect of stress nonhomogeneity on the shear melting of a thin boundary lubrication layer. *Physical Review*. 2016. E94. P. 053002.

21. Dickinson J. T. Nanotribology: rubbing on a small scale. *J. Chem. Educ.* 2005. Vol. 82, № 5. P. 734-742.
22. Michael P.C., Rabinowicz E., Iwasa Y. Friction and wear of polymeric materials at 293, 77 and 4.2 K. *Cryogenics*. 1991. Vol. 31, Iss. 8. P. 695-704.
23. Imani A., Zhang H., Owais M., Zhao J., Chu P., Yang J., Zhang Z. Wear and friction of epoxy based nanocomposites with silica nanoparticles and wax-containing microcapsules. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 107. P. 607-615.
24. Panin V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D. Physical mesomechanics of a deformed solid as a multilevel system. II. Chessboard-like mesoeffect of the interface in heterogeneous media in external fields. *Physical Mesomechanics*. 2007. Vol. 10, Iss. 1-2. P. 5-14.
25. Bolesta A.V., Fomin V.M. Molecular dynamics simulation of uniaxial deformation of thin Cu film and Al-Cu heterostructure. *Physical Mesomechanics*. 2011. Vol. 14, Iss. 3-4. P. 107-111.
26. Tarasov S.Y., Kolubaev A.V. Formation of surface layer with nanosize grain-subgrain structure due to friction of a copper – tool steel pair. *Metal Science and Heat Treatment*. 2010. No 52. P. 183-188.
27. Jha S.K., John R., Larsen J.M. Nominal vs local shot-peening effects on fatigue lifetime in Ti-6Al-2Sn-4Zn-6Mo at elevated temperature. *Metallurgical and materials transactions A*. 2009. Vol. 40A. P.2675-2684.
28. Wang T., Yu J., Dong B. Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 4777-7781.
29. Stechyshyn M.S., Lyukhovets V.V., Stechyshyn N.M., Tsepenyuk M. I. Wear resistance of structural steels nitroded in cyclic-commuted discharge at limit modes of friction. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27, No 3/105. P. 27-33.
30. Wang T. S., Lu B., Zhang M., Hou R. J., Zhang F. C. Nanocrystallization and a martensite formation in the surface layer of medium-manganese austenitic wear-resistant

steel caused by shot peening . *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 458. P. 249-252.

31. Bezjazychnyj V. F., Sutyagin A. N. Technological providing of surface layer quality parameters during the machining. *Scientific problems of machines operation and maintenance*. 2009. No 4 (160). P. 7-12.

32. Hoffmann L.A., Carenza L.N., Eckert J., Giomi L. Theory of defect-mediated morphogenesis. *Science Advances*. 2022. Vol.8 (15). PMC9012457.

33. Umemoto M., Todaka K., Tsuchiya K. Formation of nanocrystalline structured in carbon steels by ball drop and particle impact techniques. *Materials Science and Engineering A*. 2004. Vol. 375-377. P. 899-904.

34. Skvortsov A.I., Kondratov V.M. Magnetomechanical damping and physical properties of damping iron alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 1998. 40. P. 179-181.

35. Bembenek M., Krawczyk J., Pańcikiewicz K. The wear mechanism of mill beaters for coal grinding made-up from high manganese cast steel. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 142. P. 106843

36. Волосевич П.Ю., Беспалов С.А. Структурообразование и износостойкость стали 40Х . *Металлофизика и новейшие технологии*. 2004. Т.26, №5. С.691-701.

37. Волосевич П.Ю., Беспалов С.А. Связь особенностей структурообразования с износостойкостью стали Х6ВФ. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2005. Т.27, №6. С. 841-850.

38. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та ін. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2015. 104 с.

39. Афтаназів І.С., Юрчишин І.І., Клименко О.Д. Вплив технологічних параметрів процесу ВВЗК на чистоту зміцненої бокової поверхні зубів. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*: Зб. наук. пр. Донбаської держ. машинобудівної акад. Краматорськ, 2003. Вип. 14. С. 106-118.

40. Афтаназів І.С., Струтинська Л.Р., Клименко О.Д. Ефективність зміцнення зубчастих коліс вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою. *Розвідка та розробка нафтових і газових копалин*. 2003. № 2 (7). С. 22-28.

41. Ivanov V. I., Verkhoturov A. D., Konevtsov L. A. The development of criteria for evaluating the effectiveness of the surface layer formation and its properties in the process of electrospark alloying (ESA). Part 2. The criteria of the effectiveness of the ESA process and electrospark coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017. vol. 53. P. 224-228.

42. Tarel'nyk V. B., Gaponova O. P., Konoplyanchenko Ye. V., Ya M. Dovzhyk Investigation of Regularities of the Processes of Formation of Surface Layers with Electroerosive Alloying. Part I. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2016. 38/12. P. 1611-1633.

43. Yurchenko E.V., Rushika I.D., Agafii V.I., Dikusar A.I. Al-Sn nanostructured coatings on aluminum surfaces using electrospark alloying and their wear behavior. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. 2018. Vol. 2(42), No. 2. P. 115-120.

44. Prokopenko G. I., Mordyuk B. M., Mazanko V. F., Iefimov M. O., Piskun N. A. Hardening of Surface Layer on Al-6Mg Aluminium Alloy, Using Complex Effects of Electric Spark and Ultrasonic Impact Treatments. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2013. No 35/10. P. 1391-1406.

45. Verkhoturov A. D., Pochernyaeva I. A., Gorbunov Y. A., Egorov F. F. Selection of electrode material and mass transfer during electric-spark alloying. *Poroshkovaya Metallurgiya*. 1985. No 2. P. 36-39.

46. Mikhailyuk A. I., Zhitaru R. P. Features of plastic deformation of electrospark coatings and ways for improvement of their strength characteristics at friction. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2008. vol. 44. P. 383–389.

47. Анохин А.А. Некоторые прогрессивные технологии восстановления качества поверхностей деталей. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2003. No 5 (5). С. 10-16.

48. Tarelyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2019. No 41(2). С. 173-192.

49. Tarelyk V., Martynkovskyy V. Upgrading of Pump and Compressor Rotor Shafts Using Combined Technology of Electroerosive Alloying. *Applied Mechanics and Materials*. 2004. No 630. P. 397-412.

50. Триботехніка: курс лекцій / Журавель Д.П., Новік О.Ю., Бондар А.М., Петренко К.Г. Мелітополь: Видав.-полігр. центр «Люкс», 2019. 280 с.

51. Диха О.В. Розрахунково-експериментальні методи керування процесами граничного змащування технічних трибосистем: Монографія. Хмельницький: ХНУ, 2018. 197 с.

52. Ding M., Lin B., Sui T., Wang A., Yan S., Yang Q. The excellent anti-wear and friction reduction properties of silica nanoparticles as ceramic water lubrication additives. *Ceramics International*. 2018. Vol. 44, Iss. 12. P. 14901-14906.

53. Fan Y., Gu F., Ball A. Modelling acoustic emissions generated by sliding friction. *Wear*. 2010. Vol. 268, Is. 5–6. P. 811-815.

54. Lingard S., Ng K.K. An investigation of acoustic emission in sliding friction and wear of metals. *Wear*. 1989. Vol. 130, Is. 2. P. 367-379.

55. Fouvry S., Liskiewicz T., Kasper P.H., Hannel S. An energy description of wear mechanisms and its applications to oscillating sliding contacts. *Wear*. 2003. Vol. 255 (1-6). P. 287-298.

56. Богданович А.И. Кинетические и энергетико-активационные характеристики износостойкости и совместимости материалов трибоспряжений: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.02.04. Київ, 1987. 23 с.

57. Matveevsky R. M., Buyanovsky I. A. Principal Characteristics of Boundary Lubrication. *A S L E Transactions*. 1986. Vol. 30, Iss. 4. P. 526-530.

58. Du F., Li D., Sa X., Li C., Yu Y., Li C., Wang J., Wang W. Overview of Friction and Wear Performance of Sliding Bearings. *Coatings*. 2022. 12. P.1303.

59. Bogdanovych O. I. Tribokinetic test algorithm // Матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф. “АВІА-2019”, м. Київ 23-25 квітня 2019 р., Київ, 2019. Р. 17.39-17.43.

60. Benabdallah H. S., Aguilar D. A. Acoustic emission and its relationship with friction and wear for sliding contact. *Tribology Transactions*. 2008. Vol. 51, Is. 6. P. 738-747.

61. Filonenko S. F., Stadnychenko V. M., Kosmach O. P. Акустична емісія при випробуваннях на зношення вузлів тертя. *Proceedings of the National Aviation University*. 2010. Том 44, № 3. С.106-110.

62. Builo S.I., Builo B.I., Chebakov M.I. Probabilistic-Information Approach to Assessing the Reliability of the Results of the Acoustic-Emission Method of Testing and Diagnostics. *Journal of Nondestructive Testing*. 2021. Vol 57. P. 375-382.

63. Стадниченко В. М., Стадниченко М. Г., Джус Р. М., Чотій Л.Ю. Вибір інформативних параметрів акустичної емісії для структурної побудови автоматизованої системи контролю процесів зношування. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харків: НАКУ. 2003. Вып. 34 (3). С. 96-103.

64. Dykha A.V., Zaspа Y.P., Slashchuk V.O. Triboacoustic Control of Fretting. *Journal of Friction and Wear*. 2018. Vol. 39. P. 169-172.

65. Kolubaev A., Kolubaev E. A., Vagin I. N., Sizova O. Sound generation in sliding friction. *Technical Physics Letters*. 2005. Vol 31. P. 813-816.

66. Vlasov V. M., Zelenko V. K., Vasin M. I., Malenko P. I. Use of the Method of Acoustic Emission for Studying the Laws of Formation of Secondary Structures at Friction of Nitrotrated Steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2003. Vol. 45. P. 400-403.

67. Ferrer C., Salas F., Pascal M., Orozco J. Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples. *Tribology International*. 2010. No.43. P.1-6.

68. Akusticheskie i elektricheskie metody v tribotekhnike (Acoustic and Electrical Methods in Tribotechnology). edited by V.A. Belyi. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1987. 280 с.

69. Контроль якості продукції в машинобудуванні: навч. посіб. / Федоров Г.Є., Ямшинський М.М., Фесенко А.М., Фесенко М.А. Київ: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2008. 352 с.
70. Twardowski P., Tabaszewski M., Wiciak-Pikula M., Felusiak-Czyryca A. Identification of tool wear using acoustic emission signal and machine learning methods. *Precision Engineering*. 2021. Vol. 72. P. 738-744.
71. Pandiyan V., Tjahjowidodo T. Use of Acoustic Emissions to detect change in contact mechanisms caused by tool wear in abrasive belt grinding process. *Wear*. 2019. Vol. 436-437. P.203047.
72. Білокур І.П. Основи дефектоскопії: підручник. Київ: Азімут, 2004. 496 с.
73. Костецкий Б.И., Запорожец В.В. Анализ спектра колебаний при внешнем трении. сб. Теория трения и износа. Москва: Наука, 1965. С.125-127.
74. Запорожец В. В. Анализ процессов контактного взаимодействия и прочности поверхностных слоев твёрдых тел методом трибологической идентификации: автореф. дисс. ... др-ра техн. наук: 05.02.04. Киев, 1981. 38 с.
75. Запорожец В.В. Динамические характеристики прочности поверхностных слоев и их оценка. *Трение и износ*. 1980. т.1, № 4. С.602-609.
76. Geng Z., Puhan D., Reddyhoff T. Using acoustic emission to characterize friction and wear in dry sliding steel contacts. *Tribology International*. 2019. Vol. 134. P. 394-407.
77. Baranov V., Kudryavtsev E., Sarychev G., Schavelin V. Chapter 1. In Friction of Solids and Nature of Acoustic Emission: *Tribology and Interface Engineering Series*. Elsevier. 2007. Vol. 53. P. 1-36.
78. Fenenko K. Cluster analysis of acoustic emission signals from the friction zone of tribosystems. *Problems of Tribology*. 2020. Vol. 25. No 2/96. P. 25-33.
79. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. Москва: Физматгиз, 1963. 472 с.

80. Tóth L.Z., Daróczy L., Elrasasi T.Y., Beke D.L. Clustering Characterization of Acoustic Emission Signals Belonging to Twinning and Dislocation Slip during Plastic Deformation of Polycrystalline Sn. *Materials*. 2022. Vol. 15. P.6696.

81. Yudin A.A., Ivanov V.I. Acoustic emission in plastic deformation of metals (review). Report. *Strength of Materials*. 1985. Vol. 17. P. 842-851.

82. Anastassopoulos A.A., Philippidis T.P. Clustering methodology for the evaluation of acoustic emission from composites. *J. Acoust. Emiss.* 1995. Vol. 13. P. 11-22.

83. Chen Y., Gou B., Yuan B., Ding X., Sun J., Salje E. Multiple Avalanche Processes in Acoustic Emission Spectroscopy: Multibranching of the Energy–Amplitude Scaling. *Phys. Status Solidi B*. 2022. Vol. 259. P.2100465.

84. Basin V.E., Berlin A.A. Adhesive strength. *Polymer Mechanics*. 1970. Vol. 6. P. 266-271.

85. Daróczy L., Elrasasi T. Y., Arjmandabasi T., Tóth L. Z., Veres B., Beke D. L. Change of acoustic emission characteristics during temperature induced transition from twinning to dislocation slip under compression in polycrystalline Sn. *Materials*. 2021. Vol. 15. P. 224.

86. Kamel S. M., Samy N. M., Tóth L. Z., Daróczy L., Beke D. L. Denouement of the energy-amplitude and size-amplitude enigma for acoustic-emission investigations of materials. *Materials*. 2022. Vol 15. P. 4556.

87. Vojtov V.A., Fenenko K.A., Voitov A.V. Substantiation of informative amplitudes during registration of acoustic emission signals from the friction zone of tribosystems. *Problems of Tribology*. 2021. Vol. 26, No 1/99. P. 6-12.

88. Chen Y., Gou B., Fu W., Chen C., Ding X., Sun J., Salje E. K. H. Fine structures of acoustic emission spectra: How to separate dislocation movements and entanglements in 316L stainless steel. *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 117. P. 262901.

89. Німченко Т.В. Моделі сигналів акустичної емісії для дослідження динамічних процесів. *Вісник НАУ*. 2007. №3-4. С.51-57.

90. Войтов В. А., Фененко К. А., Войтов А. В. Методика діагностування різних конструкцій трибосистем методом акустичної емісії. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 2 (91). С. 18-26.
91. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. Киев: Наук. думка, 1989. 176 с.
92. Pomponi E., Vinogradov A. A real-time approach to acoustic emission clustering. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. Vol 40. P. 791-804.
93. Wang J., Huo L., Liu C., Song G. Wear Degree Quantification of Pin Connections Using Parameter-Based Analyses of Acoustic Emissions. *Sensors*. 2018. Vol. 18(10). P.3503.
94. ГОСТ 27655–88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. Издательство стандартов Москва, 1988. 13 с.
95. Devenport T., Rolfe B., Pereira M., Griffin J. M. Analysis of Acoustic Emissions for Determination of the Mechanical Effects of Scratch Tests. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(13). P. 6724.
96. Ciaburro G., Iannace G. Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(20). P. 10476.
97. Hase A., Mishina H., Wada M. Acoustic Emission in Elementary Processes of Friction and Wear: In-Situ Observation of Friction Surface and AE Signals. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*. 2009. Vol. 3. P.333-344.
98. Hase A., Mishina H., Wada M. Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. *Wear*. 2012. Vol. 292–293. P. 144-150.
99. Chung K., Oh J., Moon J., Kim D. Particle monitoring method using acoustic emission signal for analysis of slider/disk/particle interaction. *Tribology International*. 2004. Vol. 37, Is. 10. P. 849-857.
100. Filippov A. V., Filippov A. V., Tarasov S. Yu., Tarasov S. Yu., Fortuna S., Podgornykh O. A., Shamarin N. N., Vorontsov A. V. Wear, vibration and acoustic emission characterization of sliding friction processes of coarse-grained and ultrafine-grained copper. *Wear*. 2019. Vol. 424-425. P. 78-88.

101. Zhilyaev A. P., Shakhova I., Belyakov A, Kaibyshev R., Langdon T. G. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation. *Wear*. 2013. Vol. 305. Is. 1-2. P. 89-99.

102. Benabdallah H. S., Aguilar D. A. Acoustic emission and its relationship with friction and wear for sliding contact. *Tribology Transactions*. 2008. Vol. 51. Is. 6. P. 738-747.

103. Kolubaev A. V., Byeli A. V., Buyanovskii I. A., Kolubaev E. A., Kukareko V. A., Sizova O. V., Khrushchov M. M. Study of fracture of Ti-Al-N hard coatings during sliding friction using acoustic emission. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2013. Vol. 4. P. 178-182.

104. Стоев П. И., Белоус В. А., Воеводин В. Н., Куприн А. С., Леонов С. А., Овчаренко В. Д., Тихоновский М. А., Хороших В. М. Механические свойства и акустические параметры твэльных труб из сплава циркония Zr1%Nb с защитными покрытиями. *Вопросы атомной науки и техники*. 2015. № 5. С. 87-97.

105. Filippov A., Vorontsov A., Shamarin N., Moskvichev E., Novitskaya O., Knyazhev E., Denisova Y., Leonov A., Denisov V., Tarasov S. Dry sliding friction study of zrn/crn multi-layer coatings characterized by vibration and acoustic emission signals. *Metals* 2022, Vol. 12, P. 2046.

106. Філоненко С. Ф., Космач О. П. Акустична емісія під час випробувань партертя з покриттям на зносостійкість. *Наукоємні технології*. 2011. № 3-4 (11-12). С. 30-34.

107. Zlotnikov I.I., Shapovalov V.M. Improving the antifriction properties of ceramic coatings obtained by the method of MAO on aluminum alloys. *Journal of Friction and Wear*. 2019. Vol. 40. P. 360-363.

108. Molina G., Furey L. Ein Werkstoff far Alle Falle. *Galvanotechnik*. 2000. Vol. 91. No 2. P. 385-388.

109. Ellermeier J. Plasmaspritzen von keramischen pulver. *HTM: Harter.-techn. Mitt*. 2000. Vol. 55. No 3. P. 177-182.

110. Quast M., Stock H. R., Mayr P. Plasma-Assisted Nitriding of Aluminum-Alloy Parts. *Metal Science and Heat Treatment*. 2004. Vol. 46. P. 299-304.

111. Kogan Y. D., Sazonova Z. S., Aleksandrov V, D., Borovskaya T. M. Antifriction properties of aluminum alloys after surface laser alloying. *Metal Science and Heat Treatment*. 1991. Vol. 33. P. 772-776.

112. Coquerelle G., Fachinetti J.L. Friction and wear of laser treated aluminum - silicon alloys // Laser Treat. Mater. Eur. Conf., Bad Nauheim, 1986: Oberursel, 1987. P. 171-178.

113. Picas J.A., Forn A., Rilla R., Martín E. Mejora de la resistencia al desgaste de aleaciones de aluminio mediante recubrimientos obtenidos por proyecting termica HVOF. *Revista de Metalurgia*. 2005. Vol. 41. P. 197-201.

114. Prieske M., Hasselbruch H., Mehner A., Vollertsen F. Friction and wear performance of different carbon coatings for use in dry aluminium forming processes. *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 357. P. 1048-1059.

115. Lee S. Y., Kim S. H. Metal Nitride Coatings by Physical Vapor Deposition (PVD) for a Wear Resistant Aluminum Extrusion Die. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2014. Vol. 14, № 12. P. 8993-8998(6).

116. Divinski S.V., Dubovitskaya N.V., Franchouk V.I., Larikov L.N., Shmatko O.A. Intermetallic coatings with nano- and quasicrystalline structures on al-based substrates. *Advanced Light Alloys and Composites*. 1998. Vol. 59. P. 495-500.

117. Jiang W., Zhu J., Li G., Guan F., Yu Y., Fan Z. Enhanced mechanical properties of 6082 aluminum alloy via SiC addition combined with squeeze casting. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. Vol. 88. P. 119-131.

118. Hilpert M., Wendt J., Wagner L. Response of aluminum and magnesium alloys to mechanical Surface treatments. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 2000. Vol. 52, № 11. P. 63-73.

119. Hutsaylyuk V., Student M., Zadorozhna Kh., Student O., Veselivska H., Gvosdetskii V., Maruschak P., Pokhmurska H. Improvement of wear resistance of aluminum

alloy by HVOF method. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, Is. 6. P. 16367-16377.

120. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*. 2022. Vol. 12 (10). P. 1536.

121. Pliszka I., Radek N., Gądek-Moszczak A., Dwornicka R., Bronček J. Microstructure of laser-modified electro-sparking coatings. *Technical Transactions*. 2020. Vol. 115. No.10. P. 181-186.

122. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости / Ляшенко Б.А. та ін.; под ред. В.В. Харченко. Киев: Ін-т пробл. прочности ім. Г.С. Писаренко НАН України, 2010. 193 с.

123. Ляшенко Б. А., Мовшович А. Я., Долматов А. И. Упрочняющие покрытия дискретной структуры. *Технологические системы*. 2001. № 4(10). С. 17-25.

124. Ляшенко Б.А., Диган М.С., Верхотуров А.Д. Электроискровое легирование алюминиевых сплавов АЛ25 и АК4М. *Электрофизические и электрохимические методы обработки*. 1983. Вып. 8. С. 5-6.

125. Renna G., Leo P., Casalino G., Cerri E. Repairing 2024 Aluminum Alloy via Electrospark Deposition Process: A Feasibility Study. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 2018:(2018). P. 1-11.

126. Tarel'nyk, V.B., Gaponova, O.P., Loboda, V.B., Konoplyanchenko, E.V., Martsinkovskii, V.S., Semirnenko, Yu.I., Tarel'nyk, N.V., Mikulina, M.A., Sarzhanov B.A. Improving ecological safety when forming wear-resistant coatings on the surfaces of rotation body parts of 12Kh18N10T steel using a combined technology based on electrospark alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem*. 2021. Vol. 57. P. 173-184.

127. Духота А. И., Лабунец В. Ф., Жигинас В. В. Абразивная стойкость электроискровых и комбинированных лазерно- электроискровых покрытий на легких сплавах. *Проблеми тертя та зношування*. 2007. Вип. 48. С. 185-195.

128. Верхотуров А.Д., Муха К.М. Технология электроискрового легирования. Киев: Техника, 1982. 182 с.

129. Керамічний електродний матеріал на основі нітриду алюмінію для електроіскрового легування алюмінію та його сплавів: пат. 79775 України. № 20041008518; заявл. 20.10.2004; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11. 4с.

130. Соловьёв Е. К., Ляшенко Б. А., Посвятенко Э. К. Износостойкость алюминиевого сплава с дискретным электроискровым покрытием. *Проблеми тертя та зношування*. 2006. Вип. 46. С. 106-118.

131. Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью / Ляшенко Б. А., Кузема Ю. А., Дигам М. С., Цыгулев О. В. Киев: ИПП АН УССР, 1984. 57 с.

132. Посвятенко Э. К., Соловых Е. К., Ляшенко Б. А. и др. Тенденции повышения износостойкости поршней ДВС. *Вісник Національного транспортного університету*. 2006. Ч.1. Вип. 13. С.13-21.

133. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Техническое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. Запорожье: Мотор Сич, 2006. 335 с.

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

135. Запорожець В.В., Стадниченко В. М., Токарук В. В. Динамика задиростойкости и переходные процессы при износе электроискровых покрытий. *Проблеми трибології*. 2010. № 4. С. 47-51.

136. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич и др.; под ред. Петрова Ю.Н. Кишинев: Штиинца, 1985. 198 с.

137. Рычков С. П. MSC visual NASTRAN для Windows. Москва: НТ Пресс, 2004. 552 с.

138. Запорожец В.В., Стадниченко В.Н. Автоматизированные системы трибодиагностики контактных взаимодействий. *Трение и износ*. 2015. Т. 36. № 2. С. 315-324.

139. Стахова А. П. Приладова система для вимірювання механічних напружень на основі явища акустичної емісії: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01. Київ, 2017. 183 с.

140. Стадниченко В.Н. Автоматизированная система трибодиагностики. *Проблеми тертя та зношування*. 2006. Вип. 46. С. 51-63.

141. Запорожец В.В., Стадниченко В.Н., Трошин О.Н. Особенности аппаратной регистрации и обработки акусто - эмиссионного излучения при идентификации процессов трения и изнашивания. *Проблеми трибології*. 2014. № 1. С. 19-26.

142. Запорожец В.В., Стадниченко В.Н., Токарук В.В. Динамика задиристости и переходные процессы образцов с электроискровыми покрытиями. *Проблеми трибології*. 2010. № 4. С. 47-52.

143. Запорожец В.В., Стадниченко В.М., Токарук В.В. Критерії оцінювання механізму дисипації енергії та прогнозування ресурсу при акусто-емісійній діагностиці аксіально-поршневих гідромашин. *Проблеми тертя та зношування*. 2010. Вип. 54. С. 5-19.

144. Игнатович С. Р., Закиев И.М., Закиев В.И. Определение микромеханических характеристик поверхности материалов с использованием наноиндентометра «Микрон-гамма». *Вестник ХНАДУ*. Харьков, 2008. №42. С. 36-39 [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-mikromehaniceskikh-harakteristik-poverhnosti-materialov-s-ispolzovaniem-nanoindentometra-mikron-gamma> (дата звертання: 28.08.2021).

145. 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.

146. Токарук В. В., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Жосан О. Ю., Долот Д.В. Аналіз міцнісних характеристик електроіскрових покриттів. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 3 (92). С. 47-53.

147. Бутенко Т.І., Колінько С.О., Ващенко В.А. Контроль структури, елементного та фазового складу матеріалів: Конспект лекцій. Черкаси: ЧДТУ, 2021. 75 с.

148. 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.

149. 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.

150. Ляшенко Б. А., Волков Ю. В., Соловых Е. К., Солових Є. К., Лопата Л. А. Повышение износостойкости деталей судовых машин и механизмов покрытиями дискретной структуры электроконтактным припеканием. *Проблеми тертя та зношування*. 2005. Вип. 2(67). С.110-126.

151. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. Київ, 2007. 40 с.

152. Liang N., Zhao Y., Wang J., Zhu Y. Effect of grain structure on Charpy impact behavior of copper. *Scientific reports*. 2017. Vol. 7:44783. P.1-11

153. Van Acker K., Vanhoyweghen D., Persoons R., Vangrunderbeek J. Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings. *Wear*. 2005. Vol. 258(1). P.194-202.

154. Zhengchuan, Z., Guanjun, L., Konoplianchenko, I., Tarellyk, V. B., Zhiqin, G., & Xin, D. (2022). A review of the electro-spark deposition technology. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. 2021. Vol. 2 (44), P. 45-53.

155. Nikolenko S. V., Verkhoturov A. D., Syui N. A., Kuz'michev E. N. Influence of Electrospark Discharge Parameters on Roughness and Microabrasive Wear of Steel 45 Surface after ESA by TiC-Based Electrodes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016. Vol. 52(44). P. 342-349.

156. Ciołek S., Józwiak S., Karczewski K. Possibility of Strengthening Aluminum Using Low-Symmetry Phases of the Fe-Al Binary System. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2019. Vol. 50. P. 1914-1921.

157. Bigerelle M., Iost A. A numerical method to calculate the Abbott parameters: a wear application. *Tribology International*. 2007. Vol. 40 (9). P.1319-1334.

158. Radek N., Bartkowiak K. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*. 2010. Vol. 5, Part A. P. 417-423.

159. DIN 4776-1990 Determination of surface parameters Rk, Rpk, Ruk, Mr1, Mr2 serving to describe the material component of the roughness profile. MCS 17.040.20. 5p.

160. Dzyura V., Maruschak P., Slavov S., Gurey V., Prentkovskis O. Evaluating Service Characteristics of Working Surfaces of Car Parts by Microgeometric Quality Parameters. *Machines*. 2021. Vol. 366. No 9. P. 1-10.

161. Minakov A. P., Kamchitskaya I. D., Zaitsev D. L., Tyukov A. V. Resource-saving pneumovibrodynamic hardening of plane surfaces for repair and production processes. *Engineering Research*. 2009. Vol. 29; Iss. 7. P. 678-686.

162. Игнатович С. Р., Закиев И. М., Закиев В. И. Определение микромеханических характеристик поверхности материалов с использованием наноиндентометра «Микрон-гамма». *Вестник Харьковского национального авт.-дор. ун-та*. 2008. Т. 42. С. 86-90.

163. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Борисов Д.И. Оценка структурно-деформационной неоднородности тонкого поверхностного слоя материалов методом царапания. *Пробл. прочности*. 2008. № 3. С. 70-81.

164. 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.*

165. 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.

166. Al-Quraan T. M., Mikosyanchik O. O., Mnatsakanov R. G. Temperature Resistance of the Boundary Lubrication Layers Under Rolling With Slippage Condition. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*. 2017. Vol. 5. № 2. P. 78-86.

167. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*. 2006. Vol. 51. P. 427-556.

168. Kaplunov I. A., Kolesnikov A. I., Skokov K. P., Grechishkin R. M., Sedova L. V., Tret'yakov S. A. The relationship between mechanical stresses and optical anomalies in germanium and paratellurite. *Journal of Optical Technology*. 2005. Vol. 72, Is. 7. P. 572-576.

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

170. Lienert U., Han T. S., Almer J., Dawson P. R., Leffers T., Margulies L., Nielsen S. F., Poulsen H. F., Schmidt S. Investigating the effect of grain interaction during plastic deformation of copper. *Acta Materialia*. 2004. Vol. 52. P. 4461-4467.

171. Стадниченко В. Н., Варваров В. В. Методология применения метода акустической эмиссии для прогнозирования ресурса агрегатов авиационной техники. *Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки: наук. практич. конф.* Київ: ДНДІА, 2013. С. 27.

172. Варваров В.В. Аналіз механізмів дисипації зовнішньої енергії при аномально низькому терті та зношуванні. *Молодь і сільськогосподарська техніка у ХХІ сторіччі: XV Міжнар. форум молоді*. Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2019. С. 11.

173. Варваров В.В. Підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. Харків, 2021. 192 с.

174. Костецький Б.И., Колесниченко Н.Ф. Качество поверхности и трение в машинах. Киев: Техника, 1969. 214 с.

175. Марченко Д. Д. Ремонт машино-тракторного парку: метод. реком. Миколаїв: МНАУ, 2021. 95с.

176. 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.

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

178. Філоненко С.Ф., Німченко Т.В. Вплив глибини різання на закономірності зміни параметрів акустичного випромінювання. *Сучасні авіаційно-космічні технології*. 2012. №3. С. 101–108.

179. 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.

180. Landis E. N., Baillon L. Experiments to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. 2002. Vol. 128 (6). P. 698-702.

181. Kravchuk R., Landis E. N. Acoustic emission-based classification of energy dissipation mechanisms during fracture of fiber-reinforced ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 176 (21). P. 531-538.

182. Casiez N., Deshanel S., Monnier T., Lame O. Acoustic emission from the initiation of plastic deformation of Polyethylenes during tensile tests. *Polymer, Elsevier*. 2014. Vol. 55. P. 6561-6568.

183. Filonenko S. Acoustic emission model with thermoactivative destruction of composite material surface. *Proceedings of the National Aviation University*. 2015. №1 (62). P. 57-62.

184. Станкевич О.М. Застосування вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії для оцінювання макроруйнування конструкційних матеріалів. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2015. №1. С. 36-44.

185. Gershman I. S., Mironov A. E., Gershman E. I., Fox-Rabinovich G. S., Veldhuis S. C. Self-organization during friction of slide bearing antifriction materials. *Entropy*. 2015. Vol. 17. P.7967-7978.

186. Gershman I.S., Buche N.A. Realization of dissipative selforganization of friction surface of tribosystems. *Wear*. 1995. Vol. 16. P.61-70.

187. Vasiliev M. O., Voloshko S. M., Yatsenko L. F. Mechanochemical Oxidation of a Surface of Metal Alloys under the Impact of Severe Plastic Deformation. *Usp. Fiz. Met.* 2014. Vol. 15, No. 2. P. 79-100.

188. Любич О.Й., Пчелінцев В.О. Фізичні основи металургії кольорових та рідкоземельних металів: навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2009. 226 с.

189. Sekhar S.A. Self organization generation rate and bandary defects: a control volume approach. *Entropy*. 2021. Vol. 23. No 1092. 24 p.

190. Ivanov A. V., Mitrofanova O. V. Consistency of the least squares estimates of trigonometric regression model parameters in the presence of linear random noise. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту*. 2020. вип. 37. №2. С. 54-65.

ДОДАТКИ

А. Результати моделювання напружено-деформованого стану трибосистеми сталь 30ХГСА – неармований / армований дискретним ЕП дюралюміній Д16 в SolidWorks.

Б. Список публікацій за темою дисертації.

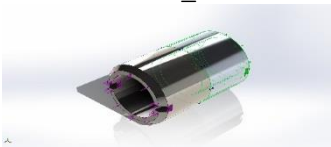
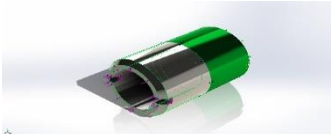
В. Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

Г. Технологіний процес зміцнення деталей.

Д. Порівняння режимів обробки поверхні дюралюміній Д16 дискретним ЕП.

Результати моделювання напружено-деформованого стану в SolidWorks

Simulation of 41CrMo4 - 2024

Solid Bodies		
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties
2024_1 	Solid Body	Mass:0,0178731 kg Volume:6,38326e-06 m ³ Density:2 800 kg/m ³ Weight:0,175157 N
41CrMo4_1 	Solid Body	Mass:0,0497894 kg Volume:6,38326e-06 m ³ Density:7 800 kg/m ³ Weight:0,487936 N

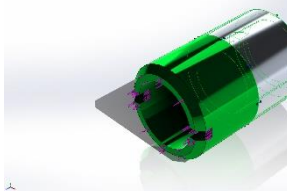
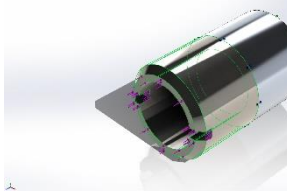
Study Properties

Study name	F=100H
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	25 Celsius
Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation	Off
Solver type	Automatic
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SOLIDWORKS document

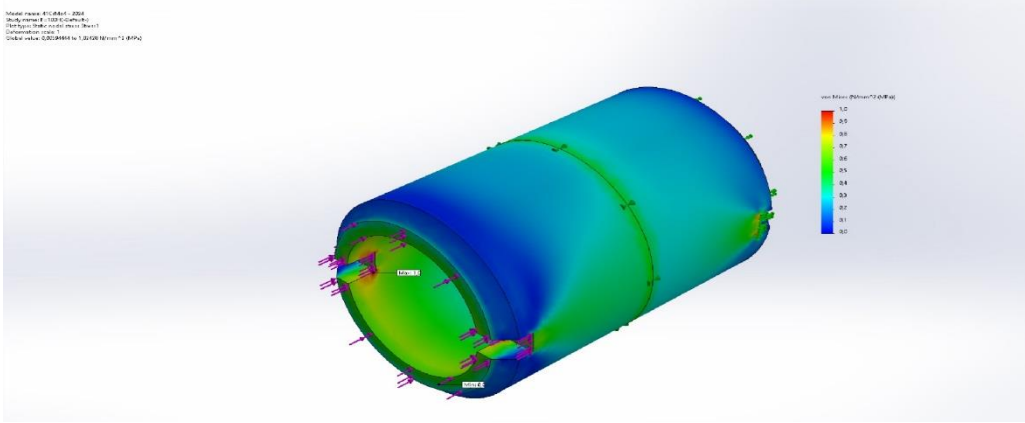
Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	micron
Temperature	Celsius
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/mm ² (MPa)

Material Properties

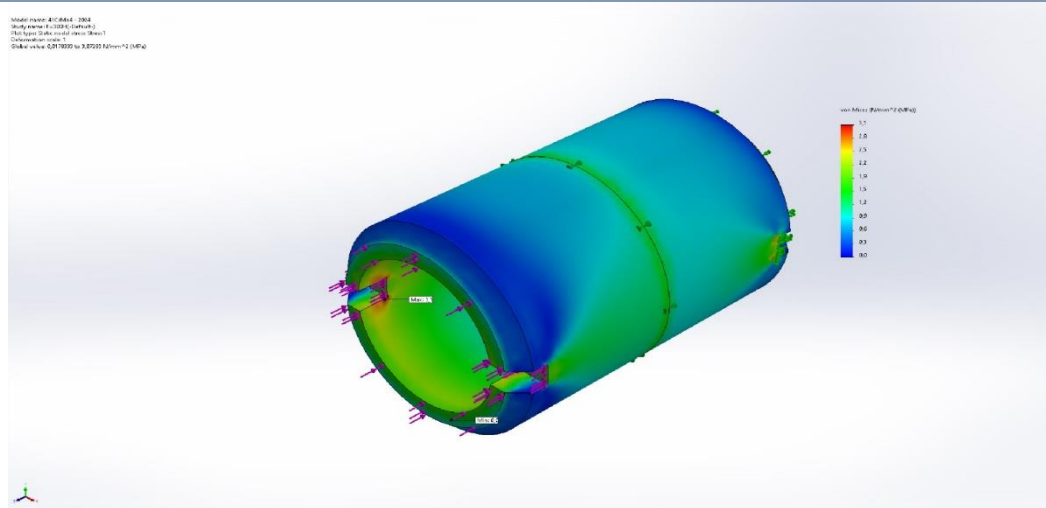
Model Reference	Properties	Components
	Name: 2024 Alloy	SolidBody 1(2024_1)(Aluminium 2024-1)
	Model type: Linear Elastic Isotropic	
	Default failure criterion: Unknown	
	Yield strength: 75,8291 N/mm²	
	Tensile strength: 186,126 N/mm²	
	Elastic modulus: 73 000 N/mm²	
	Poisson's ratio: 0,33	
	Mass density: 2,8 g/cm³	
	Shear modulus: 28 000 N/mm²	
	Thermal expansion coefficient: 2,3e-05 /Kelvin	
Curve Data:N/A		
	Name: 1.7223 (41CrMo4)	SolidBody 1(41CrMo4_1)(Steel 41CrMo4-1)
	Model type: Linear Elastic Isotropic	
	Default failure criterion: Unknown	
	Yield strength: 760 N/mm²	
	Tensile strength: 980 N/mm²	
	Elastic modulus: 190 000 N/mm²	
	Poisson's ratio: 0,28	
	Mass density: 7,8 g/cm³	
	Shear modulus: 79 000 N/mm²	
	Thermal expansion coefficient: 1,1e-05 /Kelvin	
Curve Data:N/A		

Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0,0N/mm ² (MPa)	10,0N/mm ² (MPa)
 <p>41CrMo4 - 2024-F=100H-Stress-Stress1</p>			
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0,00micron	0,17micron
41CrMo4 - 2024-F=100H-Displacement-Displacement1			

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0,0N/mm ² (MPa)	31N/mm ² (MPa)

Model name: 41CrMo4 - 2024-F=300H-Stress1
 Study name: 41CrMo4 - 2024-F=300H-Stress1
 Plot type: Stress (von Mises Stress)
 Color map: von Mises Stress
 Scale: von Mises Stress to 31,000 N/mm² (MPa)

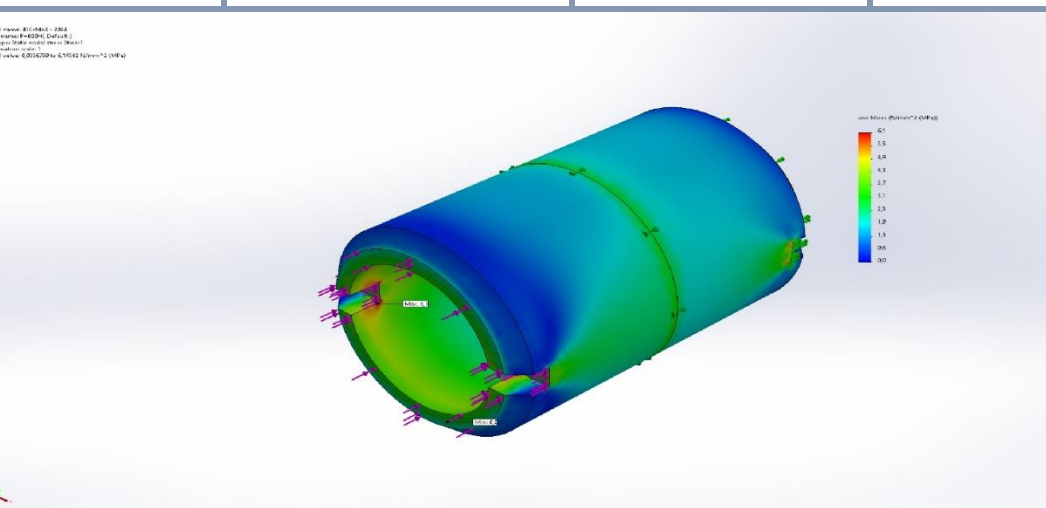


41CrMo4 - 2024-F=300H-Stress1

Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0,00micron	0,50micron

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0,0N/mm ² (MPa)	61N/mm ² (MPa)
		Node: 77117	Node: 76422

Model name: 41CrMo4 - 2024-F=600H-Stress1
 Study name: 41CrMo4 - 2024-F=600H-Stress1
 Plot type: Stress (von Mises Stress)
 Color map: von Mises Stress
 Scale: von Mises Stress to 61,000 N/mm² (MPa)

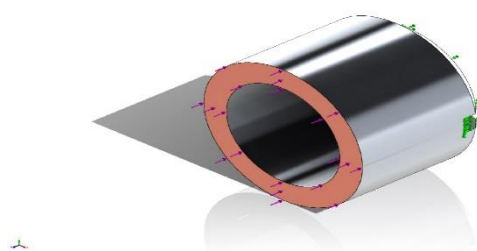


41CrMo4 - 2024-F=600H-Stress1

Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0,00micron	1,00micron

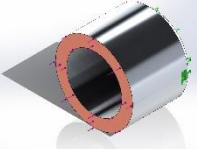
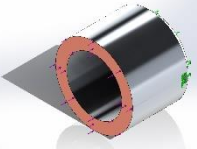
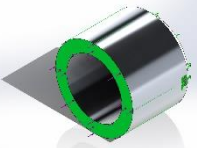
Simulation of 2024(BK8+Cu)

Model Information

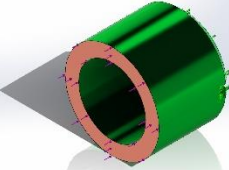
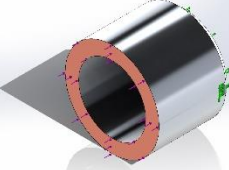
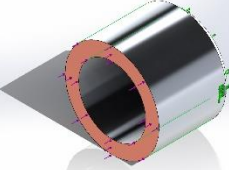


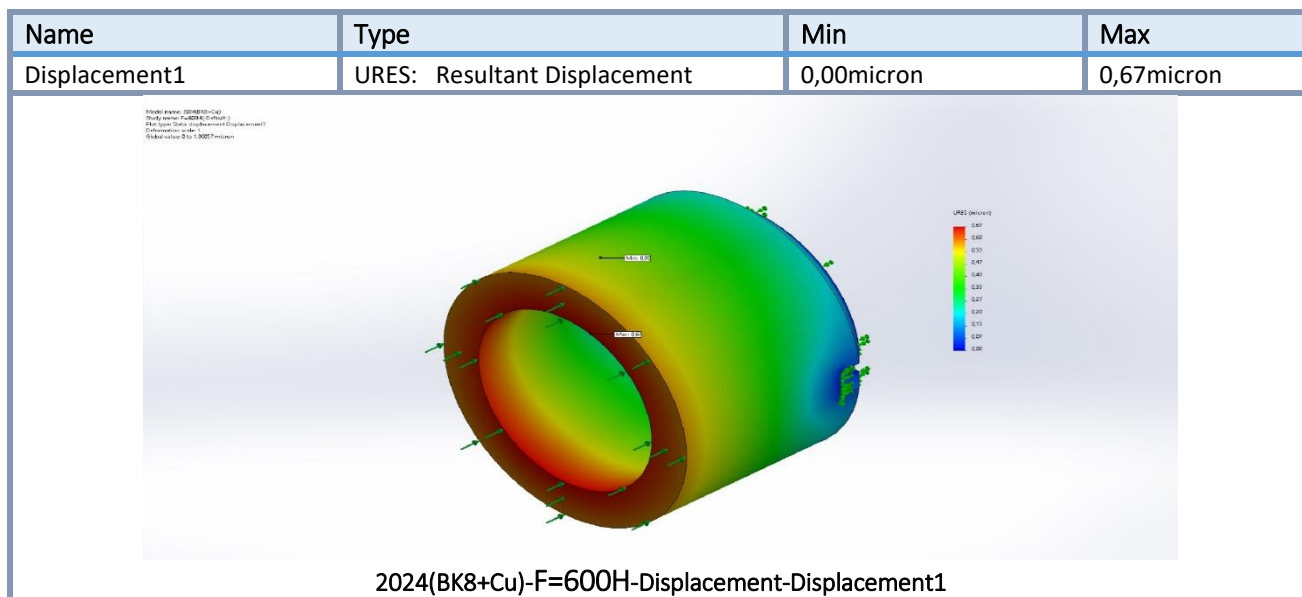
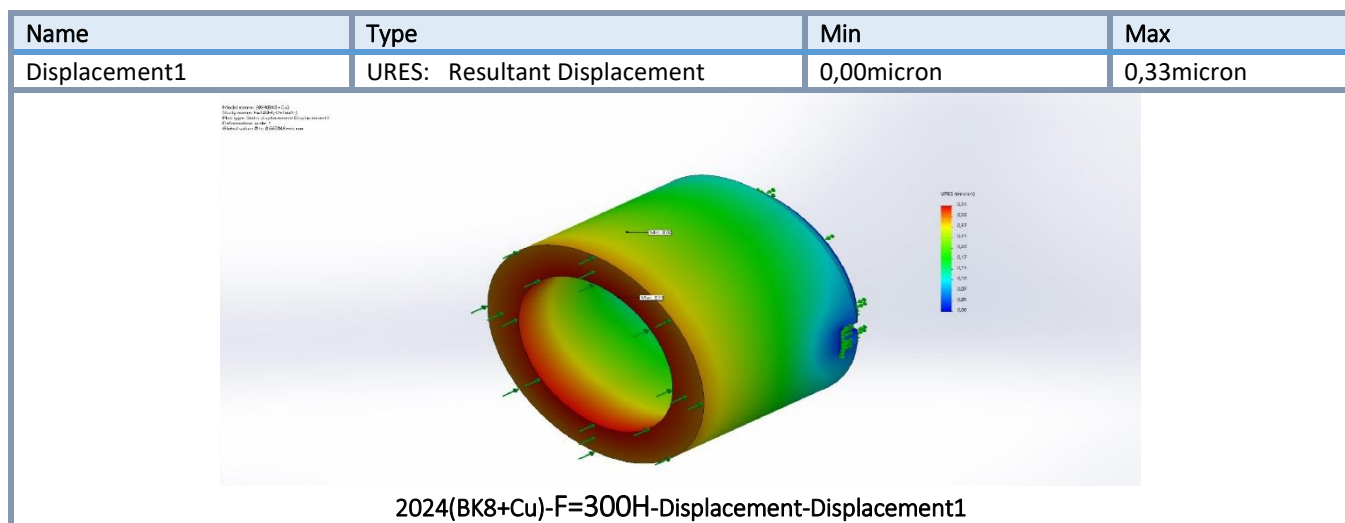
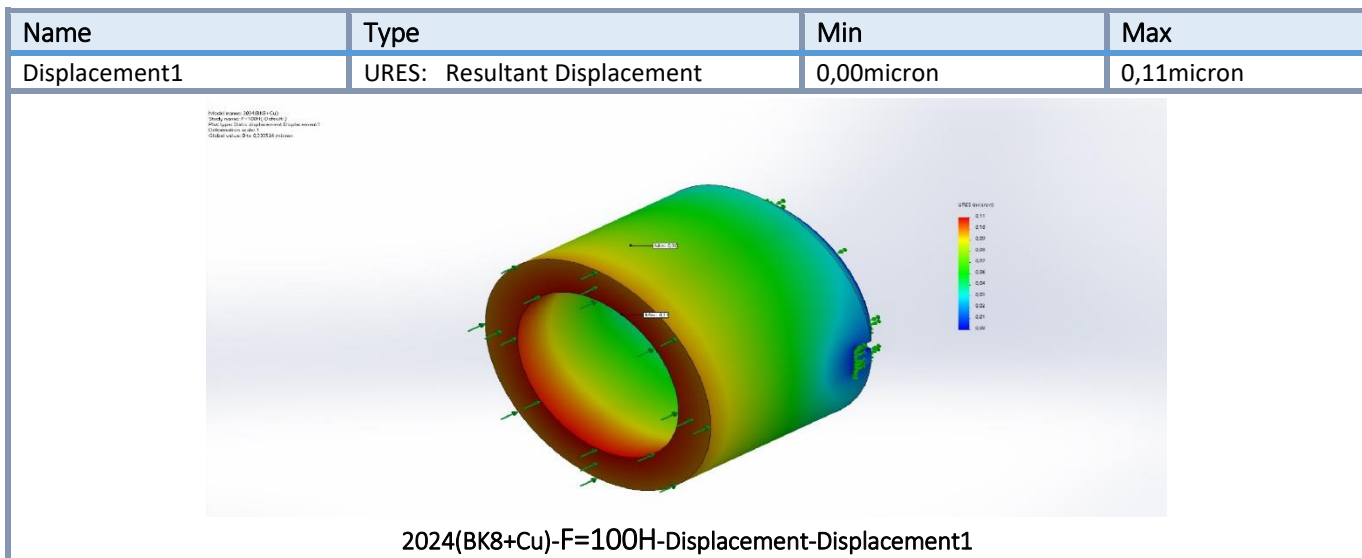
Model name: 2024(BK8+Cu)
Current Configuration: Default

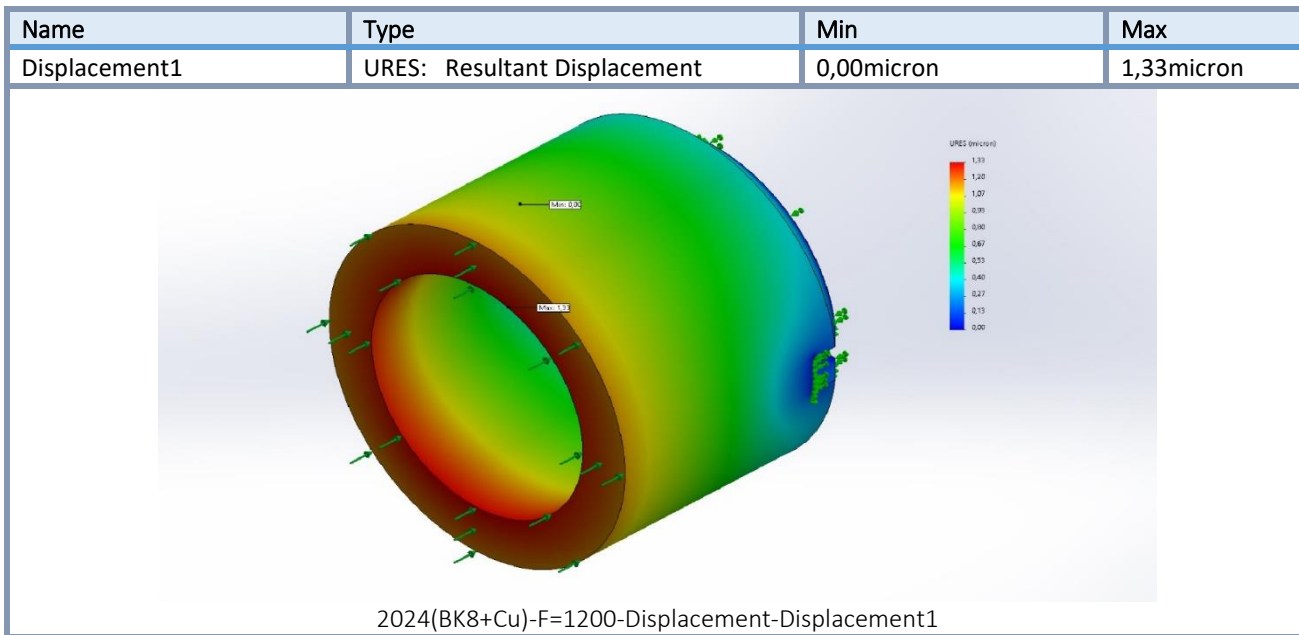
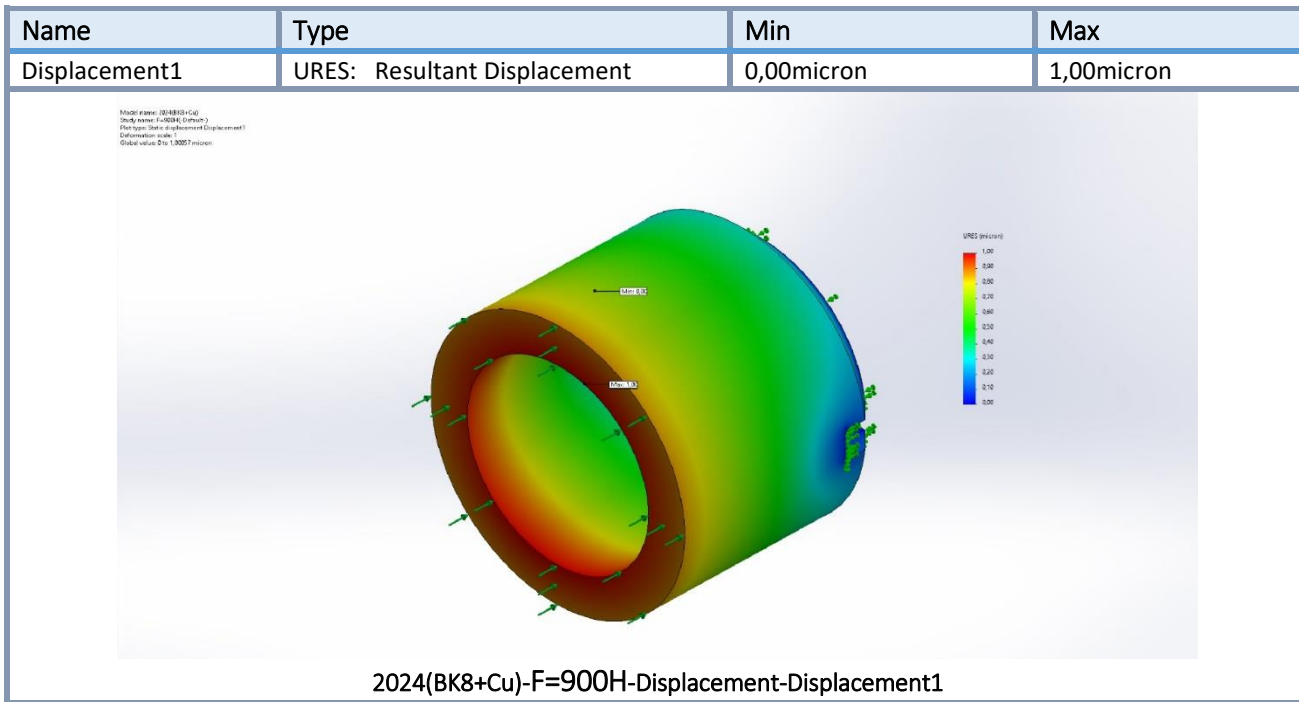
Solid Bodies

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
BK8 layer 	Solid Body	Mass:4,40326e-06 kg Volume:3,01593e-10 m ³ Density:14 600 kg/m ³ Weight:4,31519e-05 N	C:\Users\Александр\Desktop\Анализ М\2024(BK8+Cu).SLDPRT Feb 1 21:00:47 2022
Copper layer 	Solid Body	Mass:2,68418e-06 kg Volume:3,01593e-10 m ³ Density:8 900 kg/m ³ Weight:2,63049e-05 N	C:\Users\Александр\Desktop\Анализ М\2024(BK8+Cu).SLDPRT Feb 1 21:00:47 2022
2024_1 	Solid Body	Mass:0,0178731 kg Volume:6,38326e-06 m ³ Density:2 800 kg/m ³ Weight:0,175157 N	C:\Users\Александр\Desktop\Анализ М\2024(BK8+Cu).SLDPRT Feb 1 21:00:47 2022

Material Properties

Model Reference	Properties	Components																						
	<table border="1"> <tr> <td>Name:</td> <td>BK8</td> </tr> <tr> <td>Model type:</td> <td>Linear Elastic Isotropic</td> </tr> <tr> <td>Default failure criterion:</td> <td>Unknown</td> </tr> <tr> <td>Yield strength:</td> <td>1 500 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Tensile strength:</td> <td>1 660 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Compressive strength:</td> <td>2 000 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Elastic modulus:</td> <td>6e+11 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Poisson's ratio:</td> <td>0,196</td> </tr> <tr> <td>Mass density:</td> <td>14,6 g/cm³</td> </tr> <tr> <td>Shear modulus:</td> <td>2,5e+11 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Thermal expansion coefficient:</td> <td>5e-06 /Kelvin</td> </tr> </table>	Name:	BK8	Model type:	Linear Elastic Isotropic	Default failure criterion:	Unknown	Yield strength:	1 500 N/mm²	Tensile strength:	1 660 N/mm²	Compressive strength:	2 000 N/mm²	Elastic modulus:	6e+11 N/mm²	Poisson's ratio:	0,196	Mass density:	14,6 g/cm³	Shear modulus:	2,5e+11 N/mm²	Thermal expansion coefficient:	5e-06 /Kelvin	SolidBody 1 (BK8 layer) (Aluminium 2024)
Name:	BK8																							
Model type:	Linear Elastic Isotropic																							
Default failure criterion:	Unknown																							
Yield strength:	1 500 N/mm²																							
Tensile strength:	1 660 N/mm²																							
Compressive strength:	2 000 N/mm²																							
Elastic modulus:	6e+11 N/mm²																							
Poisson's ratio:	0,196																							
Mass density:	14,6 g/cm³																							
Shear modulus:	2,5e+11 N/mm²																							
Thermal expansion coefficient:	5e-06 /Kelvin																							
	<table border="1"> <tr> <td>Name:</td> <td>Copper</td> </tr> <tr> <td>Model type:</td> <td>Linear Elastic Isotropic</td> </tr> <tr> <td>Default failure criterion:</td> <td>Unknown</td> </tr> <tr> <td>Yield strength:</td> <td>258,646 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Tensile strength:</td> <td>394,38 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Elastic modulus:</td> <td>110 000 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Poisson's ratio:</td> <td>0,37</td> </tr> <tr> <td>Mass density:</td> <td>8,9 g/cm³</td> </tr> <tr> <td>Shear modulus:</td> <td>40 000 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Thermal expansion coefficient:</td> <td>2,4e-05 /Kelvin</td> </tr> </table>	Name:	Copper	Model type:	Linear Elastic Isotropic	Default failure criterion:	Unknown	Yield strength:	258,646 N/mm²	Tensile strength:	394,38 N/mm²	Elastic modulus:	110 000 N/mm²	Poisson's ratio:	0,37	Mass density:	8,9 g/cm³	Shear modulus:	40 000 N/mm²	Thermal expansion coefficient:	2,4e-05 /Kelvin	SolidBody 2 (Copper layer) (Aluminium 2024)		
Name:	Copper																							
Model type:	Linear Elastic Isotropic																							
Default failure criterion:	Unknown																							
Yield strength:	258,646 N/mm²																							
Tensile strength:	394,38 N/mm²																							
Elastic modulus:	110 000 N/mm²																							
Poisson's ratio:	0,37																							
Mass density:	8,9 g/cm³																							
Shear modulus:	40 000 N/mm²																							
Thermal expansion coefficient:	2,4e-05 /Kelvin																							
	<table border="1"> <tr> <td>Name:</td> <td>2024 Alloy</td> </tr> <tr> <td>Model type:</td> <td>Linear Elastic Isotropic</td> </tr> <tr> <td>Default failure criterion:</td> <td>Unknown</td> </tr> <tr> <td>Yield strength:</td> <td>75,8291 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Tensile strength:</td> <td>186,126 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Elastic modulus:</td> <td>73 000 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Poisson's ratio:</td> <td>0,33</td> </tr> <tr> <td>Mass density:</td> <td>2,8 g/cm³</td> </tr> <tr> <td>Shear modulus:</td> <td>28 000 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Thermal expansion coefficient:</td> <td>2,3e-05 /Kelvin</td> </tr> </table>	Name:	2024 Alloy	Model type:	Linear Elastic Isotropic	Default failure criterion:	Unknown	Yield strength:	75,8291 N/mm²	Tensile strength:	186,126 N/mm²	Elastic modulus:	73 000 N/mm²	Poisson's ratio:	0,33	Mass density:	2,8 g/cm³	Shear modulus:	28 000 N/mm²	Thermal expansion coefficient:	2,3e-05 /Kelvin	SolidBody 3 (2024_1) (Aluminium 2024)		
Name:	2024 Alloy																							
Model type:	Linear Elastic Isotropic																							
Default failure criterion:	Unknown																							
Yield strength:	75,8291 N/mm²																							
Tensile strength:	186,126 N/mm²																							
Elastic modulus:	73 000 N/mm²																							
Poisson's ratio:	0,33																							
Mass density:	2,8 g/cm³																							
Shear modulus:	28 000 N/mm²																							
Thermal expansion coefficient:	2,3e-05 /Kelvin																							





Список публікацій за темою дисертації.**Монографія**

1. Mikosianchyk 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 (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. (категорія Б)

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 (категорія Б).

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

8. Запорожець В.В., Стадниченко В.В., Токарук В.В. Динамика задиростойкости и переходные процессы при износе электроискровых покрытий. *Проблеми трибології*. 2010. № 4. С. 47-51. (категорія Б).

9. Запорожець В.В., Стадниченко В.В., Токарук В.В. Критерії оцінювання механізму дисипації енергії та прогнозування ресурсу при акусто-емісійній діагностиці аксиально-поршневих гідромашин. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2010. Вип. 54. С.5-18. (категорія Б).

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 (категорія Б)

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. (категорія Б).

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. (категорія Б).

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 (категорія Б).

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 (категорія Б).

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 30HGSA 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 (категорія Б).

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 (категорія Б)

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 (категорія Б).

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 (категорія Б).

20. Токарук В. В., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Жосан О. Ю., Долот Д.В. Аналіз міцнісних характеристик електроіскрових покриттів. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 3 (92). С. 47-53. DOI: 10.18372/0370-2197.3(92).15936 (категорія Б).

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 (категорія Б).

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., Mikosianchuk 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 нанопокрывтий 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., Mikosianchuk 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 chemmotology. 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. Моделювання процесів зношування зубчастого зачеплення. *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.

Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заст. директора
Інституту проблем міцності імені
Г.С. Писаренка НАН України

 Андрій КОТЛЯРЕНКО

22 " 12 2022 р.

АКТ

Використання наукових результатів, отриманих
Старшим викладачем кафедри «Підтримання льотної придатності повітряних
суден», Аерокосмічного факультету Національного Авіаційного
Університету, Токаруком Віталієм Володимировичем

Комісія у складі співробітників відділу №6 та лабораторії 6.1. Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, зав. відділу №6 к.т.н., с.н.с. Буйських Костянтина Павловича, зав. лаб. №6.1 к.т.н. Калініченка В.І. та с.н.с. к.т.н., с.н.с. Рутковського А.В. склали даний акт про те, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Старшим викладачем кафедри «Підтримання льотної придатності повітряних суден», Аерокосмічного факультету Національного Авіаційного Університету, Токаруком В.В. 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.

Поверхневий шар матеріалу Д16 модифікувався шляхом нанесення комбінованого дискретного покриття твердого сплаву ВК8 і міді за допомогою методу електроіскрового легування (ЕІЛ). 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.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану основа –покриття 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 для зазначених матеріалів в 1,95 : 1,14 : 1,81 рази та в основі в 1,52 : 1,33 : 1,65 рази.

Визначено оптимальний роботоздатний стан дискретних ЕІЛ покриттів зі щільністю 55 – 65%, який характеризується мінімальними показниками зносу та усередненої потужності за рахунок зниження напружено-

деформованого стану покриття та основи при оптимізації дискретності покриття, розподілу контактних навантажень, формуванні оптимальної геометрії поверхні.

Проведене моделювання НДС дискретного ЕІЛ – основа встановило наступні переваги застосування комбінованої технології формування зносостійких ЕІЛ покриттів: на вершинах покриття змінюється величина і знак залишкових напружень – напруження розтягу після ЕІЛ перетворюються на напруження стиску; при використанні в якості покриття твердого сплаву ВК-8 та міді локалізація головних нормальних напружень спостерігається в сформованому покритті, на відміну від покриття з міді; в матеріалі основи дюралюмінію Д16 при модифікуванні покриттям ВК-8 + Сu формуються напруження стиску. Зазначені чинники сприяють підвищенню зносостійкості контактних поверхонь: при терті в умовах ковзання встановлено зростання зносу контактної поверхні Д-16+ВК-8 в 4,6 рази, модифікування основи покриттям Сu та комбінованим покриттям ВК-8+Сu забезпечує зниження зносу в 5 та 2 рази відповідно, в порівнянні з немодифікованим покриттям основи Д16.

Зав.відділу №6
к.т.н., с.н.с.



Костянтин БУЙСЬКИХ

Зав.лаб №6.1
к.т.н.



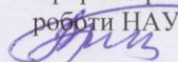
Віталій КАЛІНІЧЕНКО

С.н.с. к.т.н., с.н.с.



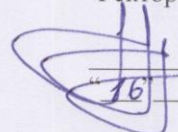
Анатолій РУТКОВСЬКИЙ

“ПОГОДЖЕНО”

Проректор з навчальної
роботи НАУ

Анатолій ПОЛУХІН
“13” 01 2023 р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Ректор НАУ


Максим ЛУЦЬКИЙ
“16” 01 2023 р.
**АКТ**про впровадження у навчальний процес
Національного авіаційного університету

наукових результатів дисертаційної роботи Токарука Віталія Володимировича
«Підвищення зносостійкості дюралюмінієвого сплаву Д16 модифікацією поверхневого шару методом електроіскрового легування»

Комісія у складі :

голова комісії	Свирід М.М.	к.т.н., заступник декана АКФ,
та членів комісії	Захарченко В.П.	к.т.н., завідувач кафедри АЕМ;
	Семак І.В.	старший викладач кафедри ПМіМ;
	Терешенко Ю.М.	д.т.н., завідувач кафедри АД;
	Бадах В.М.	к.т.н., завідувач кафедри ГТС;
	Семитківська Т.О.	к.т.н., доцент кафедри АДіБП,

яка діє на підставі розпорядження декана АКФ Національного авіаційного університету від 20.09.2022 року за № 37, засвідчує, що результати дисертаційної роботи старшого викладача кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден Аерокосмічного факультету за темою «Підвищення зносостійкості дюралюмінієвого сплаву Д16 модифікацією поверхневого шару методом електроіскрового легування» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук впроваджені у навчальний процес кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів та кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден:

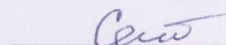
- шляхом розробки практичної роботи «Реалізація позитивного градієнту механічних властивостей металу при терті» з дисципліни «Триботехніка та основи надійності машин» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»;
- шляхом використання в курсах лекцій з дисциплін «Матеріалознавство» та «Технології композиційних матеріалів» для спеціальності 272;
- при виконанні двох кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 272 «Авіаційний транспорт», Освітньо-професійна програма «Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів».

Голова комісії



Михайло СВИРИД

Секретар комісії



Інна СЕМАК

ТОВ «АВАНТИ Груп»



ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «АВАНТИ Груп»
 В.С. Цюкан
 " 2 " 01 2023 р.



АКТ

про реалізацію результатів наукових досліджень

Токарука Віталія Володимировича

Комісія у складі:

голови комісії – директор, Цюкан Вадим Сергійович.

та членів комісії – головний інженер, Слободський Сергій Анатолійович

встановила, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Токаруком В.В., реалізовані в розробленій енергозберігаючої технології нанесення на поверхню дюралюмінію Д16 дискретного комбінованого електроіскрового покриття зі сплаву ВК8 та міді з наступною поверхневопластичною деформацією. Розроблена технологія дає можливість підвищити твердість, зносостійкість та розширити навантажувальний діапазон працездатного стану модифікованої поверхні деталей.

р/р 26006038587101
 в АТ «УКРСИББАНК» м. Київ,
 МФО 351005
 ЄДРПОУ 30440060
 www.man-ag.com.ua

Юр. адреса: 02068, м. Київ,
 вул. Ревуцького, 16-А
 03170, м. Київ, вул. Велика Кільцева, 2
 Тел.: +380 44 585 21 40
 Kiev@man-ag.com.ua

ТОВ «АВАНТІ Груп»



Також, розроблена технологія, дозволяє оптимізувати технологічні процеси нанесення дискретного комбінованого електроіскрового покриття при зміцненні, ремонті та відновленні підшипників ковзання турбокомпресора двигунів внутрішнього згоряння автомобільної техніки, та забезпечує зменшення швидкості зношування, та підвищення між ремонтного ресурсу деталей.

Голова комісії: _____

Члени комісії: _____



В.С. Цюкан

С.А. Слободський

р/р 26006038587101
в АТ «УКРСИББАНК» м. Київ,
МФО 351005
ЄДРПОУ 30440060
www.man-ag.com.ua

Юр. адреса: 02068, м. Київ,
вул. Ревуцького, 16-А
03170, м. Київ, вул. Велика Кільцева, 2
Тел.: +380 44 585 21 40
Kiev@man-ag.com.ua

NEOPLAN **MAN**

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «ПОДОЛІЯ-АГРО»
 Вінницька обл., Вінницький р-н,
 село Сокиринці, вул. Космонавтів буд. 7
 О. В. КАШУБА
 _____ 2023 р.



АКТ
про реалізацію наукових досліджень

Токарука Віталія Володимировича

Комісія у складі:

Голови – головний інженер, Берловит О.В.

та членів комісії – головний технолог, Войтенко В.М.
 інженер, Савчук Л.П.

розглянула результати наукових досліджень старшого викладача Національного авіаційного університету Токарука В.В. щодо можливості підвищення триботехнічних і міцнісних характеристик підшипників ковзання промислового маслопресу ПМ 450 для віджиму олії соняшникової, шляхом заміни підшипників ковзання з латуні на дюралюміній Д16 з дискретним електроіскровим покриттям з ефективними мікрогеометричними та міцнісними характеристиками.

На підставі даних, що отримані при науково-технічних та експериментальних дослідженнях, які були проведені в Національному авіаційному університеті комісія встановила, що запропоновані нові технологічні рішення щодо підвищення довговічності промислового маслопресу ПМ 450 шляхом заміни підшипників ковзання з латуні на модифікований дюралюміній Д16 дискретним електроіскровим покриттям ВК8+Cu можуть бути використані під час ремонту та модернізації обладнання.

Голова комісії:

БЕРЛОВИТ О.В.

Члени комісії:

ВОЙТЕНКО В.М.

САВЧУК Л.П.

Технологіний процес зміцнення деталей

1. Технологіний процес електроіскрового легування.

1.1. Технологіний процес електроіскрового легування (ЕІЛ) відбувається у повній відповідності з інструкцією з експлуатації установки «Элитон-22».

1.2. Технологіний процес ЕІЛ складається з наступних операцій:

- вибір поверхні, які підлягають ЕІЛ;
- підготовка поверхні до ЕІЛ;
- вибір схеми проведення процесу ЕІЛ;
- вибір легуючих електродів;
- вибір енергетичного режиму установки;
- контроль якості покриття.

1.3. Електроіскровому легуванню підлягають робочі поверхні деталей.

1.4. Перед нанесенням покриття поверхня, яку зміцнюють, повинна бути очищена від бруду та знежирена.

1.5. Вихідна шорсткість поверхонь, які підлягають обробці ЕІЛ повинна на перевищувати наступні значення

- 1,6 мкм – для покриття товщиною до 0,03 мм;
- 2,5 мкм – для покриття товщиною від 0,03 мм до 0,05 мм;
- 6,3 мкм – для покриття товщиною від 0,05 мм до 0,10 мм;
- 12,5 мкм - для покриття товщиною більше 0,10 мм.

1.6. При зміцнюючій обробці деталей з визначиними вимогами до точності ці вироби повинні виготовлятися з розмірами, які будуть враховувати товщину зміцнюючого шару.

1.7. Процес зміцнення на установці «Элитон-22» відбувається вручну за допомогою ектромагнітного вібратора зі змінним електродом з легуючого елемента.

Вібруючий електрод утримувати в положенні близько до перпендикулярного відносно поверхні яку зміцнюємо.

1.8. У якості зміцнюючого матеріалу (легуючого електроду) можуть застосовувати більшість струмопровідних матеріалів: чисті метали та їх сплави, тугоплавкі з'єднання, графіт, тверді сплави тощо.

1.9. Установа «Элитон-22» має режимів одинадцять зміцнення, що відповідають силі технологічного струму. Режими та відповідні їм значення струму вказані у табл. 1.

Таблиця 1.

Величина робочого струму при різних режимах установки «Элитон-22»

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Величина струму, А	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1,0	1,0-1,1	1,1-1,2	1,2-1,3	1,3-1,4	1,4-1,5

1.10. Питома кількість матеріалу, що переноситься на поверхню, яку обробляємо, залежить від енергії, що віділяється у міжелектродному проміжку за один імпульс.

Режими обробки обираються в залежності від вимог, що висуваються до зміцненої поверхні – шорсткість, щільність, товщина та пористість нанесеного шару.

1.11. Чим «мягший» режим обробки, тим менше товщина шару, но вище якість нанесеного покриття. При «грубих» режимах збільшується товщина шару, але погіршується якість покриття.

Необхідно враховувати, що при зміцненні на грубих режимах в перші хвилини роботи метал переноситься найбільш інтенсивно, потім цей процес сповільнюється, припиняється і відбувається зняття не тільки нанесеного шару, но і руйнування вихідної поверхні. Тому недопустимі багатократні (більше 4-5) проходи по одній і тій же поверхні.

Для отримання більш якісного покриття після обробки на грубих режимах необхідно обробка зміцненої поверхні на м'яких режимах, що сприяє вигладжуванню та зниженню шорсткості.

1.12. Кожному режиму обробки відповідає визначений час, протягом якого має місце оптимум покриття. Мінімальний час визначається вимогою до щільності покриття, а максимальний – часом суттєвого зменшення переносу матеріалу та погіршенням якості поверхні.

Час, за який досягається оптимальна щільність покриття, залежить від властивостей наносимого та зміцнюваного матеріалів і визначається дослідним шляхом у кожному окремому випадку.

2. Контроль якості електроіскрового легування

2.1. Деталь після електроіскрового легування підлягає контролю за зовнішнім виглядом, геометричним розмірам та шорсткості відповідно до креслення. Визначення товщини зміцненого шару та твердості, а також необхідної щільності покриття проводиться на зразках-свідках.



2.2. Контроль зовнішнього вигляду проводиться з метою виявлення нерівномірних ділянок нанесеного покриття та дефектів зміцненої обробки (ерозійні, раковини, прижоги т.д.). Покриття повинно бути рівномірним.



2.3. Шорсткість зміцненої поверхні вимірюється за допомогою прилада профілографа-профілометра, або візуально у порівнянні з еталонними зразками.

2.4. Мікротвердість покриття визначається за допомогою мікротвердоміру при навантаженні на індентор не більше 100 г.

2.5. Глибина покриття визначається за виготовленими шліфами на металографічному мікроскопі.

Порівняння режимів обробки поверхні дюралюміній Д16 дискретним ЕШ

Режим/сила струму, А	Зображення
1	2
1/0,4-0,5	
2/0.5-0,6	

1	2
4/0,7-0,8	
7/1,0-1,1	

1	2
10/1,3-1,4	