

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
Міністерство оборони України

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
Міністерство оборони України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПЛЕШКУНОВ СЕРГІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

ГРИФ
Прим. № ___

УДК 629.7.063.6:621.833]:66.088(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИКА ПРИСКОРЕНОГО ВИПРОБУВАННЯ ЗМІЦНЕНИХ
ПОВЕРХОНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ НАСОСА ПАЛИВНОЇ
СИСТЕМИ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

272 – Авіаційний транспорт

27 – Транспорт

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

_____ С.А. Плешкунов
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Джус Роман Миколайович, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Плешкунов С. А. Методика прискореного випробування зміцнених поверхонь для підвищення ресурсу насоса паливної системи повітряного судна.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 272 “Авіаційний транспорт”. – Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, 2024.

Актуальність теми.

У роботі на основі аналізу літературних джерел встановлено, що до об’єктів авіаційного транспорту висуваються підвищені вимоги щодо надійності елементів і систем та безвідмовності їх роботи. Це у свою чергу вимагає детального опрацювання цих показників для окремих систем, елементів, вузлів деталей. Такі вимоги пов’язані із забезпеченням справності повітряних суден (ПС), що є одним із важливих факторів безпеки польотів. Однією із відповідальних систем є паливна система. Аналіз даних про відмови окремих елементів цієї системи показав, що паливний насос є одним з найслабших елементів з погляду надійності їх роботи. У зв’язку з цим виникає завдання забезпечення необхідної безвідмовності роботи паливного насоса, яка у свою чергу повинна бути принаймні не нижчою, ніж безвідмовність (надійність) інших елементів систем. З іншого боку, нині спостерігається перерозподіл періоду часу розробки технічної системи та її застосуванням за призначенням. Це пов’язано зі швидкою зміною поколінь техніки, впровадження нових технологій. Тому постає завдання розробки таких методів прийняття інженерних, технічних, технологічних та конструктивних рішень, які скорочували б загальний час розробки, особливо випробувань. Тому в дисертаційному дослідженні, вирішується комплексне завдання яке присвячене прискореному методу випробувань поверхневого зміцнення деталей паливного насоса, що й забезпечує як підвищення

надійності паливного насоса, так і скорочення часу на концептуальному етапі розробки нових об'єктів авіаційної техніки та при їх модернізації. Серед авіаційних агрегатів сучасних ПС найбільш поширеними є зубчасті передачі, тому їх безвідмовність та тривалий ресурс роботи є визначальним чинником надійності роботи агрегатів ПС. А умови тертя зубчастих передач визначають необхідність високої здатності протистояти контактному втомному руйнуванню.

Аналіз процесів утомного контактного руйнування при терті показав, що як універсальну базу для опису зміни стану поверхневого шару можна застосовувати структурно-енергетичну теорію, у якій критичний стан матеріалу пов'язаний з досягненням щільності внутрішньої енергії системи величини енергії активації руйнування, при якій дисипативна система переходить до точки біфуркації, а енергію активації руйнування можна розглядати як практичну характеристику міцності матеріалу.

Аналіз механізмів дисипації енергії поверхневого шару в процесі утомного руйнування показав, що така трибосистема (ТС) працює як синергетична відкрита термодинамічна система, що знаходяться далеко від рівноважного стану, а її фундаментальною властивістю є здатність до саморегулювання, самоорганізації, гомеостазу та адаптації до зовнішніх умов. При терті поверхневий шар проявляє властивість адаптивності до зовнішніх умов шляхом безперервного активного пристосування за рахунок внутрішнього підстроювання до постійно мінливих зовнішніх чинників.

Виконаний аналіз методів іонно-плазмового модифікування поверхневого шару як фактору підвищення ресурсних показників деталей ПС, працюючих в умовах високих контактних навантажень, дозволяє прогнозувати, що цей метод може мати значні переваги перед традиційною цементацією. Але поки цей метод зміцнення не може знайти широкого застосування в авіації у зв'язку з відсутністю достатньої кількості теоретичних та експериментальних досліджень, а також супутніх їм комплексних порівняльних металофізичних досліджень.

Проведено аналіз структурно-енергетичного балансу енергії поверхневих шарів в умовах контактної взаємодії, який дозволив визначити критерій утомної міцності матеріалів: питома енергія руйнування за один цикл навантаження $\bar{E}_{\text{пит}}$. На основі цього сформульовано умови проведення прискорених випробувань на контактну втомну міцність з використанням методу акустичної емісії (АЕ): імпульсне навантаження до максимальних величин з реєстрацією кількості циклів до настання утомного пошкодження. На базі цього розроблено методику прискорених випробувань для визначення показників утомної міцності поверхневих шарів конструкційних матеріалів (КМ), яка істотним чином зменшує час експериментальної оцінки при проведенні порівняльних випробувань різних конструкційних матеріалів чи порівняння різних видів їх модифікації (зміцнення). Метод реєстрації сигналу АЕ експериментально визначено як зручний та точний інструмент кількісної оцінки параметра утомної пошкоджуваності $n_{\text{кр}}$.

Теоретично встановлено, що основним фактором, який впливає на утомну контактну міцність матеріалу є коефіцієнт дисипації енергії, сталий для кожного з матеріалів.

Кінетика розвитку пошкоджуваності поверхневого шару на графіку закономірності зміни міри пошкодження за параметром АЕ складається з лінійної та нелінійної ділянок накопичення пошкоджень. Точка початку утомного зношування (перехід до нелінійної ділянки) на цьому графіку може бути оцінена як математичне сподівання ушкодження $M(z)$ – для порівняння матеріалів чи способів зміцнення. Оцінка ресурсних показників матеріалу виконується за кількістю циклів $n_{\text{кр}}$ до початку утомного руйнування (переходу від лінійної ділянки на графіку до нелінійної).

Експериментально встановлено, що положення, сформульовані у теоретичних дослідженнях, повністю справедливі. Аналіз результатів прискорених випробувань і подальших металофізичних досліджень зразків підтвердив правомірність підходів до проведення таких випробувань.

Метод АЕ довів високу ефективність реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального механохімічного зношування до початкового втомного руйнування. При питомому контактному навантаженні $\sigma = 1\,140$ МПа кількість циклів до виникнення початкових осередків утомного викришування на досліджуваних зразках, після випробувань на утомну міцність становлять: зміцнені азотуванням AVINIT N – 97 875 циклів; зміцнені газовою цементацією – 53 812 циклів.

Запропонована методика прискорених випробувань для визначення показників утомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів істотно чином зменшує час порівняльної оцінки. Вона може бути використана при розробці нових конструкційних матеріалів або способів їх зміцнення.

Результати довготривалих випробувань на базі 10^6 циклів підтвердили висновки, зроблені після порівняльних випробувань за розробленою методикою прискорених випробувань для визначення показників утомної пошкоджуваності. Інтегральна багатоциклова стійкість до утомного зношування зразків, зміцнених азотуванням (іонно-плазмове азотування AVINIT N з глибиною шару 0,25 мм), у 10 разів вище, ніж у зразків, зміцнених цементацією (з глибиною шару 1,2 мм).

На основі цих досліджень в подальшому можливе впровадження та використання іонно-плазмових технологій азотування замість цементування з метою підвищення контактної міцності поверхонь деталей, приймаючи до уваги також такі переваги азотування, як збереження розмірів та висока чистота обробки поверхонь, внаслідок чого відпадає необхідність їх механічної обробки після зміцнення.

Підтвердивши перевагу іонно-плазмового азотування порівняно з традиційною цементацією, ці експерименти підтвердили обґрунтованість розробленої методики прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності КМ.

Випробування на зносостійкість (в умовах малоциклового зношування) досліджуваних трибосистем показали, що втомне багатоциклове зношування

(пітинг) за 8 годин випробувань на всіх досліджуваних парах тертя за показниками АЕ не виявляється. Це обумовлено правильним підбором рівня контактних навантажень ($\sigma_{\max} \approx 500$ МПа) для матеріалів, які мають високі протиітингові властивості (цементация і азотування).

Коефіцієнти тертя зразків, зміцнених за технологією AVINIT N суттєво, на ≈ 30 % менші, ніж зразків, зміцнених цементациєю. Зносостійкість зразків, зміцнених за технологією AVINIT N, при малоцикловогому зношуванні значно перевищує зносостійкість цементованих зразків (у 6 разів).

Поглиблені фрактографічні, мікроструктурні і фазові дослідження особливостей поверхневого шару сталевих зразків, зміцнених традиційною цементациєю та іонно-плазмовим азотуванням AVINIT N, виявили причини значної переваги іонно-плазмового азотування перед цементуванням за показником утомної міцності.

Мікроструктурним дослідженнями визначено, що мікроструктура азотованого шару має вигляд, характерний для азотистого мартенситу відпуску з тонкими надлишковими нітридами. При цьому спостерігається збільшення періоду решітки до 0,290 нм, пов'язане з утворенням твердого розчину азоту в решітці фериту. Наявність фази $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ має ГЦК решітку, яка забезпечує мікропластичні характеристики цього покриття. Це напряму забезпечує підвищення втомної міцності при іонно-плазмовому азотуванні. Таким чином, основною фазою, яка утворюється в поверхневому шарі сталі 20Х3МВФ при обраних умовах азотування, є фаза $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$, завтовшки не більше 5 мкм.

Отримані результати мікротвердості свідчать про те, що ефективна глибина зміцненого шару, яка відповідає мікротвердості 500 *HV*, близька за значеннями до величини шару, який встановлювався мікроструктурним способом, і для азотованого шару становить 0,155 мм, а для цементованих зразків 1,25...1,30 мм, що на порядок вище. Цей висновок дає розуміння того, чому при меншій товщині зміцненого шару, азотування забезпечує кращий

показник утомної міцності у порівнянні з цементацією. Ці висновки дають цілком обґрунтовану основу для впровадження такої перспективної технології зміцнення у масове виробництво для збільшення зносостійкості високонавантажених деталей агрегатів авіаційної та іншої техніки, які працюють в умовах тертя кочення з проковзуванням.

Наукова новизна одержаних результатів. Положення, що характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, полягають у такому.

1. Отримав подальший розвиток метод оцінки втомної міцності матеріалів насоса паливної системи повітряного судна при контактній взаємодії тертя, в якому, на відміну від відомих, використовується енергетичний критерій, а показником в якості критерію визначена питома енергія руйнування поверхні за один цикл навантаження $E_{\text{штг}}$, що дозволяє підвищити якість оцінки контактної утомної міцності.

2. Розвинуто підхід до експериментальних досліджень конструкційних матеріалів на контактну втомну міцність шляхом проведення випробувань імпульсним навантаженням, величина якого визначалася як 0,95 навантаження руйнування, який істотним чином зменшує час експертної оцінки при проведенні порівняльних випробувань різних конструкційних матеріалів чи порівняння різних видів їх модифікації.

3. Отримав подальший розвиток структурно-енергетичний метод оцінки показників контактної утомної міцності матеріалів, в якому, на відміну від відомих, проведено кількісну оцінку енергії дисипації конструкційних матеріалів після імпульсного навантаження за показниками акустико-емісійного випромінювання.

4. Отримало подальший розвиток уявлення про зв'язок характерної мікроструктури поверхні після азотування з високими показниками її втомної міцності при меншій товщині зміцненого шару у порівнянні з традиційною цементацією.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується їх використанням (додаток В).

Отримані нові наукові результати дозволили практично скоротити термін випробування варіантних проробок різних методів зміцнення поверхонь при терті на концептуальному етапі розробки об'єктів машинобудування, а саме агрегатів, до складу яких входять зубчасті передачі, зокрема шестеренчастих насосів паливної системи ПС.

Безпосереднє застосування визначеного найкращого методу зміцнення поверхонь дозволяє збільшити ресурс таких агрегатів, що в цілому підвищує надійність систем, до складу яких вони входять. Це є критичною складовою у системі заходів забезпечення безпеки польотів на етапі прийняття інженерних, технічних та технологічних рішень як при модернізації існуючих, так і при розробці перспективних зразків об'єктів машинобудування взагалі та АТ (літаків) зокрема.

Крім цього, практично важливою є методика прискорених випробувань та запропонований енергетичний критерій контактної втомної міцності для обрання технології зміцнення поверхневого шару. Ці практичні результати дисертаційних досліджень впроваджено у виробництво АТ "ФЕД" при проведенні порівняльних випробувань на контактну втомну міцність зразків, зміцнених цементуванням та плазмовим азотуванням, про що свідчить Акт впровадження та Науково-технічний звіт за участю автора.

Ключові слова: повітряне судно, ресурс, безпека польотів, надійність, авіаційний двигун, агрегати та системи літака, утомна міцність, зміцнення поверхонь, мікроструктура поверхні, випробування.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

1. Стадніченко В. М., Джус Р. М., Плешкунов С. А. Методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків, 2019. № 2 (58). С. 122-131. DOI: 10.30748/soivt.2019.58.15.

2. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Стадніченко В. М., Плешкунов С. А. Мікроструктурні та фазові особливості поверхневого шару, зміцненого

іонно-плазмовим азотуванням, як фактор підвищення втомної міцності. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2020. № 1 (63). С. 89–95. DOI: 10.30748/zhups.2020.63.12.

3. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Попов В. В., Плешкунов С. А., Семенов Я. І. Порівняльна оцінка технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування при їх використанні для зміцнення високонавантажених вузлів авіаційної техніки. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 2 (39). С. 54–61. DOI: 10.30748/nitps.2020.39.06.

4. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Плешкунов С. А., Градиський Ю. О. Порівняльний аналіз параметрів зносостійкості зразків, зміцнених цементуванням та іонно-плазмовим азотуванням, працюючих в умовах багатоциклового зношування. *Проблеми тертя та зношування*. 2020, № 3 (88). С. 87–98. DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14922.

5. Плешкунов С. А. Перспективи застосування іонно-плазмових методів для підвищення втомної міцності трибосистем. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 2. С. 92–97. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.2.11.

6. Джус Р. М., Плешкунов С. А. Збільшення ресурсу авіаційної техніки новітніми методами іонно-плазмового зміцнення поверхонь. *Повітряна міць України*. 2021. №1 (1). С. 92–95. DOI: 10.33099/2786-7714-2021-1-1-92-95.

7. Плешкунов С. А. Структурно-енергетична модель прискореної оцінки показників контактної утомної міцності матеріалів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 4 (68). С. 113–22. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.15.

8. Stadnychenko V; Djus R; Pleshkunov S. The application of Acoustic Emission Method for Accelerated Evaluation of Fatigue Strength Indicators of Structural Materials. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 14. Iss. 12. 2022. P. 1-16. DOI : 10.1177/16878132221143891 (SCOPUS).

Наукові праці які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

9. Джус Р. М., Плешкунов С. А. Методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів. *Новітні технології для захисту повітряного простору*: матеріали XV міжнар. наук. конф, м. Харків, 10-11 квітн. 2019 р. Харків, 2019. № 1(57). С. 142.

10. Стадніченко М. Г., Джус Р. М., Плешкунов С. А. Прискорена оцінка показників втомленої пошкоджуваності конструкційних матеріалів. *Промислова гідравліка і пневматика* : матеріали XX міжнар. наук.-технічн. конф. АС ПГП, м. Київ, 22-25 жовт. 2019 р. Київ, 2020. С. 164.

11. Плешкунов С. А., Стадніченко М. Г., Джус Р. М. Заходи з підвищення ресурсних показників високонавантажених вузлів приводів. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XVI міжнар. наук. конф., м. Харків, 15-16 квітн. 2020 р. Харків, 2020. С. 156.

12. Плешкунов С. А. Перспективи застосування іонно-плазмових методів для підвищення втомної міцності трибо систем. *Інтегровані технології та енергозбереження* : матеріали XIX Міжнар. наук. конференції, м. Харків, 11–16 травня 2020 р. Харків, 2020. №2 С. 92–97.

13. Плешкунов С. А., Стадніченко М. Г., Джус Р. М. Підвищення ресурсних показників навантажених вузлів коробок приводів. *Новітні технології для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XVII міжнар. наук. конф., м. Харків, 14-15 квітн. 2021 р. Харків, 2021. С. 387.

14. Плешкунов С. А., Джус Р. М. Збільшення ресурсу авіаційної техніки новітніми методами іонно-плазмового зміцнення поверхонь. *Актуальні питання протидії загрозам з повітря* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 20 жовтня 2021 р. Київ, 2021. №1 (1). С. 92–95.

15. Плешкунов С. А., Стадніченко М. Г. Іноваційні методи іонно-плазмового зміцнення для підвищення експлуатаційних показників агрегатів повітряних суден та їх силових установок. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XVIII міжнар. наук. конф., м. Харків, 15-16 квітн. 2022 р. Харків, 2022. С. 119.

16. Плешкунов С. А. Застосування новітніх методів іонноплазмового зміцнення поверхонь для збільшення ресурсу авіаційної техніки. *Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки* : матеріали II Всеукр. наук.-технічн. інтернет-конф., м. Вінниця, 17–18 листоп. 2022 р. Вінниця, 2022. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/apozbt/apozbt2022/paper/viewFile/16628/13880>.

17. Джус Р. М., Плешкунов С. А., Білозер С. Д., Калюжний І. М. Процеси утомного руйнування серед трибосполучень агрегатів повітряних суден. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XIX міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квітн. 2023 р. Харків, 2023. С. 112.

18. Плешкунов С. А., Джус Р. М., Калина О. О., Петраков Д. М., Толстіков Д. Ю. Методи оцінки показників утомної міцності трибосполучень агрегатів повітряних суден. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XIX міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квітн. 2023 р. Харків, 2023. С. 110-111.

19. Плешкунов С. А., Джус Р. М., Резніков С. В. Підвищення ресурсу агрегатів авіаційної техніки застосуванням іонно-плазмових методів зміцнення. *Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки* : матер. III міжнар. наук.-технічн. інтернет-конференції, м. Вінниця, 15–16 листоп. 2023 р. Вінниця, 2023. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/apozbt/apozbt2023/paper/view/19297>.

SUMMARY

Pleshkunov S. A. Methodology of accelerated testing of reinforced surfaces to increase the resource of the aircraft fuel system pump. - Qualifying science paper on the rights of the manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy Degree in specialty 272 - Aviation transport. – Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, 2024.

Actuality of theme.

In the work, based on the analysis of literary sources, it was established that the objects of air transport (AT) are subject to increased requirements for the reliability of elements and systems and the reliability of their operation. This, in turn, requires a detailed study of these indicators for individual systems, elements, parts nodes. These requirements are related to ensuring the serviceability of aircraft (aircraft), which is one of the factors that ensure flight safety. One of the responsible systems is the fuel system. Analysis of data on the failure of individual elements of this system showed that the fuel pump is one of the weakest elements in terms of reliability. In this connection, there is a task to ensure the necessary failure-free operation of the fuel pump, which in turn should be at least not lower than the failure-free (reliability) of other system elements. On the other hand, there is currently a redistribution of the time period for the development of a technical system and its intended use. This is due to the rapid change of generations of technology, the introduction of new technologies. Therefore, there is a task of developing such methods of making engineering, technical, technological and constructive decisions that reduce the overall development time, especially testing. Therefore, a complex task is solved in the dissertation research, which is devoted to an accelerated method of testing the surface strengthening of fuel pump parts, which ensures both an increase in the reliability of the fuel pump and a reduction of time at the conceptual stage of the development of new objects of aviation

equipment and during their modernization. Gears are the most common among aviation units of modern aircraft, and therefore their failure-free operation and long service life is a determining factor in the reliability of aircraft units. And the friction conditions of gears determine the need for them to have a high ability to resist contact fatigue failure.

The analysis of the processes of fatigue contact fracture during friction showed that the structural-energy theory can be adopted as a universal basis for describing the change in the state of the surface layer, in which the critical state of the material is associated with the achievement of the internal energy density of the system of the value of the fracture activation energy, in which the dissipative system passes to the bifurcation point, and the fracture activation energy can be considered as a practical characteristic of the strength of the material.

The analysis of the energy dissipation mechanisms of the surface layer in the process of fatigue failure showed that such a tribosystem (TS) works as a synergistic open thermodynamic system that is far from the equilibrium state, and its fundamental property is the ability to self-regulate, self-organize, homeostasis and adapt to external conditions. When rubbed, the surface layer shows the property of adaptability to external conditions through continuous active adaptation due to internal restructuring to constantly changing external factors.

The performed analysis of the methods of ion-plasma modification of the surface layer as a factor of increasing the resource performance of parts of the PS operating under conditions of high contact loads allows us to predict that this method can have significant advantages over traditional cementation. But so far this method of strengthening cannot find wide application in aviation due to the lack of a sufficient number of theoretical and experimental studies, as well as accompanying complex comparative metallophysical studies.

An analysis of the structural energy balance of the energy of the surface layers under the conditions of contact interaction was carried out, which made it possible to determine the criterion of fatigue strength of materials: the specific energy of destruction in one load cycle. Based on this, the conditions for

conducting accelerated tests on contact fatigue strength using the acoustic emission (AE) method were formulated: pulse loading to maximum values with registration of the number of cycles before the onset of fatigue damage. On the basis of this, a method of accelerated tests was developed to determine the indicators of fatigue strength of the surface layers of structural materials (CM), which significantly reduces the time of experimental evaluation when conducting comparative tests of different structural materials or comparing different types of their modification (strengthening). The method of recording the AE signal has been experimentally determined as a convenient and accurate tool for quantitative assessment of the fatigue damage parameter n_{kr} .

It is theoretically established that the main factor affecting the fatigue contact strength of the material is the energy dissipation coefficient, which is constant for each of the materials.

The kinetics of the development of damage of the surface layer on the graph of the regularity of the change in the degree of damage according to the AE parameter consists of linear and non-linear areas of accumulation of damage. The starting point of fatigue wear (the transition to the non-linear region) on this graph can be estimated as the mathematical expectation of damage $M(z)$ – for comparison of materials or methods of strengthening. The assessment of the resource indicators of the material is carried out by the number of n_{cr} cycles before the onset of fatigue failure (transition from a linear section on the graph to a non-linear one).

It has been experimentally established that the provisions formulated in theoretical studies are completely valid. Analysis of the results of accelerated tests and subsequent metallophysical studies of the samples confirmed the validity of the approaches to conducting such tests.

The AE method proved the high efficiency of registration of the moment of transition of tribosystems from normal mechanochemical wear to initial fatigue failure. At a specific contact load of $\sigma=140$ MPa, the number of cycles before the appearance of initial centers of fatigue cracking on the studied samples after

fatigue strength tests are: strengthened by nitriding AVINIT N – 97 875 cycles; strengthened by gas cementation – 53 812 cycles.

The proposed method of accelerated tests to determine indicators of fatigue damage of structural materials significantly reduces the time of comparative evaluation. It can be used in the development of new structural materials or methods of strengthening them.

The results of long-term tests on the basis of 106 cycles confirmed the conclusions made after comparative tests using the developed methodology of accelerated tests for determining the indicators of fatigue damage. The integral multi-cycle resistance to fatigue wear of samples strengthened by nitriding (ion-plasma nitriding AVINIT N with a layer depth of 0.25 mm) is 10 times higher than that of samples strengthened by cementation (with a layer depth of 1.2 mm).

On the basis of these studies, in the future, it is possible to introduce and use ion-plasma nitriding technologies instead of cementation in order to increase the contact strength of the surfaces of parts, taking into account the advantages of nitriding, such as the preservation of dimensions and high purity of surface treatment, as a result of which there is no need for their mechanical finishing after strengthening.

Having confirmed the advantage of ion-plasma nitriding over traditional cementation, these experiments confirmed the validity of the developed methodology for accelerated evaluation of indicators of fatigue damage of CM.

Tests for wear resistance (in conditions of low-cycle wear) of the studied tribosystems showed that fatigue multi-cycle wear (pitting) was not detected during 8 hours of testing on all the studied friction pairs according to AE indicators. This is due to the correct selection of the level of contact loads ($\sigma_{\max} \approx 500$ MPa) for materials that have high anti-pitting properties (cementation and nitriding).

The coefficients of friction of the samples strengthened by the AVINIT N technology are significantly $\approx 30\%$ lower than the samples strengthened by cementation. The wear resistance of the samples strengthened by the AVINIT N

technology during low-cycle wear significantly exceeds the wear resistance of the cemented samples (by 6 times).

In-depth fractographic, microstructural and phase studies of the features of the surface layer of steel samples strengthened by conventional cementation and ion-plasma nitriding AVINIT N revealed the reasons for the significant advantage of ion-plasma nitriding over cementation in terms of fatigue strength.

Microstructural studies determined that the microstructure of the nitrided layer has the appearance characteristic of nitrogen-tempered martensite with thin excess nitrides. At the same time, an increase in the lattice period to 0.290 nm is observed, which is associated with the formation of a solid nitrogen solution in the ferrite lattice. The presence of the γ Fe₄N phase has an fcc lattice, which ensures the microplastic characteristics of this coating. This directly provides an increase in fatigue strength during ion-plasma nitriding. Thus, the main phase formed in the surface layer of 20X3MVF steel under the selected nitriding conditions is the γ Fe₄N phase, with a thickness of no more than 5 μ m.

The obtained microhardness results indicate that the effective depth of the strengthened layer, which corresponds to a microhardness of 500 HV, is close in value to the size of the layer, which was established by the microstructural method and for the nitrided layer is 0.155 mm, and for cemented samples 1.25...1, 30 mm, which is an order of magnitude higher. This conclusion provides an understanding of why, with a smaller thickness of the strengthened layer, nitriding provides a better indicator of fatigue strength compared to cementation. Such conclusions provide a well-founded basis for the introduction of such a promising strengthening technology to increase the wear resistance of highly loaded parts of aircraft and other machinery units that operate under conditions of rolling friction with sliding.

Scientific novelty of the results obtained. The provisions that characterize the scientific novelty of the dissertation work.

1. The method of assessing the fatigue strength of the materials of the fuel system pump of an aircraft during the contact interaction of an aircraft received further development, in which, unlike the known ones, an energy criterion is used, and the specific energy of surface destruction in one load cycle E_{pit} is determined as an indicator as a criterion, which allows to improve the quality of assessment of contact fatigue strength.

2. An approach to experimental studies of structural materials for contact fatigue strength by conducting tests with an impulse load, the value of which was determined as 0.95 of the breaking load, was developed, which significantly reduces the time of expert evaluation when conducting comparative tests of different structural materials or comparing different types of their modification.

3. The structural-energetic method of evaluating the contact fatigue strength of materials received further development, in which, in contrast to known methods, a quantitative assessment of the dissipation energy of structural materials after impulse loading was carried out using acoustic emission radiation indicators.

4. The concept of the connection of the characteristic microstructure of the surface after nitriding with high indicators of its fatigue strength with a smaller thickness of the strengthened layer in comparison with traditional cementation received further development.

The practical value of the obtained results is confirmed by their use (Appendix B).

The obtained new scientific results made it possible to practically shorten the testing period of variant designs of various methods of strengthening surfaces during friction at the conceptual stage of development of mechanical engineering objects, namely units that include gear transmissions, namely gear pumps of the aircraft fuel system.

The direct application of the determined best method of strengthening surfaces allows to increase the resource of such aggregates, which in general increases the reliability of the systems of which they are a part. This is a critical

component in the system of measures to ensure flight safety at the stage of making engineering, technical and technological decisions, both in the modernization of existing and in the development of promising models of engineering objects in general and AS (aircraft) in particular.

In addition, the method of accelerated tests and the proposed energy criterion of contact fatigue strength are practically important for choosing the technology of strengthening the surface layer. These practical results of dissertation research were implemented in the production of JSC “FED” during comparative tests on the contact fatigue strength of samples strengthened by cementation and plasma nitriding, as evidenced by the Act of Implementation and the Scientific and Technical Report with the participation of the author.

Keywords: *aircraft, resource, flight safety, reliability, aircraft engine, aircraft units and systems, fatigue strength, surface strengthening, surface microstructure, testing.* LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE THESIS

List of publications in which the main scientific results of the thesis are published:

1. Stadnychenko V. M., Zhus R. M., Pleshkunov S. A. Methodology of accelerated assessment of indicators of fatigue damage of structural materials. *Weapon systems and military equipment*. Kharkiv, 2019. No. 2 (58). P. 122–131. DOI: 10.30748/soivt.2019.58.15.

2. Zhus R. M., Stadnichenko M. G., Stadnichenko V. M., Pleshkunov S. A. Microstructural and phase features of the surface layer strengthened by ion-plasma nitriding as a factor in increasing fatigue strength. *Collection of scientific works of the Kharkiv National University of the Air Force*. 2020. No. 1 (63). P. 89–95. DOI: 10.30748/zhups.2020.63.12.

3. Zhus R. M., Stadnichenko M. G., Popov V. V., Pleshkunov S. A., Semenov Ya. I. Comparative assessment of technological methods of cementation and ion-plasma nitriding when used to strengthen highly loaded components of aviation equipment. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. 2020. No. 2 (39). P. 54–61. DOI: 10.30748/nitps.2020.39.06.

4. Zhus R.M., Stadnichenko M.G., Pleshkunov S.A., Hradiskyi Yu.O. Comparative analysis of wear resistance parameters of samples strengthened by cementation and ion-plasma nitriding, working under conditions of multi-cycle wear. *Friction and wear problems*. 2020, No. 3 (88). P. 87–98. DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14922.

5. Pleshkunov S. A. Prospects for the application of ion-plasma methods to increase the fatigue strength of tribosystems. *Integrated technologies and energy saving*. 2020. No. 2. P. 92–97. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.2.11.

6. Zhus R.M., Pleshkunov S.A. Increasing the resource of aviation equipment using the latest methods of ion-plasma surface strengthening. *Air Force of Ukraine*. 2021. No. 1 (1). P. 92–95. DOI: 10.33099/2786-7714-2021-1-1-92-95.

7. Pleshkunov S. A. Structural-energy model of accelerated assessment of indicators of contact fatigue strength of materials. *Weapon systems and military equipment*. 2021. No. 4 (68). P. 113–22. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.15.

8. Stadnychenko V; Djus R; Pleshkunov S. The application of Acoustic Emission Method for Accelerated Evaluation of Fatigue Strength Indicators of Structural Materials. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 14. Iss. 12. 2022. R. 1-16. DOI : 10.1177/16878132221143891 (SCOPUS).

Works certifying approbation of the thesis materials:

9. Zhus R. M., Pleshkunov C. A. Methodology of accelerated assessment of indicators of fatigue damage of structural materials. The latest technologies for the protection of air space: materials of the 15th International of science conference, Kharkiv, April 10-11 2019. Kharkiv, 2019. No. 1(57). P. 142.

10. Stadnichenko M.G., Zhus R.M., Pleshkunov C.A. Accelerated assessment of indicators of fatigue damage of structural materials. *Industrial hydraulics and pneumatics: materials of XX International. scientific and technical conf. AS PGP, Kyiv, October 22-25. 2019. Kyiv, 2020. P. 164.*

11. Pleshkunov C. A., Stadnichenko M. G., Zhus R. M. Measures to increase the resource performance of highly loaded drive assemblies. The latest technologies - for the protection of air space: coll. theses add. XVI International of science conference, Kharkiv, April 15-16 2020. Kharkiv, 2020. P. 156.

12. Pleshkunov S. A. Prospects for the application of ion-plasma methods to increase the fatigue strength of tribo systems. Integrated technologies and energy saving: materials of the XIX International of science conference, Kharkiv, May 11–16, 2020. Kharkiv, 2020. No. 2, pp. 92–97.

13. Pleshkunov C. A., Stadnichenko M. G., Dzhus R. M. Increasing the resource indicators of loaded nodes of drive boxes. The latest technologies for the protection of air space: collection. theses add. XVIII International of science conference, Kharkiv, April 14-15 2021. Kharkiv, 2021. P. 387.

14. Pleshkunov C. A., Zhus R. M. Increasing the resource of aviation equipment using the latest methods of ion-plasma surface strengthening. Current issues of combating threats from the air: materials of the International science and practice conference, Kyiv, October 20, 2021. Kyiv, 2021. No. 1 (1). P. 92–95.

15. Pleshkunov C. A., Stadnichenko M. G. Innovative methods of ion-plasma hardening for increasing the performance of aircraft units and their power plants. The latest technologies - for the protection of air space: coll. theses add. XVIII International of science conference, Kharkiv, April 15-16 2022. Kharkiv, 2022. P. 119.

16. Pleshkunov C. A. Application of the newest methods of ion plasma surface strengthening to increase the resource of aviation equipment. Actual problems of combat use and operation and repair of samples of weapons and military equipment: materials of II Vseukr. scientific and technical internet conference, Vinnytsia, November 17–18. 2022. Vinnytsia, 2022. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/apozbt/apozbt2022/paper/viewFile/16628/13880>.

17. Zhus R. M., Pleshkunov C. A., Bilozer S. D., Kalyuzhny I. M. Fatigue failure processes among tribocombinations of aircraft assemblies. The latest technologies - for the protection of air space: coll. theses add. XIX International of science conference, Kharkiv, April 12-13 2023. Kharkiv, 2023. P. 112.

18. Pleshkunov S. A., Jus R. M., Kalyna O. O., Petrakov D. M., Tolstikov D. Yu. Methods of evaluating fatigue strength indicators of tribojoints of aircraft

assemblies. The latest technologies - for the protection of air space: coll. theses add. XIX International of science conference, Kharkiv, April 12-13 2023. Kharkiv, 2023. P. 110-111.

19. Pleshkunov S.A., Jus R.M., Reznikov S.V. Increasing the resource of aviation equipment units using ion-plasma strengthening methods. Actual problems of combat use and operation and repair of samples of weapons and military equipment: Mater. III International scientific and technical Internet conferences, Vinnytsia, November 15–16. 2023. Vinnytsia, 2023.
<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/apozbt/apozbt2023/paper/view/19297>.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ANNOTATION	12
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	25
ВСТУП... ..	28
Розділ 1. АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ, ПРИСВЯЧЕНИХ ПІДВИЩЕННЮ НАДІЙНОСТІ ТА РЕСУРСУ АГРЕГАТИВ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН	39
1.1 Синергетичні та структурно-енергетичні моделі оцінки утомної міцності деталей агрегатів АТ, працюючих в умовах контактного навантаження.....	41
1.1.1 Теоретичний аналіз процесів утомного контактного руйнування при терті	41
1.1.2 Аналіз механізмів дисипації енергії поверхневого шару в процесі утомного руйнування.....	45
1.2. Аналіз методів іонно-плазмового модифікування поверхневого шару як фактора підвищення ресурсних показників деталей АТ, працюючих в умовах високих контактних навантажень	48
1.3 Аналіз методів оцінки показників утомної міцності матеріалів, що працюють в умовах контактного навантаження, на етапі розробки та впровадження	50
1.3.1 Методи експериментальної оцінки енергії активації руйнування поверхневих шарів при терті	51
1.3.2 Металофізичні методи оцінки показників утомної міцності матеріалів	54
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1	57
Розділ 2. ЕНЕРГЕТИКА ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ЗМІЦНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА КОНТАКТНУ ВТОМНУ МІЦНІСТЬ.....	60

	23
2.1 Структурно-енергетична модель контактної втоми металів з урахуванням швидкості зовнішнього впливу (імпульсного навантаження).....	62
2.1.1 Оцінка енергетичного балансу матеріалу в умовах імпульсного навантаження.....	63
2.1.2 Аналіз енергетичного та структурного стану матеріалу в процесі імпульсного навантаження.....	68
2.2 Аналіз кінетики розвитку пошкоджень в умовах контактного утомного зношування	70
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2	76
Розділ 3. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	78
3.1 Обладнання для випробувань на контактну міцність	81
3.2 Вибір матеріалів для досліджень	85
3.2.1. Прогнозування макроскопічних параметрів контактної взаємодії	87
3.3 Методи досліджень.....	88
3.3.1 Вимірювання макро- і мікротвердості.....	88
3.3.2 Вимірювання шорсткості і профілю поверхні.....	89
3.3.3 Використання електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу.....	90
3.3.4 Рентгеноструктурні дослідження.....	91
3.3.5 Акустико-емісійний метод контролю зношування	92
3.4 Методика прискореної оцінки показників утомної міцності поверхневих шарів після їх модифікації	95
3.5 Статистична оцінка середньої глибини утомних пошкоджень за результатами довготривалих випробувань.	101
3.6 Експериментальна оцінка показників малоциклової та багатоциклової пошкоджуваності матеріалів, зміцнених цементуванням та іонно-плазмовим азотуванням	104

3.6.1 Порівняльна оцінка технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування за методикою прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів	104
3.6.2 Результати прискорених випробувань на міцність від утоми.....	105
3.7 Порівняльна оцінка технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування шляхом довготривалих випробувань на утомну міцність	114
3.7.1 Об'єкт випробувань і умови проведення випробувань	114
3.7.2 Результати довготривалих випробувань на міцність від утоми.....	115
3.8 Порівняльна оцінка технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування шляхом випробувань на зносостійкість в умовах малоциклового зношування.....	124
3.9 Мікроструктурні та фазові особливості поверхневих шарів, як фактор підвищення втомної міцності	129
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3	135
Розділ 4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ КОРОБОК ПРИВОДІВ ТА ШЕСТЕРЕННИХ НАСОСІВ ПС	140
ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	148
ДОДАТКИ.....	170
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	171
Додаток Б. Планування мінімально необхідного обсягу контролю.....	175
Додаток В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи	181

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АЕ – акустична емісія

АТ – авіаційна техніка

ГЦК – гранецентрований кубічний

ДКР – дослідно-конструкторська робота

ІДС – інформаційно-діагностична система

КМ – конструкційні матеріали

НДР – науково-дослідна робота

ПС – повітряне судно

РЕМ – растровий електронний мікроскоп

трибо-ЕРС – трибоелектрорушійна сила

ТС – трибоспряження

ФПК – рівняння Фокера–Планка–Колмогорова

E – енергія, що накопичується при однократному впливі

E_0 – початкова енергія руйнування від дефектів

$E_{\text{вн}_i}$ – внутрішня енергія i -го структурного елемента

E_i – модулі пружності зразків

$E_{\text{імп}}$ – енергія імпульсного навантаження

E_{max} – максимальна щільність прихованої енергії

$\bar{E}_{\text{пит}}$ – питома енергія руйнування за один цикл навантаження

$E_{\text{підв 1}}$ – частина енергії, що підводиться до ТС за один цикл контактної

взаємодії

$E_{\text{руй}}$ – енергія, що накопичилася матеріалом до моменту його руйнування

$F[z(t), \lambda(t), R(t)]$ – детермінована від’ємна для кумулятивних моделей накопичення дефектів на I етапі скалярна лінійна або на II етапі нелінійна функція при об’єднанні дефектів та тріщин

$f_{(E)_i}$ – енергетична характеристика мікроструктури

$f(n)$ – функція, що описує кінетику розвитку пошкоджень

$q(t)$ – середньоімовірнісне значення швидкості деградації за період реєстрації на атомно-молекулярному рівні в шарах 1, 2, 3

H – глибина

H_{μ} – мікротвердість

h – товщина поверхневого модифікованого шару

$M(z)$ – математичне сподівання ушкодження

$n_{кр}$ – критична кількість циклів контактної взаємодії на момент руйнування поверхневого шару

P – потужність

P – навантаження на зразках

$P(t)$ – час накопичення граничного рівня пошкодження

R_i – радіуси зразків

$R(t)$ – вектор параметрів базової залежності для заданої моделі

накопичення пошкоджень

S – площа

S – шлях тертя

$t_{имп}$ – час імпульсного навантаження

t_k – час кореляції $\lambda(t)$, який має порядок тисяч вимірювань

(15 000 вимірювань за 5 хв випробувань)

t_c – стала часу АЕ системи реєстрації пошкоджень (20 мс)

U_0 – енергія активації

V_i – швидкість ковзання

$V_{м. еф}$ – ефективний об'єм матеріалу

v_i – швидкість контактної взаємодії

$v_{кр}$ – критична швидкість зовнішнього впливу

$v_{тер}$ – лінійна швидкість взаємного переміщення зразків

W – величини потужності сигналу АЕ

$W_{кр}^*$ – критична щільність потоку енергії (потужності)

x_1, x_2, \dots, x_n – енергетичні стани елементів мікроструктури, які можуть змінюватися від початкового стану z_0 до стадії повної деструкції $z_{кр}$

$z(t)$ – міра пошкоджуваності

γ – структурно-чутливий коефіцієнт

σ – питома контактне навантаження

ξ_{AE} – питома емісійна активність

$\lambda(t)$ – параметр надійності

μ – коефіцієнт тертя

$\tau_{кр}$ – час, за який відбувається акумуляція (накопичення) пошкоджень до руйнування;

ω – швидкість обертання вала

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Усі безсумнівні переваги авіаційних перевезень (швидкість, мобільність, гнучкість і т. д.) сприяють розвитку виробництва нових типів повітряних суден (ПС) цивільної та військової авіації у світі, а також удосконалення тих, які вже знаходяться в експлуатації. Значущість цього завдання постійно зростає через високу конкуренцію серед виробників авіаційної техніки (АТ), а також у зв'язку зі зростаючою необхідністю збільшення ресурсу і підтримки її високої надійності протягом усього періоду експлуатації. Щорічні збитки авіаційної галузі через передчасний вихід з ладу деталей і вузлів АТ, що відпрацювали ресурс, становлять мільйони гривень, а витрати дорогих матеріалів на виготовлення запасних частин вузлів і агрегатів АТ часто можна порівняти з рівнем витрат на виробництво нових виробів.

Повітряні судна є складними і відповідальними технічними об'єктами, що містять напружені вузли та агрегати, які при відмові можуть стати джерелом підвищеної небезпеки.

У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження нових технологій, які дозволяють відновлювати експлуатаційні показники конструкційних матеріалів (КМ) елементів, що дає можливість подальшої експлуатації повітряних суден. При цьому значна увага приділяється поверхні виробів у реалізації цього завдання [1]. Надійність і довговічність АТ значною мірою обумовлені явищами тертя і зношування, що відбуваються в трибоспряженнях (ТС) різних систем сучасного ПС.

Серед ТС авіаційних агрегатів сучасних ПС найбільш поширеними є ТС зубчастих коліс (шестерень). Тому безвідмовність зубчастих передач – визначальний чинник надійності роботи агрегатів повітряних суден.

Зубчасті передачі широко застосовуються у агрегатах авіаційного транспорту для перетворення параметрів обертального руху. Вони входять

до складу всіх агрегатів трансмісій, коробок приводів, шестеренних насосів та інших агрегатів АТ. Термін їхньої служби визначає показники безвідмовності роботи механізму та є однією з критичних ланок дерева відмов складної технічної системи, яку являє собою кожен окремий елемент авіаційного транспорту.

Відмови агрегатів АТ через зношування або руйнування зубчастих коліс призводять до найбільш тривалих простоїв і вимагають великих витрат для відновлення працездатності. Попередити аварійне руйнування зубів та збільшити термін служби передачі дозволяють технологічні або експлуатаційні заходи щодо збільшення їх ресурсу.

Якщо виключити найгрубіші форми зношування, обумовлені мікрорізнанням і схоплюванням поверхонь, які зазвичай не спостерігаються при нормальній роботі вузла тертя, найбільш загальною формою пошкоджуваності при терті є втомне руйнування поверхонь, що протікає під дією високих знакозмінних і циклічних пружно-пластичних навантажень, які діють на локальні ділянки поверхонь на фоні теплових, хімічних, адгезійних та інших контактних взаємодій поверхонь між собою і середовищем. Тому найбільш важливим і одночасно важкоконтрольованим є втомне зношування. Цьому виду зношування присвячено більшість теоретичних та експериментальних досліджень.

На авіаційному транспорті таке завдання виходить на ще вищий рівень, враховуючи високу вартість техніки цієї галузі та підвищені вимоги до надійності та забезпечення безпеки польотів.

Висока вартість виготовлення та ремонту цих агрегатів, а також їх невеликий ресурс, обумовлюють загальну високу ціну цієї галузі авіаційної промисловості. Більшість агрегатів ПС мають деталі, які працюють в умовах високої контактної напруги (шестерні, підшипники кочення тощо), тому стан поверхні виходить на передній план при розробці нових методів покращення експлуатаційних та функціональних властивостей матеріалів, що застосовуються для виготовлення таких деталей.

У галузі авіаційного транспорту ця проблема стоїть особливо гостро в агрегатобудуванні, де пари тертя представлені найбільш концентровано. Адже наявність прецизійних пар тертя з високолегованих сталей та кольорових металів вимагає використання високоточного обладнання та фахівців найвищої кваліфікації. А це визначає високу вартість таких агрегатів. Наприклад, паливний насос для сучасних ПС коштує від 70 000 \$ і більше. Майже половину цієї суми може коштувати ремонт таких типів агрегатів. Тому вимоги до їх ресурсу надзвичайно високі. Так, згідно рішення ДП “Антонов” (м. Київ, Україна), вимогами до ресурсу таких сучасних агрегатів, як паливні насоси, гідравлічні насоси, гідроприводи і т. д.) визначено 12 000 годин без ремонту. Такі вимоги зумовили необхідність розробки та використання у цій галузі нових технологій обробки робочих поверхонь або нанесення зносостійких покриттів [2].

Останніми роками в авіаційному транспорті виникла проблема, пов’язана з недостатністю ресурсу коробок приводів та інших агрегатів ПС у порівнянні з ресурсом сучасних авіаційних двигунів. Інноваційні технології у створенні сучасних лопаток авіаційних ГТД значно збільшили їх ресурс. При цьому постало питання про доведення до цих показників ресурсу шестеренних пар тертя зазначених агрегатів.

Крім того, у сучасному авіаційному агрегатобудуванні проводяться також роботи зі створення насосів-регуляторів паливної автоматики шестеренного типу, які є дешевшими у виготовленні і ремонті та менш вимогливими до якості палива на відміну від традиційних аксіально-плунжерних.

На Харківському агрегатобудівному підприємстві АТ “ФЕД” (м. Харків, Україна) було створено дослідний зразок такого паливного насоса-регулятора шестеренного типу НР-3 000, але його ресурсні показники виявились недостатніми для встановлення на двигуни Д-436-148 літаків сімейства Ан-148. З метою підвищення ресурсних показників останнім часом виконувалися дослідно-конструкторські роботи (ДКР) з підвищення

ресурсних показників. Так само недостатніми є і ресурсні показники коробок приводів силових установок двигунів Д-436-148.

У промисловості віднедавна почали застосовувати новітні методи іонно-плазмового зміцнення поверхонь тертя [3] замість поширеної в усьому світі цементації. Метод цементації не забезпечує достатні ресурсні показники, а також є технологічно досить витратним. Водночас, при застосуванні іонно-плазмових методів, формується поверхневий шар з високими геометричними показниками, який не вимагає фінішної обробки. Метод є енергозберігаючим та екологічно чистим.

Однак порівняльних випробувань вказаних методів до цього часу не проведено. Такі ресурсні випробування вимагають великого часу на їх проведення, а тому, природно, дуже кошторисні. При цьому немає прискорених методик, які б дозволили скоротити час та, відповідно, вартість таких порівняльних експериментів [4, 5]. Тому актуальним є завдання визначення найбільш важливих факторів, які відповідають за зміну властивостей поверхневих шарів при контактній утомній взаємодії. Разом з визначенням критеріїв для прискореної оцінки утомної міцності матеріалів при контактній взаємодії це дасть можливість розробити методіку прискорених досліджень на контактну утомну міцність.

Для впровадження у промисловості нового підходу потрібні широкомасштабні лабораторні, металофізичні та стендові випробування. Стендові випробування насосу НР-3000 проводилися у АТ “ФЕД”, коробки приводів для силових установок на базі двигунів Д-436-148 випробували на АТ “Мотор Січ”, а саме лабораторні дослідження виконувалися у ХНУПС ім. Івана Кожедуба за участю автора. Ці дослідження виконувалися на основі договору про співпрацю в рамках Інноваційного аерокосмічного кластера “Мехатроніка”. Їх результати покладені в основу запропонованої роботи.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до Закону України “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні” від 08.09.2011 року № 3715-VI та п. 2

постанови Кабінету Міністрів України від 17.05.2012 року № 397 “Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012–2016 р.р.”, договором про співпрацю між ХНУПС та підприємствами України рамках Інноваційного аерокосмічного кластера “Мехатроніка”, а також планом науково-дослідних робіт ХНУПС ім. Івана Кожедуба і була складовою частиною науково-дослідною роботою НДР Розробка методики безрозбірної діагностики рухомих з’єднань агрегатів авіаційної техніки з застосуванням методу акустичної емісії (“ДІАГНОСТИКА-В”), ДР №0101U001463.

Мета дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ресурсу агрегатів повітряних суден на основі експериментальної оцінки механізмів утомної міцності для визначення передумов та критерію, який дозволить обрати відповідний метод зміцнення поверхні тертя.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі **завдання**.

1. Визначити критерії для прискореної порівняльної оцінки ресурсних показників деталей АТ та окреслити фактори прискореної оцінки й удосконалити теорію випробувань для прискореної оцінки показників контактної утомної міцності.

2. Розробити методику прискорених досліджень на контактну утомну міцність на основі методу акустичної емісії для зменшення часу на прийняття рішення щодо визначення більш зносостійкого матеріалу або методу зміцнення.

3. Виконати експериментальну оцінку енергії дисипації конструкційних матеріалів після імпульсного навантаження методом акустичної емісії для визначення найбільш важливих факторів, що відповідають за зміну властивостей поверхневих шарів при контактній утомній взаємодії.

4. Виконати комплексні порівняльні дослідження трибоспряжень, модифікованих традиційним методом цементації та перспективним методом

іонно-плазмового азотування. Визначити характер поверхневих структур зміцнених поверхонь, окреслити найбільш важливі фактори, які відповідають за зміну властивостей поверхні та запропонувати пояснення їх впливу на реакцію поверхневого шару при проведенні прискорених та довготривалих випробувань на утомну міцність.

Об'єкт дослідження – процес утомного поверхневого руйнування в результаті контактної взаємодії при терті, що визначає енергетичний стан поверхневого шару.

Предмет дослідження – надійність деталей, що працюють в умовах високих контактних навантажень.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження базувалися на системному аналізі та теорії надійності технічних систем. Експериментальні дослідження ґрунтувалися на теорії статистичної оцінки середньої глибини втомних пошкоджень за результатами довготривалих випробувань.

Трибологічні дослідження на тертя та зношування проводились на модернізованій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 у поєднанні з комплексними металофізичними дослідженнями поверхневого шару трибосистем (ТС), зміцнених цементацією та іонно-плазмовим азотуванням. Металофізичні дослідження включали такі методи.

Вимірювання твердості трибоелементів проводили за методом Роквелла, а після механічної обробки – за методом Віккерса. Вимірювання твердості за Роквеллом здійснювали на автоматичному стаціонарному твердомірі УІТ HR-300 відповідно до ГОСТ 9013-59 і ISO 6508.2. Вимірювання твердості за Віккерсом проводили на стаціонарному твердомірі УІТ HV-10/30/50 відповідно до ГОСТ 2999-75.

Мікротвердість вимірювали за допомогою твердоміра ПМТ-3 відповідно до ГОСТ 9450-60.

Шорсткість і профіль поверхні зразків перед випробуваннями, а також при оптимізації режимів фінішної обробки визначали за допомогою

профілометра-профілографа TR200 фірми JENOPTIK, відповідного стандартам ISO 4287-1997.

Дослідження проводились у лабораторії АТ “ФЕД”.

Мікроструктура при великих збільшеннях і з високою глибиною різкості вивчалася на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106 виробництва ОАО SELMI.

Для ідентифікації фазового складу поверхневого шару зразків було виконано рентгеноструктурні дослідження на дифрактометрі ДРОН-2.0 у фільтрованому випромінюванні Fe-K α . Зйомка дифрактограм для фазового аналізу здійснювалася у схемі θ -2 θ сканування з фокусуванням за Брегом–Брентано в інтервалі кутів від 25 до 140 град.

Для реєстрації інтенсивності зношування було використано метод реєстрації швидкості зношування випробовуваних зразків у реальному масштабі часу за допомогою методу акустичної емісії (АЕ). Прийом та реєстрація сигналів АЕ виконувалася за допомогою інформаційно-діагностичної системи з широкосмуговим датчиком АЕ ДИСМ1 з робочою смугою частот від 200 кГц до 1200 кГц.

Оцінювання кількісних показників КМ проводили ваговим методом та за статистичною оцінкою середньої глибини утомних пошкоджень.

Обробка результатів експериментів виконувалася із застосуванням стандартних комп’ютерних програм, з використанням середовища Mathcad.

Наукова новизна одержаних результатів. Положення, що характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, полягають у такому.

1. Отримав подальший розвиток метод оцінки втомної міцності матеріалів насоса паливної системи повітряного судна при контактній взаємодії тертя, в якому, на відміну від відомих, використовується енергетичний критерій, а показником в якості критерію визначена питома енергія руйнування поверхні за один цикл навантаження $E_{\text{пит}}$, що дозволяє підвищити якість оцінки контактної утомної міцності.

2. Розвинуто підхід до експериментальних досліджень конструкційних матеріалів на контактну втомну міцність шляхом проведення випробувань імпульсним навантаженням, величина якого визначалася як 0,95 навантаження руйнування, який істотним чином зменшує час експертної оцінки при проведенні порівняльних випробувань різних конструкційних матеріалів чи порівняння різних видів їх модифікації.

3. Отримав подальший розвиток структурно-енергетичний метод оцінки показників контактної утомної міцності матеріалів, в якому, на відміну від відомих, проведено кількісну оцінку енергії дисипації конструкційних матеріалів після імпульсного навантаження за показниками акустико-емісійного випромінювання.

4. Отримало подальший розвиток уявлення про зв'язок характерної мікроструктури поверхні після азотування з високими показниками її втомної міцності при меншій товщині зміцненого шару у порівнянні з традиційною цементацією.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримані нові наукові результати дозволили практично скоротити термін випробування варіантних проробок різних методів зміцнення поверхонь при терті на концептуальному етапі розробки об'єктів машинобудування, а саме агрегатів, до складу яких входять зубчасті передачі, зокрема шестеренчастих насосів паливної системи повітряних суден.

Безпосереднє застосування визначеного найкращого методу зміцнення поверхонь дозволяє збільшити ресурс таких агрегатів, що в цілому підвищує надійність систем, до складу яких вони входять. Це є критичною складовою у системі заходів забезпечення безпеки польотів на етапі прийняття інженерних, технічних та технологічних рішень як при модернізації існуючих, так і при розробці перспективних зразків об'єктів машинобудування взагалі та авіаційної техніки (літаків) зокрема.

Крім цього, практично важливою є методика прискорених випробувань та запропонований енергетичний критерій контактної втомної міцності для обрання технології зміцнення поверхневого шару. Ці практичні результати дисертаційних досліджень були впроваджені у виробництві АТ “ФЕД” при проведенні порівняльних випробувань на контактну втомну міцність зразків, зміцнених цементуванням та плазмовим азотуванням, про що свідчить Акт впровадження та Науково-технічний звіт за участю автора.

Визначено високу ефективність методу акустичної емісії для реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального механохімічного зношування до початкових руйнувань багатоциклового втомного зношування.

Визначено перевагу іонно-плазмового азотування порівняно з традиційною цементацією. Інтегральна багатоциклова стійкість до втомного зношування (руйнування) зразків, зміцнених іонно-плазмовим азотуванням (з глибиною шару 0,25 мм), у 10 разів вище, ніж у зразків, зміцнених цементацією (з глибиною шару 1,2 мм), що дає основу для повномасштабних стендових випробувань та впровадження цього методу у виробництво.

Особистий внесок здобувача.

Особисто опубліковані наукові праці 5, 6 (1, 3 розд.).

У наукових працях, опублікованих у співавторстві здобувачу належать: порівняльна оцінка ресурсних показників (контактної втомної міцності) ТС при різних видах зміцнення їх поверхонь методом акустичної емісії при проведенні випробувань за прискореною методикою 1, 7 (2, 4 розд.) та при довготривалих випробуваннях 3, 7 (2, 4 розд.); визначення переліку фрактографічних, мікроструктурних і фазових досліджень особливостей поверхневих шарів зразків, зміцнених різними методами, для виявлення причини значної переваги іонно-плазмового азотування перед цементуванням за показником утомної міцності 2, 7 (1, 2 розд.); методологія використання акустичної емісії для реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального механохімічного зношування до початкових

руйнувань багатоциклового втомного зношування 1, 3, 7 (2, 4 розд.); необхідність та методика проведення експериментальних досліджень для оцінки параметрів зносостійкості від малоциклової утоми трібоспряжень з різними видами зміцнення 4 (4 розд.); теоретичний аналіз процесів утомного контактного руйнування при терті та визначення, що як і універсальну базу для опису зміни стану поверхневого шару можна застосовувати структурно-енергетичну теорію, а енергію активації руйнування можна розглядати як практичну характеристику міцності матеріалу 4, 7 (1 розд.); аналіз механізмів дисипації енергії поверхневого шару в процесі утомного руйнування. Визначення, що трибосистема працює як синергетична відкрита термодинамічна система, що знаходяться далеко від рівноважного стану, а її фундаментальною властивістю є здатність до саморегулювання, самоорганізації та адаптації до зовнішніх умов 1, 3, 7 (1, 3 розд.).

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися та обговорювалися на:

- XV міжнародній науковій конференції ХНУПС “Новітні технології для захисту повітряного простору” (Харків, ХНУПС, 10 – 11 квітня 2019 р.);
- XX міжнародній науково-технічній конференції Асоціації спеціалістів промислової гідравліки і пневматики “Промислова гідравліка і пневматика” (Київ, НАУ, 22–25 жовтня 2019 р.);
- XVI науковій конференції ХНУПС “Новітні технології для захисту повітряного простору” (Харків, ХНУПС, 15 – 16 квітня 2020 р.);
- XIX міжнародній науковій конференції “Інтегровані технології та енергозбереження” НТУ “ХП” (Харків 11–16 травня 2020 р.);
- XVII міжнародній науковій конференції ХНУПС “Новітні технології для захисту повітряного простору” (Харків, ХНУПС, 14–15 квітня 2021 р.);
- міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні питання протидії загрозам з повітря” (Київ, НУОУ імені Івана Черняхівського, 20 жовтня 2021);

– XVIII міжнародній науковій конференції ХНУПС “Новітні технології для захисту повітряного простору” (Харків, ХНУПС, 27–28 липня 2022 р.);

– II Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції “Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки” (Вінниця, ВНТУ, 17–18 листопада 2022 р.);

– XIX міжнародній науковій конференції ХНУПС “Новітні технології для захисту повітряного простору” (Харків, ХНУПС, 12–13 квітня 2023 р.);

– III Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції “Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки” (Вінниця, ВНТУ, 15–16 листопада 2023 р.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 183 сторінки, у тому числі 3 додатки. Обсяг основного тексту дисертації становить 147 сторінки, 47 рисунків, 18 таблиць. Список використаних джерел нараховує 203 найменування.

Розділ 1

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ, ПРИСВЯЧЕНИХ ПІДВИЩЕННЮ НАДІЙНОСТІ ТА РЕСУРСУ АГРЕГАТИВ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Авіаційний транспорт нині в усьому світі відіграє велику роль в рішенні широкого спектра життєво важливих для держави завдань в економічній, військово-стратегічній, політичній, соціальній, науковій та культурній сферах. Тому проблема безпеки польотів набуває особливо важливого соціального значення. Вона забезпечується доведенням льотно-технічних характеристик повітряних суден до рівня, що відповідає новим міжнародним нормам (за шумом, емісією, аеронавігацією), і забезпечення їх конкурентоспроможності та розробкою науково-технічних рішень з метою поліпшення ресурсних, економічних та експлуатаційних характеристик авіаційної техніки.

Бурхливий розвиток науки та технологій останнього часу зумовлює постійне вдосконалення конструкцій окремих агрегатів ПС та їх систем. Збільшення ресурсу АТ у сучасних обставинах (проблеми зі справністю) є актуальним, як ніколи, завданням. Ресурс агрегатів двигунів та трансмісій авіаційної техніки визначається здатністю уникати втомного руйнування поверхонь тертя зубчастих коліс завдяки контактній міцності матеріалу. А вона може бути підвищена шляхом зниження механічних і термічних впливів на контактуючі поверхні внаслідок їх деформації при терті [4, 5]. Для цього розробляються нові КМ для агрегатів АТ та нові способи зміцнення вже існуючих матеріалів.

Але прийняття рішення про довготривалі та кошторисні дослідження, навіть спрямовані на збільшення ресурсу АТ та підвищення безпеки польотів, неможливе без ретельного визначення їх актуальності та нагальної потреби.

Відомо, що втомне контактне зношування виникає в результаті повторного деформування мікроб'ємів матеріалу, яке викликає утворення тріщини та відділення частинок матеріалу. Циклічно змінні контактні напруги призводять до поверхневого руйнування у вигляді викришування (пітинг),

тріщин, віспевидного зношування, відшаровування. Утворені раковинки з діаметром від сотих долі міліметра до кількох міліметрів збільшуються в процесі роботи вузла тертя, виникає луцення поверхні. Кількісна оцінка контактної втоми виражається в числі циклів навантаження і в годинах роботи до виникнення втомних руйнувань поверхонь [6,7].

Умови виникнення і кінетика розвитку втомного контактного зношення залежать від напружено-деформованого стану поверхонь і поверхневих шарів матеріалу, фізико-механічних властивостей матеріалу, фізико-хімічних властивостей мастильних матеріалів та навколишнього середовища, товщини мастильного шару, кінематики контакту, форми та розмірів контактуючих поверхонь [8-9].

У роботах [10-13] проведено докладний аналіз причин недостатньої утомної міцності конструкційних матеріалів.

Умовами появи викришування, пов'язаними з пластичними деформаціями, можна пояснити позитивний вплив підвищених значень межі пружності, плинності, в'язкості матеріалу, твердості несучої поверхні матеріалу, а також визначальний вплив дислокаційних процесів – утворення порожнин. Цей фактор обумовив розробку нових методів зміцнення, які забезпечують високі показники мікропластичних властивостей поверхневого шару, що є основним напрямком досягнення високих показників утомної міцності у наших дослідженнях [14-19].

Усвідомлення впливу цих факторів, на підвищення надійності та ресурсу агрегатів авіаційного транспорту, сприяло широкому використанню різних методів модифікації і зміцнення поверхневих шарів деталей з метою збільшення їх життєвого циклу. Традиційно це завдання вирішується підвищенням твердості контактуючих поверхонь, застосуванням антифрикційних покриттів і мастил [12, 13, 17, 19].

Вирішенню проблеми підвищення життєвого циклу деталей АТ технологічними методами присвячено багато робіт [20-27], але, попри це, воно не втрачає своєї актуальності.

Подальший розвиток технологічних методів збільшення ресурсу деталей АТ неможливий без аналізу мікроструктурних особливостей матеріалу, які забезпечують дисипацію енергії, що підводиться ззовні. Найбільш ефективним теоретичним напрямом такого аналізу є структурно-енергетична теорія міцності [28, 29]. Ретельний аналіз перерахованих методів, дозволив виділити високошвидкісне газополум'яне напилювання покриттів як метод, що має широкі технологічні можливості і економічну ефективність.

1.1 Синергетичні та структурно-енергетичні моделі оцінки утомної міцності деталей агрегатів АТ, працюючих в умовах контактного навантаження

1.1.1 Теоретичний аналіз процесів утомного контактного руйнування при терті

Нині втомна теорія зношування отримала загальне визнання. У багатьох роботах [10, 12, 14, 30-38] можна знайти обґрунтування втомного характеру механічних і корозійно-механічних видів зношування, відмінність між якими полягає в кількості циклів до руйнування матеріалу.

Втомний знос найбільш характерний при терті кочення в кулькових і роликових підшипниках, опорно-поворотних пристроях, катках, бандажах, що обертаються і т. д.

Перші пояснення втоми пов'язували з наявністю при терті високочастотних пружних знакозмінних навантажень, що виникають у матеріалі поверхневого шару внаслідок періодичного зачеплення та розчеплення виступів шорсткостей контактуючих поверхонь. За оцінками [35], частота контактування виступів знаходиться в межах 105–107 Гц. При цьому вважалося, що пластичний контакт має місце лише під час припрацювання поверхонь, а потім, після багаторазових циклів деформації, взаємодія поверхонь стає переважно пружною (І. В. Крагельський) [38]. На відміну від

цього погляду, Д. М. Чаллен [34] показав, що пластичні деформації відіграють основну роль у процесі утворення частинок зносу навіть після припрацювання поверхонь. При цьому руйнування поверхневого шару є результатом малоциклової втоми і кількість циклів деформування поверхні може визначатися з рівняння Менсона–Коффіна. Нещодавні дослідження з використанням хвильової моделі контакту дали можливість зробити аналогічний висновок [34, 36, 39-41]. Проте питання механізму втомного руйнування до тепер перебуває у стадії розвитку, що підтверджується пошуками критерію втомного руйнування та пропозицією нових гіпотез. Зокрема А. Елеод [36] визначив, що відділення часток зношування може бути викликане трьома факторами:

- зниженням роботи руйнування матеріалу поверхневого шару до нульового значення під впливом різних факторів у полі пружних напруг;
- накопиченням пошкоджень в умовах пружної напруги;
- вичерпанням ресурсу пластичності у сфері пластичного контакту.

Усі три процеси мають загальний характер, за яким руйнування настає при вичерпанні локального ресурсу пластичності [28, 30, 32, 35, 42, 43].

Як універсальну базу для опису зміни стану поверхневого шару можна застосовувати структурно-енергетичну теорію, у якій критичний стан матеріалу пов'язується з досягненням щільності внутрішньої енергії системи величини енергії активації руйнування, при якій дисипативна система переходить до точки біфуркації [11, 44-47].

Згідно з сучасним й уявленнями про руйнування твердих тіл, енергію активації руйнування можна розглядати як практичну характеристику міцності матеріалу.

Фундаментальні дослідження кінетики пошкоджуваності та тривалої міцності конструкційних матеріалів почали вестися з середини минулого століття завдяки відомим роботам академіка С. М. Журкова [48-51], у яких було закладено основи нової термофлуктуаційної теорії міцності твердих тіл. Він вперше встановив однозначну залежність довговічності матеріалів при

повзучості від прикладеного навантаження та температури, зв'язок між якими здійснювався через активаційні параметри руйнування – енергію активації U_0 та структурно-чутливий коефіцієнт γ .

Спроби теоретичного опису емпіричного рівняння Журкова С.Н. на основі фундаментальних наукових принципів тривають і досі [52-55]. Разом з емпіричною оцінкою активаційних характеристик руйнування матеріалів, довгий час проводилися дослідження кінетики пошкоджуваності матеріалів, засновані на фізичних методах дослідження закономірностей зміни мікроструктури та еволюції дефектів кристалічної решітки впритул до руйнування матеріалів [1, 56-59].

Теоретичною основою фізичних досліджень стала теорія І. Р. Пригожина про стійкість та флуктуації у відкритих системах, які знаходяться далеко від рівноваги [44, 45, 60-64]. Поєднати накопичений досвід дослідження кінетики пошкоджуваності та руйнування матеріалів вдалося на основі нового міждисциплінарного напрямку – синергетики, засновником якої можна вважати Г. Хакена [65-69].

Не дивлячись на те, що енергетичні методи оцінки параметрів зношування застосовуються в трибології вже більше півстоліття, ще досі експериментальні дослідження зміни накопиченої енергії поверхневих шарів у процесі зношування практично не проводилися – не було відповідних методик та технічних засобів. Традиційні термодинамічні методи оцінки енергії активації руйнування матеріалів є довготривалими, трудомісткими та непридатними для дослідження тонких, модифікованих тертям поверхневих шарів, що стало серйозним бар'єром для широкого застосування в трибології енергетичних критеріїв міцності та розрахункових моделей зношування кінетичного типу.

На основі аналізу загальної структури моделей зношування та виразів для визначення довговічності поверхневих шарів, автором [12] отримано моделі для інженерних розрахунків швидкості поверхневого руйнування в результаті контактної взаємодії матеріалів. Показано, що для виконання таких

розрахунків достатньо оцінити значення енергії активації U_0 , мікротвердості H_μ та товщини поверхневого модифікованого шару h незалежно від технологій такої модифікації. Для оцінки U_0 запропоновано використовувати кінцево-елементне моделювання фрикційного контакту двох шорстких поверхонь.

Але досі проблему моделювання поверхневого руйнування в результаті контактної взаємодії не можна вважати вирішеною. Складність опису цих ефектів посилена специфікою модифікованого матеріалу поверхневого шару. Так, при описі процесу накопичення пошкоджень у матеріалі поверхневого шару доцільно переходити на макрорівень [12].

На сьогодні встановлено, що на процес утомного зношування найбільше впливає саме процес пластичної деформації, що протікає при терті на вершинах виступів шорсткостей і призводить до малоциклового втомного руйнування поверхневого шару [70, 71].

Багатьма вченими підтримується думка про глибокий зв'язок між об'ємними та поверхневими втомними явищами. Ця думка підтримується результатами рентгеноструктурних досліджень, за допомогою яких було доведено, що дислокаційні субструктури, які формуються при терті, аналогічні тим, що утворюються при об'ємному деформуванні матеріалів [1, 72, 73].

А. Л. Жарін встановив взаємозв'язок між результатами циклічних випробувань на контактну міцність та об'ємними втомними властивостями матеріалів. При цьому один цикл втомного диспергування поверхневого шару прирівнюється до класичного випробування одного зразка на міцність втоми [74]. При всій привабливості такого підходу повторно зазначимо, що властивості поверхневого шару, який деформується тертям, суттєво відрізняються від об'ємних, що може призвести до значних похибок, про що у своїй роботі також зазначав В. В. Федоров [70, 71].

Похибки при моделюванні контактної взаємодії без урахування товщини поверхневого модифікованого шару обумовлені нерівномірністю розподілу енергії у цьому шарі та її залежністю від його структурного стану.

Тобто, в процесі моделювання необхідно враховувати товщину модифікованого шару та фізико-механічні властивості саме цього шару, а не об'ємні властивості матеріалу. Та розрахунки структурно-енергетичного балансу трибосистем треба виконувати саме для цих модифікованих поверхневих шарів, які беруть участь у терті.

1.1.2 Аналіз механізмів дисипації енергії поверхневого шару в процесі утомного руйнування

Дисипація механічної енергії при терті зумовлює появу в зоні контакту ряду ефектів, що мають різну природу і ступінь інтенсивності. Внаслідок цього вузол тертя може розглядатися як генератор власних і поглинач зовнішніх теплових, акустичних, хімічних, сорбційних, дифузійних, втомних і інших процесів.

Схема руйнування поверхневого шару може бути описана такою послідовністю: “механічна дія → деструкційні процеси → еволюційні (акомодаційні) процеси → досягнення граничного стану → утворення частинок зносу”. У загальному випадку дисипація механічної енергії при терті відбувається за кількома напрямками, спрощена схема яких представлена в роботі [75].

На кожному з етапів роботи ТС відбувається перерозподіл енергії і, згідно з принципами нерівноважної термодинаміки [76, 77], одні дисипативні механізми стають переважаючими, інші, навпаки, кінетично загальмовуються. Основною проблемою, яка досі залишається невирішеною, є кількісна оцінка величини внутрішньої енергії на кожному з масштабних рівнів поверхневого шару. Ця величина суттєво залежить від способу та технології модифікування поверхонь [78-80].

У цілому точне уявлення про поверхневий шар, що деформується тертям, можна отримати, розглядаючи його як синергетичну систему. До таких систем відносяться відкриті термодинамічні системи, що знаходяться далеко від рівноважного стану. Їх фундаментальною властивістю є здатність

до саморегулювання, самоорганізації, гомеостазу та адаптації до зовнішніх умов [64, 65, 67, 68].

Саморегулювання засноване на принципі мінімуму виробництва ентропії Гленсдорфа-Пригожина і спрямоване на оптимізацію стану системи в енергетичному фазовому просторі за рахунок пріоритетної активації малоенергоємних дисипативних механізмів, таких, як мікропластична деформація. Це дозволяє системі максимально зберігати стійкість при потраплянні до неї великих потоків енергії на початковому етапі роботи ТС (при її початковому навантаженні). Цей принцип ранжирує дисипативні механізми і створює послідовно зростаючу в просторових і часових масштабах ієрархію дисипативних систем, яка визначає їхню еволюцію в поверхневих шарах при терті [81, 82].

Це проявляється у відомому факті, що основна частка дисипації енергії припадає на нагрівання (80...90 %), а не на поглинання енергії матеріалом (до 10...20 %) [71].

При терті поверхневий шар проявляє властивість адаптивності до зовнішніх умов шляхом безперервного активного пристосування за рахунок внутрішнього підстроювання до постійно мінливих зовнішніх чинників. Адаптація здійснюється відповідно до принципу найменшого примусу Ле-Шательє-Брауна [83], який вказує на те, що реакція системи завжди спрямована на ослаблення зовнішнього впливу, що відхиляє її від стану рівноваги. Ця обставина дозволила розробити найбільш оптимальний режим припрацювання ТС в умовах імпульсного навантаження до максимально можливих величин для даної ТС [84-88].

Таким чином, зовнішні прикладені сили втратили роль причини руйнування і стали лише його умовою, необхідною для запуску внутрішніх дисипативних механізмів. Роботу з руйнування поверхневого шару здійснюють внутрішні сили, що сформувалися в результаті обміну енергією дисипативної системи з навколишнім середовищем.

Таким чином, самоорганізація нових структур врівноважує надлишкову енергію матеріалу і відбувається за рахунок цієї енергії. Основною умовою самоорганізації дисипативних структур на більш високих масштабних рівнях,

відповідно до теорії І. Р. Пригожина, є незворотність кінетичних актів на мікрорівні [60-64]. Тобто структурування на початковому етапі роботи ТС є достатньо важливим фактором та визначає її ресурсні показники.

Дотримуючись такого підходу, В. В. Федоров запропонував свою термодинамічну концепцію руйнування матеріалів під час пластичної деформації та при зношуванні [70, 71].

У його роботах руйнування опосередковане конкуренцією двох взаємопов'язаних, але протилежних тенденцій зростання щільності ушкоджуваності та зниження (вивільнення) цієї енергії за рахунок релаксації.

Приховану енергію пошкодження створюють флуктуації теплової енергії в полі механічних напруг. Прихована енергія є константою, що характеризує втомну контактну міцність. Так, для сталі 45 ця величина становить близько 700...750 Дж/м³.

У той же час, визначення критичної щільності прихованої енергії є досить складним завданням [89-92]. Найпростішим розв'язком цього завдання є визначення загальної підведеної енергії до початку втомних руйнувань поверхні [93].

При досягненні критичної щільності прихованої енергії відбувається руйнація, як показано на рис. 1.1 залежно від величини діючих напруг [70, 71].

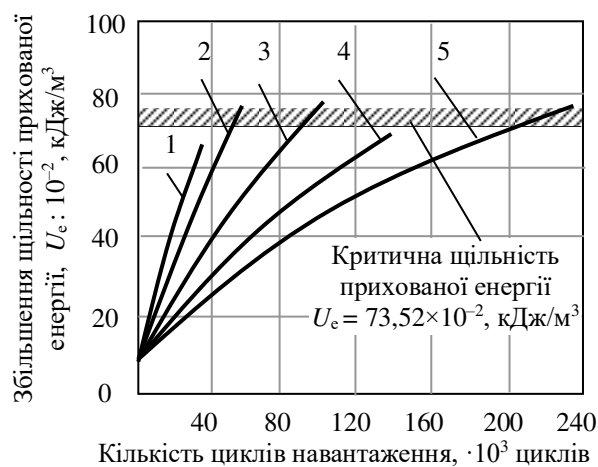


Рисунок 1.1 – Характеристика руйнування по В. В. Федорову

Кінетичні криві зміни щільності прихованої енергії U_c в деформованому об'ємі матеріалу (сталь 45) до моменту руйнування при N циклів навантаження становили [70, 71]:

- 1) $\sigma_a = 25,3 \text{ кгс/мм}^2, N = 28 \times 10^3$ циклів;
- 2) $\sigma_a = 24,8 \text{ кгс/мм}^2, N = 59 \times 10^3$ циклів;
- 3) $\sigma_a = 23,9 \text{ кгс/мм}^2, N = 88 \times 10^3$ циклів;
- 4) $\sigma_a = 23,1 \text{ кгс/мм}^2, N = 133 \times 10^3$ циклів;
- 5) $\sigma_a = 22,5 \text{ кгс/мм}^2, N = 265 \times 10^3$ циклів.

З рис. 1.1 видно, що для скорочення часу порівняльних випробувань матеріалів на контактну втомну міцність, ці випробування потрібно проводити при максимально можливих для цього матеріалу контактних навантаженнях. Визначення цього максимального рівня навантаження є окремим завданням. Прикладами можуть бути методики, викладені у роботах [89-92].

Таким чином, завданням порівняльних випробувань є визначення критичної щільності прихованої енергії, за допомогою якої можна порівнювати утомну контактну міцність матеріалів. Методика вирішення цієї задачі також викладена у [89-92].

Таким чином, імпульсне навантаження до максимальних величин на початковому етапі роботи ТС забезпечує можливість швидкої оцінки змін у структурно-енергетичному балансі поверхневого шару до початку руйнування. Для цього необхідно використовувати динамічні методи оцінки показників утомної міцності матеріалів, що працюють в умовах контактного навантаження. Приклади використання таких методів наведено у роботах [93-111].

1.2 Аналіз методів іонно-плазмового модифікування поверхневого шару як фактора підвищення ресурсних показників деталей АТ, працюючих в умовах високих контактних навантажень

Серед методів, які використовуються для підвищення контактної міцності матеріалів, широко використовуються термо-хімічні методи

цементациї поверхні матеріалів. Методи азотування також використовуються для підвищення контактної міцності матеріалів, хоча і рідше, ніж цементация. Останнє, мабуть, значною мірою пов'язане з традиційними уявленнями про перевагу у формуванні зміцнених шарів великої протяжності при цементациї в порівнянні з азотуванням, як одного з основних факторів, з яким пов'язують підвищення контактної міцності. Цим, мабуть, зумовлена обмежена кількість досліджень щодо впливу азотування на величину контактної міцності матеріалів [112-120].

У разі цементациї відбувається зміцнення з одночасним накопиченням енергії на межі розділу зерен, які надалі зумовлюють виникнення мікротріщин. Крім того, виділення енергії при контактній взаємодії поверхонь веде до їх нагрівання і руйнування в цементованому шарі карбідів, наслідком чого є зменшення контактної міцності [80].

Для азотування слід очікувати, що припинення зовнішнього впливу буде приводити до швидкої зміни структури, а отже – до релаксації залишкових напружень. Це дозволяє сподіватися, що методи азотування можуть бути більш ефективними для підвищення контактної міцності матеріалів, ніж цементация [80].

При обробці концентрованими потоками енергії в умовах іонно-плазмового азотування одночасно здійснюється радіаційний, тепловий та ударно-механічний вплив. Процеси зміни структури, які розвиваються при цьому, відбуваються в умовах, далеких від термодинамічно рівноважних, що дозволяє отримувати поверхневі шари з унікальним комплексом фізико-механічних властивостей [1, 121]. Плазмову обробку можна умовно розділити на 2 види: високоенергетичну та низькоенергетичну. Серед способів високоенергетичного впливу найбільшого поширення набула іонна імплантація [1, 122, 123].

Під іонною імплантацією розуміють процес впровадження іонів у матеріал виробу на деяку глибину і, як наслідок, виникнення різноманітних дефектів та поверхневе легування. При цьому енергія іонів повинна істотно перевищувати енергію зв'язку атома в решітці матеріалу, що легується (в

матриці). При високодозній іонній імплантації в поверхневому шарі формується настільки потужна дислокаційна структура, що виникає велика кількість дислокаційних петель [1, 124, 125].

Раніше проведені трибологічні дослідження зразків зі сталі 20Х3МВФ, зміцнених традиційною газовою цементацією і плазмовим азотуванням AVINIT N, показали, що зносостійкість зразків в середовищі палива ТС-1, зміцнених азотуванням AVINIT N, істотно вище, ніж зразків, зміцнених традиційною цементацією [89-92, 132, 133].

Таким чином, проведений аналіз дозволяє прогнозувати, що азотування за своїми показниками утомної міцності для деталей АТ, які працюють в умовах контактної взаємодії, може мати значні переваги перед традиційною цементацією. Але поки що цей метод зміцнення не набув поширення у авіації у зв'язку з відсутністю достатньої кількості теоретичних та експериментальних досліджень, а також супутніх їм комплексних порівняльних металофізичних досліджень.

1.3 Аналіз методів оцінки показників утомної міцності матеріалів, що працюють в умовах контактного навантаження, на етапі розробки та впровадження

Дослідження показників утомної міцності матеріалів, що працюють в умовах контактного навантаження, можуть проводитися на етапі розробки та впровадження методами неруйнівного контролю [134].

Оцінка утомної міцності конструкційних матеріалів після модифікування їх поверхневого шару виконується експериментальними методами. У процесі таких випробувань, як правило, виконуються комплексні металофізичні та електрофізичні дослідження структури поверхневого шару. Особливу роль при цьому відіграють методи оцінки, які дозволяють реєструвати процес накопичення утомних пошкоджень та забезпечують

перехід до пітінгового руйнування безпосередньо під час випробувань у реальному масштабі часу. До них належать зокрема електрофізичні методи.

1.3.1 Методи експериментальної оцінки енергії активації руйнування поверхневих шарів при терті

Більшість існуючих методик оцінки енергії активації руйнування матеріалів за результатами випробувань на тривалу міцність ґрунтуються на рівнянні довговічності С. М. Журкова (1.1) [12, 135, 136].

У іншому способі з метою підвищення точності оцінки енергії активації матеріалу при характерному для тертя напруженому стані у відомий спосіб внесений новий елемент, що наближає умови випробування до умов тертя [137, 138]. На сьогодні встановлено, що деформація може здійснюватися за рахунок різних механізмів, які діють на мікрорівні, кожен з яких має власну величину енергії активації. Підтвердженням цього є експерименти, поставлені Д. Дорном та з його колегами співробітниками [139].

Поширеним є спосіб дослідження енергії активації руйнування матеріалу поверхневого шару методом мікротвердості [135, 140], при якому вимірюють діагональ відбитків індентора D при різних температурах, навантаженнях на індентор та тривалості дії навантаження.

Головна перевага цього способу полягає в тому, що енергія активації руйнування досліджується в тонкому поверхневому шарі матеріалу, який відображає аномалію його властивостей, зумовлену межею твердого тіла (обривом зв'язків) та наслідками його обробки. Однак при цьому неможливо оцінити вплив анізотропії механічних властивостей при спільній дії нормальних та дотичних напруг, що діють на поверхні при терті.

Аналізу методів оцінки прихованої енергії руйнування та дослідження кінетики енергетичних змін у процесі пластичної деформації матеріалів присвячені роботи С. Е. Гуревича, І. М. Копьєва, Б. К. Барахтіна, С. А. Іванова,

П. П. Петрова та ін. [141, 142], які вперше встановили основні закономірності накопичення прихованої енергії деформації. Суть отриманих ними результатів зводиться до таких положень [142, 143]:

- 1) з деформацією матеріалу інтенсивність зростання прихованої енергії зменшується з тенденцією до насичення;
- 2) накопичена енергія деформації значно перевищує енергію пружної деформації матеріалу;
- 3) фізично прихована енергія формується за рахунок утворення та взаємодії лінійних, точкових та інших дефектів кристалічних решіток.

Більш ретельно до оцінювання щільності енергії руйнування підійшов В. В. Федоров, який запропонував враховувати тепловий ефект деформації, що становить значну частку від витраченої на руйнування матеріалу енергії. У проведених ним утомних випробуваннях зразків періодично фотографувалися петлі гістерезису, площа яких визначалася графічним інтегруванням (планіметруванням) або розрахунковим способом [71].

Область застосування механічного підходу обмежена вивченням активаційних характеристик деформації та руйнування матеріалів при пластичній деформації. Однак вибір оптимальних температурно-швидкісних умов пластичної деформації не тільки важливий для трибології, але і є одним із важливих завдань для визначення режимів обробки металів та сплавів різанням та тиском.

Для механічної активації деформації та руйнування матеріалу поверхневого шару традиційно застосовуються два основних методи: вдавлення (індентування) і дряпання (склерометрія) поверхні твердими інденторами [144-148]. Основна сфера їх застосування – оцінка мікротвердості поверхневих шарів, наприклад, за ГОСТ 23.221-84.

Незважаючи на те, що можливості методу індентування за останні десятиліття істотно розширилися [149], другий випадок все ж таки ближчий до процесу деформації, що відбувається при реальному терті.

Метод склерометрії широко відомий і застосовується у трибології вже досить довгий час [143, 144, 150]. Цей метод має багатоцільовий характер, і тому нині він застосовується в багатьох країнах під час вирішення широкого кола завдань [10, 37, 151-1610].

Безумовно, такий метод оцінки енергії активації не дозволяє виявити ні кількість механізмів руйнування, що діють, ні їх частку в загальному процесі деформації.

Розвиток електронної бази дозволив перейти від створення окремих приладів до розробки автоматизованих склерометричних програмно-апаратних комплексів [108, 161].

Проте цей метод складний у реалізації, оскільки дуже важко дотримуватися умов сталості роботи деформації при дряпанні різних матеріалів у різних умовах, крім того, залишається необхідність у вимірюванні об'єму деформованого матеріалу, що вимагає точних дорогих датчиків або складних оптичних пристроїв, оскільки йдеться про дуже малі розміри деформованого мікрооб'єму.

У процесі реального тертя матеріал поверхневого шару зазнає багаторазової пластичної деформації [160, 162], що зрештою призводить до вичерпання запасу пластичності та робить матеріал схильним до крихкості [163].

Загальним недоліком розглянутих методів визначення енергії активації руйнування є їх проведення на зразках після проведення випробувань на утомну міцність. У той же час відомо, що після закінчення випробувань енергетичний стан поверхонь істотно змінюється за рахунок релаксації напружень [149, 150, 156]. Крім того, ці випробування, як правило, за кінематичною схемою не відповідають реальним умовам роботи трибоспряження. Для динамічної оцінки енергії активації руйнування доцільно використовувати метод акустичної емісії (АЕ) [8, 9, 94-111]. На першому етапі роботи ТС одразу після навантаження відбувається накопичення внутрішньої енергії у ефективному об'ємі взаємодії, яка

релаксується у результаті процесів пластичної деформації та дефектів, що виникають на субмікроскопічному рівні. Ці процеси генерують сигнали АЕ цілком певного енергетичного рівня [8, 9, 94, 111]. Таким чином, інтегральна величина енергії акустичного випромінювання до настання руйнування пропорційна енергії активації руйнування певного матеріалу. У цьому випадку враховуються синергетичні структурно-енергетичні зміни в поверхневому шарі ТС відповідно до синергетичного підходу І. Пригожина [61-64]. Така гіпотеза потребує експериментального підтвердження, що є одним із завдань нашого дослідження.

1.3.2 Металофізичні методи оцінки показників утомної міцності матеріалів

Методи визначення характеристик пар тертя можна умовно розділити на статичні і динамічні.

При всій вичерпності інформації, яку надають статичні методи дослідження поверхонь фрикційного контакту, на жаль вони не дозволяють проводити безперервний контроль процесу зношування, що значно звужує діапазон їх використання.

Цього недоліку позбавлені динамічні методи, що дозволяють безперервно контролювати процес зношування поверхонь фрикційного контакту без їх розбирання. Серед них виділяють активні і пасивні. До активних методів відносять методи радіоактивних ізотопів, вимірювання флуктуацій електромагнітних параметрів, інтенсивності гамма-, рентгенівського і лазерного випромінювань, роботи виходу електрона, тангенса кута діелектричних втрат, інтенсивності екзоелектронної та іонної емісії, швидкості поширення електромагнітних хвиль [164-166].

Статичні методи засновані на реєстрації результатів дії після контактної-фрикційної взаємодії. Одним із найбільш поширених методів є фрактографічний аналіз поверхонь фрикційного контакту [167].

При вивченні рельєфу фрикційних поверхонь та структурних характеристик поверхневого шару матеріалів вузлів тертя застосовують оптичну й електронну мікроскопію. Оптична мікроскопія здебільшого використовується для одержання інформації про розміри і розподіл структурних складових матеріалу за фотографіями полірованих та злегка протравлених ділянок робочих поверхонь вузлів тертя або зразків матеріалу (шліфів). Їх обробка дозволяє вимірювати розміри зерен і їх складових [167].

Електронні мікроскопи дозволяють одержати збільшення, набагато більше, ніж в оптичних – до 500 000 разів і більше. На електронних мікроскопах можливі зйомки “на просвіт”, якщо вивчається структура й стан тонких плівок, а також при віддзеркаленні. У режимі віддзеркалення працюють растрові електронні мікроскопи (РЕМ). Метод РЕМ широко застосовуються для спостереження топографії поверхонь тертя. Наприклад, якщо поверхня містить осередки утомних руйнувань, то за фотографією мікрошліфів можна визначити глибину та розміри цих руйнувань.

Широке коло методів структурного аналізу засноване на дифракції рентгенівських променів, електронів і нейтронів, що можуть бути спрямовані на досліджуваній об’єкт. При рентгеноструктурному аналізі використовують промені з довжиною хвиль в інтервалі $0,05 \div 0,25$ нм [164, 165].

Одним із фізичних методів дослідження в трибології є спектральний аналіз, що дозволяє визначати речовини тонких поверхневих шарів на основі вивчення їхніх спектрів. При пошкодженні поверхні електричною дугою або іскровими розрядами аналізований матеріал випаровується і випускає світлове випромінювання [164-167].

Широко застосовуваним останнім часом став метод аналізу трибоелектрорушійної сили (трибо-ЕРС) з використанням апаратурного розділення постійної і флюктууючої складових [164-166]. Вимірювання трибо-ЕРС використовується при оцінці триботехнічних властивостей змащувальних матеріалів, визначенні термостійкості матеріалів деталей трибоспряження, дослідження характеру і режиму тертя. При цьому розглядається не тільки

середнє значення ЕРС, але і динаміка її зміни, а також підраховується кількість імпульсів ЕРС за заданий інтервал часу. Встановлено безпосередній зв'язок трибо-ЕРС із процесами зношування матеріалів вузлів тертя, а також процесами дефектоутворення залежно від умов фрикційної взаємодії [164-167].

Серед електричних методів визначення триботехнічних показників ефективним є метод вентиляного ефекту, заснований на випрямлянні частини змінного асиметричного струму, що пропускається через поверхні тертя. Метод вентиляного ефекту дозволяє досліджувати кінетику структурних перетворень поверхневих шарів при терті і одержати взаємозв'язок електричних параметрів з питомою роботою руйнування [167].

Використання значень роботи виходу електронів дозволило розробити метод контактної різниці потенціалів для оцінки стану поверхонь тертя. Проте застосування цього методу обмежене значним впливом чистоти поверхні, ступеня забруднення мастила на величину контактної різниці потенціалів [165].

Поширеними також є методи контролю продуктів зношування, що знаходяться в змашуваному середовищі. Застосування спектрального аналізу проб масла надає можливість визначити динаміку зміни концентрації частинок в маслі, що в свою чергу несе інформацію про стан сполучень, які труться [4, 168].

Також для дослідження процесів зношування використовується магнітометричний метод [169]. Використання цього методу дозволило встановити хорошу кореляційну залежність між напруженістю магнітного поля та інтенсивністю зношування. Проте недостатнє вивчення електромагнітного випромінювання при терті і складність виділення корисного сигналу робить недоцільним застосування цього методу в практичній діагностиці.

Слід зазначити, що більшість методів, які використовуються для діагностики трибосистем, надають інформацію або про післядію контактної-

фрикційної взаємодії, або про зміни, що відбулися в макрооб'ємах матеріалу, тоді як природа тертя і зношування пов'язана з мікродинамічними процесами в тонких поверхневих шарах матеріалів, що труться [170, 171].

Однак, для адекватного опису стану трибосистеми необхідні методи, що характеризуються високою чутливістю до кінетики процесів структурної перебудови і руйнування матеріалів. На думку ряду дослідників [100-107] до таких методів належить метод акустичної емісії (АЕ), що має унікальну можливість отримання достовірної інформації про швидкоплинні елементарні акти пластичної деформації і руйнування матеріалів при терті.

Можливість отримання інформації про процеси пружньопластичної деформації і руйнування в матеріалах сприяла широкому використанню методу АЕ в трибологічних дослідженнях і для діагностики технічного стану ТС.

Як інформативні параметри використовують різноманітні характеристики сигналів АЕ: загальну кількість імпульсів і швидкість лічби; амплітуду; енергію сигналу; амплітудний розподіл сигналів АЕ; спектральну щільність сигналів тощо. Кожен з цих параметрів характеризує певні аспекти процесу, що вивчається [100-107].

Крім того, одночасний багатопараметричний аналіз не уявляється можливим, і тому на практиці прагнуть використати невеликий набір параметрів, які б достатньо повно характеризували трибологічну систему. Систематизація основних досягнень в цій галузі дозволила провести розмежування джерел АЕ при фрикційній взаємодії вузлів тертя [109-111].

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1

1. Проведений огляд та аналіз доступних джерел свідчить, що серед трибоспряжень авіаційних агрегатів сучасних повітряних суден найбільш поширеними є зубчасті передачі, і тому їх безвідмовність та довгий ресурс роботи є визначальним чинником надійності роботи агрегатів повітряних

суден. А умови тертя цих трибоспряжень визначають вимоги до високої здатності протистояти контактному втомному руйнуванню.

2. Визначено, що універсальною базою для опису зміни стану поверхневого шару можна прийняти структурно-енергетичну теорію, у якій критичний стан матеріалу пов'язаний з досягненням щільності внутрішньої енергії системи величини енергії активації руйнування, при якій дисипативна система переходить до точки біфуркації. А енергію активації руйнування можна розглядати як практичну характеристику міцності матеріалу.

3. Визначено, що трибосистема працює як синергетична відкрита термодинамічна система, яка знаходиться далеко від рівноважного стану, а її фундаментальною властивістю є здатність до саморегулювання, самоорганізації, гомеостазу та адаптації до зовнішніх умов. При терті поверхневий шар проявляє властивість адаптивності до зовнішніх умов шляхом безперервного активного пристосування за рахунок внутрішньої адаптації до постійно мінливих зовнішніх чинників. Адаптація здійснюється відповідно до принципу найменшого примусу Ле-Шательє–Брауна. Самоорганізація і еволюція дисипативних структур завжди спрямовані на досягнення найбільшої довговічності існування синергетичної системи.

4. Виконано аналіз методів іонно-плазмового модифікування поверхневого шару як фактору підвищення ресурсних показників деталей АТ, що працюють в умовах високих контактних навантажень. Проведений аналіз дозволяє прогнозувати, що азотування за своїми показниками утомної міцності для деталей АТ, які працюють в умовах контактної взаємодії, може мати значні переваги перед традиційною цементацією. Але поки цей метод зміцнення не може знайти широкого застосування в авіації у зв'язку з відсутністю достатньої кількості теоретичних та експериментальних досліджень, а також супутніх їм комплексних порівняльних металофізичних досліджень.

5. Проведено аналіз методів оцінки показників утомної міцності матеріалів, що працюють в умовах контактного навантаження. Виділено дві основні групи методів:

– експериментальної оцінки енергії активації руйнування поверхневих шарів при терті;

– металофізичні методи оцінки показників утомної міцності матеріалів, які, у свою чергу умовно розділяють на статичні і динамічні.

Визначено що при порівняльних металофізичних дослідженнях поверхневих шарів конструкційних матеріалів на утомну міцність необхідно використання як динамічних, так і статичних методів аналізу. Серед динамічних методів досліджень найбільш розробленим є метод акустичної емісії. Серед статичних методів найбільш поширеними для мікроструктурних досліджень є фактографічні дослідження поверхонь з використанням електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу.

На основі результатів аналізу публікацій сформульовано мету та завдання дослідження.

Розділ 2

ЕНЕРГЕТИКА ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ЗМІЦНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА КОНТАКТНУ ВТОМНУ МІЦНІСТЬ

Розділ присвячений вирішенню першого та другого завдань дослідження. Практика показує, що моделі поверхневого руйнування, в яких не закладена теоретична база, заснована на фундаментальних законах термодинаміки, фізики міцності, механіки деформованого твердого тіла і ін., мають досить обмежену сферу застосування і в інженерних розрахунках, і при проведенні експериментальних досліджень.

Згідно з сучасними уявленнями про руйнування твердих тіл, оціночною характеристикою утомної міцності може бути енергія активації руйнування, яку можна розглядати як характеристику утомної міцності матеріалу [12, 20, 21, 28].

Не зважаючи на те, що енергетичні методи оцінки параметрів зношування застосовуються у трибології більше ніж півсторіччя, досі експериментальні дослідження зміни накопиченої енергії поверхневих шарів в процесі зношування практично не проводилися – не було відповідних методик та технічних засобів.

Основною проблемою енергетичної теорії руйнування, що оперує параметрами пошкоджуваності, є те, що вони за своєю природою важко спостережувані [15, 16, 71, 198]. Цю проблему можна вирішити за допомогою методу контролю, основанийого на аналізі параметрів сигналів акустичної емісії, які надходять безпосередньо із зони тертя [199]. Сучасний розвиток неруйнівних методів контролю, а саме методу акустичної емісії (АЕ), дозволив контролювати процеси як мало-, так і багатоциклового утомного зношування на усіх етапах роботи ТС [8, 199, 200]. Це і дало практичні основи для розробки методики прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності.

При імпульсному навантаженні перехід у збуджений стан відбувається під зовнішнім впливом (силовим, потоковим і т. д.) з інтенсивністю, вище деякої критичної. Це означає, що переходу передують накопичення певних елементарних збуджень, концентрація яких досягає критичного значення. При знятті зовнішнього впливу збуджений стан релаксує – надлишкова локальна латентна енергія перетворюється на теплову і виділяється з об'єму матеріалу.

Таким чином, можна визначити збуджений стан як деяку багатомасштабну дисипативну структуру, що утворюється під дією енергетичних впливів ззовні, має кінетичні і механічні властивості, відмінні від квазірівноважних, і релаксує досить швидко після зняття зовнішніх впливів.

На рис. 2.1 наведена схема структурної будови поверхневого шару сталевого зразка при терті, на який діє імпульсне навантаження при переведенні трибосистеми в збуджений стан. У відповідності з даними роботи [116], найбільш навантаженими є шари 2 і 3, в об'ємі яких зароджуються мікротріщини, що призводять до виразкових руйнувань. Тому структурна будова поверхневого шару досліджуваних матеріалів є визначальним в їх контактній витривалості (утомній міцності) фактором. Відомо [117, 120, 188], що процеси втоми в матеріалі поверхневого шару при механічному зношуванні розвиваються в локальній області, розміри якої визначаються конкретними умовами тертя. Поза цією областю структура матеріалу має іншу сутність. Тому розміри активованої зони можуть бути визначені експериментально, методами структурного аналізу матеріалу поверхневого шару по глибині після його навантаження (переведення в активний стан). Прагнення матеріалу до досягнення рівноважного стану включає різні механізми пасивації, що зменшують внутрішню енергію трибосистеми (ТС).

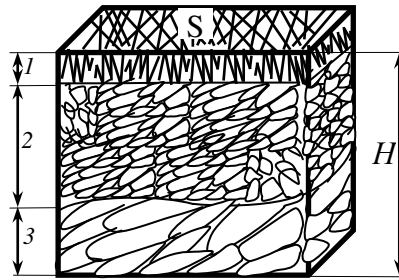


Рисунок 2.1 – Схема мікроструктурної організації поверхневого шару матеріалів трибосистеми за умов тертя з великими контактними навантаженнями: 1 – шар перенесення (вторинні структури), 2 – дрібноосередкова фрагментована структура, 3 – структура з нерівновісними осередками

Одним з таких механізмів є накопичення пошкоджуваності (рис. 2.1). При втомному зношуванні формуються дві області накопичення пошкоджуваності: перша зосереджена в тонкому поверхневому шарі 1, який накопичує дефекти і руйнується в режимі малоциклової втоми, а друга, поширюючись на велику глибину в шар 2, відповідає за кінетику розвитку контактної фрикційної втоми, яка протікає в багатоцикловому режимі [158].

У шарах 1 і 2 відбувається накопичення енергії, що і призводить до руйнування, а також дисипація роботи сил тертя. Тобто ці шари істотно впливають на коефіцієнт тертя.

Тому для моделювання енергетичного стану поверхневого шару конструкційних матеріалів в умовах імпульсного навантаження використовували структурно-енергетичний підхід [189-192].

2.1 Структурно-енергетична модель контактної втоми металів з урахуванням швидкості зовнішнього впливу (імпульсного навантаження)

Ресурс роботи деталей різних пристроїв і агрегатів у багатьох випадках визначається здатністю матеріалу протистояти втомному руйнуванню, у тому

числі втомному руйнуванню робочих поверхонь, що характеризується такою величиною, як контактна міцність матеріалу. Відомо, що контактну міцність, в загальному випадку, можна підвищити шляхом зниження механічних і термічних впливів на контактуючі поверхні внаслідок їх деформації і тертя [12, 93, 189-191].

2.1.1 Оцінка енергетичного балансу матеріалу в умовах імпульсного навантаження

Умовно виділимо на поверхні ефективного об'єму матеріалів (того, що бере участь у контактній взаємодії) (рис. 2.1) ділянку площею S , тоді, при глибині H , ефективний об'єм матеріалу $V_{м. еф} = SH$. В умовах контактної взаємодії відбуваються структурні зміни (деградація матеріалу, накопичення дефектів) зі швидкістю контактної взаємодії v_i . Ефективний об'єм матеріалу $V_{м. еф}$ після критичної кількості циклів взаємодії може зруйнуватися та перетворитися у продукт зносу (пітинг). У нашому випадку, цей об'єм формується на поверхнях обох контактуючих роликів по лінії контакту.

Очевидно, що деструкція та подальше руйнування вказаного об'єму матеріалу буде відбуватися у відповідності з мірою пошкоджуваності $z(t)$ поверхневого шару конструкційного матеріалу, яка залежить від балансу підведеної та накопиченої в цьому об'ємі енергії [70, 71].

Тоді досягнення моменту початку втомного руйнування може бути оцінено мірою пошкоджуваності $z(t)$:

$$z(t) = \frac{E_{вн} v_i}{E_{руй} v_{кр}} n_{кр} f(n) = \frac{E_{вн} v_i}{W_{кр}^*} n_{кр} f(n) \quad (2.1)$$

де $E_{вн}$ – енергія, що накопичується при однократному впливі;

$E_{руй}$ – енергія, що накопичилася матеріалом до моменту його руйнування;

$v_{кр}$ – критична швидкість зовнішнього впливу, якої достатньо для руйнування матеріалу у шарах 1, 2, 3 (рис. 2.1) поверхневого шару в $V_{м. еф}$;

$W_{кр}^*$ – критична щільність потоку енергії (потужності), осереднена у об'ємі $V_{м. еф}$, $НМ/М^3$;

$n_{кр}$ – критична кількість циклів контактної взаємодії на момент руйнування поверхневого шару; $n_{кр} = \tau_{ак} \omega$;

$\tau_{ак}$ – час за який відбувається акумуляція (накопичення) пошкоджень до руйнування $n_{кр}$;

ω – швидкість обертання вала;

$f(n)$ – функція, що описує кінетику розвитку пошкоджень (досягнення $n_{кр}$).

Величина енергії $W_{кр}^*$ по суті і визначає утомну міцність поверхневого шару матеріалу [193]. У роботах [8, 107, 111, 181] зазначається, що функція, яка описує кінетику розвитку пошкоджень (досягнення $n_{кр}$) $f(n)$ істотним чином залежить від швидкості зовнішнього впливу v_i .

У відповідності зі структурно-енергетичною теорією утомної міцності, сформульованою В. В. Федоровим в умовах контактної взаємодії паралельно відбуваються два процеси: накопичення енергії та її розсіювання (дисипація). Більша частина енергії (більше 80 %) перетворюється на тепло, а інша частина внутрішньої енергії накопичується у поверхневому шарі ($E_{вн}$).

Виходячи з цього, накопичена енергія за один цикл контактного навантаження $E_{вн1}$ може бути визначена, як 20 % від енергії, що підводиться при однократному впливі $E_{підвл}$:

$$E_{вн1} = 0,2 E_{підвл} \quad (2.2)$$

Величина накопиченої енергії є сталою для кожного матеріалу і може бути представлена виразом:

$$E_{вн} = E_0 + E_{руй} = \text{const}_M, \quad (2.3)$$

де E_0 – початкова енергія руйнування від дефектів, закладених при виготовленні деталі з урахуванням всіх видів фінішної обробки (хіміко-термічна обробка, поверхневого зміцнення, нанесення покриттів і т. д.);

$E_{руй}$ – енергія, що накопичилася матеріалом до моменту його руйнування.

Величина енергії $E_{вн}$ визначається структурним станом поверхневого шару та залежить від механізмів дисипації зовнішньої енергії, підведеної до матеріалу (дислокаційні механізми, зернограничне ковзання та ін.).

З урахуванням можливості визначення критичної кількості циклів контактної взаємодії на момент руйнування поверхневого шару з урахуванням функції, що описує кінетику розвитку пошкоджень (досягнення $n_{кр}$) $f(n)$ за допомогою методу акустичної емісії [8, 107, 111, 181], запропоновано оцінювати втомну міцність питомою енергією руйнування за один цикл навантаження:

$$E_{пит} = \frac{E_{max} - (E_0 + E_{имп})}{n_{кр}}, \quad (2.4)$$

де $E_{пит}$ – питома енергія руйнування за один цикл навантаження;

E_{max} – максимальна щільність прихованої енергії, при якій руйнується ідеальний бездефектний матеріал, $E_{max} = \text{const} = 10^{11}$ Дж/м³ (для матеріалів з близькими фізико-механічними властивостями) [10];

$E_{имп}$ – енергія імпульсного навантаження – початкова енергія руйнування, що накопичується в поверхні за час імпульсного навантаження (10 с, 50 циклів), $E_0 = E_{підвл} n_{имп} = 50 E_{підвл}$.

Для порівняльної оцінки утомної міцності КМ достатньо використання відношення $E_{вн} / n_{кр}$. У цьому виразі $E_{вн}$ визначається розрахунковим методом, а $n_{кр}$ – експериментальним шляхом за допомогою методу АЕ. Фізична сутність цього відношення при порівняльній оцінці різних матеріалів полягає у кількості енергії, яку матеріал може сприйняти за один

цикл без руйнування. При порівнянні треба визначати це відношення для $n_{кр}$ менш міцного матеріалу (найменше $n_{кр}$ з усіх порівнюваних матеріалів).

Аналіз рівнянь (2.2), (2.4) дає розуміння про можливість прискорення порівняльних випробувань на контактну утомну міцність. Перший шлях: проведення випробувань на максимально можливому навантаженні. Другий шлях – збільшення E_0 за рахунок збільшення швидкості зовнішнього впливу (швидкість імпульсного навантаження).

Таким чином, основним етапом прискорених випробувань є імпульсне навантаження до максимальних величин навантажень σ_{max} . Імпульсне навантаження захоплює шар в кілька десятків мікрон – залежно від рельєфу поверхні і контактних напружень. У цьому шарі розсіюється основна частка роботи сил тертя. Зараз це питання вивчено ще недостатньо, але можна виділити чотири основні канали дисипації (зі зростанням товщини шару) [12, 71]:

- а) розриви адгезійних зв'язків між поверхнями;
- б) релаксація пружних напружень від взаємодіючих нерівностей поверхонь (тобто перехід пружних напружень у довгохвильові фонони);
- в) перетворення енергії механічного впливу на теплову ($\approx 80\%$);
- г) релаксація напружень у результаті пластичних деформацій по дислокаційному механізму.

Загальні потоки енергії через поверхневі шари досить великі. Згідно формули В. І. Владимірова, кількість енергії, яка проходить через поверхневі шари при терті, дорівнює [184]:

$$\frac{P}{V_{м. еф}} = \frac{\sigma v_{тер}}{H}, \quad (2.5)$$

де P – потужність, підведена до ТС;

$V_{м. еф}$ – ефективний об'єм взаємодії;

σ – контактне напруження від абсолютного навантаження при терті;

$v_{тер}$ – лінійна швидкість взаємного переміщення зразків;

H – товщина шару, у якому відбувається взаємодія.

Частина енергії, що підводиться до трибосистеми (з урахуванням її особливостей) нормується коефіцієнтом тертя μ :

$$\frac{P}{V_{\text{м. еф}}} = E_{\text{підвл}} = \mu \frac{\sigma V_{\text{тер}}}{H}. \quad (2.6)$$

де $E_{\text{підвл}}$ – частина енергії, що підводиться до ТС за один цикл контактної взаємодії (за одне обертання привідного валу);

μ – коефіцієнт тертя.

Якщо в нашому випадку прийняти товщину шару для азотованих і цементованих зразків рівним $H \approx 0,2$ мм, а напруження при терті $\sigma \approx 1140$ МПа, то при швидкості зсуву $V_{\text{тер}} \approx 0,65$ м/с при контактній взаємодії на кожному циклі та вимірюваного коефіцієнту тертя $\mu \approx 0,04$, питома потужність енергії, що підводиться до ефективного об'єму ТС за один цикл буде близько $E_{\text{підвл}} \approx 4,8 \cdot 10^6$ Дж/м³.

Загальна підведена енергія залежить від кількості циклів до руйнування. Ця кількість залежить від частоти обертання вала машини тертя, тому, з урахуванням (3.6) можемо визначити $E_{\text{підв}}$:

$$E_{\text{підв}} = E_{\text{підвл}} n_{\text{кр}} = \mu \frac{\sigma V_{\text{тер}}}{H} n_{\text{кр}}, \quad (2.7)$$

Якщо навіть невелика частка цієї енергії перейде в приховану (латентну), яку накопичила структура поверхневого шару, то матеріал переходить у збуджений стан. Це дозволяє прискорити досягнення критичного рівня величини внутрішньої накопиченої енергії та переходу до руйнування [12].

З урахуванням структурно-енергетичного підходу до руйнування в умовах контактної взаємодії конструкційних матеріалів, руйнування обумовлено конкуренцією двох взаємопов'язаних, але протилежних тенденцій: зростання щільності пошкоджуваності і зниження (вивільнення) цієї енергії за рахунок релаксації. І при досягненні критичної щільності прихованої енергії відбувається руйнування. Таким чином, у результаті

моделювання було сформульовано умови проведення прискорених випробування для порівняльної оцінки показників утомної пошкоджуваності матеріалів.

Для розглянутих умов імпульсних контактних впливів такий стан може привести до таких ефектів.

Оскільки в межах роботи планувалося оцінювати утомну контактну міцність зразків, зміцнених цементацією та іоно-плазмовим азотуванням, то це буде впливати на величину коефіцієнта дисипації $E_{\text{вн}} = \text{const}_M$.

1. На зразках, зміцнених азотуванням, збільшення ступеня і швидкості деформації створюють умови переходу структури з кристалічного в аморфний стан [116, 117, 120].

2. У випадку ж з цементацією відбувається зміцнення з одночасним накопиченням енергії на межі розподілу зерен, що в подальшому призводять до розвитку мікротріщин [1].

Ці висновки є підставою для проведення прискорених випробувань заявлених трибосистем на контактну втому з очікуваною перевагою зміцнення азотуванням за технологією AVINIT N.

2.1.2 Аналіз енергетичного та структурного стану матеріалу в процесі імпульсного навантаження

Математичний аналіз динаміки зміни за часом енергетичного балансу мікроструктури поверхневого шару в ефективному об'ємі взаємодії $V_{\text{м. еф}}$ під час імпульсного навантаження може бути виконаний з використанням рівняння Фокера–Планка–Колмогорова (ФПК) [193]. Це рівняння найбільш повно описує випадкові зміни в елементах мікроструктури x_i у випадках “енергетичного накачування” (силового впливу).

Умови побудови моделі

Нехай динаміка енергетичного стану мікроструктури описується звичайним диференціальним рівнянням виду

$$\frac{dx_i}{dt} + f_{(E)i}(x_1, x_2, \dots, x_n, t_{\text{имп}}) = E_{\text{вн.}i}, \quad (2.8)$$

де $f_{(E)i}$ – енергетична характеристика мікроструктури;

$i = 1, 2, \dots, n$;

x_1, x_2, \dots, x_n – енергетичні стани елементів мікроструктури, які можуть змінюватися від початкового стану z_0 до стадії повної деструкції $z_{\text{кр}}$;

$t_{\text{имп}}$ – час імпульсного навантаження;

$E_{\text{вн.}i}$ – внутрішня енергія i -го структурного елемента.

Енергетична характеристика мікроструктури $f_{(E)i}$ залежить від величини $E_{\text{вн.}i}$ – частини енергії, яка підводиться за кожен цикл навантаження за час імпульсного навантаження $t_{\text{имп}}$.

Загальний енергетичний стан поверхневого шару зміниться за час імпульсного навантаження $t_{\text{имп}}$ за рахунок зміни в кожному з елементів мікроструктури, яка залежить від фактичної обробки, зміцнення чи модифікації поверхні. У нашому випадку цементация або іоноплазмове азотування.

Початкові значення енергетичного стану мікроструктурних елементів $x_{1(0)}, x_{2(0)}, \dots, x_{n(0)}$ вважаємо випадковими а їх розподіл характеризується щільністю імовірності енергетичного стану:

$$P(x_1, x_1, \dots, x_n) = P_0(x_1, x_1, \dots, x_n), \quad (2.9)$$

яка за умовами нормування рівняння ФПК задовольняє умові:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} P_0 dx_1 dx_2, \dots, dx_n = 1. \quad (2.10)$$

Рівняння ФПК дозволяє встановити зв'язок часу імпульсного навантаження $t_{\text{имп}}$ з поточною щільністю імовірності $P(x_1, x_1, \dots, x_n, t)$ з характеристикою мікроструктури $E_{\text{вн.}i}$:

$$\frac{d \ln P}{dt} - \sum_{i=1}^n E_{\text{вн.}i} \frac{d \ln P}{dx_i} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_{\text{вн.}i} \left(\frac{d^2 \ln P}{dx_i dx_i} + \frac{d \ln P}{dx_i} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{dE_{\text{вн.}i}}{dx_i} \quad (2.11)$$

При певних умовах за час $t_{\text{имп}}$ ця величина послідовно досягне у всіх елементах мікроструктури x_i величини $E_{\text{вн}}$ (початок руйнування).

І рівняння динаміки зміни енергії в ефективному об'ємі поверхневого шару (рис. 3.1) можна записати у такому вигляді:

$$\begin{cases} \frac{d \ln P(E_{\text{вн},t})}{dt} - \frac{f(E_{\text{вн},t})}{dE_{\text{вн}}} = \frac{df(E_{\text{вн},t})}{dE_{\text{вн}}}, \\ \frac{dE_{\text{вн},t}}{dt} + f(E_{\text{вн},t}) = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

У випадку руйнування, енергія перетворюється на енергію деструкції.

Якщо розподіл $P(E_{\text{вн}})$ не змінюється в часі, то перший член системи (2.12) дорівнює нулю і тоді:

$$\frac{d}{dE_{\text{вн}}} [\ln f(E_{\text{вн},t}) + \ln P(E_{\text{вн}})] = 0, \quad (2.13)$$

тобто

$$\ln f(E_{\text{вн},i}) + \ln P(E_{\text{вн}}) = E_{\text{max}}. \quad (2.14)$$

E_{max} визначається з умови характеристик мікроструктури та підведеної потужності N , яка діє на мікроструктуру у процесі імпульсного навантаження. З цього випливає, що матеріал з більш дрібнозернистою структурою має більше значення енергії руйнування, а відповідно, і вищі ресурсні показники. Такий висновок дає привід для проведення порівняльних ресурсних випробувань ТС з різними видами модифікування поверхонь (цементация та іонно-плазмове азотування AVINIT N).

2.2 Аналіз кінетики розвитку пошкоджень в умовах контактного утомного зношування

Дослідження питання розвитку пошкоджень в умовах контактного утомного зношування залишається надзвичайно актуальною і недостатньо вивченою проблемою. Вона складається з двох частин:

– визначення міри пошкодження, яка адекватно оцінює зміну фізико-механічних властивостей конструкційного матеріалу у процесі тривалої експлуатації;

– математичний опис еволюції змін міри пошкодження матеріалів у процесі тривалої експлуатації в умовах знакозмінних навантажень.

У результаті проведеного аналізу [194] встановлено, що найбільшому впливу КМ піддається при роботі в умовах високонавантажених агрегатів приводів АТ. Тому прогнозування ресурсу КМ зводиться до контролю зміни їх фізико-механічних властивостей у процесі контрольних випробувань, основним недоліком яких є довготривалість, а формування методики прискорених випробувань є надзвичайно актуальним завданням [195].

Моніторинг зміни фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів свідчить [165], що найбільш ефективними методами контролю фізико-механічних властивостей матеріалу є метод АЕ, розроблений у НАУ та ХНУПС [8, 107, 111, 181].

Еволюція зміни мір пошкодження матеріалів у процесі тривалої експлуатації в умовах знакозмінних навантажень, являє собою дифузійний марківський процес [193, 196].

Розглянемо закономірності аналізу зміни міри пошкодження за параметром АЕ (рис. 2.2), отримані в попередніх експериментальних дослідженнях при проведенні прискорених випробувань на втомну міцність за методикою, викладеною у розділі 2 [90]. На рис. 2.2:

– $n_{крЦ} = 53\,812$ – критична кількість циклів контактної взаємодії на момент початку утомного руйнування поверхневого шару, зміцненого цементациєю;

– $n_{крА} = 97\,875$ – критична кількість циклів контактної взаємодії на момент початку утомного руйнування поверхневого шару, зміцненого азотуванням;

– $z_{крЦ} = 322\ 000$ – критична міра пошкоджуваності, еквівалентна інтегральній величині потужності АЕ $W_{кр}^*$ у відносних одиницях [8, 108, 112, 182] на момент початку утомного руйнування поверхневого шару, зміцненого цементациєю;

– $z_{крА} = 587\ 000$ – критична міра пошкоджуваності, еквівалентна інтегральній величині потужності АЕ $W_{кр}^*$ у відносних одиницях на момент початку утомного руйнування поверхневого шару, зміцненого азотуванням.

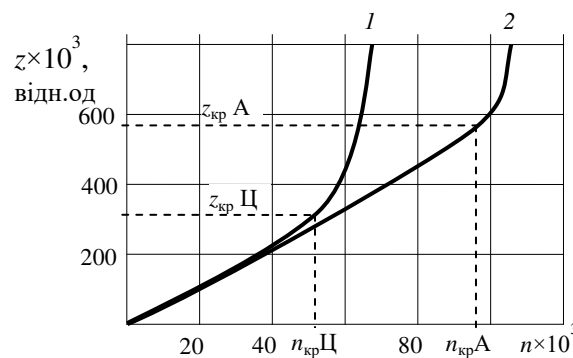


Рисунок 2.2 – Аналіз закономірності зміни міри пошкодження за параметром АЕ: 1 – залежність для ТС, зміцненого цементациєю; 2 – залежність для ТС, зміцненого азотуванням AVINIT N

Цілком логічно, що площі під ділянкою графіку до досягнення $n_{кр}$ пропорційні величині максимальної щільності прихованої енергії, при якій матеріал починає руйнуватися. Тобто ці площі дають можливість виконати порівняльну оцінку енергії активації руйнування різних матеріалів (або різних способів модифікації поверхонь тертя) при використанні прискореної методики такої оцінки [89].

Кінетичні рівняння для міри пошкодження поверхневого шару конструкційного матеріалу $z(\tau_{ак})$ є рівнянням фільтра для визначального

параметра надійності $\lambda(\tau_{ак})$, за рахунок процесів деградації на атомно-молекулярному рівні:

$$\begin{cases} \frac{dz(t)}{dt} = F[z(t), \lambda(t), R(t)]; \\ \frac{d\lambda(t)}{d(t)} = \Phi_1(\lambda) + \Phi_2(\lambda)n(t), \end{cases} \quad (2.15)$$

де $F[z(t), \lambda(t), R(t)]$ – детермінована від’ємна для кумулятивних моделей накопичення дефектів на I етапі скалярна лінійна або на II етапі нелінійна функція при об’єднанні дефектів та тріщин;

$R(t)$ – вектор параметрів базової залежності для заданої моделі накопичення пошкоджень;

$\Phi_1(\lambda)$ і $\Phi_2(\lambda)$ – детерміновані функції, що задовольняють умові Ліфшиця (фактори впливу). Фактор $\Phi_1(\lambda)$ – залежність надійності від граничної енергоємності матеріалу, $\Phi_2(\lambda)$ – фактор, що характеризує механізм дисипації підведеної до ТС енергії

Визначальний параметр надійності $\lambda(t)$ напряму пов’язаний з функцією, що описує кінетику розвитку пошкоджень $n_{кр}f(t)$ у рівняннях (2.1), (2.3) та узагальнено системою (2.15).

Часовий діапазон вимірювання міри пошкодження визначається швидкістю зміни механічних властивостей конструкційного матеріалу $z(t)$ за одиницю часу. В цьому випадку процес $z(t)$, швидкість якого описується першим рівнянням (2.1), можна вважати приблизно одномірним марківським для часових інтервалів $(t, \Delta t), (t \geq 0)$, якщо величина Δt задовольняє нерівностям:

$$t_k \ll \Delta t \ll t_c \quad (2.16)$$

де t_k – час кореляції $\lambda(t)$, який має порядок тисяч вимірювань (15 000 вимірювань за 5 хв випробувань);

t_c – стала часу АЕ системи реєстрації пошкоджень (20 мс).

Унаслідок цього, виконання лівої частини нерівності (2.16) не викликає сумнівів, тоді як виконання правої частини вимагає перевірки у кожному конкретному випадку. Наведені факти про можливість розгляду процесу накопичення пошкоджень у поверхневому шарі, як марківського процесу носять якісний характер. Строго доведення цього твердження є складною проблемою та потребує проведення випробувань на багатоциклову втому конструкційного матеріалу.

З рівнянь (2.15) можна на підставі роботи [197] стверджувати, що множина $[z(t), \lambda(t)]$ становитиме двовимірний марківський процес, одновимірна щільність імовірності якого $f(z, \lambda, t)$ задовольняє рівнянню Фокера–Планка–Колмогорова [197]:

$$\frac{df}{dt} = -\frac{d}{d\lambda}[A_1(\lambda)f] - \frac{d}{dz}[A_1(\lambda, z)f] + \frac{1}{2}\frac{d^2}{d\lambda^2}[B(\lambda)f]. \quad (2.17)$$

з граничними умовами:

$$f(z, \lambda, t) > 0 \quad (2.18)$$

і початковими умовами:

$$f(z, \lambda, t) = f(z)f(\lambda), \quad t > 0. \quad (2.19)$$

Умови (2.18) формулюються виходячи з фізичної суті задачі. В умові (2.19) передбачається, що $z(t)$ і $\lambda(t)$ у початковий момент часу $t=0$ стохастично незалежні. Відповідно до загальної теорії марківських процесів [194, 197] існує взаємно однозначна відповідність між коефіцієнтами рівняння (2.17) і коефіцієнтами стохастичних диференціальних рівнянь (2.15):

$$A_1(\lambda) = \Phi_1(\lambda) + \frac{N_0}{4}\Phi_2(\lambda)\frac{d\Phi_2(\lambda)}{d\lambda}; \quad (2.20)$$

$$A_2(\lambda, z) = F(\lambda, z, y_m, R); \quad (2.21)$$

$$B(\lambda) = \frac{N_0}{2} \Phi^2(\lambda). \quad (2.22)$$

Таким чином, розв'язавши рівняння (2.20), яке базується на методі характеристичних функцій, можна визначити одновимірну щільність імовірності величини міри пошкоджень поверхневого шару $f(z, t)$, за якою визначаються всі основні показники міцності для кумулятивних лінійних моделей накопичення пошкоджень в поверхневому шарі в умовах знакозмінних навантажень конструкційного матеріалу:

$$P(t) = \int_0^1 f(z, t) dz, \\ q(t) = -\frac{dP}{dt} = -\int_0^1 \left(\frac{df(z, t)}{dt} \right) dz, \quad (2.23)$$

де $P(t)$ – час накопичення граничного рівня пошкодження, який визначає утомну міцність КМ;

$q(t)$ – середньоімовірнісне значення швидкості деградації за період реєстрації на атомно-молекулярному рівні в шарах 1, 2, 3 (рис. 2.1).

Такий підхід до визначення утомної міцності конструкційного матеріалу справедливий для лінійної моделі накопичення пошкоджень на атомно-молекулярному рівні (дефекти 1-го типу).

Зародження дефектів типу тріщина (дефекти 2-го типу) відбувається при критичному накопиченню дефектів 1-го типу. У цьому випадку поєднання дефекту 1-го типу у формі структурно фазових перетворень [193, 196] і формування субмікроскопічних, а надалі і макроскопічних тріщин, призводить до пітингового руйнування, тобто до закінчення ресурсу конструкційного матеріалу (точка переходу від лінійної ділянки до нелінійної, рис. 2.2).

Особливості зміни параметрів міцності конструкційних матеріалів (зменшення міцності атомних зв'язків) реєструються в одиницях параметрів АЕ з переходом від лінійної залежності до нелінійної.

Таким чином, метод АЕ дає інструмент кількісної оцінки показників кінетики розвитку пошкоджень в умовах контактної утомної зношування при проведенні прискорених випробувань. Ця теоретична модель прискорених випробувань на контактну міцність потребує експериментального підтвердження.

Як вже зазначалося, попередні експериментальні дослідження при проведенні прискорених випробувань на втомну міцність [90] показали, що діаграма запису параметру АЕ за часом випробувань містить дві ділянки: перша – демонструє лінійну залежність збільшення рівня пошкоджуваності, а на другій ділянці – нелінійна залежність за рахунок поєднання дефектів та формування великих часток зносу, характерних для пітингових явищ (рис. 2.2). Точка початку утомної зношування (перехід до нелінійної ділянки) на цьому графіку може бути оцінена як математичне сподівання пошкоджуваностей $M(z)$ – для порівняння матеріалів чи способів зміцнення) та дисперсією (амплітудою сигналу АЕ) $D(z)$ – для визначення моменту оцінювання $M(z)$. Оцінка ресурсних показників матеріалу виконується за кількістю циклів $n_{кр}$ до переходу від лінійної ділянки на графіку до нелінійної. Це повністю підтверджує запроповану модель та дає основу для проведення комплексних порівняльних досліджень різних матеріалів згідно запропонованого критерію утомної міцності – питомою енергією руйнування за один цикл навантаження \bar{E}_{num} (2.4). Ці результати будуть викладені у наступному розділі.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2

Теоретичний аналіз контактної взаємодії дає можливість розробити методику прискорених випробувань при оцінці утомної міцності поверхонь, зміцнених різними методами.

1. Аналіз структурно-енергетичного балансу енергії поверхневого шару в умовах контактної взаємодії дозволив сформулювати критерії утомної міцності матеріалів: питома енергія руйнування за один цикл навантаження \bar{E}_{num} .

2. Метод реєстрації сигналу АЕ визначено як зручний та точний інструмент кількісної оцінки параметра утомної пошкоджуваності $n_{кр}$.

3. Сформульовано умови проведення прискорених випробувань на контактну втомну міцність з використанням методу АЕ: імпульсне навантаження до максимальних величин з реєстрацією кількості циклів до настання утомного пошкодження.

4. Встановлено, що основним фактором, який впливає на утомну контактну міцність КМ є коефіцієнт дисипації енергії, що є константою для кожного з матеріалів.

5. Кінетика розвитку пошкоджуваності поверхневого шару на графіку закономірності зміни міри пошкодження за параметром АЕ складається з лінійної та нелінійної ділянок накопичення пошкоджень. Точка початку утомного зношування (перехід до нелінійної ділянки) на цьому графіку може бути оцінена як математичне сподівання пошкоджуваностей $M(z)$ – для порівняння матеріалів чи способів зміцнення) та дисперсією (амплітудою сигналу АЕ) $D(z)$ – для визначення моменту оцінювання $M(z)$. Оцінка ресурсних показників матеріалу виконується за кількістю циклів $n_{кр}$ до початку утомного руйнування (переходу від лінійної ділянки на графіку до нелінійної).

Розділ 3

МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

У розділі розглянуто методичний підхід щодо експериментального дослідження дисертаційної роботи та наведено його результати.

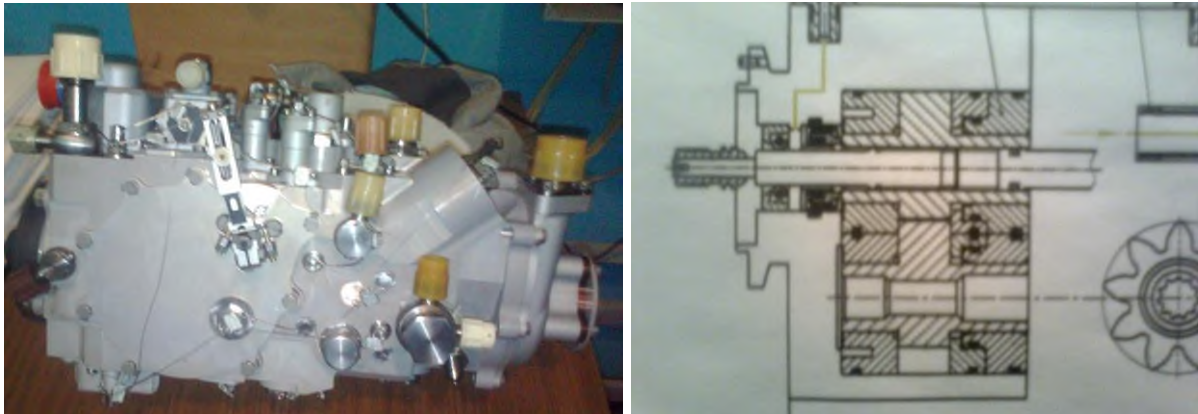
При виконанні експериментального дослідження моделювалися два типи зразків. Перші працюють у високонавантажених коробках приводів та редукторах сучасних ПС. Досліджували:

1. Зубчасті шестеренні передачі під великими навантаженнями до 4 500 Н, що відповідає напруженню $\sigma \approx 1140$ МПа при циклічних навантаженнях в умовах кочення з проковзуванням при змащенні маслом.

2. Нові сучасні шестеренні насоса-регулятора. в них зубчасті шестеренні зчеплення знаходились під меншими навантаженнями (до 1 600 Н, що відповідає напруженню $\sigma \approx 350$ МПа), при циклічних навантаженнях в умовах кочення з проковзуванням при змащенні авіаційним гасом.

Такий розподіл обумовлений наступним. Як вже відмічалось у вступі, зараз досліджується питання проектування насосів-регуляторів паливної автоматики шестеренного типу зі збільшеним ресурсом, який би дорівнював ресурсу нових двигунів. У зв'язку з цим проводяться роботи по створенню насосів-регуляторів шестеренного типу, які є дешевшими у виготовленні і ремонті та менш вимогливі до якості палива. Так, на Харківському агрегатобудівному підприємстві АТ "ФЕД" (м. Харків, Україна) розроблено дослідний зразок такого насосу (рис. 3.1, а). Для підвищення ресурсних показників у даний час виконуються ДКР з підвищення ресурсних показників основних трибосистем, які відповідають за його ресурс (шестерні вузла, що качає (рис. 3.1, б)). З цією метою було запропоновано замінити традиційний

метод зміцнення їх робочих поверхонь цементуванням на іонно-плазмове азотування, розроблене на АТ “ФЕД” (м. Харків, Україна) [3, 118-120].



а

б

Рис. 3.1 – Паливний насос-регулятор шестеренного типу НР-3000:

а – загальний вигляд; *б* – схема вузла, що качає

Використання іонно-плазмових технологій азотування замість цементації з метою підвищення контактної втомної міцності поверхонь деталей обумовлено такими перевагами цієї технології, як збереження розмірів та висока чистота обробки поверхонь, внаслідок чого відпадає необхідність їх механічного доопрацювання після зміцнення [116, 117].

З урахуванням поставлених завдань та для їх вирішення було сформульовано загальну структуру виконання теоретичних і експериментальних досліджень та їх взаємний зв'язок, представлений у вигляді діаграми Ісікави [172, 173], рис. 3.2. Теоретичні дослідження включають системний аналіз структурно-енергетичного підходу до явищ утомного руйнування.

Зазначена вище діаграма (або причино-наслідкова схема) дає змогу визначити основні чинники процесів, що впливають на досягнення поставленої мети дослідження – визначення критерію оцінки ресурсних показників при втомному руйнуванні, формування методики прискорених випробувань та порівняльна оцінка методів зміцнення.



Рисунок 3.2 – Структурна схема теоретичних та експериментальних досліджень та їх взаємний зв'язок

Системний підхід, який покладено в основу причинно-наслідкової діаграми, дає можливість визначати та сформулювати основні етапи досліджень, що, в свою чергу, дозволяє вирішити поставлені завдання в даній дисертаційній роботі. Для вирішення кожного з поставлених завдань необхідно встановити раціональний цикл досліджень, при якому етапи досліджень передбачають використання найкращих результатів кожного етапу.

3.1 Обладнання для випробувань на контактну міцність

Дослідження на порівняння контактної утомної міцності при терті кочення з проковзуванням проводились на модернізованій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 (рис. 3.3), за схемою “диск-диск” [174] у Харківському національному університеті Повітряних Сил (ХНУПС) ім. Івана Кожедуба на підставі договору про науково-технічне співробітництво з підприємством АТ “ФЕД” (м. Харків, Україна). Методика проведення випробувань стандартизована [175]. Форма та розміри трибоелементів для випробувань, відповідали вимогам ДСТУ 30480-97.

До проведення випробувань трибоелементи промивалися бензином “Калоша” ГОСТ 2603-71, висушувалися при температурі 70 °С, зважувалися на аналітичних терезах ВЛР-200 з точністю до 10^{-4} грама.

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

- момент тертя (перераховували в коефіцієнт тертя), за величиною якого судили про механічні втрати в трибосистемі;

- температуру елементів безперервно реєстрували в реальному масштабі часу випробувань безпосередньо в зоні тертя, з використанням пірометра “Німбус-760”.

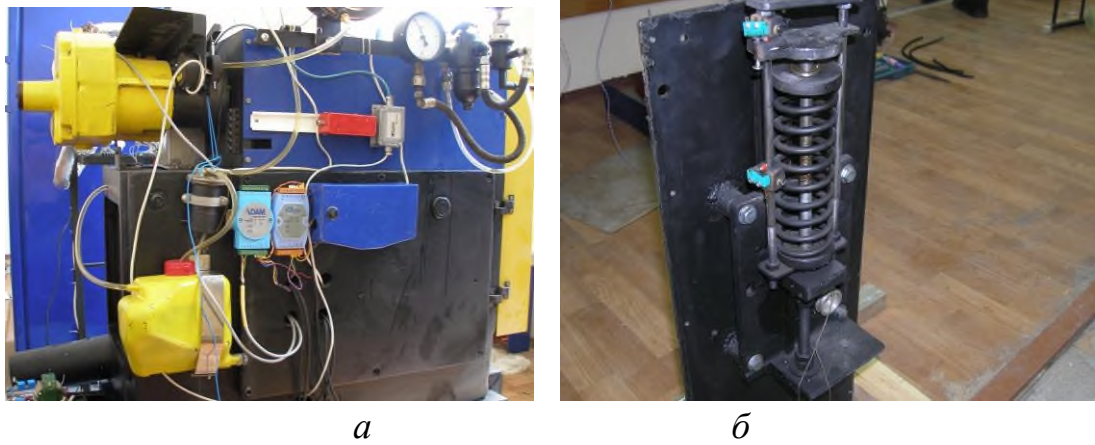


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд удосконаленої машини тертя 2070 СМТ-1:
а – блоки автоматизації режимів тертя; *б* – електромеханічний навантажувальний пристрій

Додатково проводили вимірювання швидкості зношування методом акустичної емісії (АЕ) [106, 107, 110, 111]. Цей метод дозволяє реєструвати швидкість зношування за час від 20 мс у відносних одиницях. Таким чином, зношення реєструється з моменту відділення перших частин матеріалу з поверхні тертя в реальному масштабі часу за весь період випробування.

Удосконалення машини тертя 2070 СМТ-1 полягало в підвищенні величини навантаження, яку можна прикласти до випробуваних зразків шляхом зміни кріплення важеля каретки і в автоматизації процесу зміни навантаження. За рахунок цього вдалося підвищити величину навантаження до 4 500 Н і таким чином досягти контактних навантажень $\sigma \approx 1140$ МПа, що дозволило оцінити відносну контактну втому при циклічних навантаженнях в умовах кочення з проковзуванням.

Перерахунок виконувався за формулою Герца (3.1) у спрощеному варіанті [38]. При перерахунку за Герцем для заданої геометрії зразків маємо

$$\sigma_{\max} = 0,418 \sqrt{2 \frac{P}{a} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}, \quad (3.1)$$

де P – навантаження на зразках;

a – ширина площадки контакту;

E_1 і E_2 – модулі пружності зразків;

R_1 і R_2 – радіуси зразків.

У нашому випадку модуль пружності першого роду при температурах випробування від 20 до 100 °С становить 207 ГПа (ГОСТ 20072-74, ОСТ 1 90005-91).

Без урахування зміцнення поверхонь зразків $E_1 = E_2$, $R_1 = R_2$; $a = 10$ мм, впливає (3.2):

$$\sigma_{\max} = 0,418 \sqrt{2 \frac{P E}{a R}} = 0,418 \sqrt{2 \frac{931,5 \cdot 10^{12}}{0,00025}} = 1141 \text{ МПа.} \quad (3.2)$$

Зміна величини прикладеного до навантаження

З метою управління величиною навантаження прикладеного до зразка, що досліджується, серійна машина тертя 2070 СМТ-1, була доукомплектована модулем управління величиною навантаження [8, 9]. А також електромеханічним пристроєм зміни величини навантаження, що дозволяє здійснювати автоматичну зміну навантаження в широкому експлуатаційному діапазоні 0...4 500 Н (зовнішній вигляд електромеханічного пристрою навантаження представлено на рис. 3.3, б). Загальна схема управління величиною навантаження наведена у [9].

Випробування на утомну міцність проводилися за схемою “диск-диск”. Змащення здійснювалося маслом М-8В ГОСТ 10541 шляхом занурення нижнього зразка в мастильну ванну. Мастильна рідина, яка захоплюється нижнім зразком, надійно утримується на його поверхні, потрапляє в контактну область і при русі формує гідравлічний клин в зазорі між хвилеводом і нижнім зразком (рис. 3.4).

Форма хвилеводу забезпечує утримання необхідної кількості масла і його безперервну подачу в контактну область. Прийом сигналів АЕ здійснювався через масляний клин між хвилеводом і нижнім зразком (рис. 3.4, б).

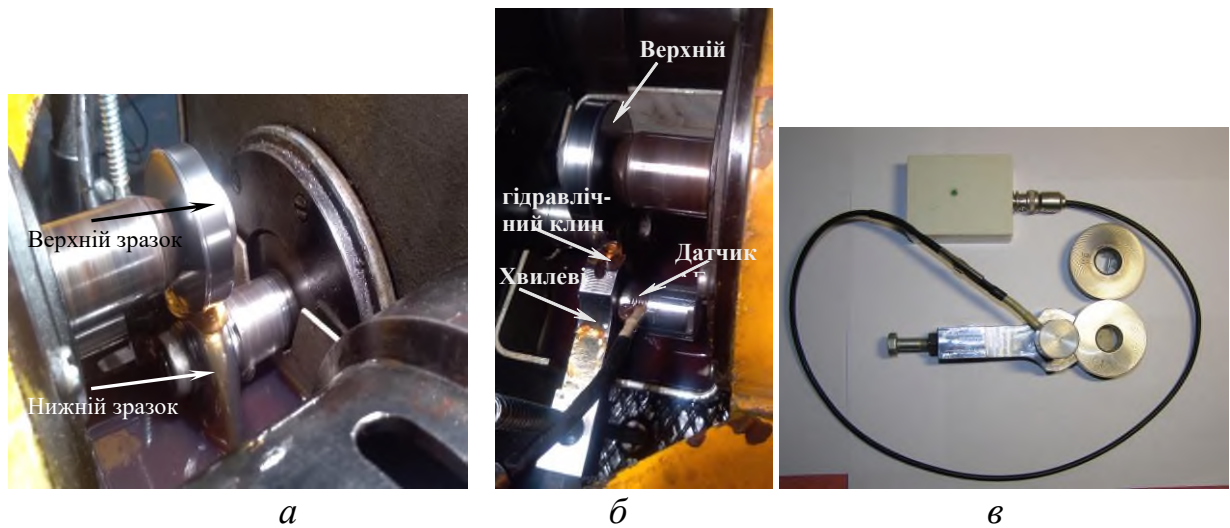


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд контактної взаємодії зразків (а) і хвилеводу при випробуваннях (б); зразок обладнання прийому сигналів АЕ через гідролічний клин (в)

Випробувано по 3 пари зразків. Умови випробувань: швидкість обертання ведучого зразка – 500 об/хв; проковзування між зразками – 20 %; абсолютне навантаження – 4 500 Н ($\sigma_{\max} = 1\,140$ МПа); швидкість навантаження $V_{\text{нав}} = 450$ Н/с; час досягнення навантаження – 10 секунд; час випробувань – до моменту збільшення величини потужності сигналу АЕ W (у відносних одиницях) більше ніж в 10 разів від її рівня при нормальному механохімічному зношуванні, тобто до початку первинних проявів утомного руйнування [89, 90].

Випробування на зносостійкість при механохімічному зношуванні (малоциклова утомна міцність).

Схема випробувань та змащення аналогічна випробуванням на утомну міцність. Змащення здійснювалося авіаційним гасом ТС-1 шляхом занурення в нього нижнього зразка. Прийом сигналів АЕ здійснювався через гідролічний клин між хвилеводом і нижнім зразком (рис. 3.4, б).

Випробувано по 3 пари зразків. Умови випробувань: швидкість обертання ведучого зразка – 500 об/хв; проковзування між зразками – 20 %; абсолютне навантаження – 1 500 Н ($\sigma_{\max} \approx 500$ МПа); швидкість навантаження $V_{\text{нав}} = 450$ Н/с; час досягнення навантаження – 10 секунд; час

випробувань – 8 годин. Оцінка зносу виконується ваговим методом, порівняльний аналіз – за параметрами АЕ.

3.2 Вибір матеріалів для досліджень

Порівняльні експериментальні дослідження проводилися на порівняння контактної утомної міцності при терті кочення з проковзуванням поверхонь, зміцнених традиційною газовою цементацією і плазмовим азотуванням по технології AVINIT N (АТ “ФЕД”).

Для порівняння контактуючі поверхні зразків були зміцнені:

– газовою цементацією за традиційною технологією, шліфовані після загартування;

– азотуванням AVINIT N за технологією АТ “ФЕД” [119, 120].

Об’єктами випробувань були зразки у вигляді дисків діаметром 50 мм і висотою 12 мм – стандартні для машин тертя СМЦ-2 і 2070 СМТ-1.

Випробували зразки з одного матеріалу – жароміцна релаксаційностійка сталь 20Х3МВФ ГОСТ 20072-74. Марку матеріалу було обрано з умови, що ця сталь може зміцнюватися як цементацією, так і азотуванням. Зразки піддавалися термообробці та фінішній обробці, які забезпечували такі фізико-механічні характеристики (табл. 3.1):

Таблиця 3.1 – Додаткові технічні вимоги до виготовлення зразків зі сталі 20Х3МВФ

Спосіб зміцнення	Технічні вимоги
Цементация	1. Поверхню тертя цементувати на глибину 0,4...0,7 мм після кінцевої механічної обробки > 88HRN15. Твердість серцевини > 24HRC. 2. Обробити холодом. 3. Шорсткість поверхні тертя $R_a = 0,05 \mu\text{m}$. 4. Поверхню тертя в кінці обробити кільцевим притиром із застосуванням алмазної пасти. 5. Мікротріщини не допускаються. Метод контролю магнітопорошковий.

Азотування	1. Поверхню тертя азотувати на глибину 0,15...0,38 мм після кінцевої механічної обробки > 800HV. Твердість серцевини > 30...38,5HRC. 2. Шорсткість поверхні тертя $R_a = 0,12 \mu\text{m}$. 3. Поверхню тертя перед азотуванням обробити кільцевим притиром із застосуванням алмазної пасти.
------------	--

Вихідний хімічний склад матеріалу, що випробувався, наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад матеріалів зразків з 20X3MBФ

Хімічний склад сталі 20X3MBФ, %											
Fe	Si	Cu	Ni	P	Cr	Mn	W	S	C	Mo	V
93	0,17-0,37	до 0,2	до 0,3	до 0,03	2,8-3,3	0,25-0,5	0,3-0,5	до 0,025	0,15-0,23	0,35-0,55	0,6-0,85

Кожний зразок досліджувався приладом для вимірювання параметрів мікрогеометрії JENOPTIK (АТ “ФЕД”). Крім того, вимірювалися показники шорсткості, твердості та мікротвердості поверхонь за глибиною поверхневого шару.

Результати металографічного аналізу, визначення твердості та глибини зміцненого шару робили на двох парах зразків з кожним видом зміцнення (з номерами 6С, 10С для цементованих та 1А, 5А для азотованих) наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати визначення твердості та глибини зміцненого шару

Тип зразка	Твердість		Глибина зміцненого шару, мм
	зміцненої поверхні, HV/HRN15	серцевини, HRC	
6С (цемент.)	679/89,0	34,5–36,0	1,2
10С (цемент.)	731/90,0	35,0	1,2
1А (азотуван.)	831/91,5	27,0–28,5	0,25
5А (азотуван.)	800/90,0	27,0–28,0	0,25

3.2.1. Прогнозування макроскопічних параметрів контактної взаємодії

Прогнозування макроскопічних параметрів контакту зразків проводили на основі такої розрахункової схеми (тіла 1 і 2) (рис. 3.5) [9].

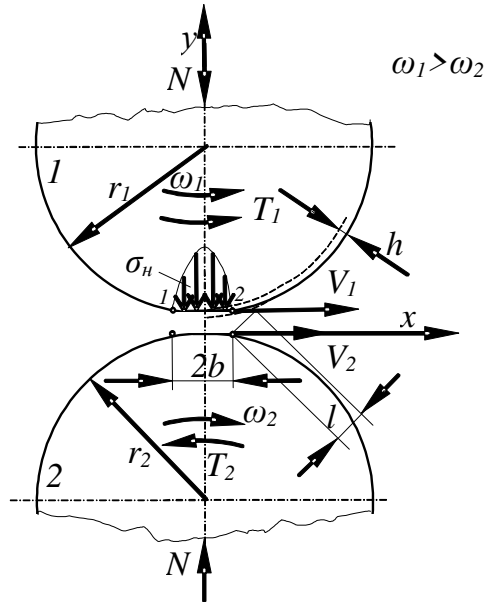


Рисунок 3.5 – Модель контактної взаємодії пари тертя:

r_1, r_2 – радіуси зразків трибосистеми; h – глибина модифікованого шару; V_1, V_2 – швидкості ковзання для першого та другого зразка відповідно; ω_1, ω_2 – кутові швидкості першого та другого зразка; N – прикладене навантаження; $2b$ – ширина герцівської плями контакту; l – довжина контакту

Товщина модифікованого шару h тіл 1, 2 зразків, зміцнених азотуванням AVINIT N з глибиною шару 0,25 мм, у 5 разів нижче, ніж зразків, зміцнених цементацією з глибиною шару 1,2 мм.

Шлях тертя S за один цикл контактування під навантаженням N знайдемо із таких міркувань (рис. 3.5): час контактування тіла 1 – $t = \frac{2b}{V_1}$; тіла

2 – $t = \frac{2b}{V_2}$, де $2b$ – герцівська пляма контакту; V_1, V_2 – швидкості ковзання для

першого та другого зразків відповідно.

Нехай шлях $S_1 = 2b \frac{V_1}{V_2}$, тоді за час дії одного контактування:

$$S = 2b \frac{V_1 - V_2}{V_2}. \quad (3.3)$$

Залежність шляху тертя від положення точки контактування визначається рівнянням:

$$S = (x + b) \frac{V_1 - V_2}{V_2}, \quad (3.4)$$

де S – шлях тертя за один цикл контактування; b – половина герцівської плями контакту; V_1 , V_2 – швидкості ковзання для першого та другого зразку відповідно.

Таким чином, час інтегрування амплітуд при формуванні усередненої потужності АЕ повинен проходити за час контактної взаємодії на ділянці $2b$ (рис. 3.5). Проведені розрахунки показують, що цей час становить 20 мс, який потім був введений, як стала інтегрування амплітуд сигналів АЕ при формуванні усередненої потужності АЕ.

3.3 Методи дослідження

3.3.1 Вимірювання макро- і мікротвердості

Вимірювання твердості зразків проводили за методом Роквелла, а після механічної обробки – за методом Віккерса. За число твердості приймалося середнє арифметичне значення результатів п'яти вимірювань.

Вимірювання твердості за Роквеллом здійснювали на автоматичному стаціонарному твердомірі UIT HR-300 відповідно до ASTM E-18-22 (ISO 6508-2:2015). Індентором був стандартний алмазний конус з кутом при вершині 120° . Діапазон навантажень – 98,07...1471 Н, діапазон значень твердості – 20...70 HRC.

Вимірювання твердості за Віккерсом проводили на стаціонарному твердомірі UIT HV-10/30/50 відповідно до ГОСТ 2999-75 (ISO 14271:2017). У приладі застосований навантажувальний механізм зі зниженим тертям, що значно підвищує точність випробувань. Аналіз отриманих відбитків проводився за допомогою встановленого на приладі окуляр-мікрометра зі збільшенням 20 і 10 крат. Для вимірювання відбитка до його вершин

підводили маркери і вимірювали діагоналі. Значення твердості розраховувалося автоматично і виводилося на екран твердоміра. Діапазон використовуваних навантажень становив 9,8...49,03 Н, час витримки під навантаженням – 10 с.

Мікротвердість вимірювали за допомогою твердоміра ПМТ-3 відповідно до ГОСТ 9450-76 (аналогічно ISO 4516:2002). Прилад призначений для визначення мікротвердості при малих навантаженнях (до 19,6 Н) з використанням стандартної алмазної піраміди Віккерса з кутом при вершині 136°. Діапазон навантажень – 0,098...19,61 Н, час витримки – 10...15 с, діапазон вимірювань мікротвердості – 5...2500 МПа. У приладі реалізовано повністю автоматизований процес вимірювань, для ініціалізації якого досить встановити величину зусилля і вибрати необхідне місце на поверхні трибоелемента з використанням вбудованого мікроскопа (загальне збільшення $\times 100$ і $\times 400$). У твердомірі застосований навантажувальний механізм зі зниженим тертям, що забезпечує сталість прикладеного зусилля і підвищення точності випробувань.

Виконувалась скісна (непряма) оцінка мікротвердості за глибиною робочого шару зразків після випробувань. Для цього проводили вимірювання мікротвердості при навантаженнях 0,5; 1 та 2 Н. Перерахунок діагоналі по глибині відбитку виконано за формулою $h = d/7$, де h – глибина відбитку, d – діагональ відбитку після його розвантаження.

Мікротвердість визначали як середнє за 10 вимірюванням¹.

3.3.2 Вимірювання шорсткості і профілю поверхні

Експлуатаційні властивості виробів значною мірою залежать від геометричних характеристик поверхні (відхилення форми, хвилястість і шорсткість поверхні). Шорсткість впливає на коефіцієнт тертя, зносостійкість, статичну, тривалу і утомну міцність, корозійну стійкість, міцність з'єднань з натягом [1767, 177]. У зв'язку з цим необхідно ретельно

¹ Дослідження виконувалися в лабораторії трибології ДП “Завод ім. В. О. Малишева” О. К.Олійником

регламентувати основні характеристики шорсткості. Тому в запропонованій роботі приділено увагу вивченню змін геометричних параметрів поверхні після різних обробок.

Шорсткість і профіль поверхні зразків перед випробуваннями, а також при оптимізації режимів фінішної обробки визначали за допомогою профілометра-профілографа TR200 фірми JENOPTIK, відповідного до стандартів ISO 4287-1997. У прилад має вбудований стандартний RS232 порт для безпосереднього зв'язку з комп'ютером, що дає можливість систематизувати отримані дані.

Чутливість датчика профілометра становить 0,002 мкм. Це дозволяє описувати рельєф нерівностей висотою від 0,005 мкм. Діапазон вимірювань – 0,01...160 мкм, радіус опори – 125 мм, радіус вістря алмазної голки – 5 мкм. Шорсткість оцінювали середнім арифметичним абсолютних значень відхилень Ra . Похибка вимірювання Ra не перевищувала 10 %, відтворюваність становила $\leq 6\%$. Вимірювання проводили при кімнатній температурі і відносній вологості повітря не більше 70 %.

Дослідження проводились у лабораторії АТ “ФЕД”.

3.3.3 Використання електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу

Електронна мікроскопія. Мікроструктура при великих збільшеннях і з високою глибиною різкості вивчалася на растровому електронному мікроскопі PEM-106 виробництва ОАО SELMI. Прилад має комп'ютерне керування, що значно спрощує процес дослідження і дає можливість зберігати отримані зображення безпосередньо в цифровому вигляді. Мікроскоп дозволяє вивчати структури зі збільшенням від 15 до

300 000 разів. Роздільна здатність в режимі високого вакууму становить 4 нм, в режимі низького вакууму – 6 нм. Максимальний розмір об'єкта – 55 мм.

У растровому електронному мікроскопі зображення зазвичай формується за допомогою вторинних і відбитих електронів, зона виходу яких обмежена малою областю навколо місця пучка, тому досягається висока роздільна здатність. Це дозволяє досліджувати найдрібніші деталі рельєфу поверхні, а також забезпечує більшу різкість в поєднанні з наочністю зображення, що дає можливість досліджувати об'єкти з сильно розвиненою поверхнею [178].

Досліджувані об'єкти попередньо протруюють в 4 % розчині азотної кислоти, причому тривалість травлення була збільшена в порівнянні з підготовкою трибоелементів для оптичної мікроскопії з метою отримання більш глибокого рельєфу. Зображення вивчали у вторинних (у режимі високого вакууму, прискорюючи напруга 30 кВ) і відображених (у режимі низького вакууму, прискорюючи напруга 20 кВ) електронах.

3.3.4 Рентгеноструктурні дослідження

Для ідентифікації фазового складу поверхневого шару азотованих зразків було виконано рентгеноструктурні дослідження. Вони проводилися на дифрактометрі ДРОН-2.0 у фільтрованому випромінюванні Fe-K α . Зйомка дифрактограм для фазового аналізу здійснювалася у схемі θ -2 θ сканування з фокусуванням за Брегом–Брентано в інтервалі кутів від 25 до 140 град. Для порівняння було отримано дифрактограми з поверхні азотованого зразку 5А і такого ж фрагмента, вирізаного з цього зразку, поверхня якого була зішліфована на глибину 1 мм для видалення азотованого шару.

Після обробки дифрактограм, визначення кутового положення дифракційних максимумів та ідентифікації фаз за формулою Вульфа–Брегга розраховувалася міжплощинна відстань d_{hkl} для кристалографічних площин

(hkl). Значення параметра решітки a для виявлених фаз визначалося зі співвідношення:

$$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}. \quad (3.5)$$

3.3.5 Акустико-емісійний метод контролю зношування

Основною проблемою енергетичної теорії руйнування, що оперує параметрами пошкоджуваності, є те, що вони за своєю природою важко спостережувані [15, 16, 71]. Сучасний розвиток неруйнівних методів контролю, а саме методу акустичної емісії (АЕ), дозволив контролювати процеси як мало-, так і багатоциклової втоми на усіх етапах розвитку [89-92, 132, 133, 179]. Це і дало практичні основи для розробки методики прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності.

Дослідження за параметрами АЕ виконувались за допомогою інформаційно-діагностичної системи (ІДС) АЕ [89-92, 132, 133, 179]. Технічні характеристики ІДС наведено у табл. 3.4. Зовнішній вигляд ІДС, блока реєстрації і обробки сигналів АЕ в ІДС та датчика АЕ представлені на рис. 3.6. Застосовувався широкосмуговий датчик акустичної емісії ДИСМ1 з робочою смугою частот від 200 кГц до 1 200 кГц (рис. 3.6., в). У конструкції датчика застосовано метод демпфування тильної сторони п'єзопластини – чутливого елемента датчика акустичної емісії.

Таблиця 3.4 Технічні характеристики та комплектність ІДС

Характеристика	Показники
Вхідний опір, МОм	1
Чутливість входу, мкВ	10
Частотний діапазон, кГц	200...2000
Коефіцієнт посилення, дБ	65...90
Динамічний діапазон, дБ	40...65
Крок дискретизації, мс	20
Розмір відносної похибки, %	0,7

Продовження табл. 3.4

Комплектність
1. Датчик типу ДИСМ-1 (широкосмуговий п'єзоелектричний перетворювач) з робочою смугою частот 200...2000 кГц, вхідний опір – $2,3 \cdot 10^{-11}$ Ом, нерівномірність АЧХ – 8,5 дБ, ємність – 1,45 нФ, чутливість – 125 мВ/м·с ² .
2. Блок реєстрації обробки сигналів акустичної емісії

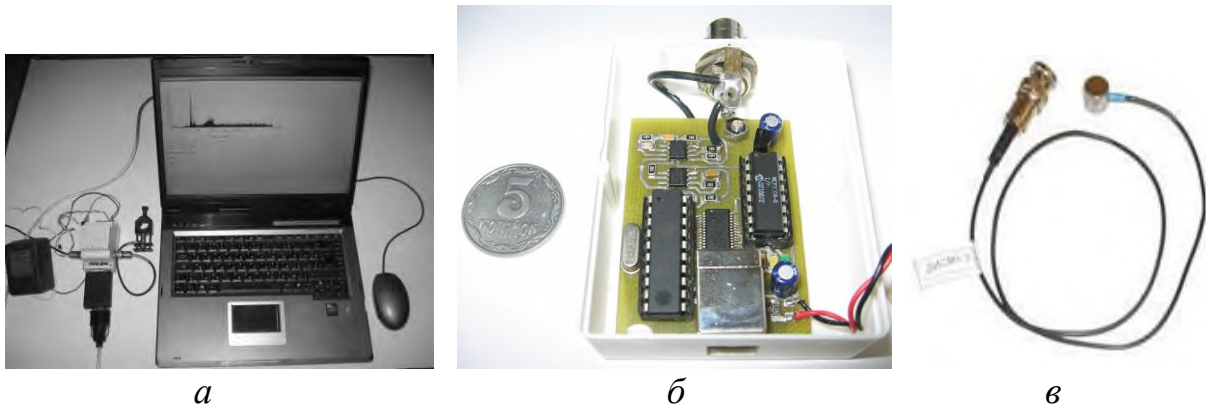
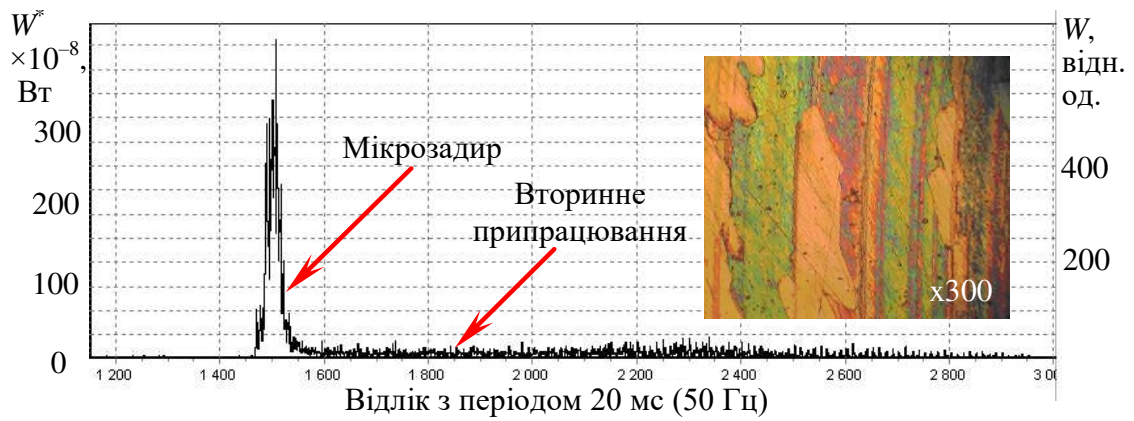
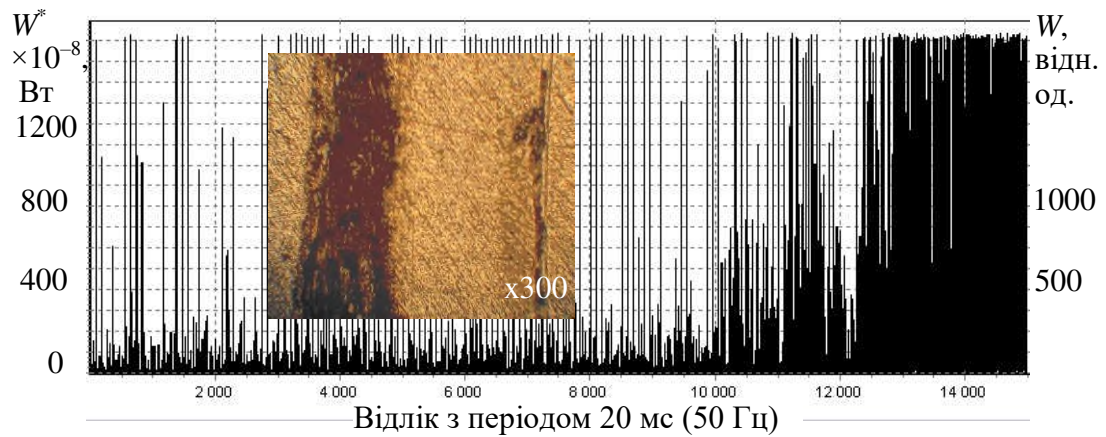


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд ІДС: *а* – загальний вигляд ІДС;
б – блок обробки сигналів АЕ; *в* – датчик АЕ

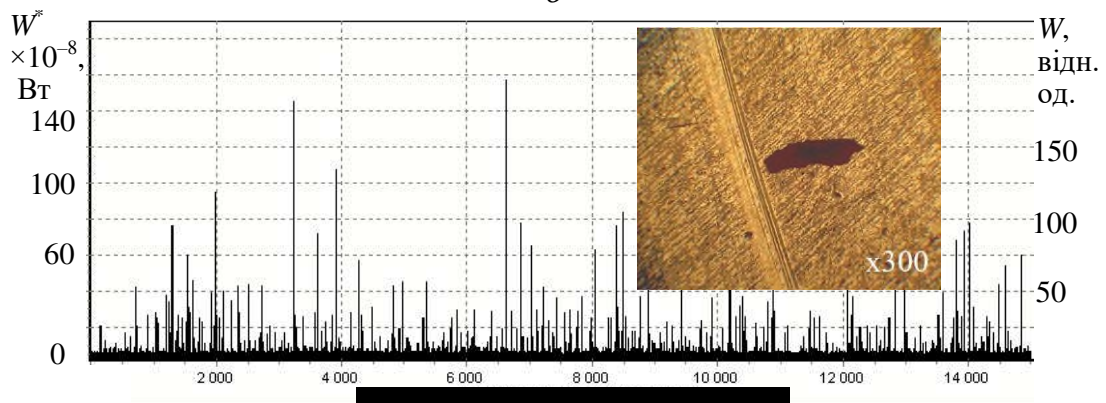
Результати оцінки швидкості зношування методом акустичної емісії дозволили провести оцінку чутливості цього методу при реєстрації зносу в трибосполученнях, що аналізуються [89-92, 132, 133, 179]. Вона знаходиться у межах діапазону зміни питомої емісійної активності $\xi_{AE} = 1,2 \cdot 10^{-11} \dots 1,45 \cdot 10^{-11}$ г/відн. од. Питома емісійна активність збільшується при збільшенні міцності матеріалу. При нормальному механохімічному зносі похибка прогнозування забезпечується на рівні не більше 2...2,5 %. В умовах переходу до пошкоджуваності похибки різко зростають і застосування методу АЕ в цьому випадку обмежується діагностичними ознаками (рис. 3.7). На цих графіках W^* є величиною потужності сигналу акустичної емісії у Ватах, а W – у відносних одиницях, між якими є пряма лінійна залежність [94, 180, 181].



а



б



в

Рисунок 3.7 – Діаграма зміни швидкості зношування в одиницях вимірювання потужності АЕ за наявності мікропошкоджуваності: а – мікрозадир; б – перехід до задиру; в – пітингове руйнування (глибина пітингових виразок становить складає 0,05...0,052 мм)

Розроблена методологія вимірювання швидкості зношування зразків в одиницях вимірювання потужності [182] дозволила розділити сигнали АЕ при нормальному зношуванні та при пошкоджуваності залежно від їх енергоємності (рис. 3.7, табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Енергоємність сигналів АЕ для різних механізмів накопичення пошкоджень у зразках

№ з/п	Механізми пошкоджень (зношування)	Енергоємність в одиницях вимірювання потужності	
		відносні одиниці	Вт·10 ⁻⁸
1.	Процеси пластичної деформації і утворення мікротріщин у поверхневому шарі	0...3	0...3,75
2.	Відділення одиничних частинок зносу	3...10	3,75...12,5
3.	Ділянка стаціонарного зношування (після припрацювання)	10...25	12,5...31,25
4.	Пітингове руйнування	60...80	75...100
5.	Супутні механізми мікропошкоджуваності (мікрозадир)	300...600	375...750

Для приймання сигналів АЕ, зважаючи на завдання роботи, використовували хвилевод (див. рис. 3.4 б, в), який встановлювали на відстані 0,2 мм від нижнього рухомого зразка та контакт здійснювався через масляний (гасовий) шар у зазорі.

3.4 Методика прискореної оцінки показників утомної міцності поверхневих шарів після їх модифікації

Грунтуючись на основних положеннях енергетичної теорії, фізичний зміст параметра пошкоджуваності u можна уявити як питому потужність дисиперованої енергії за один цикл навантаження $E_{\text{ц}}$ в межах часу t^* , тобто по суті це критерій, що оцінює дисипацію енергії руйнування, накопичену за цей час t^* , основна роль у якій відводиться прихованій енергії пластичної деформації [71, 183]. На підставі цього запропонована методика прискореної порівняльної оцінки показників утомної міцності зразків при коченні з проковзуванням з використанням методу АЕ.

Концепція розробки методики основана на кількісній оцінці енергетичного параметра пошкоджуваності КМ. Структурна схема методики складається з декількох етапів і наведена на рис. 3.8.

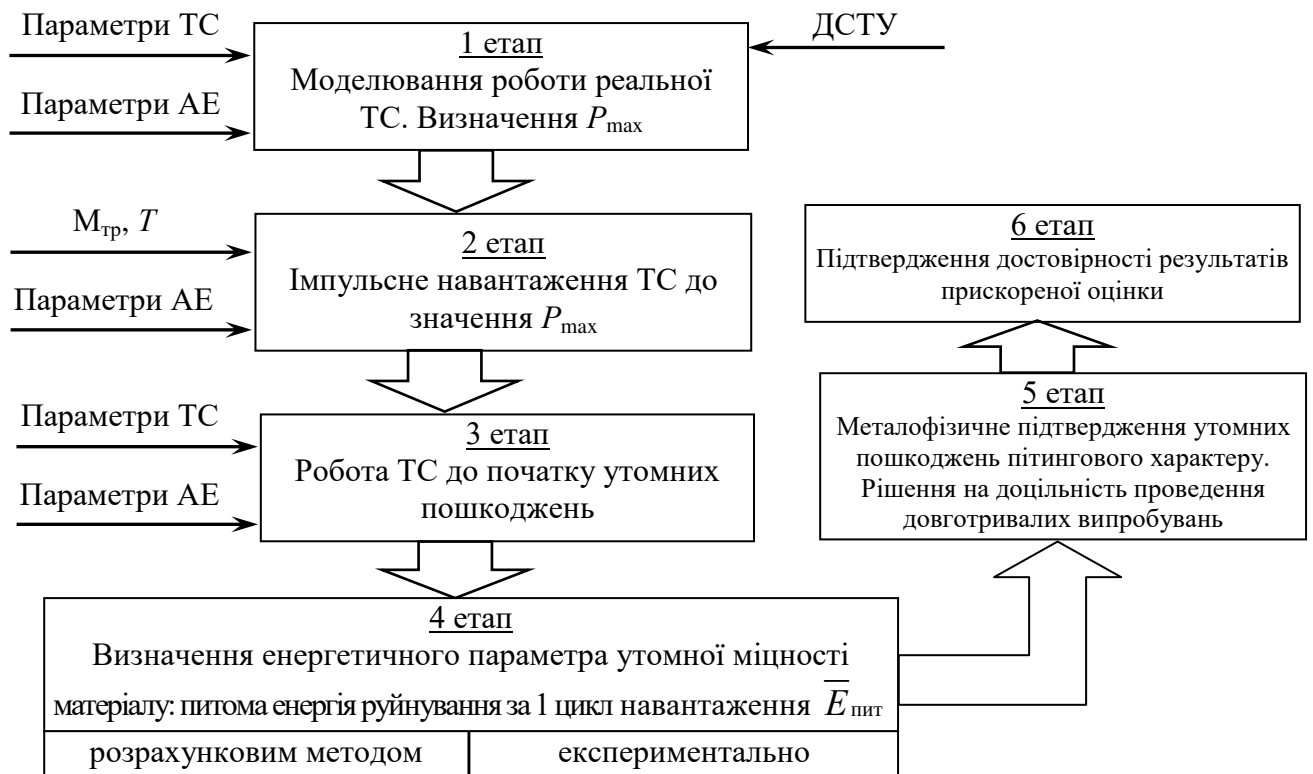


Рисунок 3.8 – Структурна схема методики прискореної порівняльної оцінки показників втомної міцності ТС при коченні з проковзуванням з використанням методу АЕ

- 1 етап: моделювання роботи реальної ТС. Визначення P_{\max} .
- 2 етап: імпульсне навантаження ТС до значення P_{\max} .
- 3 етап: робота ТС до початку утомних пошкоджень.
- 4 етап: визначення енергетичного параметру утомної міцності КМ: питома енергія руйнування за 1 цикл навантаження $\bar{E}_{\text{пит}}$ розрахунковим методом та експериментально. Порівняння матеріалів, що випробуються.
- 5 етап: металофізичне підтвердження утомних пошкоджень пітингового характеру. Рішення на доцільність проведення довготривалих випробувань.
- 6 етап. Підтвердження достовірності результатів прискореної оцінки. Проведення довготривалих порівняльних випробувань КМ на утомну міцність та кількісна оцінка показників утомної пошкоджуваності ваговим

методом та розрахунком середньої глибини пітингових пошкоджень (не менше 10^6 циклів контактної взаємодії). Рекомендації на проведення стендових випробувань організацією, яка має ліцензійний дозвіл з експертної оцінки (ПАТ Мотор Січ).

На **другому етапі** цієї методики проводять імпульсне навантаження до гранично можливих значень. Максимальні значення визначали за класичною методикою: східчасте навантаження з витримуванням на ньому до стабілізації параметрів ТС ($M_{тр}$, T , параметри АЕ) з продовженням такого східчастого навантаження з витримкою до моменту настання задир. Час витримки на кожній сходинці становить 20 хв.

Згідно з цією методикою швидкість навантаження ТС повинна дорівнювати швидкості релаксації напружень у поверхневому шарі [89].

Задир визначається за параметрами ТС ($M_{тр}$, T , (рис. 3.9) та параметрами АЕ (рис. 3.10). Результати визначення P_{max} для базової ТС (цементация) наведено на (рис. 3.9, 3.10.)

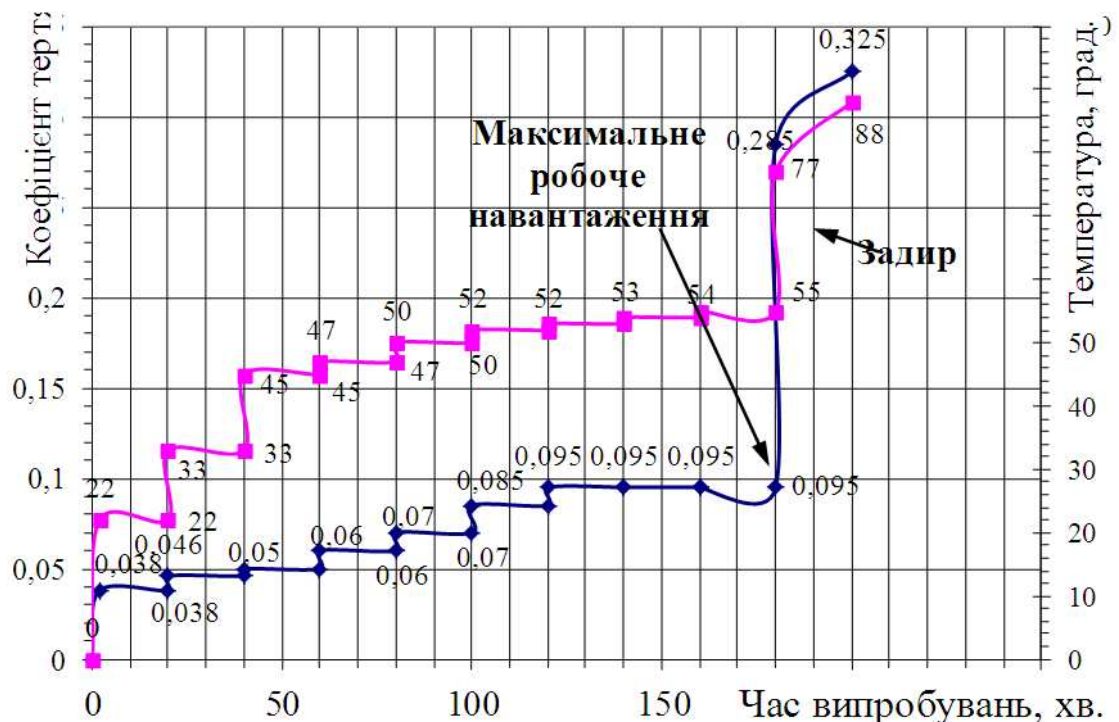
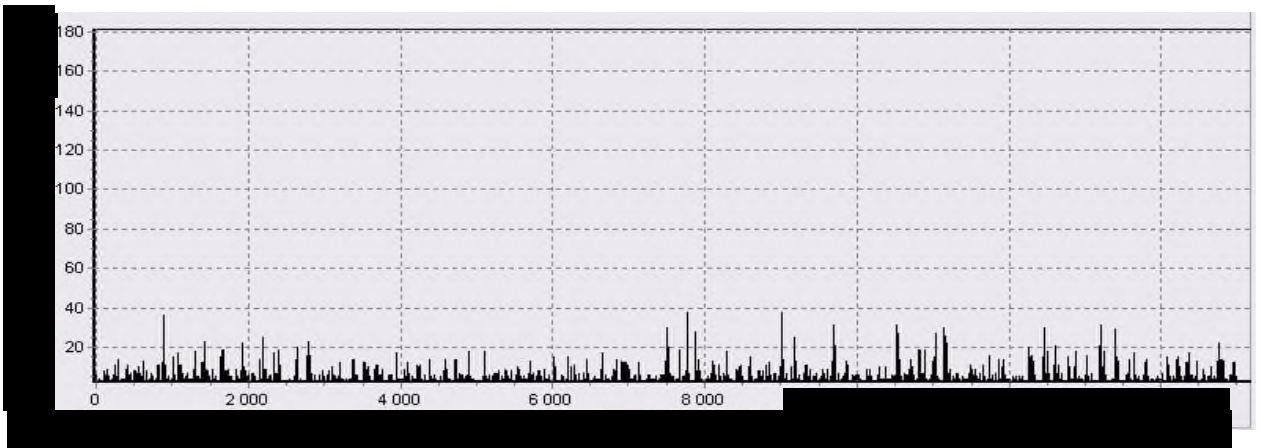


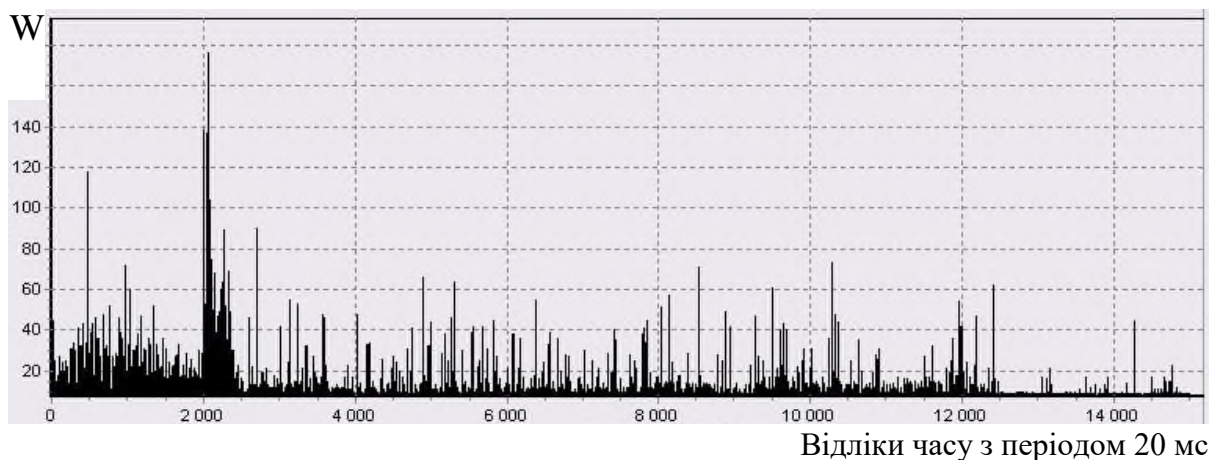
Рисунок 3.9 – Зміна триботехнічних параметрів при східчастому навантаженні при визначенні P_{max} для базової ТС (цементация)

Під час випробувань реєстрували середньоповерхневу температуру та момент тертя, який перераховувався у коефіцієнт тертя за формулою $f_{тр} = 2M / PD$, де M – момент тертя; P – навантаження; D – діаметр зразка.

Метод АЕ реєструє перехід ТС до задиру при навантаженні 5 000 Н. При цьому фіксувалися збільшення коефіцієнту тертя та температури. Це підтверджується мікрофотографіями поверхні зі слідами задиру (рис. 3.11.). Таким чином максимальне значення навантаження для даного зразка становить 4 500 Н.



a



Відліки часу з періодом 20 мс

б

Рисунок 3.10 – Діаграма зміни параметру АЕ для базового зразка (цементация) після навантаження: *a* – навантаження $P = 4\,500$ Н;
б – навантаження 5 000 Н

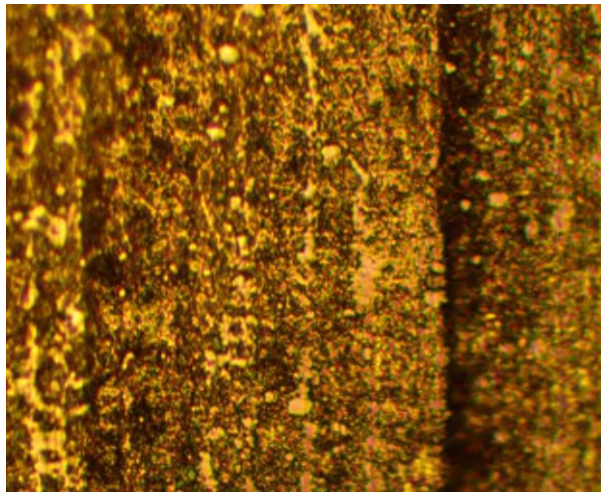


Рисунок 3.11 – Мікрофотографія поверхні зі слідами задиру при збільшенні навантаження до 5 000 Н (x532)

У результаті імпульсного навантаження реєструємо діаграму зміни сигналів АЕ (рис. 3.12) і до початку втомного руйнування амплітуда АЕ зростає до значень більше 100 відн. од., (рис. 3.13).

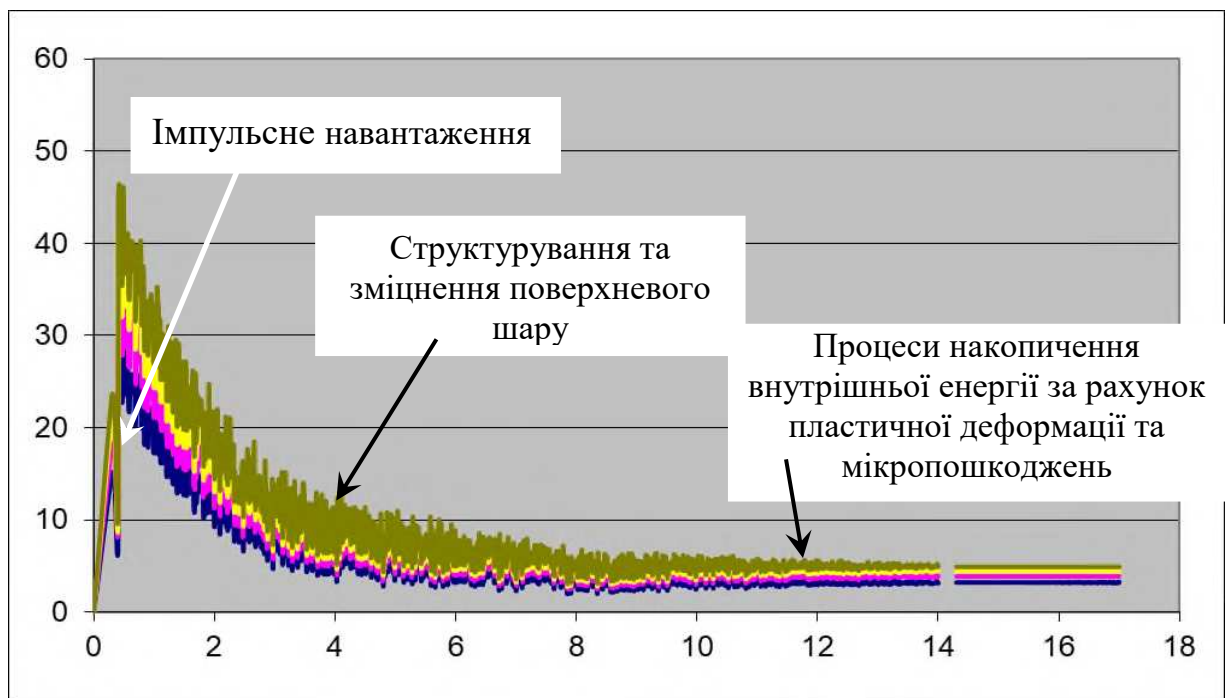


Рисунок 3.12 – Діаграма зміни сигналів АЕ при імпульсному навантаженні

Імпульсне навантаження практично виключає процеси малоциклового зношування. Надлишкове накопичення енергії E_0 при імпульсному навантаженні відбувається у підповерхневому шарі, що зумовлює процеси накопичення пластичної деформації та мікропошкоджень. Величина цієї енергії оцінюється лінійним накопиченням спектральної потужності АЕ до початку пошкоджень (пітингу).

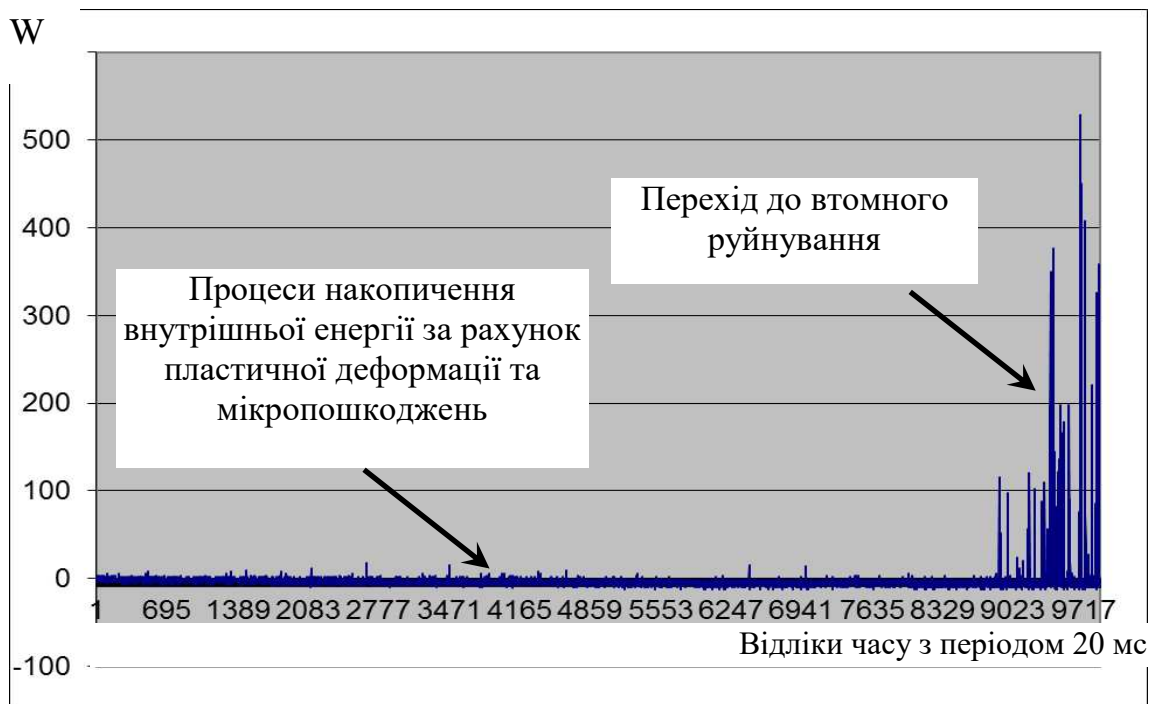


Рисунок 3.13 – Перехід зразка до явищ задиру за параметрами АЕ

На **третьому етапі** визначемо кількість циклів до початку втомного руйнування.

На **четвертому етапі** визначаємо розрахункове значення енергетичного параметра утомної міцності КМ $\bar{E}_{\text{пит}}$ (питому енергію руйнування за 1 цикл навантаження) та експериментально з'ясуємо його значення за показниками АЕ. Далі визначаємо різницю між величиною енергії зв'язку атомів в шарі E_{max} і питомою потужністю дисипованої енергії. Ця різниця є еквівалентом параметра пошкоджуваності u .

У відповідність з цим запропоновано оцінювати втомну міцність питомою енергією руйнування за один цикл навантаження:

$$\bar{E}_{\text{пит}} = \frac{E_{\text{max}} - (E_0 + E_{\text{имп}})}{n_{\text{ц}}}, \quad (3.4)$$

де $\bar{E}_{\text{пит}}$ – питома енергія руйнування за один цикл навантаження;

E_{max} – максимальна питома енергія, при якій матеріал руйнується, $E_{\text{max}} = \text{const} = 10^{11}$ Дж/м³ (для матеріалів з близькими фізико-механічними властивостями) [72];

E_0 – початкова питома енергія руйнування від дефектів, закладених при виготовленні деталі (фактор прискорення);

$E_{\text{имп}}$ – питома енергія імпульсного навантаження;

$n_{\text{ц}}$ – кількість циклів до початку втомного руйнування.

Процеси накопичення пошкоджень реєструються методом АЕ та підпорядковуються лінійному закону накопичення пошкоджень до виникнення пітингових пошкоджень (рис. 3.13).

3.5 Статистична оцінка середньої глибини утомних пошкоджень за результатами довготривалих випробувань

У нормативних документах при дефектації зубчастих коліс приводів [184, 185] оцінюється середня глибини пошкоджень, які поділяються на припустимі та неприпустимі. Враховуючи це, проводили оцінку заданих показників для обох варіантів зміцнення за результатами довготривалих випробувань. Для цього використовували таку методику [186] (дод. Б).

Розподіл глибин пітингових утомних пошкоджень за відсутності додаткових впливаючих факторів, має підпорядковуватися розподілу Вейбулла [186]. У деяких публікаціях розподіл пошкоджень описують нормальним або логарифмічно-нормальним законом. Однак частіше

дослідники описують розподіл глибин пітингових раковин законом екстремальних значень (подвійним експоненційним) [12, 29, 31]. Такому закону підпорядковується розподіл максимальної величини з n значень, які розподілені за законом із затухаючою щільністю розподілу (нормальним, логарифмічно-нормальним, гамма, Вейбулла та ін.). Функція цього розподілу має такий вигляд:

$$\Phi(x) = \exp\left\{-\exp\left[-a_n(x - u_n)\right]\right\} \quad (3.5)$$

де a_n – параметр інтенсивності (розмірність зворотна розмірності x);

u_n – характеристичне найбільше значення величини x .

Параметри розподілу можна визначити з таких співвідношень:

$$\overline{X}_n = u_n + \omega / a_n, \quad \sigma_n = \pi / \sqrt{6} a_n \quad (3.6)$$

\overline{X}_n – математичне сподівання максимальної величини x_n ;

$\omega = 0,57721\dots$ – стала Ейлера;

σ_n – середнє квадратичне відхилення x_n .

Використання цього розподілу для оцінки пошкодженості поверхні можливе таким чином. На випадково обраних ділянках поверхні тертя площею F (із середньою кількістю дефектів $\geq 10^2$), виміряти максимальні величини дефектів x ; потім визначити x та за формулами (3.6) знайти параметри розподілу.

Далі за формулою (3.5) визначають імовірність відсутності на довільній ділянці F дефектів розміром більше x . Імовірність відсутності таких дефектів на всій поверхні тертя площею F :

$$\Phi_F(x) = [\Phi(x)]^{F/F_0}. \quad (3.7)$$

При необхідності визначення максимального ймовірного розміру дефекту x задають допустиму ймовірність наявності такого дефекту $(1 - \Phi_F(x))$ і обчислюють x за формулами (3.7) та (3.6) у зворотному порядку.

Необхідно також відзначити, що індивідуальна оцінка показників утомної міцності матеріалів шляхом суцільного контролю дефектів і

пошкоджень, що виникли на поверхнях, дуже трудомістка, а іноді й неможлива через відсутність окремих ділянок, причому 100 %-й контроль не гарантує виявлення всіх дефектів. Частка випадковості при застосуванні навіть найкращих сучасних методів дефектоскопії все ще велика і надійність виявлення навіть великих прихованих дефектів становить лише близько 80 % при високій імовірності невиявлення цих дефектів під час другої перевірки [188].

Як бачимо з табл. Б.1 додатку Б, при високій необхідній достовірності оцінки та малій величині припустимої помилки необхідно провести велику кількість вимірювань. Було зазначено, що кількість вимірювань можна значно скоротити, використовуючи залежність (3.7), якщо є можливість вимірювання максимальних глибин на ділянках певної площі. Така можливість виникає при вираженій нерівномірності руйнувань, коли пошкодження максимальної глибини виявляються вже при зовнішньому огляді. У цьому випадку необхідно визначити площу поверхні S_0 , що припадає на одне незалежне вимірювання (на одну каверну, пітинг) і площу поверхні S_1 , що охоплюється одноразовим оглядом (зазвичай величина S_1 становить (1–10 дм²)). За величиною відношення S_1/S_0 визначається орієнтовний коефіцієнт варіації максимальних глибин V_h (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Визначення коефіцієнта V_h

$M = S_1/S_0$	10	10^2	10^3	10^4
V_h	0,3	0,2	0,15	0,1

Потім за табл. Б.1 дод. Б визначається необхідна кількість точок N для виміру максимальних глибин. Після виконання вимірювань обчислюють фактичне V_h і за потреби уточнюють N . Далі за графіками (рис. Б.1 дод. Б) визначають значення коефіцієнта варіації повного розподілу глибин руйнування, приймаючи $M = S_1/S_0$. Значення середньої глибини руйнування h може бути визначено за величиною середнього значення максимальних вимірних глибин h з використанням графіків (рис. Б.2 дод. Б).

Для цього від значення $M = S_1/S_0$ відновлюється перпендикуляр до перетину з кривою, що відповідає визначеному значенню V_h , і по точці перетину визначають на осі ординат значення $Eh_{\max} = h_{\max}/h$, за яким обчислюють h .

Така методика дозволяє більше ніж у п'ять разів зменшити площу сукупної поверхні, яку треба контролювати.

3.6 Експериментальна оцінка показників малоциклової та багатоциклової пошкоджуваності матеріалів, зміцнених цементуванням та іонно-плазмовим азотуванням

Впродовж багатьох років в Україні проводяться інтенсивні дослідження і розробки багатокомпонентних багатофункціональних покриттів та методів їх нанесення на поверхні з прецизійною обробкою, яку потребують деталі вузлів сучасних агрегатів літакобудування, космічної техніки та інших галузей [78, 79, 118-120]. Такі ж дослідження проводяться і за кордоном [15, 16]. Для впровадження цих технологій необхідні комплексні експериментальні дослідження з оцінки показників малоциклової та багатоциклової утомної міцності та порівняння їх з базовим методом – цементациєю.

3.6.1 Порівняльна оцінка технологічних методів цементациї та іонно-плазмового азотування за методикою прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів

Для проведення випробувань були підготовлені чотири пари зразків, зміцнені за традиційною технологією газової цементациї і шліфуванням поверхні після гарту, і чотири пари зразків, зміцнених азотуванням AVINIT N за технологією АТ “ФЕД” без механічної обробки поверхні після зміцнення.

Випробуванням піддані 4 однойменних пари зразків з індексом “С” (цементация / цементация) і 4 пари зразків з індексом “А” (азотування / азотування). Схема випробувань “диск-диск”.

Умови випробувань:

- швидкість обертання ведучого зразка – 500 об/хв;
- проковзування між зразками – 20 %;
- максимальне абсолютне навантаження – 4 500 Н (розрахункове питоме контактне навантаження $\sigma_{\max} = 1\,140$ МПа), швидкість навантаження – 450 Н/с;
- час досягнення навантаження 10 сек.;
- мастило – мінеральне масло М-8В ГОСТ 10541;
- час випробування – до моменту збільшення амплітуд акустичної емісії більше ніж у 10 разів, імовірно, до початку первинних проявів втомного руйнування.

Товщина зміцненого цементациєю шару за даними металографічних досліджень зразків становила 1,2 мм, азотованого шару – 0,25 мм. Твердість поверхні HRN15 цементованих і азотованих зразків становила, відповідно, 89-90 і 90-91,5, а твердість серцевини HRC – (34,5-36) і (27-28,5). Докладно результати мікроструктурних досліджень буде наведено у підрозділі 3.9

3.6.2 Результати прискорених випробувань на утомну міцність від втоми

З урахуванням термодинамічної концепції руйнування матеріалів при пластичній деформації і при зношуванні, руйнування обумовлено конкуренцією двох взаємопов'язаних, але протилежних тенденцій зростання щільності пошкоджуваності і зниження (вивільнення) цієї енергії за рахунок релаксації. При досягненні критичної щільності прихованої енергії відбувається руйнування.

Експерименти виконувалися за методикою прискореного оцінювання показників утомної міцності поверхневих шарів після їх модифікації, розкритої у підрозд. 3.5.

У процесі проведення випробувань встановлено, що кожен цикл випробувань складається з трьох характерних етапів: перший – етап навантаження; другий – вихід на сталий режим накопичення пошкоджень в поверхневому шарі; третій – перехід до початкових руйнувань утомного характеру. На рис. 3.14 і 3.15 наведені види діаграми акустико-емісійного

випромінювання при випробуваннях однієї з пар зразків, зміцнених цементациєю (рис. 3.14) і азотуванням (рис. 3.15).

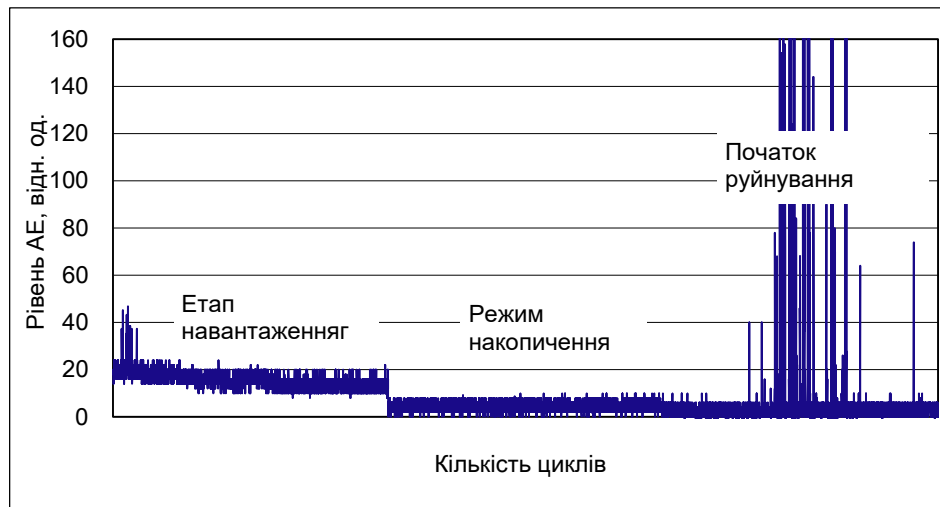


Рисунок 3.14 – Пара зразків 6С / 10С (59 000 циклів до виникнення пошкодження)

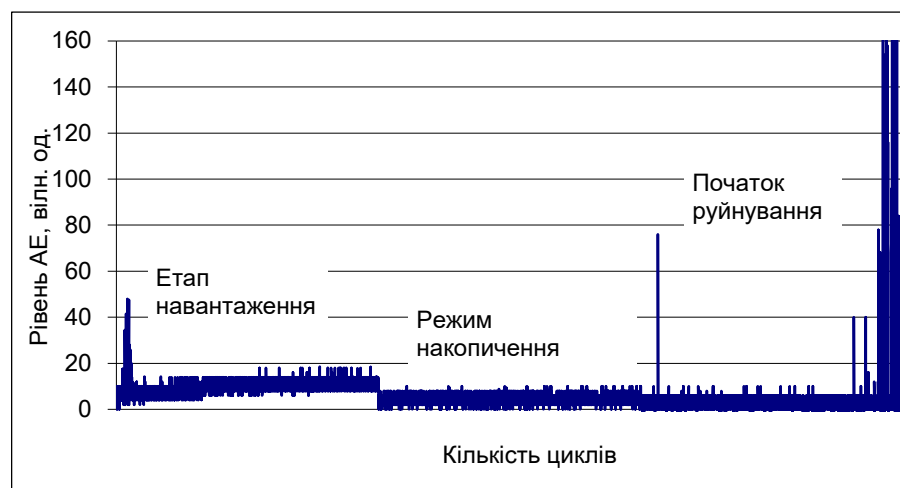


Рисунок 3.15 – Пара зразків 9А / 3А (97 500 циклів до виникнення початку пошкодження)

Усереднені результати триботехнічних параметрів при випробуваннях зразків на втомну міцність наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Усереднені результати триботехнічних параметрів при прискорених випробуваннях

Вид зміцнення зразків		Коефіцієнт тертя / середня температура поверхні, °С		Кількість циклів до початку явищ утомного руйнування	$E_{\text{вн}}$, Дж/м ³	$E_{\text{вн}} / n_{\text{кр}}$, Дж/м ³
Ведучий	Ведений	На початку випробувань	В кінці випробувань			
Цементация	Цементация	0,054/43	0,045/45	53812	$2,6 \cdot 10^{11}$	$4,832 \cdot 10^6$
Азотування	Азотування	0,08/50	0,063/52	97875	$4,7 \cdot 10^{11}$	$8,734 \cdot 10^6$

Після випробувань проведено оцінювання робочих поверхонь всіх зразків за допомогою мікроскопа. Загальний вигляд поверхонь після випробувань показано на рис. 3.16. Зображення пошкоджень поверхонь після випробувань наведено на (рис. 3.17–3.19).

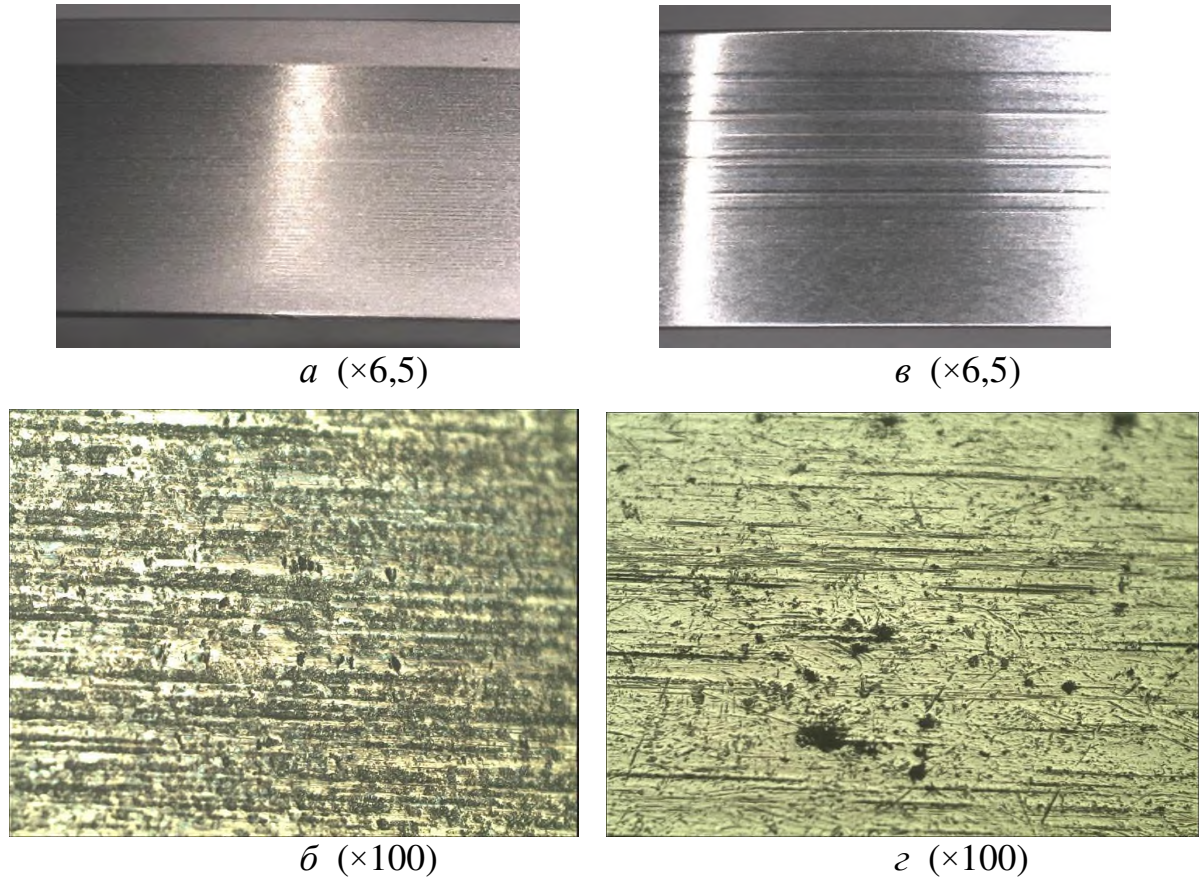


Рисунок 3.16 – Зображення поверхні зразків після випробувань: *a*, *б* – поверхні роликів, зміцнених цементацією; *в*, *г* – поверхні роликів, зміцнених азотуванням

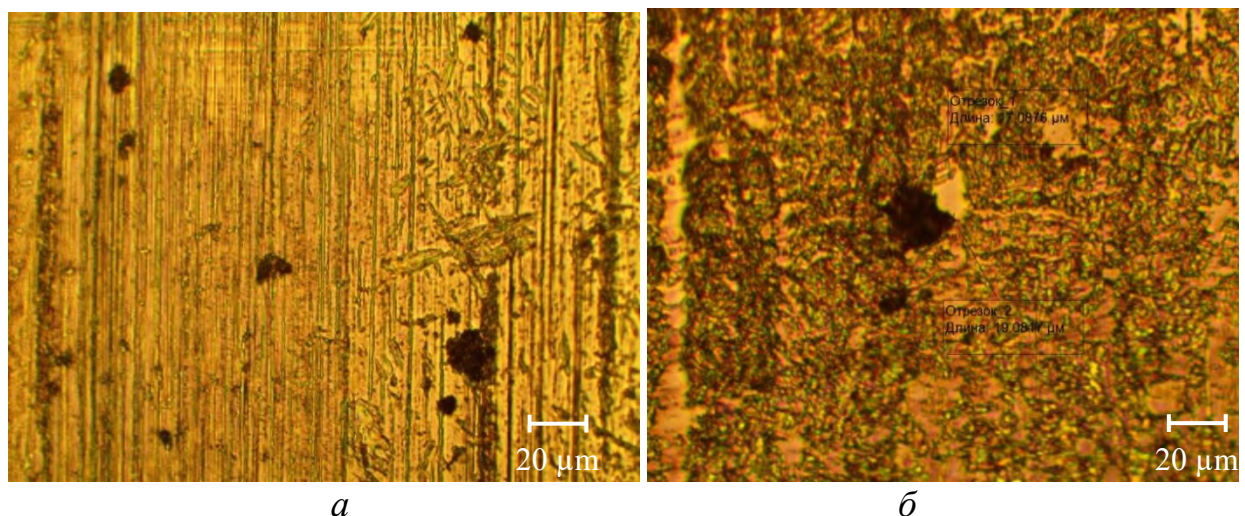


Рисунок 3.17 – Зображення пошкоджень після випробувань: *a* – цементація; *б* – азотування

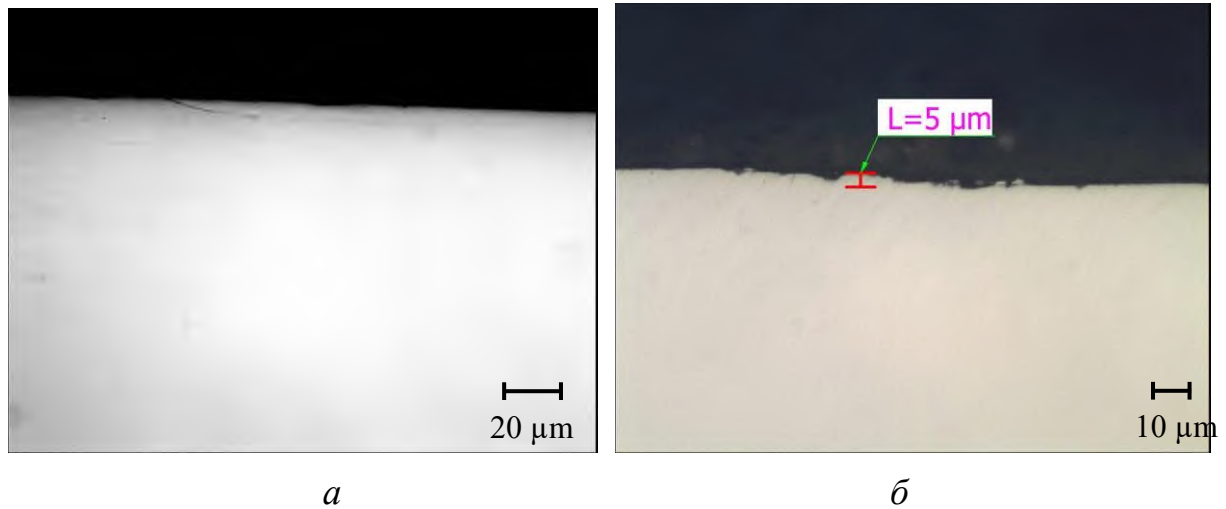


Рисунок 3.18 – Сліди викришування на цементованому зразку з боку контактної поверхні: *a* – поздовжній шліф ($\times 500$);
б – поперечний шліф ($\times 200$)

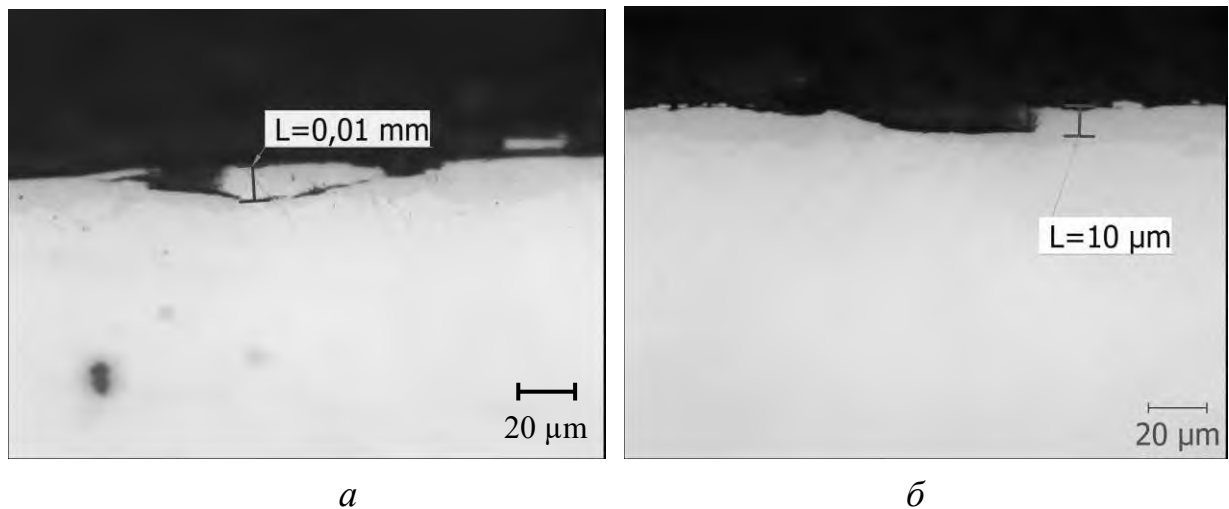


Рис. 3.19. Сліди викришування на азотованому зразку з боку контактної поверхні: *a* – поздовжній шліф ($\times 500$); *б* – поперечний шліф ($\times 500$)

За результатами проведених експериментів маємо вихідні дані для розрахунку критерію міцності для конструкційних матеріалів, зміцнених цементацією та азотуванням, а також можемо на їх основі провести порівняльну оцінку матеріалів (з урахуванням формули 3.7).

Якщо в нашому випадку прийняти товщину шару для азотованих і цементованих зразків рівним $H \approx 0,2$ мм а напруження при терті $\sigma \approx 1400$ МПа, то при швидкості зсуву $V_{\text{тер}} \approx 0,65$ м/с/с при контактній взаємодії на кожному циклі та при значенні вимірюваного коефіцієнта тертя $\mu \approx 0,04$, питома потужність енергії, що підводиться до ефективного об'єму ТС за один цикл буде становити близько $E_{\text{вн1}} \approx 4,8 \cdot 10^6$ Дж/м³. Різницю між

товщиною шарів, які модифіковані цементацією та азотуванням, не враховано навмисно: при такому підході можна оцінити вплив механізму дисипації енергії за рахунок різних механізмів, яку може забезпечити модифікування матеріалу.

Встановлено, що вихідні рельєфи контактуючих поверхонь всіх випробуваних зразків прикатані, за винятком того, що на контактуючих поверхнях азотованих зразків, що не піддавалися шліфуванню, проглядається вихідний рельєф попередньої обробки.

За результатами дослідження шорсткості поверхонь до випробувань (рис. 3.20) та після випробувань (рис. 3.21) бачимо, що зміни шорсткості відбуваються за рахунок потрапляння у контактну область твердих часток різної величини в процесі тертя (див. рис. 3.16, 3.17).

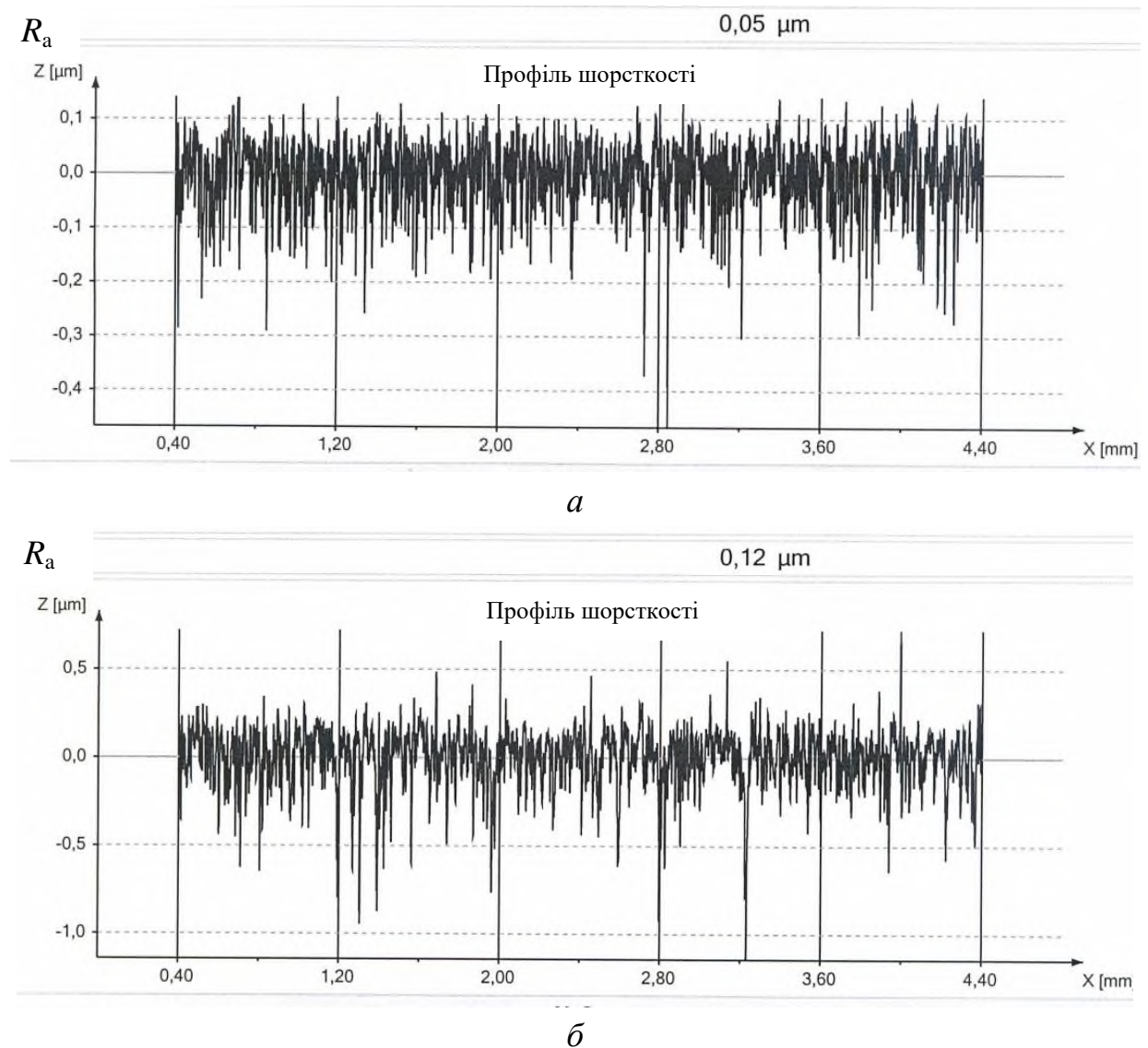
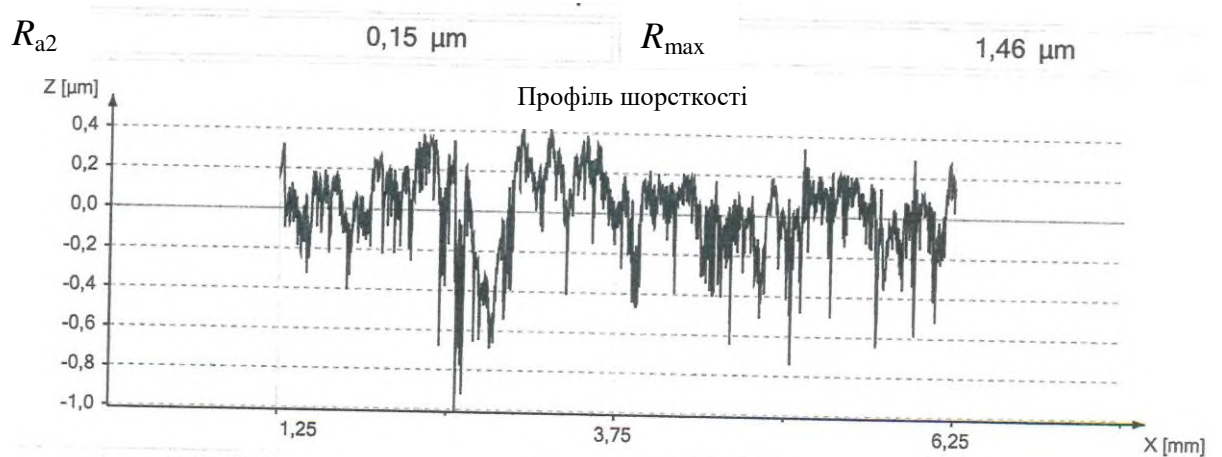


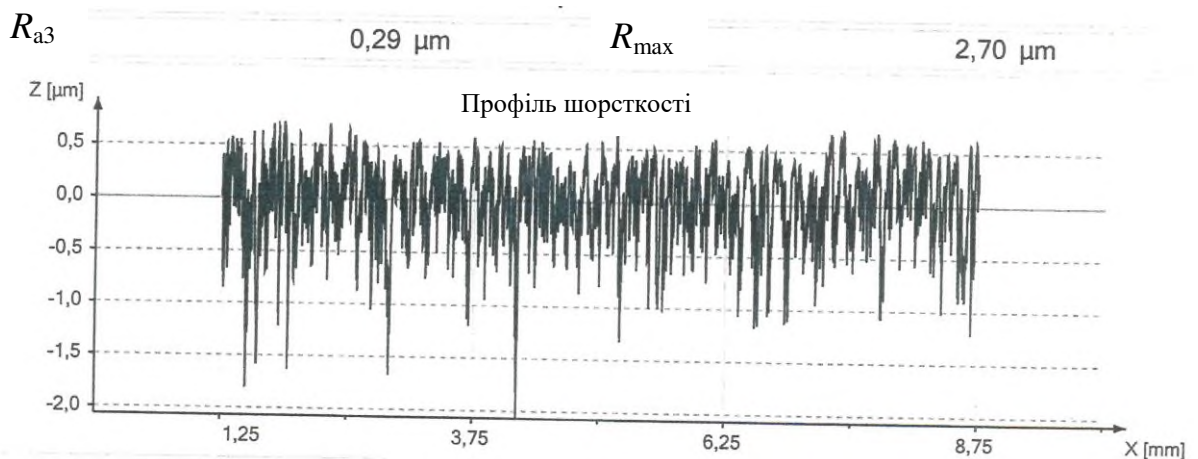
Рисунок 3.20 – Профіль шорсткості ведених зразків до випробувань:
a – зміцнених цементацією ($R_a = 0,05$); *б* – зміцнених азотуванням ($R_a = 0,12$)

На контактуючих поверхнях зразків є риски різної величини від прослизання і потрапляння в зону контакту твердих частинок, сліди вдавнення, що характеризуються випинанням матеріалу по контуру, а також групові скупчення слідів вдавнення різної величини від роздавлювання більш твердої частинки (див. рис. 3.16, 3.17).

На поверхнях зразків, зміцнених цементацією, є множинні сліди викришування з наявністю прилеглих тонких виразкових тріщин, що свідчить про втомний характер викришування. Поверхня азотованих зразків також містить численні сліди викришування різної величини, однак з огляду на більш грубий рельєф поверхні, виразкові тріщини не проглядаються.



a



б

Рисунок 3.21 – Профіль шорсткості ведених зразків після випробувань:

a – зміцнених цементацією; *б* – зміцнених азотуванням

Встановлено, що контактуючі поверхні ведених зразків пошкоджені більш інтенсивно, ніж ведучих зразків незалежно від способу їх зміцнення (цементациєю або азотуванням).

Вимірювання глибини пошкоджень на поверхні зразків за допомогою інтерферометра МІІІ-4У4.2 показали, що для цементованих поверхонь вона, залежно від діаметра пошкодження, може знаходитися в межах від 0,01 до 0,027 мм. Для азотованих поверхонь глибина пошкоджень не перевищувала 0,003 мм.

Таким чином, проведені порівняльні випробування зразків, зміцнених за різною технологією показали, що при питомому контактному навантаженні $\sigma = 1\ 140$ МПа на робочих поверхнях всіх випробуваних зразків утворилися початкові осередки втомного викришування. Усереднена кількість циклів до реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального зносу до початкового руйнування від втоми для зразків, зміцнених за технологією азотування AVINIT N, вище в 1,82 рази в порівнянні зі зразками, зміцненими традиційною газовою цементациєю. Менша швидкість накопичення пошкоджуваності поверхні, що передують втомному руйнуванню, дає підставу зробити висновок про більш високі втомні характеристики азотованих зразків з товщиною зміцненого шару 0,25 мм у порівнянні з цементованими зразками з товщиною зміцненого шару 1,2 мм.

На контактуючих поверхнях всіх зразків є множинні точкові раковини без випинання металу по контуру, які ймовірно, являють собою осередки втомного викришування.

Мікроструктурними дослідженнями матеріалу зразків встановлено:

– на цементованому зразку з боку контактуючої поверхні є виразкова тріщина і дрібні лунки від викришування, глибина яких становить $\approx 0,005$ мм (див. рис. 3.18). Фактична глибина цементованого шару становить $\approx 1,2$ мм;

– на азотованому веденому зразку з боку контактуючої поверхні є виразкові тріщини і орієнтовані по них лунки від викришування, глибина яких становить $\approx 0,010$ мм (див. рис. 3.19). Фактична глибина азотованого шару становить $\approx 0,2$ мм (рис. 3.22 а).

У мікроструктурі азотованого шару в крайньому зовнішньому шарі є ξ -фаза товщиною $\approx 0,03$ мм, а також прилеглі до неї великі надлишкові нітриди, глибиною залягання від поверхні $\approx 0,07$ мм (рис. 3.22 б).

Далі по перерізу азотований шар являє собою азотистий мартенсит відпускання, а надлишкові нітриди фактично відсутні.

Виконано визначення мікротвердості по перерізу зміцнених шарів. Результати наведені в таблицях 3.8 і 3.9.

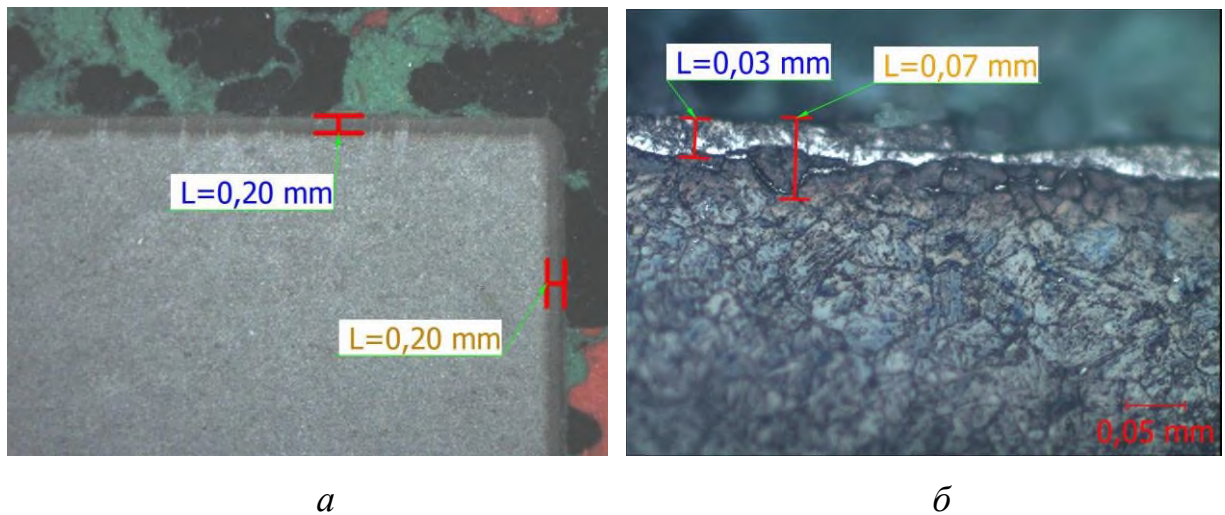


Рисунок 3.22 – Мікроструктурні дослідження поверхневого шару азотованих зразків: *a* – зразок ведений, ($\times 6,5$) шар азотування; *б* – зразок ведений, ($\times 500$), мікроструктура шару азотування

Ефективна глибина цементованого шару, відповідна 500 HV, становить $\approx 1,15$ мм. Твердість серцевини веденого цементованого зразку – 39,5 HRC (табл. 3.8). Ефективна глибина азотованого шару, відповідна 500 HV, становить $\approx 0,15$ мм. Твердість серцевини веденого азотованого зразка – 29 HRC (табл. 3.9).

Таблиця 3.8 – Мікротвердість по перерізу цементованого шару

Зразок ведений	Відстань від поверхні, мм											
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
	мікротвердість, HV (HRN15)											
	671,5 (89)	658 (89)	656,5 (88,5)	610,5 (88)	597 (87,5)	546,5 (87)	535 (86)	535 (86)	524,5 (85,5)	513 (85,5)	512 (85,5)	478,5 (84)

Таблиця 3.9 – Мікротвердість по перерізу азотованого шару

Зразок ведений 3А	Відстань від поверхні, мм			
	0,05	0,1	0,15	0,2
	мікротвердість, HV (HRN15)			
	821,5 (92)	801,5 (91,5)	501,5 (85)	402 (80,5)

Виконано фрактографічні дослідження точкових раковин без випинання металу по контуру за допомогою електронного мікроскопа зі збільшенням до $\times 5500$, в результаті якого по донцям раковин виявлені концентричні і східчасті лінії відпочинку, що є характерною ознакою руйнування по втомному механізму (рис. 3.23).

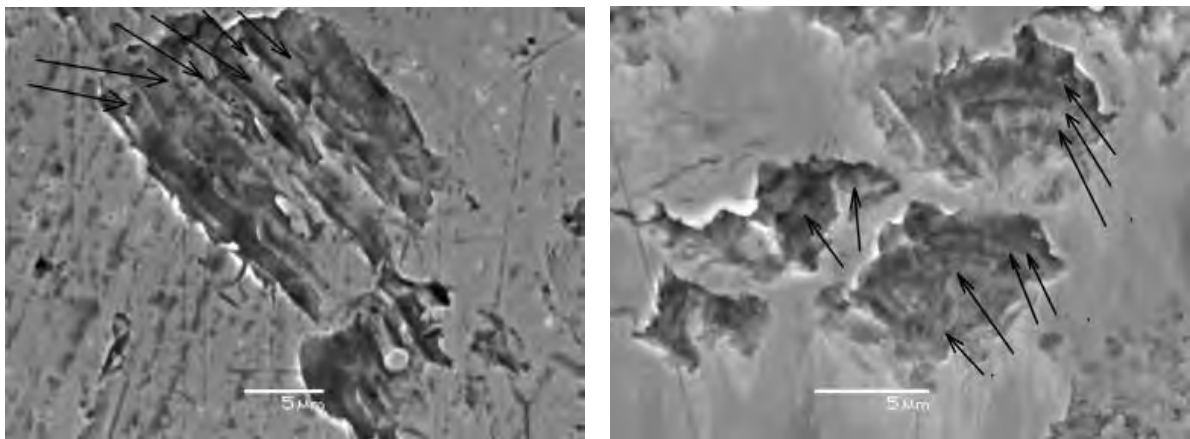
*a* – ($\times 3500$), лінії відпочинку*б* – ($\times 5000$), лінії відпочинку

Рисунок 3.23 – Фрактографічні дослідження з показаними лініями відпочинку:

a – загальмованого цементованого зразку, ($\times 3500$); *б* – загальмованого азотованого зразку, ($\times 5000$)

Аналіз результатів прискорених випробувань і подальших досліджень зразків підтверджують правомірність підходів до проведення таких випробувань. Цей аналіз показує, що при питомому контактному навантаженні $\sigma = 1140$ МПа на робочих поверхнях всіх випробуваних зразків утворилися початкові осередки втомного викришування.

Метод АЕ довів високу ефективність реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального зносу до початкового втомного руйнування.

Кількість циклів до виникнення початкових осередків утомного викришування на зразках, які досліджувались, після випробувань на утомну міцність становлять:

1. Зразок ведений, зміцнений азотуванням AVINIT N глибиною 0,2 мм, відпрацював 97 500 циклів.

Зразок ведений, зміцнений газовою цементацією глибиною 1,2 мм, відпрацював 47 000 циклів.

2. У середньому за результатами чотирьох випробувань, пари зразків до утворення початкових осередків утомного викришування відпрацювали:

– зміцнені азотуванням AVINIT N – 97 875 циклів;

– зміцнені газовою цементацією – 53 812 циклів.

3. Робочі поверхні ведених (загальмованих) зразків мають більш інтенсивні пошкодження, ніж ведучих зразків.

Таким чином, сутність викладеного дає можливість стверджувати, що запропонована методика прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів істотним чином зменшує час експертної оцінки. Вона може бути використана при розробці нових конструкційних матеріалів та способів їх зміцнення.

3.7 Порівняльна оцінка технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування шляхом довготривалих випробувань на утомну міцність

3.7.1 Об'єкт випробувань і умови проведення випробувань

Довготривалі порівняльні випробування на утомну міцність обох методів зміцнення поверхонь були сплановані, у тому числі, і для підтвердження достовірності результатів методики прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності, розкритої у підрозділі 3.4.

Проведені експерименти показали, що після здійснення модернізації машини тертя вдалося досягти контактних навантажень, що дозволяють оцінити відносну контактну утомну міцність при циклічних навантаженнях в умовах кочення з проковзуванням (розділ 2). У цих дослідженнях зразки зі зміцненням цементацією прийняті за еталон.

Випробувано по три однойменних пари тертя. Умови випробувань: швидкість обертання ведучого зразка – 500 об/хв; прослизання між зразками – 20 %; абсолютне навантаження – 4 500 Н (розрахункове питоме контактне

навантаження $\sigma_{\max} = 1\,140$ МПа), навантаження – східчає по 500 Н з витримуванням на кожному кроці навантаження 5 хв до стабілізації параметрів ТС; час випробувань – 32 години роботи періодами по 8 годин з 16 годинними перервами, що відповідало 960 000 циклів контактної взаємодії.

3.7.2 Результати довготривалих випробувань на утомну міцність від втоми

У якості оціночного показника було прийнято ваговий знос за весь період випробувань. У нашому випадку оцінювалася інтегральна характеристика зносостійкості в умовах великих контактних напружень. Ця характеристика включала втрату маси через нормальний механохімічний знос і за рахунок втомного викришування. За таких умов випробувань розділити ці дві складові зношування не можливо.

Випробували по три пари тертя з певними номерами. Результати наведені в табл. 3.10, 3.11. Явищ задиру не виявлено за весь період випробувань на жодній парі зразків.

Під час випробувань реєстрували середньоповерхневу температуру і момент тертя, який перераховувався в коефіцієнт тертя (табл. 3.10).

Таблиця 3.10. – Результати вимірювання коефіцієнту тертя і температури

Зміцнення зразків		Коефіцієнт тертя / температура, °С			
Ведучого	Веденого				
Цементация		Через 240000 циклів		Через 960 000 циклів	0,036/50,4
№6С*	№10С загальм.				0,036/50,4
Азотування					0,043/54,2
№5А	№ 1А загальм.				0,036/50,4
Цементация					0,043/54,2
№8С	№ 2С загальм.				0,036/50,4
Азотування					0,043/54,2
№2А	№10А загальм.				0,036/50,4
Цементация					0,043/54,2
№4С	№5С загальм.				0,036/50,4
Азотування					
№11А	№4А загальм.			0,036/50,4	

* Позначення номерів зразків, які в подальшому використовувалися для металофізичних досліджень

До і після випробувань зразки зважували на аналітичних лабораторних терезах ВЛА-200 з точністю до 10^{-4} гр. Визначали знос ведучого і веденого зразків, а також сумарний знос (табл. 3.11).

Таблиця 3.11 – Результати визначення вагового зносу зразків

Зміцнення зразків	Ваговий знос зразків, гр		Сумарний знос, гр
	Ведучих (нижніх)	Ведених (верхніх)	
Цементация/ Цементация	6С – 0,1816	10С – 0,1052	0,2868
	8С – 0,1690	2С – 0,1163	0,2853
	4С – 0,2004	5С – 0,1105	0,3109
Всього/середнє за 3 зразки	0,551/ 0,1837	0,332/ 0,1107	0,883/ 0,2943
Азотування / Азотування	5А – 0,0164	1А – 0,0104	0,0268
	2А – 0,0185	10А – 0,0132	0,0317
	4А – 0,0163	11А – 0,0122	0,0285
Всього/середнє за 3 зразки	0,0512/ 0,0171	0,0358 / 0,0119	0,087/ 0,029

У момент відділення великої частки зносу за механізмом піттингу на діаграмі зміни коефіцієнта тертя спостерігається стрибок, тривалість якого 10–12 хвилин. На наш погляд, це обумовлено механікою руйнування. Спочатку відбувається випинання, а потім – відділення об'єму матеріалу (рис. 3.24). Після чого момент тертя стабілізується і починається вищерблення по межі дефекту. Таким чином поступово утворюється характерна смугастість на зразках з цементациєю.



Рисунок 3.24 – Стрибок моменту тертя при пітинговому руйнуванні поверхневого шару цементованого зразка

Отримані дані свідчать про те, що зразки, зміцнені іонно-плазмовим азотуванням за технологією AVINIT N, мають більш високі показники зносостійкості в порівнянні з цементацією з урахуванням утомного механізму поверхневого руйнування (у 10 разів).

Також фрактографічні дослідження показують (рис. 3.25), що на поверхнях тертя спостерігаються локальні викришування втомного характеру (для азотованих зразків глибиною в межах 0,006...0,009 мм, для цементованих – глибина збільшується до 0,015...0,03 мм). Аналіз мікрофотографій поверхонь і візуальне спостереження по всій поверхні зразків показав, що ведучий ролик з цементацією втрачає вагу в основному в результаті втомних пошкоджень і частково за рахунок механохімічного зносу. У веденого ролика втрата ваги в основному відбувається за рахунок нормального механохімічного зносу і частково – втомного.

Причому, глибина пошкоджень в цьому випадку значно більше (див. рис. 3.25). У азотованих зразків втрата ваги для ведучого і веденого зразків виникає рівноцінно за рахунок механохімічного зносу і втомних пошкоджень (рис. 3.25).

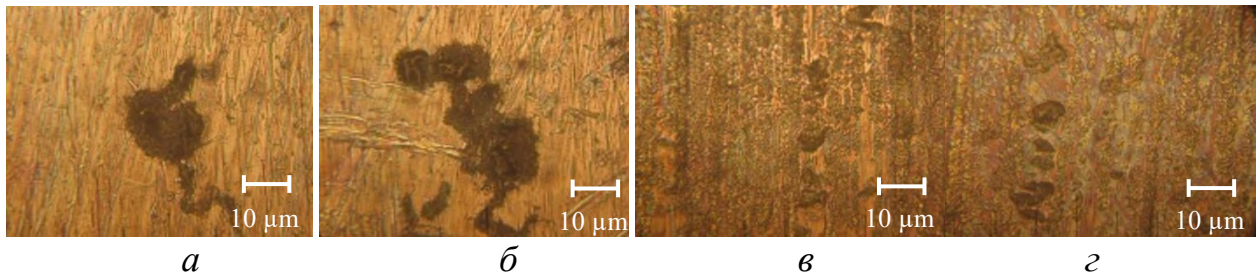


Рисунок 3.25 – Фрактографічні дослідження поверхонь тертя після випробувань ($\times 534$): *a, б* – характерний вигляд пошкоджень для роликів з цементацією; *в, г* – характерний вигляд пошкоджень для роликів з азотуванням

Для підтвердження гіпотези про переваги структурної інженерії поверхні з азотуванням перед поверхнею з цементацією були проведені вимірювання мікротвердості по глибині поверхневого шару в діапазоні

до 0,2 мм (табл. 3.12, 3.13) і коерцитивної сили² [201, 202] (табл. 3.14). Дослідження проводили до випробувань і після 32 годин напрацювання.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити такий висновок: у цементованому шарі після 960 000 циклів спостерігається значне зниження мікротвердості за рахунок накопичення в поверхневому шарі втомних дефектів мікроструктурного рівня. Це і є причиною підвищення інтегральної величини зносу (звичайний механохімічний знос плюс пітингові руйнування).

Таблиця 3.12 – Результати визначення мікротвердості H_{μ} до випробувань

№ зразка	Навантаження P, H								
	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0
	Діагональ відбитку $d, \text{мкм}$			Глибина відбитку $h, \text{мкм}$			Мікротвердість $H_{\mu}, \text{кг/мм}^2$		
6А (азотування)	9,4	12,7	17,7	1,34	1,81	2,53	1049	1149	1184
7С (цементация)	21,2	24,0	24,6	3,02	3,43	3,52	780	1060	1160

Таблиця 3.13 – Результати визначення мікротвердості H_{μ} після випробувань з 960 000 циклів навантаження (32 години роботи)

№ зразка	Навантаження P, H								
	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0
	Діагональ відбитку $d, \text{мкм}$			Глибина відбитку $h, \text{мкм}$			Мікротвердість $H_{\mu}, \text{кг/мм}^2$		
4А (азотування)	10,3	12,0	17,9	1,5	1,7	2,6	873	1287	1157
5С (цементация)	11,9	16,9	22,3	1,7	2,4	3,2	655	649	746

Таблиця 3.14 – Результати визначення коерцитивної сили

Спосіб зміцнення	Значення коерцитивної сили $H_c, \text{А/см}$	
	До випробувань	Після 32 годин випробувань
Цементация	20,6	26,2
Азотування	10,2	8,0

² Коерцитиметрія є доволі ефективним методом неруйнівного контролю. Вона дозволяє за вимірюваннями магнітної характеристики металу – коерцитивної сили – судити про механічні властивості, напружено-деформований стан та ступінь утомленості матеріалу. Дослідження виконані на ДП “Малишева”, (м. Харків, Україна).

Для зразків із азотуванням значення мікротвердості залишаються практично незмінними, що є підтвердженням аморфізації поверхневого шару, і, внаслідок цього, значно меншого накопичення втомних дефектів.

Вимірювання коерцитивної сили (табл. 3.14) також підтверджують ці висновки: кількість границь зерен в мікроструктурі цементованого шару зростає, а у азотованого – навіть дещо зменшується за рахунок аморфізації поверхневого шару в процесі тривалої роботи. Це досить добре спостерігається на мікрошліфах, представлених далі.

Таким чином, результати порівняльних випробувань показали суттєву перевагу зразків, що мають зміцнення азотуванням у порівнянні з цементацією. За показниками коефіцієнта тертя трибосистема зі зміцненням азотуванням кілька поступається трибосистемі з цементацією в першому циклі роботи (8 годин). Це, ймовірно, пов'язано з виникненням у процесі роботи на поверхнях зразків з цементацією характерного смугастого рельєфу. Після 32 годин випробувань коефіцієнти тертя для обох досліджуваних трибосистем вирівнюються (див. табл. 3.10). Інтегральне значення величини зносу зразків, зміцнених азотуванням, більш ніж у 10 разів менше в порівнянні зі зміцненням цементацією.

Дослідження роликів 6С/10С (цементация) та 5А/1А (азотування) виконувалися фахівцями і на обладнанні АТ “Мотор Січ” (м. Запоріжжя, Україна). Огляд зразків 6С і 10С за допомогою бінокулярного та оптичного мікроскопів встановив, що рельєф прикатаних поверхонь є характерним для тертя з проковзуванням, яке супроводжується утворенням поверхневих рисок та заглибин у вигляді точкових раковин на всіх ділянках, які брали участь у контакті. Огляд зразків 5А і 1А за допомогою бінокулярного та оптичного мікроскопів встановив, що на їх поверхнях проглядається рельєф вихідної механічної обробки з наявністю рисок та заглибин у вигляді точкових раковин, характерних для поверхневого відлущування та викришування, на всіх ділянках, задіяних у контакті. Для підтвердження утомного характеру раковин на поверхнях зразків зроблено фрактографічне дослідження за допомогою електронного мікроскопа при збільшенні до $\times 5\ 500$. У результаті підтверджено, що раковини являють собою сліди втомного відлущування і

викришування: по денцях раковин спостерігаються лінії відпочинку, характерні для втомного руйнування (рис. 3.26).

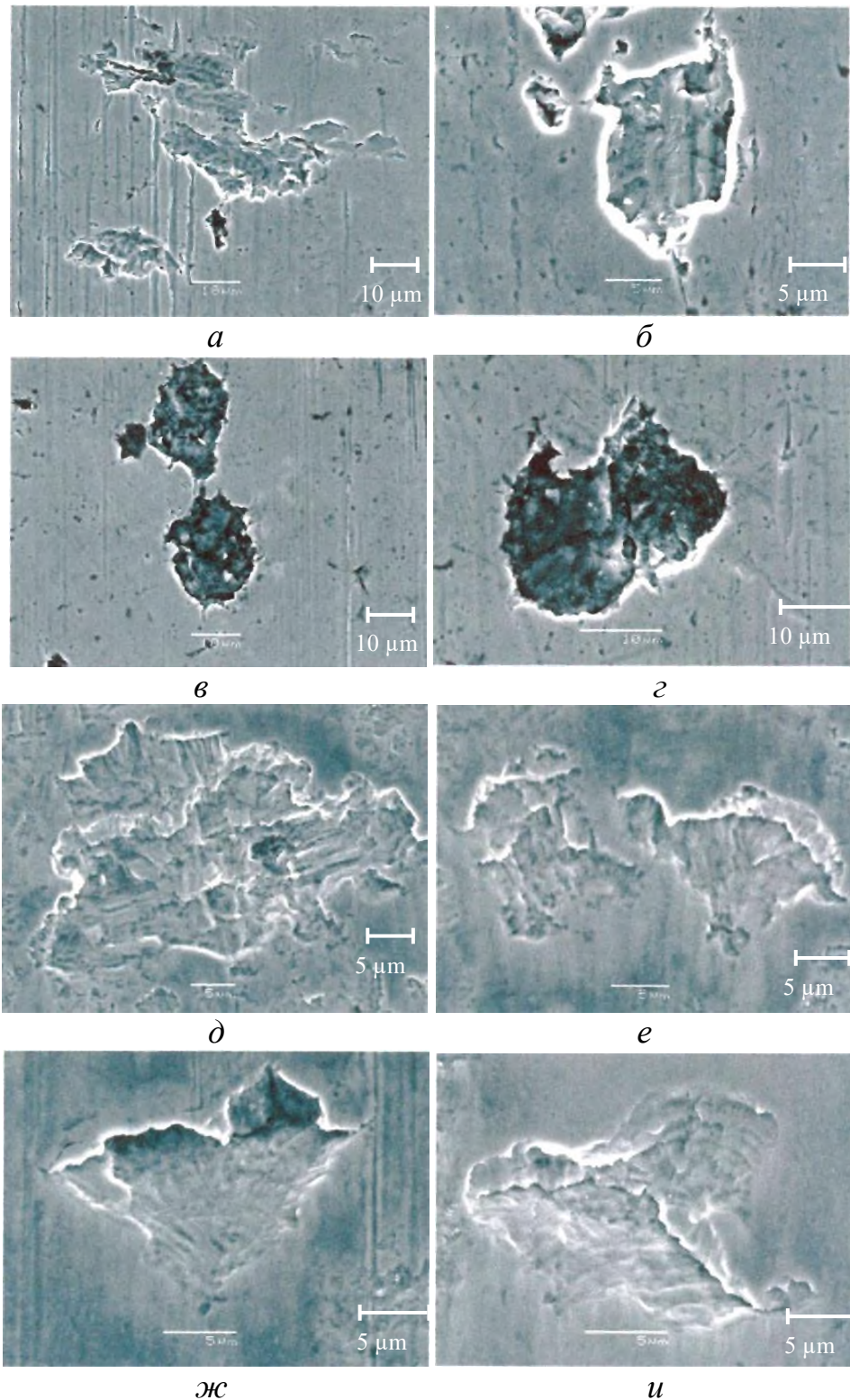


Рисунок 3.26 – Фрактографічні дослідження: *a* – зразок 6С ($\times 1500$); *б* – зразок 6С ($\times 3500$); *в* – зразок 10С ($\times 1500$); *г* – зразок 10С ($\times 2500$); *д* – зразок 1А ($\times 2700$); *е* – зразок 1А ($\times 3500$); *ж* – зразок 5А ($\times 4500$); *и* – зразок 5А ($\times 5000$)

Мікродослідженням поперечних шліфів (рис. 3.27, 3.28) встановлено, що глибина лунок від викришування становить:

– на цементованих зразках 6С та 10С фактично однакова і становить ≈ 5 мкм (рис. 3.27 *а, б*);

– на азотованих зразках 5А та 1А фактично однакова і становить $\approx 4...5$ мкм, одиничних лунок – до 8 мкм (рис. 3.28 *а, б, в*)

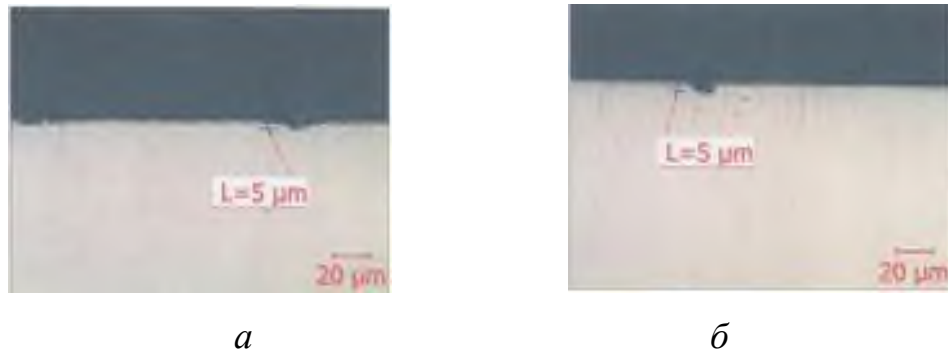


Рисунок 3.27 – Глибина лунок від викришування цементованих зразків:

а – ролик 6С; *б* – ролик 10С

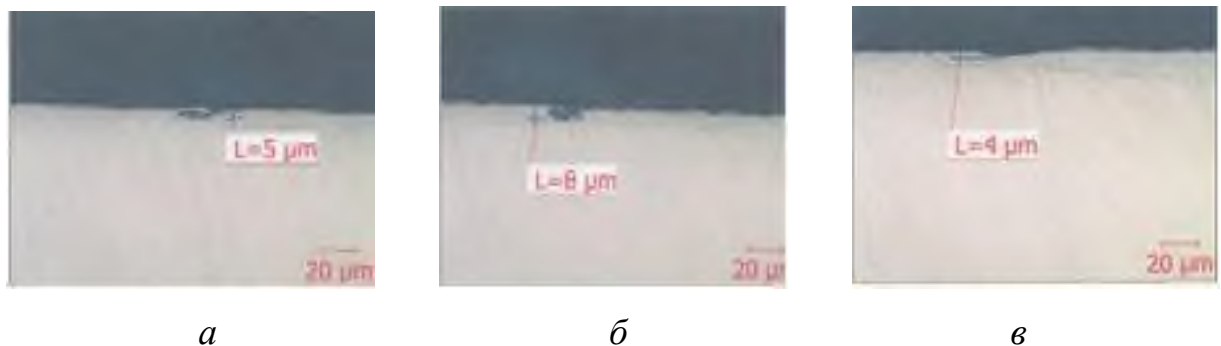


Рисунок 3.28 – Глибина лунок від викришування азотованих зразків:

а, б – ролик 1А; *в* – ролик 5А

Принциповою відмінністю є характер перехідного процесу по зміні моменту тертя після навантаження на початку чергового циклу роботи ТС (рис. 3.29).

– на азотованих ТС на кожному наступному циклі випробувань величина моменту тертя після навантаження встановлюється поступово протягом 10–12 хв. (рис. 3.29 *а, б*), тобто трибоспряження ніби знову припрацьовується;

– на цементованих зразках на кожному наступному циклі випробувань величина моменту тертя після навантаження встановлюється відразу (рис. 3.29 в, г).

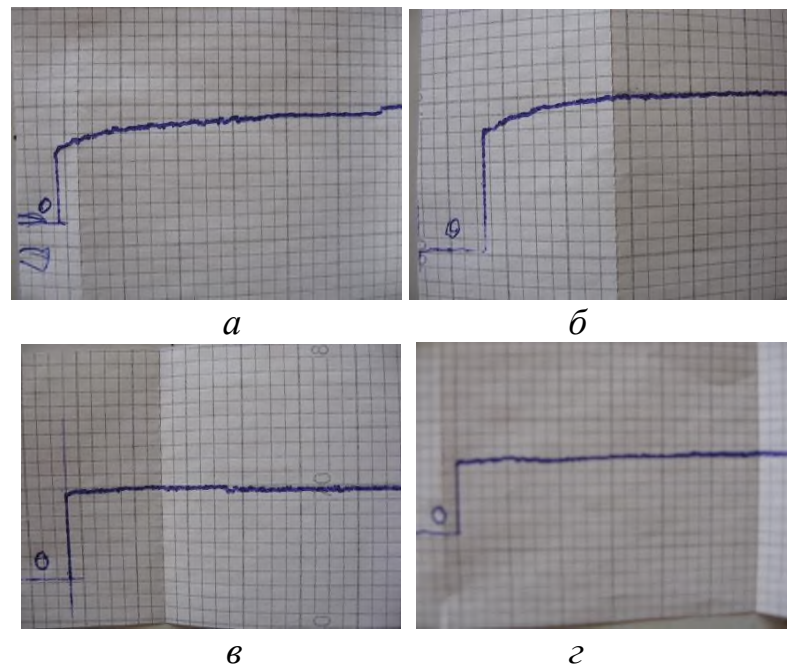


Рисунок 3.29 – Характер перехідного процесу по зміні моменту тертя після навантаження:

- а* – азотування AVINIT N перший цикл випробувань (8 год);
- б* – азотування AVINIT N четвертий цикл випробувань (32 год);
- в* – цементация перший цикл випробувань (8 год);
- г* – цементация четвертий цикл випробувань (32 г)

На робочих поверхнях всіх зразків є кільцеві риси:

- множинні – на цементованих зразках;
- одиночні на фоні сліду припрацювання – на азотованих зразках. У той же час на зразках проглядаються вихідні рельєфи попередньої механічної обробки, виконаної до азотування.

Металографічними дослідженнями після тривалих випробувань на утомну міцність встановлено, що рельєф прикатаних поверхонь, характерний для роботи з проковзуванням, супроводжується утворенням поверхневих рисок і заглиблень у вигляді точкових раковин.

Зазначені ушкодження є на всіх ділянках, задіяних у контакті.

Раковини являють собою сліди втомного відлущування і викришування: на поверхні донець раковин спостерігаються лінії

відпочинку, характерні для втомного руйнування (рис. 3.30). Характер змін сигналів АЕ наведено на рис. 3.31.

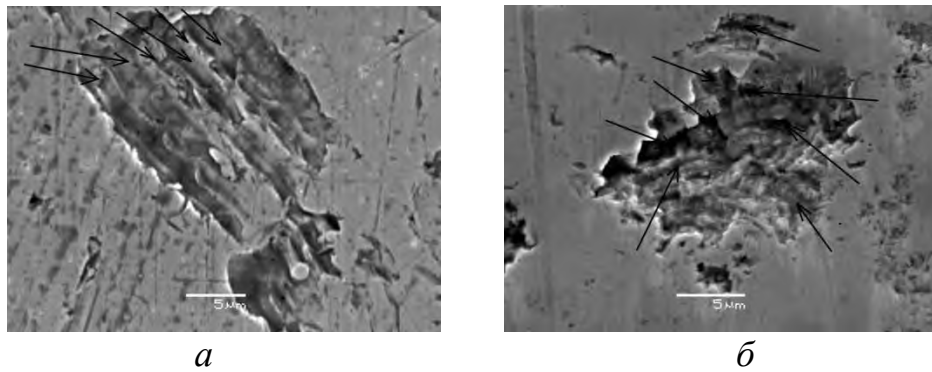


Рисунок 3.30 – Результати фрактографічного дослідження утомних раковин на поверхнях зразків: *a* – цементація; *б* – азотування

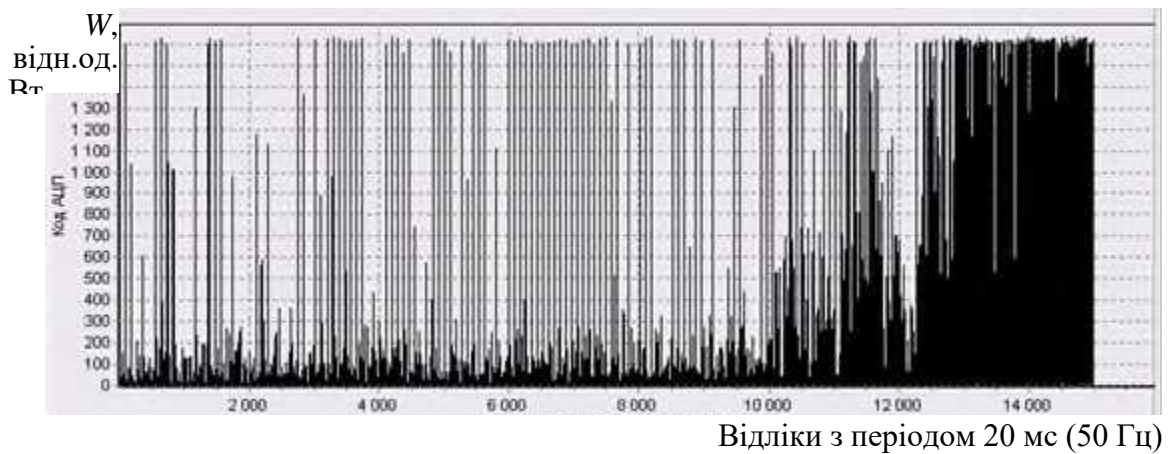


Рисунок 3.31 – Характер змін сигналів АЕ, характерних для утомного руйнування

Таким чином, результати довготривалих випробувань на базі 1 млн. циклів (кочення з 20 %-им проковзуванням з контактним навантаженням $\sigma_{\max} = 1\,140$ МПа, характерним для середньо- та високонавантажених агрегатів) підтвердили висновки, зроблені після порівняльних випробувань за розробленою в підрозділі 3.4 методикою прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності КМ підрозділ 3.6. Інтегральна багатоциклова стійкість до утомного зношування (руйнування) зразків, зміцнених азотуванням (іонно-плазмове азотування AVINIT N з глибиною шару

0,25 мм), в 10 разів вище, ніж у зразків, зміцнених цементациєю (з глибиною шару 1,2 мм) за показником вагового зносу.

На основі цих досліджень в подальшому можливе впровадження та використання іонно-плазмових технологій азотування замість цементування з метою збільшення контактної міцності поверхонь деталей, зважаючи на такі переваги азотування, як збереження розмірів та високої чистоти обробки поверхонь, внаслідок чого відпадає необхідність їх механічної доробки після зміцнення.

Підтвердивши перевагу іонно-плазмового азотування перед традиційною цементациєю, ці експерименти підтвердили обґрунтованість розробленої у підрозділі 3.4 методики прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності КМ.

3.8 Порівняльна оцінка технологічних методів цементациї та іонно-плазмового азотування шляхом випробувань на зносостійкість в умовах малоциклового зношування

В умовах довготривалих випробувань неможливо відрізнити малоцикловий знос (який відбувається за механізмом утворення та руйнування на поверхнях тертя вторинних структур) від багатоциклового утомного зносу (при якому дефекти накопичуються у великих об'ємах поверхневого шару). Тому цілком актуальним є завдання проведення таких експериментальних випробувань, коли багатоцикловий знос неможливий – для оцінки параметрів зносостійкості саме при малоцикловому зношенні. Для цього величина питомого навантаження в зоні контакту в експериментальних дослідженнях була знижена (у порівнянні з випробуваннями, проведеними у попередніх дослідженнях у підрозділах 3.6, 3.7) до $\sigma_{\max} \approx 500$ МПа. Абсолютне навантаження при цьому складало 1 500 Н. Змашування здійснювали авіаційним гасом ТС-1 шляхом занурення в нього нижнього зразка.

Експерименти, проведені на контактну втому при великих навантаженнях ($\sigma_{\max} \approx 1140$ МПа, багатоциклове втомне зношування) показали багатократну перевагу цього методу зміцнення поверхонь за параметром сумарного зносу (біля 10 разів) у підрозділах 3.6, 3.7.

Решта умов та параметрів випробувань відповідали випробуванням на зносостійкість за механізмом багатоциклової утомної міцності (розд. 2).

Триботехнічні характеристики оцінювались за показниками вагового зносу, коефіцієнта тертя і середньоповерхневої температури випробуваних зразків. Відсутність початкових пошкоджень втомного характеру оцінювались за показниками АЕ [96, 97, 106, 161].

Результати визначення триботехнічних параметрів досліджуваних трибосистем на початку та в кінці випробувань наведені в (табл. 3.15.) Триботехнічні параметри досліджуваних трибосистем визначали як середні арифметичні значення параметрів, що вимірюються за кожною групою однойменних зразків (по 5 пар зразків для кожного з видів зміцнення).

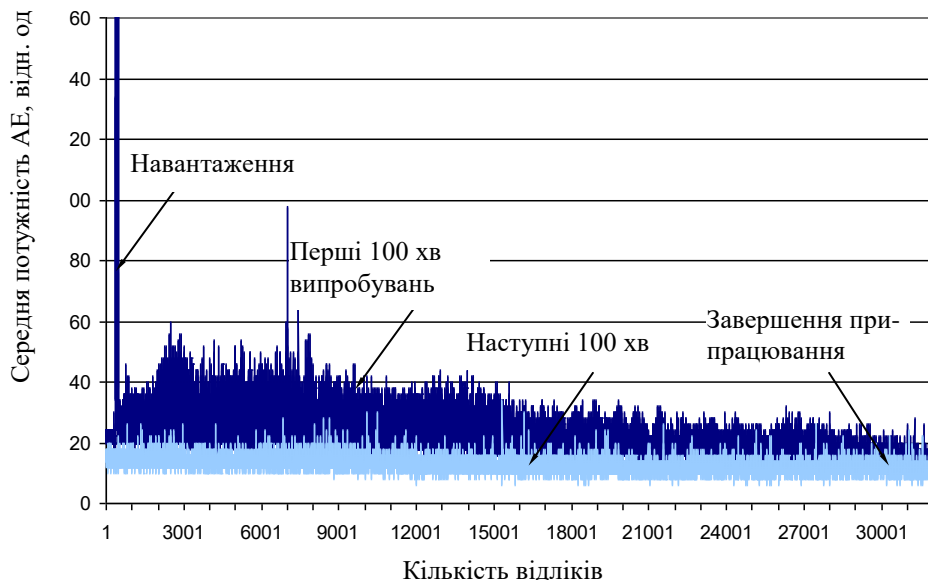
Таблиця 3.15. – Результати визначення триботехнічних параметрів при випробуваннях на зносостійкість в умовах малоциклового зношування

Зміцнення зразків	Коефіцієнт тертя / середньоповерхнева температура, °С		Ваговий знос зразків, г		Загальний знос
	На початку випробувань	В кінці випробувань	Ведучого	Веденого	
цементация	0,108/59	0,099/58	0,0020	0,0060	0,0080
AVINIT N	0,080/56	0,069/44	0,0008	0,0007	0,0015

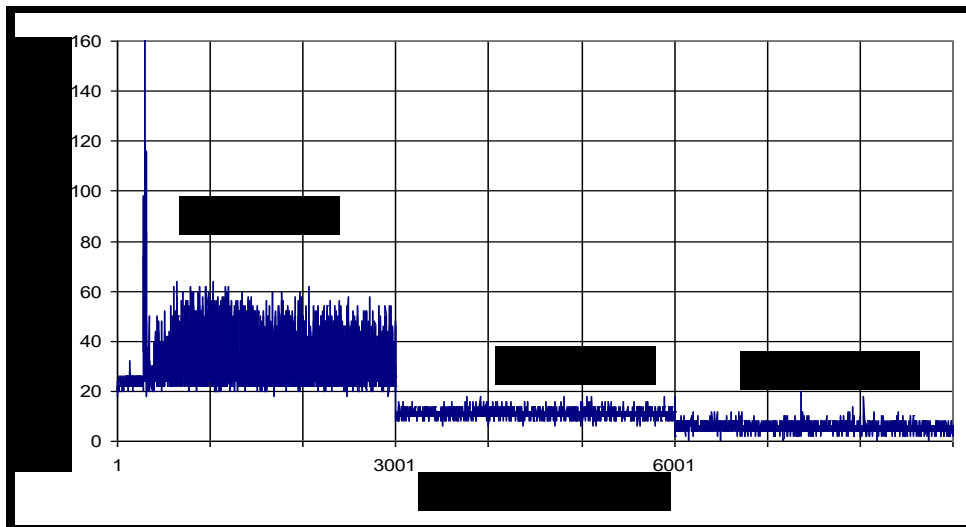
Результати аналізу акустико-емісійного випромінювання за весь період випробувань показав, що параметрами АЕ чітко реєструється період навантаження, припрацювання та усталеної роботи трибосистем (рис. 3.32, 3.33). Однак при роботі трибосистеми з азотуванням припрацювання відбувається зі збільшеною швидкістю зношування, що обумовлено вихідним станом поверхні тертя (шорсткістю) та їх мікропластичними характеристиками, дослідження яких буде наведено у наступному підрозділі.

Діаграми зміни параметра акустичної емісії для всіх трибосистем, що досліджуються, представлені для трьох ділянок (на початку випробувань,

середина випробувань, кінець випробувань). Для трибосистем з цементацією припрацювання має менш виражений характер, що також обумовлено початковим станом поверхні тертя (полірування).



a



б

Рисунок 3.32 – Діаграма зміни параметра усередненої потужності акустичної емісії (азотування) на різних етапах випробувань: *a* – на етапі припрацювання; *б* – за періодами випробувань

Різниця у здатності до припрацювання досліджуваних зразків пояснюється різницею вихідної шорсткості зразків з різними видами зміцнення (рис. 3.20, 3.21) внаслідок попередньої обробки.

Для всіх досліджуваних зразків сигнали акустичної емісії, які можна було б віднести до втомного багатоциклового пошкодження – не виявлено.

Аналіз результатів випробувань на зносостійкість підтвердив їх відповідність результатам, отриманим на основі аналізу акустично-емісійного випромінювання трибосистем. Величини зносів пар тертя, зміцнених за технологією AVINIT N вирівнюються та мають близькі показники, що підтверджує дані, одержані при аналізі акустичного випромінювання під час випробувань.

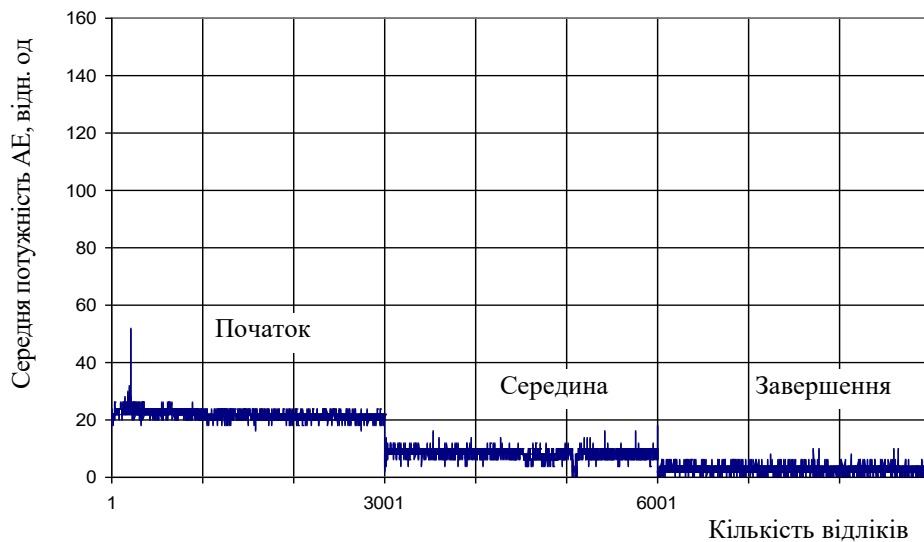
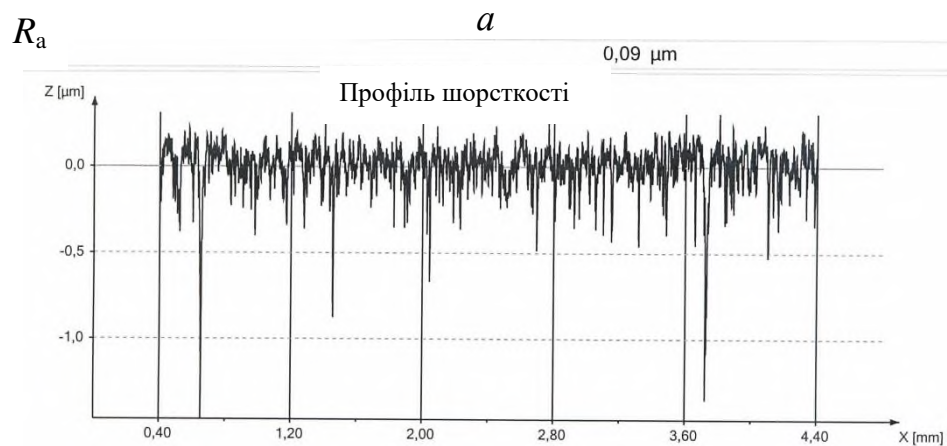
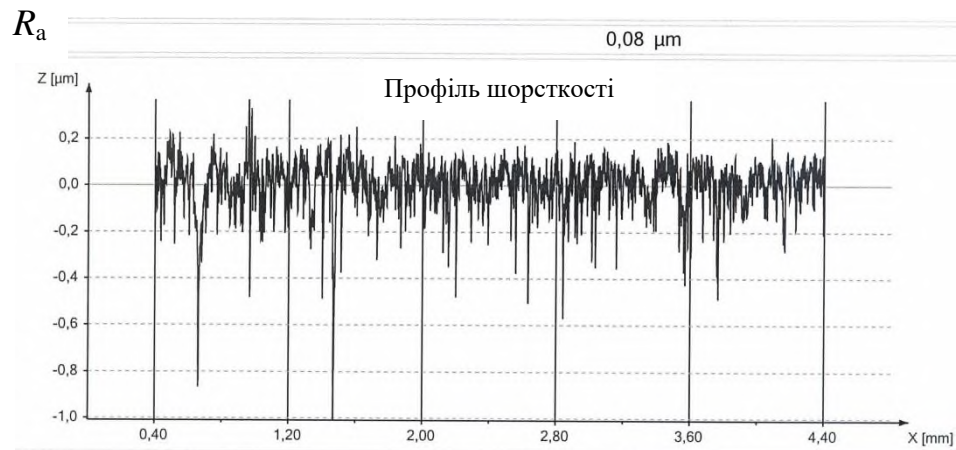


Рисунок 3.33 – Діаграма зміни параметра усередненої потужності АЕ (цементация) за періодами випробувань

Початкові пошкодження втомного характеру на всіх парах, що досліджуються, не виявлено.

На заключному етапі роботи зразків коефіцієнти тертя для пар, зміцнених азотуванням, на 30 % нижче за зразки, зміцнені цементацияю. Шорсткість зразків після випробувань практично вирівнюється (рис. 3.34). Тому зниження коефіцієнта тертя для азотування можна пояснити зміною фізико-механічних властивостей поверхневого шару (мікропластичністю).



б

Рисунок 3.34 – Профіль шорсткості ведених зразків, після випробувань:

a – зміцнених цементациєю ($R_a = 0,08$);

б – зміцнених азотуванням ($R_a = 0,09$)

Випробування на зносостійкість досліджуваних зразків показали, що втомне багатоциклове зношування (пітинг) за 8 годин випробувань на всіх досліджуваних парах тертя за показниками акустичної емісії не виявляється. Це обумовлено правильним підбором рівня контактних навантажень для матеріалів, які мають високі протипітингові властивості (цементация і азотування).

Аналіз діаграми зміни акустичної емісії показав, що зразок з азотуванням протягом 100 хвилин роботи при коченні з 20 % проковзуванням показує значну швидкість зношування на першому етапі (припрацювання), що зумовлено станом поверхневого шару, його значної шорсткості.

Трибосистема з цементациєю при тих же умовах випробувань не має чітко визначеного за часом припрацювання. Швидкість зношування плавно зменшується за весь період зношування (8 год).

Аналіз результатів визначення коефіцієнтів тертя свідчить про те, що коефіцієнти тертя зразків, зміцнених за технологією AVINIT N суттєво, (приблизно на 30 %) менші, ніж коефіцієнти тертя, одержані при випробуваннях зразків зміцнених цементациєю.

Зносостійкість зразків, зміцнених за технологією AVINIT N значно перевищує зносостійкість цементованих зразків (у 6 разів) (табл. 3.15), що можна пояснити високими мікропластичними характеристиками азотування. Підтвердження цього вимагало подальших мікроструктурних досліджень, які наведено далі.

За показниками акустичної емісії (рис. 3.32, 3.33) зносостійкість досліджуваних трибосистем при восьми годинах випробувань відрізняються незначно і розподіляються таким чином: цементовані зразки – рівень акустичної емісії 4...5 відн. од.; азотовані зразки – рівень акустичної емісії – 5...7 відн. од.

3.9 Мікроструктурні та фазові особливості поверхневих шарів, як фактор підвищення втомної міцності

Для встановлення фізичних механізмів високих показників зносостійкості та втомної міцності ТС, зміцнених іонно-плазмовим азотуванням, проводили комплексні мікроструктурні дослідження зразків, які піддавалися порівняльним випробуванням.

На обладнанні АТ “Мотор Січ” (м. Запоріжжя, Україна) було виконано комплексні мікроструктурні й фазові дослідження особливостей поверхневого шару пар зразків 6С/10С (зміцнених цементуванням) та 5А/1А (зміцнених іонно-плазмовим азотуванням).

Дослідження зовнішнього вигляду обкатаної поверхні, мікроструктурний стан матеріалу, а також мікротвердість за перерізом зміцненого шару визначали на кожному зразку у чотирьох зонах, (рис. 3.35).

Зони 1 – стан до випробувань (оскільки ці зони не були задіяні у контакт), зони 2, 3, 4 – після дії контактних навантажень різної величини, що обумовлено вигином верхнього та нижнього валів машини тертя СМТ 2070 від діючого навантаження.

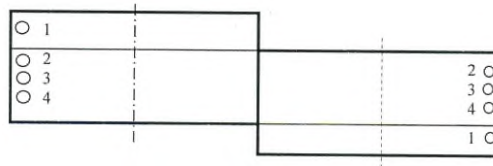


Рисунок 3.35 – Схема розташування досліджуваних зон у відповідності до взаємного розташування зразків у процесі випробувань

У результаті мікродосліджень було встановлено таке. Контактуючі поверхні зразків № 6С і № 10С цементовані у відповідності з умовами виготовлення. Фактична глибина цементованого шару становить $\approx 1,2$ мм (рис. 3.36, а, 3.37, а).

Результати визначення мікротвердості і ефективна глибина шару, що відповідає мікротвердості 500 HV для цементації наведені в (табл. 3.16.)

Таблиця 3.16 – Мікротвердість по перерізу цементованого шару на зразках № 6С і № 10С.

№№	Відстань від поверхні, мм													Еф. глиб., мм
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	
Мікротвердість, HV (HRN15)														
№ 6С:														
1	679	730	731	727	710	697	681	667	652	637	598	528	506	~1,3
2	696	705	689	678	652	628	605	585	581	550	529	510	486	~1,25
3	703	670	657	649	621	597	587	562	554	522	505	486	478	~1,1
4	699	665	635	630	622	611	587	560	544	529	524	510	474	~1,25
№ 10С:														
1	731	725	714	702	666	662	637	609	585	556	543	537	501	~1,3
2	731	716	736	739	694	664	660	637	623	591	558	544	506	~1,3
3	731	743	727	710	670	657	628	598	585	558	544	535	506	~1,3
4	705	745	716	688	657	649	616	593	579	562	541	537	475	~1,25

Мікротвердість по перерізу азотованого шару наведено у табл. 3.17.

Таблиця 3.17 – Мікротвердість по перерізу азотованого шару на зразках № 1А і № 5А

Номер зразка	Відстань від поверхні, мм				Еф. глиб., мм (500HV)
	0,05	0,1	0,15	0,2	
Мікротвердість, HV (HRN15)					
№1А:					
1	972	831	741	379	~0,155
2	1024	876	754	388	~0,155
3	977	892	793	388	~0,155
4	965	783	749	352	~0,155
№5А:					
1	932	800	734	420	~0,155
2	918	788	718	374	~0,155
3	930	829	777	421	~0,155
4	927	813	750	420	~0,155

Мікроструктура цементованого шару на зразках являє собою мартенсит і карбіди: з поверхні до глибини $\approx 0,18$ мм – карбіди більш крупні, округлої і стовбчатої форми, недопустимі за Шкалою мікроструктур, далі за перерізом шару карбіди дрібнодисперсні, що відповідає 8-му, допустимому балу за шкалою мікроструктур (рис. 3.36, а, 3.37, б). Структурних відмінностей за шириною робочої поверхні зразків в зонах контакту № 1...№ 4 (рис. 3.35) не відмічено.

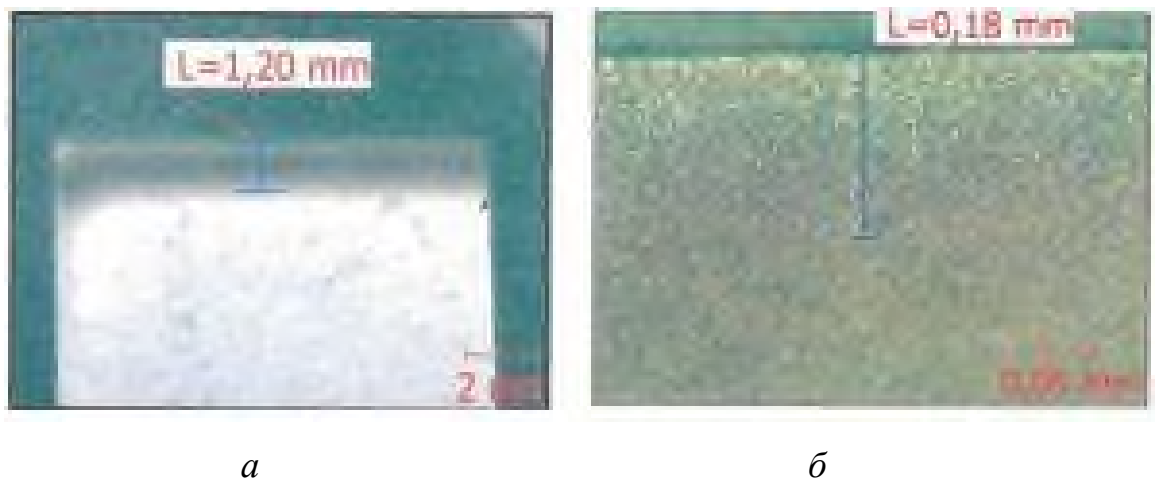


Рисунок 3.36 – Мікроструктура цементованого шару

а – ($\times 6,5$) і серцевини зразка б – ($\times 500$) 6С

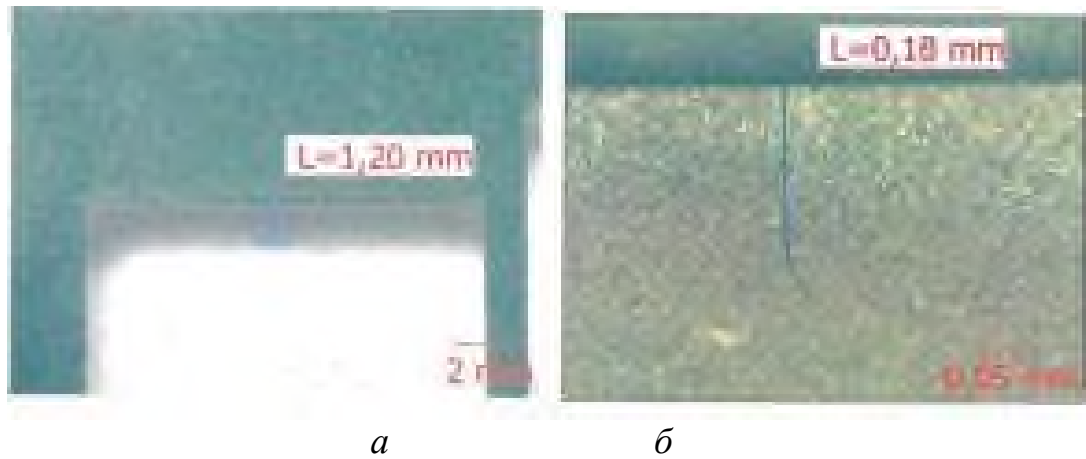


Рисунок 3.37 – Мікроструктура цементованого шару *a* – ($\times 6,5$) і серцевини зразку *б* – ($\times 500$) 10С

Мікроструктура серцевини – маловуглецевий мартенсит, відповідає сталі 20Х3МВФ, термообробленій на вказану твердість. Контактуючі поверхні зразків № 1А і № 5А азотовані. Фактична глибина азотованого шару становить $\approx 0,25 \text{ mm}$ (рис. 3.38, *a*, 3.39, *a*).

Мікроструктура азотованого шару на зразках ідентична. В поверхневому шарі виявляється фаза товщиною $\approx 0,01 \text{ mm}$, далі по перерізу мікроструктура азотованого шару має вигляд, характерний для азотистого мартенситу відпуску з тонкими надлишковими нітридами (рис. 3.38, *б*, 3.39, *б*). Мікроструктура серцевини – мартенсит відпуску, відповідає сталі 20Х3МВФ, термообробленій на вказану твердість.

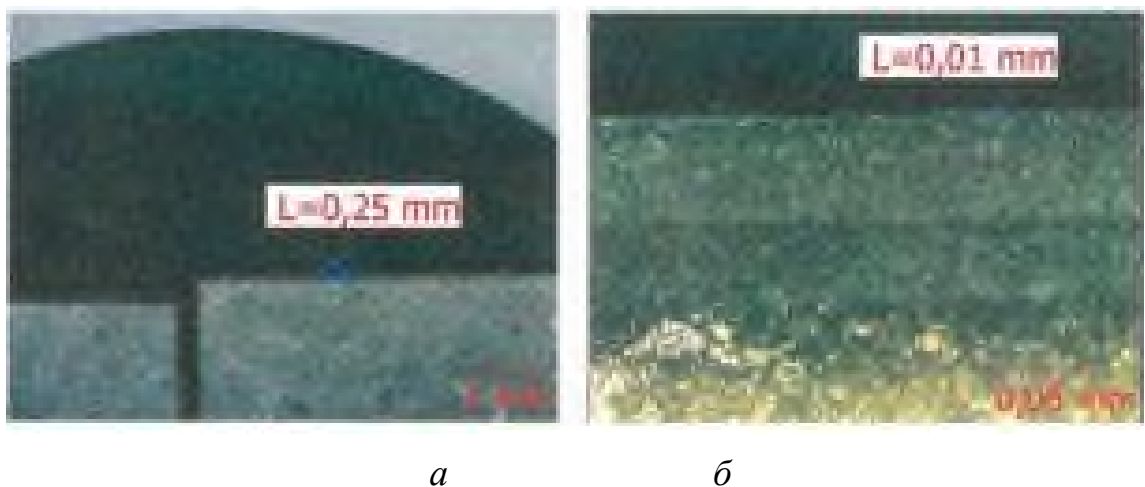


Рисунок 3.38 – Мікроструктура азотованого шару *a* – ($\times 6,5$) і серцевини зразку *б* – ($\times 500$) 1А

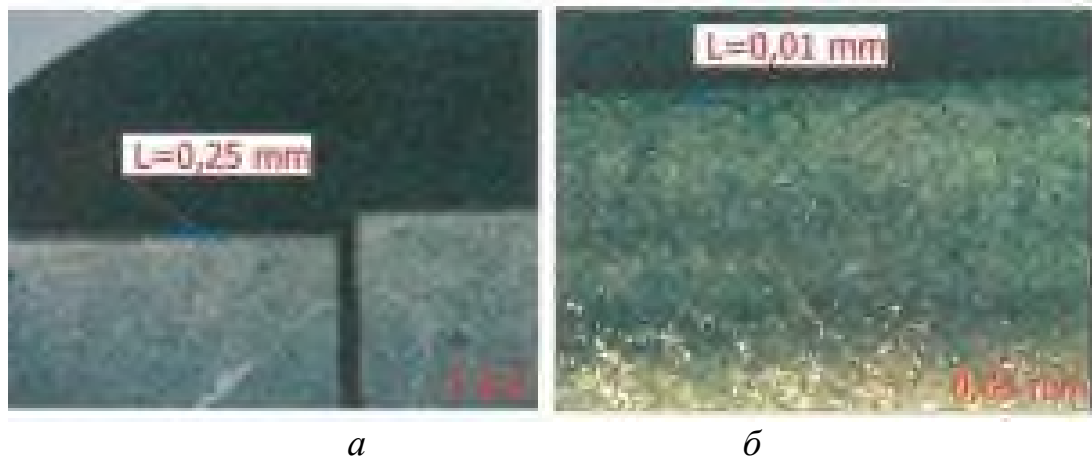


Рисунок 3.39 – Мікроструктура азотованого шару *a* – ($\times 6,5$) і серцевини зразку *б* – ($\times 500$) 5А

Для ідентифікації фазового складу поверхневого шару азотованих зразків було виконано рентгеноструктурні дослідження. Методика їх виконання та обладнання описані у підрозділі 3.3.

На дифрактограмі зразка сталі 20Х3МВФ з видаленим азотованим шаром (рис. 3.40) виявляються вузькі лінії α -Fe з ОЦК структурою (з об'ємноцентрованою кубічною решіткою) і параметром кристалічної решітки 0,287 нм. Лінії карбиду не виявляються. Співвідношення інтенсивності ліній наближене до табличних значень, що свідчить про відсутність текстури.

На дифрактограмі зразка № 5А (рис. 3.41) лінії α -Fe суттєво ослаблені і виявляються лінії нітридів γ -Fe₄N, найбільш інтенсивними з яких є (110), (200), (211), що відповідає табличним даним.

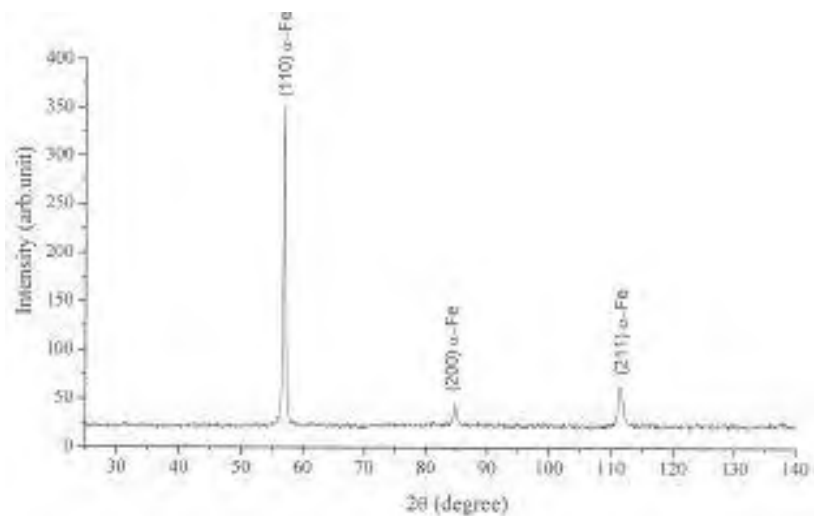


Рисунок 3.40 – Дифрактограма зразку зі сталі 20Х3МВФ з видаленим азотованим шаром

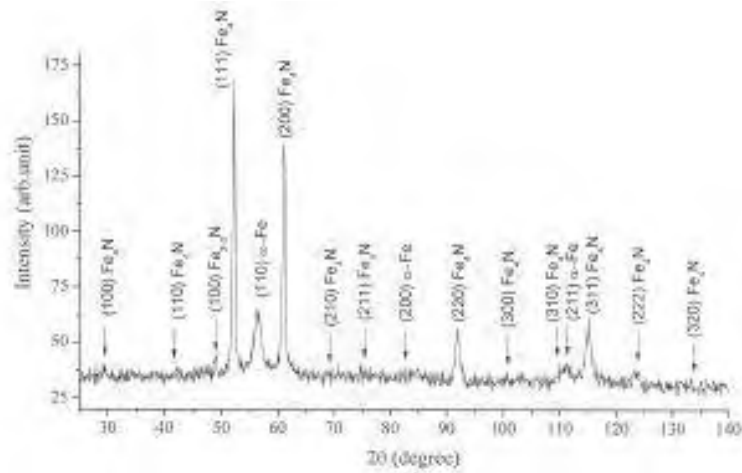


Рисунок 3.41 – Дифрактограма поверхні азотованого зразку 5А зі сталі 20Х3МВФ

При цьому лінії фази α -Fe зсуваються у бік менших кутів, що свідчить про збільшення періоду решітки до 0,290 нм, пов'язаного з утворенням твердого розчину азоту в решітці фериту (азотистий ферит). Фаза γ -Fe₄N має ГЦК решітку (гранецентровану кубічну). Атоми заліза розташовані так же, як в структурі аустеніту (γ -Fe), а атоми азоту – у міжвузлях. Параметр решітки цієї фази в азотованому шарі 0,382 нм.

Таким чином, основною фазою, яка утворюється в поверхневому шарі сталі 20Х3МВФ при обраних умовах азотування, є фаза γ -Fe₄N, завтовшки не більше 5 мкм.

Отримані результати мікротвердості свідчать про те, що ефективна глибина зміцненого шару, яка відповідає мікротвердості 500 НВ, на цементованих та на азотованих зразках близька за значеннями величині шару, визначеного мікроструктурним способом.

Помітної різниці у величині ефективної глибини шару у зонах контакту № 1...№ 4 (рис. 3.35) не визначено.

Таким чином, за результатами мікроструктурних досліджень визначено, що мікроструктура азотованого шару має вигляд, характерний для азотистого мартенситу відпуску з тонкими надлишковими нітридами. При цьому спостерігається збільшення періоду решітки до 0,290 нм, що

зумовлено утворенням твердого розчину азоту в решітці фериту. Наявність фази $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ має ГЦК решітку, яка забезпечує мікропластичні характеристики певного покриття, напряду пов'язані з підвищенням утомної міцності.

Отримані результати мікротвердості свідчать про те, що ефективна глибина зміцненого шару, яка відповідає мікротвердості 500 HV, близька за значенням до величини шару, який встановлювався міроструктурним способом, та для азотованого шару становить 0,155 мм, а для цементованих зразків на порядок вище: 1,25...1,30 мм. Цей висновок дає розуміння того, що, при меншій товщині зміцненого шару, азотування забезпечує кращий показник утомної міцності у порівнянні з цементациєю.

Таким чином, проведені поглиблені фрактографічні, мікроструктурні і фазові дослідження особливостей поверхневого шару сталевих зразків, зміцнених традиційною цементациєю та новим іонно-плазмовим азотуванням AVINIT N, виявили причини значної переваги іонно-плазмового азотування перед цементуванням за показником втомної міцності. Це дає цілком обґрунтовану основу для впровадження такої перспективної технології зміцнення для збільшення зносостійкості високонавантажених деталей агрегатів авіаційної та іншої техніки, які працюють в умовах тертя кочення з проковзуванням.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3

Експериментальні дослідження повністю підтверджують положення, сформульовані у теоретичних дослідженнях (розд. 2).

1. Виконано вибір матеріалів та робочого середовища, кінематичних схем контакту для проведення досліджень, моделюючих роботу реальних трибосистем у агрегатобудуванні. Визначено основні напрямки та методи дослідження. Обґрунтовано комплексні метало-фізичні дослідження для розкриття переваг іонно-плазмового азотування перед цементациєю при проведенні комплексних досліджень.

2. Розроблено методику прискореної оцінки показників утомної міцності поверхневих шарів конструкційних матеріалів, яка істотним чином зменшує час експертної оцінки при проведенні порівняльних випробувань різних конструкційних матеріалів чи порівняння різних видів їх модифікації.

3. Виконано статистичну оцінку середньої глибини утомних пошкоджень за результатами довготривалих випробувань.

4. Аналіз результатів прискорених випробувань і подальших досліджень зразків підтверджують правомірність підходів до проведення таких випробувань. Цей аналіз показує, що при питомому контактному навантаженні $\sigma = 1\ 140$ МПа на робочих поверхнях всіх випробуваних зразків утворилися початкові осередки втомного викришування.

Метод АЕ довів високу ефективність реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального механохімічного зношування до початкового втомного руйнування.

Таким чином, запропонована методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів істотним чином зменшує час експертної оцінки. Момент початкових явищ втомного зношування для двох варіантів зміцнення сталі 20Х3МВФ – цементация та іонно-плазмове азотування – наставав, відповідно, після 59 000 циклів та 97 500 циклів взаємодії. При цьому стандартні довготривалі випробування повинні проводитися протягом часу, який дорівнює 106 циклів взаємодії. Тобто запропонована методика дає можливість дозволити скоротити попередні оціночні випробування матеріалів чи методів їх зміцнення до 10 разів.

Вона може бути використана при розробці нових конструкційних матеріалів та способів їх зміцнення.

5. Результати довготривалих випробувань на базі 1 млн циклів (кочення з 20 %-им проковзуванням з контактним навантаженням $\sigma_{\max} = 1\ 140$ МПа, характерним для середньо- та високонавантажених поверхонь) підтвердили висновки, зроблені після порівняльних випробувань за розробленою

методикою (підрозд. 3.4) прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності КМ. Інтегральна багатоциклова стійкість до утомного зношування (руйнування) зразків, зміцнених азотуванням (іонно-плазмове азотування AVINIT N з глибиною шару 0,25 мм), у 10 разів вище, ніж у зразків, зміцнених цементацією (з глибиною шару 1,2 мм).

На основі цих досліджень в подальшому можливе впровадження та використання іонно-плазмових технологій азотування замість цементування з метою збільшення контактної міцності поверхонь деталей, зважаючи на такі переваги азотування, як збереження розмірів та високої чистоти обробки поверхонь, внаслідок чого відпадає необхідність їх механічної доробки після зміцнення.

Продемонструвавши перевагу іонно-плазмового азотування перед традиційною цементацією, ці експерименти підтвердили обґрунтованість розробленої методики прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності КМ.

6. Випробування на зносостійкість досліджуваних трибосистем показали, що втомне багатоциклове зношування (пітинг) за 8 годин випробувань на всіх досліджуваних парах тертя за показниками акустичної емісії не виявляється. Це обумовлено правильним підбором рівня контактних навантажень для матеріалів, які мають високі протипітингові властивості (цементация і азотування).

Аналіз діаграми зміни акустичної емісії показав, що трибосистема з азотуванням протягом 100 хвилин роботи при коченні з 20 % проковзуванням має значну швидкість зношування на першому етапі (припрацювання), що зумовлено станом поверхневого шару, його значної шорсткості.

Трибосистема з цементацією при тих же умовах випробувань не має чітко визначеного за часом припрацювання. Швидкість зношування плавно зменшується за весь період зношування (8 год).

За показниками акустичної емісії зносостійкість досліджуваних трибосистем при восьми годинах випробувань розрізняються незначно і розподіляються таким чином: цементовані зразки – рівень акустичної емісії 4...5 відн. од.; азотовані зразки – рівень акустичної емісії 5...7 відн. од.

Аналіз результатів визначення коефіцієнтів тертя свідчить про те, що коефіцієнти тертя зразків, зміцнених за технологією AVINIT N суттєво (приблизно на 30 %) менші, ніж коефіцієнти тертя, одержані при випробуваннях зразків зміцнених цементациєю.

Зносостійкість зразків, зміцнених за технологією AVINIT N значно перевищує зносостійкість цементованих зразків (у 6 разів).

7. Проведені поглибленні фрактографічні, мікроструктурні і фазові дослідження особливостей поверхневого шару сталевих зразків, зміцнених традиційною цементациєю та новим іонно-плазмовим азотуванням AVINIT N, виявили причини значної переваги іонно-плазмового азотування перед цементуванням за показником утомної міцності.

За результатами мікроструктурних досліджень визначено, що мікроструктура азотованого шару має вигляд, характерний для азотистого мартенситу відпуску з тонкими надлишковими нітридами. При цьому спостерігається збільшення періоду решітки до 0,290 нм, що зумовлено з утворенням твердого розчину азоту в решітці фериту. Наявність фази $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ має ГЦК решітку, яка забезпечує мікропластичні характеристики певного покриття, напряму пов'язаного з підвищенням утомної міцності. Таким чином, основною фазою, яка утворюється в поверхневому шарі сталі 20Х3МВФ при обраних умовах азотування, є фаза $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$, завтовшки не більше 5 мкм.

Отримані результати мікротвердості свідчать про те, що ефективна глибина зміцненого шару, яка відповідає мікротвердості 500 HV, близька за значеннями до величини шару, який встановлювався мікроструктурним

способом, та для азотованого шару становить 0,155 мм, а для цементованих зразків 1,25...1,30 мм, що на порядок вище. Цей висновок дає розуміння того, що, при меншій товщині зміцненого шару, азотування забезпечує кращий показник утомної міцності у порівнянні з цементациєю.

Це дає цілком обґрунтовані підстави для впровадження такої перспективної технології зміцнення для збільшення зносостійкості високонавантажених деталей агрегатів авіаційної та іншої техніки, які працюють в умовах тертя кочення з проковзуванням.

Розділ 4

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ КОРОБОК ПРИВОДІВ ТА ШЕСТЕРЕННИХ НАСОСІВ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ

Проведений у попередніх розділах аналіз теоретичних, експериментальних та металографічних досліджень показав, що запропонована в роботі методика прискореної оцінки втомної зносостійкості матеріалів є достовірною та може бути застосована на етапі проектування агрегатів авіаційної паливної системи з підвищеним ресурсом. Методика надасть можливість значно (*до 20 разів*) скоротити час та витрати на експериментальні ресурсні дослідження на етапі концептуального проектування.

Крім того, результати досліджень підтвердили очікувані переваги іонно-плазмового азотування перед традиційною цементацією для пар тертя, що моделюють зубчасті передачі. Це дає можливість рекомендувати азотування для збільшення ресурсу агрегатів повітряних суден з такими парами тертя.

За результатами виконаних досліджень визначено, що їх впровадження на етапі експлуатації зумовлює скорочення часу на обслуговування ПС, підвищує їх надійність та безпеку польотів. Крім того, приводить до скорочення часу на розробку та проектування нових агрегатів АТ на етапі проектування чи модернізації.

Аналіз результатів прискорених випробувань і подальших досліджень зразків підтверджує правомірність підходів до проведення таких випробувань. Цей аналіз показує, що при питомому контактному навантаженні $\sigma = 1\ 140$ МПа на робочих поверхнях всіх випробуваних зразків утворилися початкові осередки втомного викришування.

Метод АЕ довів високу ефективність реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального механохімічного зношування до початкового втомного руйнування.

Запропонована методика прискорених випробувань для визначення показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів істотним чином зменшує час експертної оцінки. Момент початкових явищ утомного зношування для двох варіантів зміцнення сталі 20Х3МВФ – цементація та іонно-плазмове азотування наставав, відповідно, після 59 000 циклів та 97 500 циклів взаємодії. При цьому стандартні довготривалі випробування повинні проводитися протягом часу, який дорівнює 10^6 циклам взаємодії. Тобто запропонована методика може дозволити скоротити попередні оціночні випробування матеріалів до 10 разів.

Вона може бути використана при розробці нових конструкційних матеріалів та способів їх зміцнення. Запропонована методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів також істотним чином зменшує час експертної оцінки. Вона може бути використана при розробці нових конструкційних матеріалів та способів їх зміцнення.

При цьому на етапі концептуального проектування при проведенні попередніх оціночних випробувань, застосовуючи імпульсне навантаження до максимально можливих величин та реєструючи момент початку переходу зношування до втомного механізму, можна робити висновки про перевагу певного матеріалу чи методу зміцнення.

Результати довготривалих випробувань на базі 1 млн. циклів (кочення з 20 %-м проковзуванням з контактним навантаженням $\sigma_{\max} = 1\,140$ МПа, характерним для середньо- та високонавантажених поверхонь) підтвердили висновки, зроблені після порівняльних випробувань за розробленою (п.п. 3.4) методикою прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності КМ. Інтегральна багатоциклова стійкість до утомного зношування (руйнування)

зразків, зміцнених азотуванням (іонно-плазмове азотування AVINIT N з глибиною шару 0,25 мм), у 10 разів вище, ніж у зразків, зміцнених цементациєю (з глибиною шару 1,2 мм).

На основі цих досліджень в подальшому можливе впровадження та використання іонно-плазмових технологій азотування замість цементування з метою збільшення контактної міцності поверхонь деталей, приймаючи до уваги також такі переваги азотування, як збереження розмірів та високої чистоти обробки поверхонь, внаслідок чого відпадає необхідність їх механічної доробки після зміцнення.

Підтвердивши перевагу іонно-плазмового азотування перед традиційною цементациєю, ці експерименти засвідчили обґрунтованість розробленої методики прискореної оцінки показників утомної пошкоджуваності КМ.

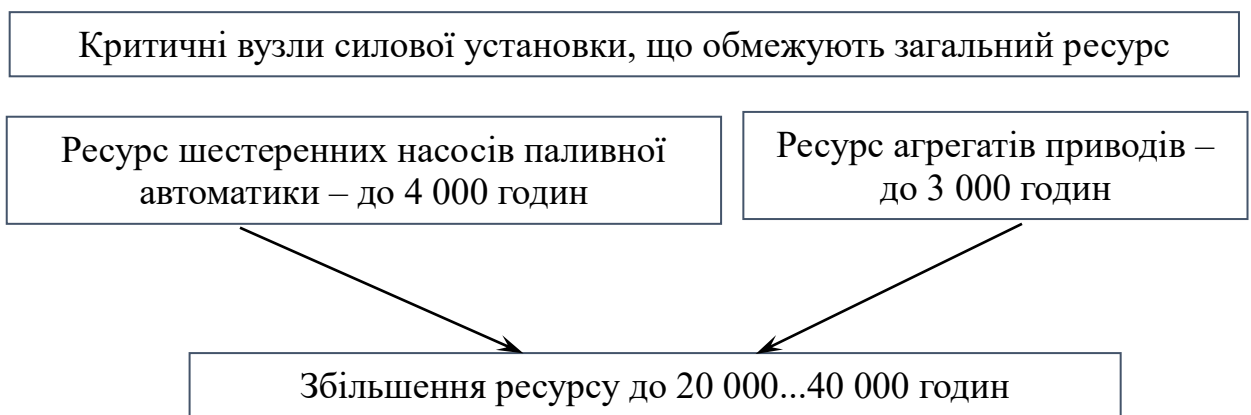
Випробування на зносостійкість досліджуваних трибосистем показали, що втомне багатоциклове зношування (пітинг) за 8 годин випробувань на всіх досліджуваних парах тертя за показниками акустичної емісії не виявляється. Це обумовлено правильним підбором рівня контактних навантажень для матеріалів, які мають високі протипітингові властивості (цементация і азотування).

Зносостійкість зразків, зміцнених за технологією AVINIT N значно перевищує зносостійкість цементованих зразків (у 6 разів).

Визначення переваг азотування перед традиційною цементациєю дозволяє рекомендувати цей спосіб зміцнення для очікуваного збільшення ресурсу шестеренних насосів та коробок приводів у 2...10 разів (початок настання втомного зношування: в 1,92 рази; довготривалі випробування – ваговий знос за 32 години: у 10 разів краще; випробування на малоцикловий знос: ваговий знос за 8 годин у 5,3 рази).

Виготовлення шестеренних коліс нових насосів-регуляторів та коробок приводів для літаків сімейства Ан-148 зумовлює до збільшення їх ресурсу до 6-10 разів. Таким чином ці агрегати можуть досягти показників ресурсу самих двигунів та майже виключити ремонт та обслуговування силових установок цих літаків до вичерпання ресурсу двигуна.

Ці результати дозволяють дати певні практичні рекомендації як для етапу експлуатації (рис. 4.1), так і для етапу проектування (рис. 4.2) авіаційної техніки з визначеними деталями.



Паливний насос-регулятор шестеренного типу НР-3000

Рисунок 4.1 – Практичні рекомендації з підвищення ресурсу шестеренних насосів та коробок приводів на етапі експлуатації

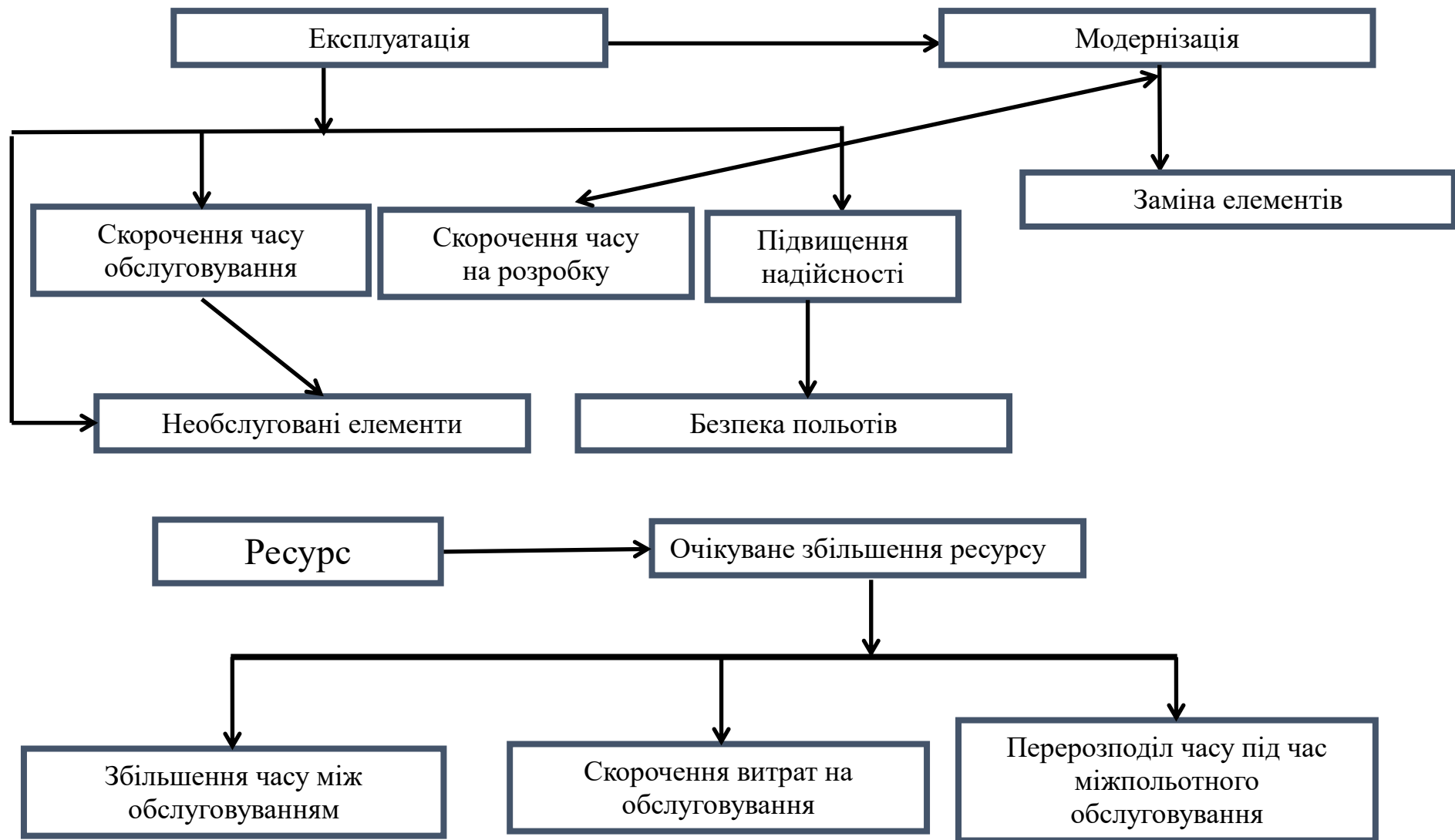


Рисунок 4.2 – Практичні рекомендації з підвищення ресурсу шестеренних насосів та коробок приводів на етапі проєктування

Під час експлуатації вже існуючого парку повітряних суден, може виникати необхідність у проведенні модернізації певних агрегатів для збільшення їх ресурсу. За результатами запропонованої роботи можливе істотне скорочення часу на розробку модернізованих вузлів шляхом застосування розробленої методики прискорених досліджень на контактну утомну міцність. Нові, модернізовані таким чином агрегати, маючи більший ресурс, забезпечать зменшення часу на обслуговування ПС та збільшення часу між обслуговуваннями, а також скорочення витрат на нього. Також це зумовить перерозподіл часу міжпольотного обслуговування і підвищення надійності ПС в цілому, що дає підвищення безпеки польотів.

На етапі експлуатації були підтверджені переваги, отримані за рекомендаціями цієї роботи розглянутих агрегатів. Критичними вузлами силової установки на основі двигунів Д-436-148 літаків сімейства Ан-14Х, які обмежують її загальний ресурс є шестеренні насоси паливної автоматики та коробок двигунових приводів. Їх ресурс при традиційному зміцненні цементацією становив 3 000-4 000 годин, тоді як двигуни Д-436-148 мають ресурс 20 000 годин. Результати даних досліджень дають змогу вирівняти ресурс шестеренних насосів та коробок приводів до загального ресурсу двигуна.

Наведені практичні рекомендації впроваджено АТ “ФЕД” (м. Харків, Україна), що підтверджено відповідним актом, наведеним у додатку В.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове-практичне завдання для машинобудівної галузі взагалі та для авіабудування зокрема щодо збільшення ресурсу паливного насоса регулятора паливної системи літака на основі впровадження розробленої методики прискорених випробувань зміцненої поверхні шестерен, що при обранні методу зміцнення поверхні конструкційного матеріалу на етапі концептуального проектування дозволяє скоротити час на випробування, а тому і на розробку взагалі.

При виконанні роботи отримані такі наукові результати.

1. Встановлено, що серед авіаційних агрегатів сучасних повітряних суден найбільш поширеними є зубчасті передачі, і тому їх безвідмовність та довготривалий ресурс є визначальними чинниками надійності роботи агрегатів.

2. Визначено енергетичний критерій для прискореної оцінки утомної міцності матеріалів при контактній взаємодії, а саме використання питомої енергії руйнування поверхні за один цикл навантаження $E_{\text{пит}}$.

3. Розроблено методику прискорених досліджень на контактну утомну міцність, яка передбачає випробування імпульсним навантаженням, величина якого становить 0,95 навантаження руйнування.

4. Встановлено, що утомне зношування зразків характеризує інтегральна багатоциклова стійкість, яка є сукупністю властивостей матеріалу, що складають опір зношуванню.

5. Встановлено зв'язок між мікроструктурою поверхні після азотування та її втомною міцністю.

Результати дисертаційних досліджень послужили основою для проведення дослідних робіт з використанням плазмових технологій азотування замість традиційної технології цементування для підвищення контактної міцності поверхонь деталей високонавантажених агрегатів трансмісій та насосів-регуляторів шестеренного типу паливних систем

повітряних суден, які проводилися у АТ “ФЕД” (акт впровадження від 25.10.19).

Аналіз застосування іонно-плазмової модифікації поверхневого шару як фактора підвищення ресурсних показників деталей повітряних суден, що працюють в умовах високих контактних навантажень, дозволив прогнозувати підвищення ресурсних показників шестеренних насосів паливної автоматики до, як мінімум 8 000 годин, а агрегатів приводів – 6 000 годин, двигунів серії Д436-148 для літаків сімейства Ан-148/158/178. Крім того, завдяки збільшенню ресурсних показників зменшаться експлуатаційні витрати шляхом зменшення кількості знімачів та встановлень відповідного обладнання.

Розроблена методика прискорених випробувань на зносостійкість імпульсними навантаженнями має універсальний характер та може бути корисною для визначення найкращої технології зміцнення поверхневого шару інших елементів, що працюють в аналогічних умовах.

В роботі, процес дослідження економії часу фактично не вимірювалася, але прогнозовано економія часу що до випробувань становить до 50%. Завдання хронометражу відноситься до вимірювання часових витрат на виконання відповідних операцій та може бути відносене до економічного обґрунтування застосування цієї методики, або до технології машинобудування, що виходить за межі здійсненого дослідження.

Таким чином, поставлені завдання дослідження вирішені, мета роботи досягнута.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Татаркіна І. С. Підвищення експлуатаційних властивостей ресурсовизначальних деталей та технологічних характеристик матеріалу модифікуванням поверхні, включаючи наноструктурування : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. Харків, 2015. 143 с.
2. 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. 184 с.
3. The method of ion-plasma precision nitriding of the surfaces of metal products, Patent 2555692, Russian Federation, C23C8/36 (H01J 37/00), C23C14/48, stated 27.12.2014; publ. 10.07.2015, Bull. No. 19, 13 p.
4. Беркович И. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения : учеб. для ВУЗов / под ред Д. Г. Громаковского . Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2000. 268 с.
5. Кравец І. А., Щепетов В. В., Максимов С. Л., Гладкий Я. Н. Энергетика бессервисных систем. *Проблемы трибологии*. 2002. №2. С. 12-14.
6. Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В., Моисеенко Д. Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел. *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 62–69.
7. Panin V. E., Grinyaev Yu. V., Panin A. V., Panin S. V. Multilevel wave model of a deformed solid in physical mesomechanics // Proceedings of the Sixth International Conference for Mesomechanics. *Multiscale in Applied Science and Emerging Technology. Fundamentals and Applications in Mesomechanics*. 2004. P. 335–342.
8. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Идентификация наноизносных режимов трения с использованием метода акустической эмиссии. *Технологические системы*. 2012. № 4. С. 42–56.

9. Стадниченко В. М. Методологія керування процесами контактної взаємодії на основі акустико-емісійних ефектів у триботехнічних системах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04. Київ, 2014. 40 с.
10. Gromakovsky D.G., Kovshov A.G., Ibatullin I.D., Dynnikov A.V. Problems of Kinetics of Surface Destruction. Proceedings of VII-th International Symposium "*INTERTRIBO 2002*", section B – Wear, Slovak Republic, Stara Lesna, House of Technology. 2002, P. 57–58.
11. Nicolis G. Prigogine I. Exploring complexity : an introduction. New York : W.H. Freeman, 1989. P. 313.
12. Ибатуллин И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.
13. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для техн. вузов / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, И. А. Буше, И. А. Буяновский и др. М. : Наука и техника, 1995. 778 с.
14. Громаковский Д. Г. Система понятий и структура моделей изнашивания. *Трение и износ*. 1997. Том 18. №1. С. 53–62.
15. Amiri M., Khonsari M. On the thermodynamics of friction and wear – a review. *Entropy*. Vol. 12. 2010. P. 1021–1049.
16. Yunhui M., Dehua T., Xicheng W. Research on friction-coatings with activated ultra-thick tin-base / et al. *Adv. Tribol*. 2010. P. 915–919.
17. Мухин В. С., Смыслов А. М. Инженерия поверхности деталей машин. *Вестник УГАТУ*. 2009. Т.12. № 4(33). С. 106–112.
18. Gleiter H. Nanostructured materials. Basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*. 2000. № 48. P. 1–29.
19. Гуткин М. Ю., Овидько И. А. Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурных и некристаллических материалах. М. : Янус, 2000. 178 с.
20. Пономаренко И. В., Дьяченко С. С., Дощечкина И. В. Влияние различных методов поверхностного упрочнения на усталостную прочность. *Вестник ХНАДУ*. Харьков, 2006. Вып. 33. С. 41–44.
21. Пономаренко І. В. Підвищення конструктивної міцності сталевих виробів шляхом поверхневого наноструктурування іонним бомбардуванням :

автореф. дис. ... канд.. техн. наук : 05.02.01. “Матеріалознавство” Харків, 2011. 21 с.

22. ГОСТ 19905-74. Упрочнение металлических изделий поверхностной химико-термической обработкой. [Действителен от 01.01.1974]. Издательство стандартов, 1974. 9 с.

23. ГОСТ 20495-75. Упрочнение металлических деталей поверхностной химико-термической обработкой. Характеристики и свойства диффузионного слоя. Термины и определения. [Действителен от 01.01.1975]. Издательство стандартов, 1975. 12 с.

24. Дьяченко С. С., Пономаренко И. В., Дуб С. Н. Влияние ионно-плазменной обработки на микро- и нанотвердость конструкционных сталей. *Вестник ХНАДУ*. 2009. Вып. 46. С. 134–136.

25. Дьяченко С. С., Пономаренко И. В. Новый аспект використання іонно-плазмової обробки. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2009. № 1. С. 71–77.

26. Vohidov A. S. Multifunctional fluorine peahens nanofilms in electronics and friction tribotechnics – the epilam technology. The second Nanotechnology International Forum, October 6. M., 2009. P. 12–14.

27. Dyachenko S.S., Doshchechkina I.V., Ponomarenko I.V., Tatarkina I.S. Use of the ion-plasma treatment for improving the structural strength of items. *Journal of Nano- and Electronic Physics Sumy State University*. Vol. 4, № 1, 2012, P. 1–4.

28. Евдокимов В. Д., Клименко Л. П., Евдокимова А. Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов : учеб. пособие справ. К. : Професионал 2006. 352 с.

29. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н., Голубев Н. Ф. Моделирование износостойкости и долговечности материалов и технических средств на основе структурно-энергетической теории изнашивания. *Трение и износ*. Июнь 2002. Том 4. №2. С. -66-67.

30. Триботехническое материаловедение и триботехнология / Н. Е. Денисова, В. А. Шорин, И. Н. Гонтарь и др. ; под общей редакцией Н. Е. Денисовой. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. 248 с.

31. Безъязычный В. Ф., Драпкин Б. М., Любимов Р. В., Тимофеев М. В. Экспериментальное подтверждение малоцикловой усталостной природы фреттинг-изнашивания поверхностных слоев металлов. *Трение и износ*. Сентябрь, 2000. Т. 2. №3. С-70-79.

32. Беркович П. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / под ред. Д. Г. Громаковского. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2000. 268 с.

33. Лихачев В. А., Малинин В. Г. Структурно-аналитическая теория прочности. С.-Пб : Наука, 1995. Т. 1. 298 с. Т. 2. – 320 с.

34. Challen J.M., Kopalinsky E.M. and Oxley P.L.V. An asperity deformation model for relating the coefficient of friction and wear in sliding metal friction, in *Tribology – Friction, Lubrication and Wear fifty years on*. Vol II, I MechE. London (1987) Paper C156/87.

35. Gromakovsky D.G., Malyarov A.N., Samarin Y.P. Modelling and Wear Calculation on Friction. Abstracts of Papers of the World Tribology Congress, Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997, 462.

36. Eleod A. Numerical modelling of particle detachment, Abstracts of Papers of The World Tribology Congress, Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997, 44.

37. Kato K. Wear mechanisms, Plenary Papers of The World Tribology Congress, Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997, 300, 39–56.

38. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М. : Машиностроение, 1977. 526 с.

39. Nosonovsky M., Mortazavi V. Friction-induced vibrations and self-organization. *Mechanics and non-equilibrium thermodynamics of sliding contact*. Taylor & Francis Group, 2014. 331 p.

40. Kosminska Y.O., Perekrestov V. I. Regularities of self-organization of technological conditions during plasma-arc synthesis of carbon nanotubes. *Diamond and Related Materials*. 2018. Vol. 85. P. 37–48.

41. Persson B.N.J. Sliding friction. *Physical principles and applications*. Berlin : Springer-Verlag, 2000. 514 p.

42. Ramalho A. A reliability model for friction and wear experimental data. *Wear*. Volume 269, Iss. 3–4, 2010. P. 213–223.

43. Kucharski S., Starzyński G. Contact of rough surfaces under normal and tangential loading. *Wear*. Vol. 440–441, 2019. P. 1-14.

44. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М. : Едиториал УРСС, 2014. 360 с.

45. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М. : Едиториал УРСС, 2014. 304 с.

46. Бершадский Л. И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем. *Трение и износ*. 1992. Т. 13. № 6. С. 1077–1094.

47. Ruiz-Andres M., Conde A., de Damborenea J., Garcia I. Use of a dissipated energy approach to analyses the effects of contact frequency on the reciprocating sliding wear of non-lubricated DP600 steel against corundum. *Wear*. 15 Nov. 2015. Vol. 342–343. P. 288–296.

48. Журков С. Н. К вопросу о физической основе прочности. *Физика твердого тела*. Т.22. Вып. 11. С. 3344–3349.

49. Журков С. Н. Проблема прочности твердых тел. *Вестник АН СССР*. 1957. №11. С. 78–82.

50. Журков С. Н., Нарзуллаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердого тела. *Журнал технической физики*. Т. 23. Вып. 10. 1953. С. 1677–1689.

51. Журков С. Н., Томашевский Э. З. Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения. *Некоторые проблемы прочности твердого тела* : сб. статей, посвящ. 80-летию акад. Н. Н. Давиденкова. М. – Л. : АН СССР, 1959.

52. Алексеев Г. Ф. О трении и износе фрикционных пар при вибрационных нагрузках // Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. М. : Наука, 1982. 285 с.

53. Алехин В. П. Физические закономерности микропластической деформации поверхностных слоев материалов. *Физика и технология обработки поверхности металлов*. Л. : АН СССР, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1984. С. 10–32.

54. Garbar I.I. The effect of load on the structure and wear of friction pair materials (example of low-carbon steel and copper). *Wear*. 1997. Vol. 205, Iss. 1–2. P. 240–245.

55. Furustig J., Dobryden I., Almqvist A., Almqvist N., Larsson R. The measurement of wear using AFM and wear interpretation using a contact mechanics coupled wear model. *Wear*. 2016. Vol. 350–351. P. 74–81.

56. Рыбакова Л. М. Механические закономерности деструкции металла при объемном и поверхностном пластическом деформировании. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. Вып. 5. 1998. С. 113–122.

57. Елсукова Т. Ф., Панин В. Е. Влияние масштабных уровней поворотных мод пластического течения на сопротивление деформации поликристалла. *Физическая мезомеханика*. 2009. Т. 12. № 3. С. 5–13.

58. Баранов Ю. В., Сахвадзе Г. Ж., Столяров В. В. Некоторые особенности эффекта Иоффе в наноструктурных материалах. *Вестник научно-технического развития*. 2009. № 2. С. 7–18.

59. Столяров В. В., Сахвадзе Г. Ж., Баранов Ю. В. Импульсные технологии обработки для получения наноструктурных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*. 2007. № 3. С. 13–20.

60. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М. : Мир, 1973. 280 с.

61. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. Изд. 8-е. М. : Едиториал УРСС, 2014. 229 с.

62. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках : пер. с англ. / под. ред. Ю. Л. Климонтовича. М. : Наука, 1985. 328 с.

63. Пригожин И. Философия нестабильности. *Вопросы философии*. 1991. №6. С. 46–57.

64. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур : пер. с англ. Ю. А. Данилова, В. В. Белого. М. : Мир, 2002. 461 с.

65. Tschacher W., Haken H. Intentionality in non-equilibrium systems? The functional aspects of self-organized pattern formation. *New Ideas in Psychology*. 2007. Vol. 25. Iss. 1. P. 1–15.

66. Haken H. Synergetics. *Physica B+C*. 1984. Vol. 127. Iss. 1–3. P. 26–36.

67. Haken H. Synergetics—an interdisciplinary approach to phenomena of self-organization. *Geoforum*. 1985. Vol. 16, Iss. 2. P. 205–211.

68. Haken H. Synergetics and computers. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1988. Vol. 22. Iss. 2–3. P. 197–202.

69. Dowson D. Progress in Tribology: a Historical Perspective, Plenary Papers of The World Tribology Congress. Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997, 300, P. 3-20.

70. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент : ФАН, 1985. 168 с.

71. Федоров В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент : ФАН, 1979. 186 с.

72. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Неравновесная термодинамика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Корпускулярно-волновой дуализм пластического сдвига. *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 11. № 2. С. 9–30.

73. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Физическая мезомеханика измельчения кристаллической структуры при интенсивной пластической деформации. *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 11. № 5. С. 5–16.

74. Жарин А. Л. Кинетические и физико-химические процессы в тонких поверхностных слоях металлов и сплавов при трении скольжения : докт. дисс : 05.02.04 / Гомель: Ин-т механики металлополимерных систем, 1994. 352 с.

75. Громаковский Д. Г., Ибатуллин И. Д. Опора надежности и качества. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. Сер. Металлообработка. X. : Центринформ, 2006. Вып. 2 (75), С. 6-12.

76. Кайзер Д. Статистическая термодинамика неравновесных процессов. М. : Мир, 1990. 608 с.

77. Агеев Е. П. Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах. М. : Эдиториал УРСС, 2001. 136 с.

78. Сагалович А. В., Дудник С. Ф., Сагалович В. В., Кононыхин А. В., Попов В. В., Любченко А. П., Олейник А. К. Разработка многокомпонентных покрытий для повышения износостойкости поверхностей пар трения в прецизионных узлах. *Физическая инженерия поверхности*. 2007. Т. 5, № 3–4. С. 155–164.

79. Дудник С. Ф., Сагалович А. В., Сагалович В. В., Любченко А. П., Олейник А. К. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве. *Физическая инженерия поверхности*. 2004. Т. 2, № 1–2. С. 110–114.

80. Sagalovych A., Popov V., Sagalovych V., Dudnik S., Bogoslavzev V., Stadnichenko N., Edinovich A. Comparative analysis of the fatigue contact strength of surfaces hardened by cementation and the ion-plasma nitriding Avinit N. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6(12) (108), P. 20–27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217674>.

81. Ибатуллин И. Д. Кинетический критерий повреждаемости и разрушения поверхностных слоев, деформируемых трением. *Вестник СГАУ*. Самара : СГАУ, 2006. №2 (10). Ч. 2. С. 204–209.

82. Бершадский Л. И. Масштабное переупорядочение структуры и энтропийные эффекты при трении и износе металлов. *Физика*

износостойкости поверхности металлов: сб. / сост. А. Е. Романов. Л. : ФТИ, 1988. С. 166–182.

83. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М. : Наука, 1994. 383 с.

84. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Механізми припрацювання пар тертя в об'ємних гідромашинах в умовах нанозношування в присутності трибовідновлюючих сумішей. *Проблеми трибології*. 2013. № 4. С. 92–95.

85. Стадниченко В. Н., Трошин О. Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловым потоком. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ": Темат. вип. : Технології в машинобудуванні*. 2007. № 17. С. 49–62.

86. Запорожець В. В., Стадниченко В. М., Трошін О. М. Фізичні основи нерівноважного самовпорядкування в трибо системі. *Технологические системы*. 2013. 4 (65). С. 62–70.

87. Viktor Voitov, Viacheslav Stadnychenko, Valeriy Varvarov, Nikolay Stadnychenko. Mechanisms of self-organization in tribosystems operating under conditions of abnormally low friction and wear. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12(10). P. 1–18.

88. Stadnychenko V., Varvarov V., Results of Theoretical and Experimental Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems. *Advances in Materials*. 2019. Vol. 8. №4, P. 156–165.

89. Стадниченко В. М., Джус Р. М., Плешкунов С. А. Методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2019. № 2(58). С. 122–131. DOI: 10.30748/soivt.2019.58.15.

90. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Попов В. В., Плешкунов С. А., Семенов Я. І. Порівняльна оцінка технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування при їх використанні для зміцнення високонавантажених вузлів авіаційної техніки. *Наука і техніка Повітряних*

Сил Збройних Сил України. 2020. № 2(39). С. 54–61.
DOI: 10.30748/nitps.2020.39.06.

91. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Плешкунов С. А., Градиський Ю. О. Порівняльний аналіз параметрів зносостійкості зразків, зміцнених цементуванням та іонно-плазмовим азотуванням, працюючих в умовах багатоциклового зношування. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. №3 (88). С 87–98. DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14922.

92. Плешкунов С. А. Структурно-енергетична модель прискореної оцінки показників контактної утомної міцності матеріалів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. №4 (68). С. 113–22. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.15.

93. Васильев А. С., Дальский А. М., Золотаревский Ю. М. Направленное формирование свойств изделий машиностроения. М.: Машиностроение, 2005. 384 с.

94. Стадніченко В. Н., Трошин О. Н., Приймак А. В. Прогнозирование ресурса трибосистем, работающих в режиме наноизнашивания, методом акустической эмиссии. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2010. №4 (26). С. 41–48.

95. Babak V. P., Filonenko S. F., Kalita V. M. Model of acoustic emission signal at self-accelerated crack development. *Aviation*. 2005. № 2. V.IX. P. 3–8.

96. Джус Р. М., Стадніченко В. М., Трошин О. М. Про границі застосування методу акустичної емісії при вирішенні задач трибо діагностики. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2004. Вип. 1 (10). С. 187–194.

97. Sause M., Hamstad M. Acoustic Emission Analysis. *Comprehensive Composite Materials II*. 2018. Vol. 7. P. 291–326.

98. Баранов А. В., Тарасевич С. В., Вагнер В. А. Ультразвуковой мониторинг работы трибосопряжений. *Ползуновский вестник*. 2012. № 1. С. 23–27.

99. Маркова Л. Ф. Перспективы развития трибодиагностики. *Трение и износ*. 2006. Т. 11. № 7. С. 175–184.

100. Filonenko S. F., Stadnychenko V. N., Stakhova A. P. Modelling of acoustic emission signals at friction of materials' surface layers. *Aviation*. 2008. Vol.12. №3. P. 87–94.

101. 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. № 3 (4). P. 333–344.

102. Hase A. Mishina H., Wada M. Fundamental study on early detection of seizure in journal bearing by using acoustic emission technique. *Wear*. 2016. №346. P. 132–139.

103. Mishina H., Hase A. Wear equation for adhesive wear established through elementary process of wear. *Wear*. № 308 (1–2). P. 186–192.

104. Hase A. Mishina H., Wada M. Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. *Wear*. № 292. P. 144–150.

105. Березняков А. И., Стадниченко В. Н. О взаимосвязи характеристик акустического излучения поверхности трибосопряжения с трибологическими параметрами. *Трение и износ*. 1998. Т. 19, № 3. С. 312–317.

106. Wang Zh., Wu X., Liu X., Cao Y., Xie J. Research on feature extraction algorithm of rolling bearing fatigue evolution stage based on acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 113. P. 271–284.

107. Filonenko S. F., Stadnichenko V. N., Troshin O. N. Research of influence of thermal resistance of elements of trybosystem on wearproofness of friction units // Proceeding of the forth world congress “Aviation in the XXI-st century” : Safety in aviation and space technology. Kyiv : NAU, 2010. Vol. 1. P. 12.1–12.4.

108. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Методология ускоренной оценки износостойкости образцов с электроискровыми покрытиями. *Проблеми трибології*. 2010. № 4. С. 25–32.

109. 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.
110. Запорожець В. В., Стадніченко В. М., Трошин О. М., Варваров В. В. Прискорена методика визначення зносостійкості нанопокриттів в трибосистемах з використанням інформативних параметрів акустичної емісії. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2010. № 3(25). С. 19–24.
111. Трошин О. Н., Стадниченко Н. Г., Джус Р. Н., Гурин О. А. Информативное содержание метода акустической эмиссии для безразборной диагностики узлов авиационной техники. *Наука і техніка Повітряних Сил*. 2013. № 2 (11). С. 80–83.
112. Зинченко В. М., Сыропятов В. Я., Прусаков Б. А., Перекатов Ю. А. Азотный потенциал: современное состояние проблемы и концепция развития / под общей редакцией проф. Б. А. Прусакова. М. : ФГУП Машиностроение, 2003. 90 с.
113. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 400 с.
114. Каплун В. Г., Каплун П. В. Ионное азотирование в безводородных средах : монография. Хмельницький : ХНУ, 2015. 318 с.
115. Пастух І. М., Соколова Г. М., Здибель О. С. Вплив режимних параметрів азотування у тліючому розряді на товщину нітридної зони модифікованого шару. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2014. №4 (215). С. 130–134.
116. Могильная Е. П., Дубасов В. М. Ионное азотирование изделий из конструкционной стали 38ХМФА. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні*. 2013. №1. С. 193–198.

117. Костик К. О., Костик В. О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивості легованої сталі 30X3BA. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях*. 2014. №48 (1090). С. 21–41.

118. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N : пат. №84664 U Україна ; від 25.10.13.

119. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N : пат. №107408 U Україна; від 28.12.14.

120. Столбовой В. А. Структура и физико-механические свойства вакуумно-дуговых наноструктурных Ti-N и Mo-N покрытий : дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07. Харків, 2011. 129 с.

121. Братушка С. Н., Маликов Л. В. Ионно-плазменная модификация титановых сплавов. *Вопросы атомной науки и техники*. 2011. № 6. С. 126 – 140.

122. Погребняк А. Д., Ердыбаева Н. К., Маликов Л. В. Влияние высокодозной имплантации ионов металлов и газов на физико-механические свойства титановых сплавов. *Вопросы атомной науки и техники*. 2008. № 1. С. 81–92.

123. Погребняк А. Д., Братушка С. Н., Михалев А. Д. Физико-химические и триботехнические свойства железа, оплавленного импульсной плазменной струей. *Трение и износ*. 2007. Т. 28. № 5. С. 457–464.

124. Pogrebnyak A. D., Zecca A., Bratushka S. N. Evolution of vacancy defects and dislocations in surface layers of iron as a result of pulsed electronic beam treatment. *Physics letters*. 1998.Vol. 241. P. 357 – 363.

125. Тюменцев А. П., Коротаев А. Д., Бугаев С. П. Закономерности структурно-фазовых превращений в металлических сплавах при высокодозной имплантации. *Известия вузов. Физика*. 1994. № 5. С. 59–71.

126. Калинин Б. А., Якушин В. Л., Польский В. И. Модификация металлических материалов при обработке потоками высокотемпературной импульсной плазмы. *Известия вузов. Физика*. 1994. № 5. С. 109–126.

127. Панин А. В., Шугуров А. Р., Казаченок М. С., Сергеев В. П. Влияние наноструктурирования подложки Si на разрушение теплозащитных покрытий Si–Al–N при одноосном растяжении. *Журнал технической физики*. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 44–52.

128. Козлов Э. В., Терешко И. В., Попова Н. А. Физическая картина модификации поверхностных слоев и объема металлов и сплавов при воздействии низкоэнергетической плазмы. *Функционально–механические свойства материалов и их компьютерное моделирование*. 1994. № 5. С. 127–140.

129. Прочность материалов и конструкций: серия монографий / под общ. ред. Трощенко В. Т. // Т.2. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия. Київ : Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2009. 664 с.

130. Козлов Э. В. Формирование дефектной структуры при воздействии на металлы плазмы газового разряда. *Известия вузов. Физика*. 1992. № 1. С. 14–19.

131. Попова Н. А., Козлов Э. В. Эволюция дислокационной структуры при обработке металлов и сплавов в плазме газового разряда. *Эволюция дислокационной структуры. Упрочнение и разрушение сплавов*. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1992. С. 107–115.

132. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Стадніченко В. М., Плешкунов С. А. Мікроструктурні та фазові особливості поверхневого шару, зміцненого іонно-плазмовим азотуванням, як фактор підвищення втомної міцності. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2020. № 1(63). С. 89–95. DOI : 10.30748/zhups.2020.63.12.

133. Плешкунов С. А. Перспективи застосування іонно-плазмових методів для підвищення втомної міцності трибосистем. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 2. С. 92–97. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.2.11.

134. Каневский И. Н., Сальникова Е. Н. Неразрушающие методы контроля : учебн. пособ. Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. 243 с.
135. Регель В. Р., Слуцкер А. И, Томашевский Э. И. Кинетическая природа прочности твердых тел . М. : Наука, 1974. 560 с.
136. Степанов В. А., Песчанская Н. Н, Шпейзман В. В. Прочность и релаксационные явления в твердых телах . Л : Наука, 1984. 246 с.
137. А.с. 1490592 СССР. Способ оценки энергии активации материалов / Д. Г. Громаковский и др. – Оpubл. в бюлл. изобретений Гос. комитета СССР №24 от 30.06.89.
138. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов : учеб. для вузов . М. : Высш. шк., 1995.– 560 с.
139. Кеннеди А. Д. Ползучесть и усталость в металлах. М. : Металлургия, 1965. 312 с.
140. Логвинов А. Н., Трегуб В. И., Ибатуллин И. Д. Методика оценки энергии активации методом микротвердости материалов // Российский симпозиум по трибологии “Актуальные проблемы трибологии” : тезисы докл. Самара, 1994. С. 16.
141. Барахтин Б. К., Иванов С. А, Петров П. П. Запасенная упругая энергия в приповерхностном слое деформированных металлов. *Физика износостойкости поверхности металлов* : сост. А. Е. Романов. Л. : ФТИ, 1988. С. 56–58.
142. Усталость и хрупкость металлических материалов / В. С. Иванова, С. Е. Гуревич, И. М. Копьев и др. М. : Наука, 1968. – 216 с.
143. Трощенко В. Т. Усталость и неупругость металлов. Киев : Наукова думка, 1971. 267 с.
144. Волков П. В. Метод локальной экспресс-оценки механических свойств поверхностных слоев машиностроительных материалов : дисс. канд. техн. наук: 05.02.01. М. : МЭИ, 2000. 166 с.
145. Ибатуллин И. Д., Берсудский А. Л. Применение кинетической модели повреждаемости при анализе усталостного разрушения материалов.

Актуальные проблемы трибологии : материалы Междунар. научно-технической конференции: труды, том 3. М. : Машиностроение, 2007. С. 193–202.

146. Матюнин В. М. Методы и средства безобразцовой экспресс-оценки механических свойств конструкционных материалов: учеб. пособ. по курсу “Диагностика структурно-механического состояния металла” / под ред. В. Г. Борисова. М. : МЭИ, 2001. 94 с.

147. Матюнин В. М., Волков П. В. Испытание материалов царапанием. *Технология металлов*, 2000. №2. С. 27–30.

148. Способ определения механических характеристик материалов: пат. 2143106 Российская Федерация : G01 N 3/42; 1999. 6 с.

149. Крагельский И. В. Трение и износ. М. : Машиностроение, 1968. 480 с.

150. Кузнецов В. Д. Физика резания и трения металлов и кристаллов. Избранные труды . М. : Наука, 1977. 310 с.

151. Баранов Н. Г., Мурзин Л. М., Круглов И. А. Влияние содержания графита на локальную хрупкость и структурные механизмы релаксации напряжений. *Трение и износ*, 1993. №6 С. 1054–1060.

152. Устройство и методика испытаний материалов шарошечных долот методом склерометрии / В. Е. Барынкин, В. И. Кремлев, Н. С. Нассиф, Р. М. Богомоллов, Д. Г. Громаковский, И. Д. Ибатуллин / под общ. ред. В. Ф. Безъязычного, В. Ю. Замятина // Международная науч.-практич. школа-конференция “Славянтрибо-7а” : материалы. В 3 т.: т. 3682 .Рыбинск : РГАТА, 2006. С. 102–103.

153. Беленьких Е. В., Карпов А. С., Ибатуллин И. Д., Сорокин А. Н. Новый способ оценки энергии активации смазочных материалов при механическом разрушении. *Контактная гидродинамика* : материалы VI Всероссийская конф., Самара, 1996. – С. 31.

154. Берсудский А. Л., Кудюров Л. В., Ибатуллин И. Д. Метод повышения износостойкости стальных деталей // XXVI Международное

совещание по динамике и прочности двигателей [посвящ. 85-летию со дня рождения Генерального конструктора академика Н. Д. Кузнецова: докл.]. Самара, 1996. С. 25–27.

155. Громаковский Д. Г., Ефимов В. П., Ковтунов Е. П., Мохонько Е. П., Кулаков Г. А., Ибатуллин И. Д. Триботехнические основы повышения износостойкости рельс, колес и колесных подшипников. *Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин*: материалы Междунар. науч.-техн. конф., м. Самара. Самара : Машиностроение, 2003. С. 207–212.

156. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, И. А. Буше, И. А. Буяновский и др. – М.: Наука и техника, 1995. 778 с.

157. Способ упрочнения деталей с одновременным нанесением композиционных покрытий: пат. 2138579 Российская Федерация: С23С26/00; опубл. 27.09.1999, Бюл. Открытия. Изобретения.

158. Gromakovsky D. G., Malyarov A. N., Samarin Y. P. Modelling and Wear Calculation on Friction // Abstracts of Papers of the World Tribology Congress, Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997, 462 p.

159. Gromakovsky D. G., Sorokin A. N., Ibatullin I. D. Tribological Properties of a Modern Additive for Motors and Transmission Fluid // 2-nd International conference on synthetic lubricants and functional fluids, AIM-Centro Italiano ditribologia Milano, EMW In, 1995, p.145–146.

160. Xie Y. and Williams J. A. The Generation of Worn Surfaces By the Repeated Interaction of Parallel Grooves. *Wear*. 1993, 864–872.

161. Zaporozhets V., Stadnichenko V. Automated Systems for Tribodiagnostics of Contact Interactions. *Journal of Friction and Wear*. 2015. Vol. 36. № 3. P. 241–248.

162. Challen J. M., Kopalinsky E. M. and Oxley P.L.B. An asperity deformation model for relating the coefficient of friction and wear in sliding metal

friction, in Tribology – Friction, Lubrication and Wear fifty years on, Vol II, I MechE., London (1987) Paper C156/87.

163. Eleod, A. Numerical modelling of particle detachment // Abstracts of Papers of The World Tribology Congress, Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997, 44.

164. Браун Э. Д., Буяновский И. А., Смушкович Б. Л. Средства трибологических испытаний. *Заводская лаборатория*. 1997. № 10. С. 29-37.

165. Tazbaz O. D., Wood R.J.K. Electrostatic monitoring of oil lubricated sliding point contacts for early detection of scuffing. *Wear*. 1999. №230/1. P. 86–97.

166. Трибоэлектрические характеристики систем с граничным трением и избирательным переносом / В. Э. Бурлакова, С. Б. Булгаревич, А. С. Кужаров и др. *Транспорт*, 2003. – 274 с.

167. Кужаров А. С., Бурлакова В. Э., Булгаревич С. Б. Трибоэлектрохимический мониторинг режимов трения. *Вестник ДГТУ*. 2014. Т.4, №1(19). С. 47–54.

168. Диагностический комплекс для трибологических исследований электрофлуктуационными методами: Отчет о НИР (Заключ). № ГР.01.20.0010086. Орел: Орловский государственный технический университет, 2000. 101 с.

169. Acoustic emission in friction AE / V. Baranov, E. Kudryavtsev, G. Sarychev, V. Schavelin. Amsterdam., 2007. – 218 p.

170. Подмастерьев К. В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения. М.: Машиностроение, 2001. 376 с.

171. Конструкційні та функціональні матеріали. Ч. II. / Бабак В. П., Байса Д. Ф., Різак В. М., Філоненко С. Ф. Київ: Техніка, 2004. 364 с.

172. Ishikawa K. Quality Control in Japan : In book The Japanese Approach to Product Quality / eds. N. Sasaki and D. Hutchins. Copyright Elsevier B.V., 1984. 134 p.

173. Федюкин В. К. Управление качеством процессов. С.-Петербург.: Питер, 2005. 202 с.

174. А. С. 1803811 СССР. Машина для испытаний материалов на трение и износ / В. А. Войтов, В. А. Баздеркин, О. И. Носовский, Л. Г. Козырь, В. Н. Стадниченко, А. И. Смахтин (СССР). – 1993, № 11.

175. ДСТУ 30480-97. Міждержавний стандарт. Забезпечення зносостійкості виробів. Методи випробувань на зносостійкість. Загальні вимоги. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 1997. 23 с.

176. Алиев А. А., Булгаков В. П., Приходько Б. С. Качество поверхности и свойства деталей машин. *Вестник астраханского государственного технического университета*. Астрахань, 2004. № 1. С. 8–11.

177. Безъязычный В. Ф. Влияние качества поверхности после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин. *Инженерный журнал*. М. : 2001. № 4. С. 9–16.

178. Jianbin L. Physics and Chemistry of Micro-Nanotribology. ASTM International, 2008. 290 p.

179. Stadnychenko V; Djus R; Pleshkunov S. The application of Acoustic Emission Method for Accelerated Evaluation of Fatigue Strength Indicators of Structural Materials. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 14. Iss. 12. 2022. P. 1-16. DOI : 10.1177/16878132221143891 (SCOPUS).

180. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н., Трошин О. Н., Стадниченко Н. Г., Джус Р. Н. О механизмах подвижности металлокерамического слоя в технологиях триботехнического восстановления деталей. *Військово-технічний збірник*. Харків, 2010. № 3. С. 101–106.

181. Стадниченко В. Н., Трошин О. Н., Стадниченко Н. Г., Приймак А. В., Просяник И. И. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме . *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2011. № 1 (27). С. 51–61.

182. Стадниченко В. Н. Диагностика процессов изнашивания фрикционных узлов трансмиссий авиационных ГТД методом акустической

эмиссии. *Вопросы проектирования и производства конструкций летальных аппаратов* : сб. науч. тр. Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". 2010. Вып. 1(61). С. 108–117.

183. Владимиров В. И. Проблемы физики трения и изнашивания. *Трение, износ, смазка*. 2008. Т.10. №2. С. 7–31.

184. Войтов В. А., Чернявский В. Н. Методика оценки остаточного ресурса главного редуктора. *Системы обработки інформації*. 2008. Вып. 7(74). С. 39–42.

185. Войтов В. А., Орловський М. Н., Чернявский В. Н. Обоснование мест установки датчиков при диагностировании технического состояния главного редуктора вертолета. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2008. Вып.7(74). С. 39–42.

186. Маннапов Р. Г. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении. *Обзорная информация*. Сер. ХМ-1. М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1988. 39 с.

187. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М. : Мир, 1984. – 642 с.

188. Kemmer H. A. Investigation of the friction behavior of automotive brakes though experiments tribological modeling. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1998. Вып. 5. С. 113–122.

189. Ибатуллин И. Д. Диагностика ресурсных характеристик элементов машин. *Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки*. 2002. №15. С. 123–130.

190. Bhushan B. Nanotribology and Nanomechanics an Introduction. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 1148 p.

191. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. *Известия КГТУ*. Калининград, 2007. № 11. С. 22–31.

192. Погодаев Л. И., Ежов Ю. Е., Сергеева Л. Л., Касьянова Н. Р. Структурно-энергетические модели поведения (надежности) материалов при импульсном нагружении. *Трение, износ, смазка*. – 2013. Т. 15, № 57.

193. Стадніченко М. Г., Фененко О. О., Варваров В. В. Методика прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів силових елементів планера летального апарату військового призначення. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. №1(22). С. 41–45.

194. Анипко О. Б. Фененко О. А. Дефекты стыковочной ленты узла крепления киля к подкилевой надстройке и физико-химические процессы, приводящие к ним. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. 2014. С. 96–102.

195. Хромов С. П., Петросян М. А. Метеорология и климатология: 7-е изд. Москва : Наука, 2006. 582 с.

196. Кочаров Э. А., Олешко В. С. Энергосберегающая технология контроля прижогов титановых лопаток компрессоров газотурбинных двигателей по флюктуациям работы выхода электрона. *Перспективы развития пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов*. Москва : Радиотехника, 2008, Т. 80. № 4. С. 73–76.

197. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. Москва : Машиностроение, 1990. 448 с.

198. Тушкевич В. М. Физика: Проблемы. История. Люди: сб. статей / сост.: В. М. Тушкевич, ред. колл.: В. Я. Френкель (пред.) и др. – М. : Наука, 1986. – 132 с.

199. Чернявський В. М., Джус Р. М., Степанов С. В. Результати застосування методу акустичної емісії для діагностування стану зразків ОВТ в експлуатації. *Системи озброєння і військова техніка*. 2011. № 4. С. 105–108.

200. Стадніченко В. М., Стадніченко М. Г., Джус Р. М., Гурін О. О. Перспективи впровадження вбудованих систем контролю авіаційної техніки на основі методу акустичної емісії. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2013. 2(35). С. 33–37.

201. Безлюдько Г. Я., Елкина Е. И., Соломаха Р. Н., Попов Б. Е. Коэрцитиметрия как основной метод неразрушающего контроля усталости и как приоритетный метод в диагностическом наборе. *Неразрушающий*

контроль и техническая диагностика ECNDT-2010 : материалы Доклады 10-ой Европейской конференции. Москва, 7–11 июня 2010 года.

202. Shkatulyak N. M., Dragomeretskaya E. A., Usov V. V., M. D. Rabkina, Palienko A. L. Texture and coercive force of the metal of furnace tube coils. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2016. – Issue 1. – pp. 29-37. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.1.029-037.

203. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М. : Высш. школа. 2000. 480 с

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Стадніченко В. М., Джус Р. М., Плешкунов С. А. Методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків, 2019. № 2 (58). С. 122-131. DOI: 10.30748/soivt.2019.58.15.
2. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Стадніченко В. М., Плешкунов С. А. Мікроструктурні та фазові особливості поверхневого шару, зміцненого іонно-плазмовим азотуванням, як фактор підвищення втомної міцності. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2020. № 1 (63). С. 89–95. DOI: 10.30748/zhups.2020.63.12.
3. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Попов В. В., Плешкунов С. А., Семенов Я. І. Порівняльна оцінка технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування при їх використанні для зміцнення високонавантажених вузлів авіаційної техніки. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 2 (39). С. 54–61. DOI: 10.30748/nitps.2020.39.06.
4. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Плешкунов С. А., Градиський Ю. О. Порівняльний аналіз параметрів зносостійкості зразків, зміцнених цементуванням та іонно-плазмовим азотуванням, працюючих в умовах багатоциклового зношування. *Проблеми тертя та зношування*. 2020, № 3 (88). С. 87–98. DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14922.
5. Плешкунов С. А. Перспективи застосування іонно-плазмових методів для підвищення втомної міцності трибосистем. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 2. С. 92–97. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.2.11.
6. Джус Р. М., Плешкунов С. А. Збільшення ресурсу авіаційної техніки

новітніми методами іонно-плазмового зміцнення поверхонь. *Повітряна міць України*. 2021. №1 (1). С. 92–95. DOI: 10.33099/2786-7714-2021-1-1-92-95.

7. Плешкунов С. А. Структурно-енергетична модель прискореної оцінки показників контактної утомної міцності матеріалів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 4 (68). С. 113–22. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.15.

Статті у закордонних виданнях:

1. Stadnychenko V; Djus R; Pleshkunov S. The application of Acoustic Emission Method for Accelerated Evaluation of Fatigue Strength Indicators of Structural Materials. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 14. Iss. 12. 2022. P. 1-16. DOI : 10.1177/16878132221143891 (SCOPUS).

Матеріали і тези конференцій:

1. Джус Р. М., Плешкунов С. А. Методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів. *Новітні технології для захисту повітряного простору: матеріали XV міжнар. наук. конф, м. Харків, 10-11 квітн. 2019 р. Харків, 2019. № 1(57). С. 142.*

2. Стадніченко М. Г., Джус Р. М., Плешкунов С. А. Прискорена оцінка показників втомленої пошкоджуваності конструкційних матеріалів. *Промислова гідравліка і пневматика : матеріали XX міжнар. наук.-технічн. конф. АС ПГП, м. Київ, 22-25 жовт. 2019 р. Київ, 2020. С. 164.*

3. Плешкунов С. А., Стадніченко М. Г., Джус Р. М. Заходи з підвищення ресурсних показників високонавантажених вузлів приводів. *Новітні технології – для захисту повітряного простору : зб. тез доп. XVI міжнар. наук. конф., м. Харків, 15-16 квітн. 2020 р. Харків, 2020. С. 156.*

4. Плешкунов С. А. Перспективи застосування іонно-плазмових методів для підвищення втомної міцності трибо систем. *Інтегровані технології та енергозбереження : матеріали XIX Міжнар. наук. конференції, м. Харків, 11–16 травня 2020 р. Харків, 2020. №2 С. 92–97.*

5. Плешкунов С. А., Стадніченко М. Г., Джус Р. М. Підвищення ресурсних показників навантажених вузлів коробок приводів. *Новітні технології для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XVII міжнар. наук. конф., м. Харків, 14-15 квітн. 2021 р. Харків, 2021. С. 387.

6. Плешкунов С. А., Джус Р. М. Збільшення ресурсу авіаційної техніки новітніми методами іонно-плазмового зміцнення поверхонь. *Актуальні питання протидії загрозам з повітря* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 20 жовтня 2021 р. Київ, 2021. №1 (1). С. 92–95.

7. Плешкунов С. А., Стадніченко М. Г. Іноваційні методи іонно-плазмового зміцнення для підвищення експлуатаційних показників агрегатів повітряних суден та їх силових установок. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XVIII міжнар. наук. конф., м. Харків, 15-16 квітн. 2022 р. Харків, 2022. С. 119.

8. Плешкунов С. А. Застосування новітніх методів іонноплазмового зміцнення поверхонь для збільшення ресурсу авіаційної техніки. *Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки* : матеріали II Всеукр. наук.-технічн. інтернет-конф., м. Вінниця, 17–18 листоп. 2022 р. Вінниця, 2022. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/apozbt/apozbt2022/paper/viewFile/16628/13880>.

9. Джус Р. М., Плешкунов С. А., Білозер С. Д., Калюжний І. М. Процеси утомного руйнування серед трибосполучень агрегатів повітряних суден. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XIX міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квітн. 2023 р. Харків, 2023. С. 112.

10. Плешкунов С. А., Джус Р. М., Калина О. О., Петраков Д. М., Толстіков Д. Ю. Методи оцінки показників утомної міцності трибосполучень агрегатів повітряних суден. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XIX міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квітн. 2023 р. Харків, 2023. С. 110-111.

11. Плешкунов С. А., Джус Р. М., Резніков С. В. Підвищення ресурсу агрегатів авіаційної техніки застосуванням іонно-плазмових методів зміцнення. *Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки* : матер. III міжнар. наук.-технічн. інтернет-конференції, м. Вінниця, **15–16 листоп. 2023 р.** Вінниця, 2023. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/apozbt/apozbt2023/paper/view/19297>.

ДОДАТОК Б

Планування мінімально необхідного обсягу контролю

Підвищення достовірності оцінки надійності обладнання завжди бажано, але воно пов'язане зі збільшенням обсягу (отже, і трудомісткості) отримання вихідної інформації (збільшення кількості вимірювань, частоти обстежень). Тому рівень достовірності зазвичай визначається залежно від наслідків неточності оцінки виникнення організаційних незручностей (наприклад, зміна термінів проведення ремонтів) економічних втрат від відмов або виникнення загрози безпеці під час експлуатації.

Вимоги до точності та достовірності оцінки надійності обладнання повинні задаватись у технічній документації на обладнання. За відсутності з боку замовника спеціальних вимог щодо достовірності оцінки відповідно до [203] рівень довірчої ймовірності приймається рівним 0,8.

Вибір необхідної кількості спостережень (вимірювань) для оцінки показників надійності регламентований для різних рівнів достовірності та різних законів розподілу. З урахуванням встановленого виду закону розподілу (Вейбулла) та області можливих значень коефіцієнтів варіації глибин руйнування запропоновано ряд рекомендацій щодо вибору кількості вимірювань. Мінімальну необхідну кількість N точок на поверхні для вимірювань слід обирати залежно від ступеня нерівномірності руйнування, що характеризується коефіцієнтом варіації глибин руйнування V_h (табл. Б.1). Довірчу ймовірність γ вибирають з ряду 0,8; 0,9; 0,95; 0,99. Максимальну припустиму відносну помилку вибирають із ряду 0,05; 0,1; 0,15; 0,2. Попередньо величина коефіцієнта варіації V_h може бути орієнтовно обрана на таких інтервалах: при квазірівномірному суцільному руйнуванні (корозії, ерозії) до 0,2; при нерівномірній суцільній корозії 0,3-0,6; за наявності локальних руйнувань (каверн, виразок, пітингів) понад 0,6.

Таблиця Б.1 – Мінімальна кількість N точок для вимірювань

S	γ	N при V_h						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
0,05	0,8	4	13	25	50	100	200	315
	0,9	8	25	65	100	250	500	650
	0,95	13	40	100	150	400	650	1000
	0,99	25	100	200	315	800	1 000	>1 000
0,1	0,8	<3	5	10	13	32	50	100
	0,9	3	8	15	32	65	125	200
	0,95	5	13	25	50	100	200	400
	0,99	8	25	50	100	200	400	650
0,15	0,8	<3	3	5	6	15	25	40
	0,9	<3	4	8	15	32	65	80
	0,95	3	6	13	25	50	100	150
	0,99	5	13	25	40	100	200	315
0,2	0,8	<3	<3	3	5	10	20	25
	0,9	<3	4	6	10	20	40	50
	0,95	<3	5	8	15	32	50	100
	0,99	4	8	15	25	65	125	150

Після виконання вимірювань слід обчислити за формулою (Б.3) фактичний коефіцієнт варіації, і у разі, якщо він виявиться більшим за попередньо обраний, виконати додаткові вимірювання відповідно до рекомендацій табл. 3.6. За наявності у вибірці значень, що різко виділяються на ділянках, де вони були отримані, слід виконати додаткові вимірювання. При повторному отриманні такого результату цю ділянку слід розглядати окремо від інших, оскільки підвищена глибина руйнувань у ній, очевидно, викликана конструктивно-технологічними причинами. Критерієм різкого виділення значення з вибірки може бути виконання умови $h > h_p$, де h_p визначається за формулою, наведеною далі.

Наприклад, при обстеженні поверхні площею 5 м^2 виявлено суцільні пітингові руйнування. Для оцінки працездатності агрегату необхідно визначити максимальну глибину пітингу на поверхні. Середня кількість пітингів на одиницю поверхні дорівнює 100 1/дм^2 . Оптимальна величина ділянки S_1 , на якій візуально виявляється пітинг максимальної глибини,

становить $100 \times 100 \text{ мм}^2$, тобто 1 дм^2 . Суцільний контроль зумовив би необхідність огляду та вимірювання 500 таких ділянок, що потребувало б великої праці. Тому прийнято рішення щодо оцінки максимальної глибини пітингів вибіркоким методом з довірчою ймовірністю 0,9 при помилці не більше 10.

Розв'язання:

1. Визначається середня площа поверхні, що припадає на 1 пітинг:

$$S_0 = 1/100 = 0,01 \text{ дм}^2.$$

2. Визначається величина $M = S_1/S_0 = 1/0,01 = 100$.

3. За табл. 3.6 визначається орієнтовне значення коефіцієнта варіації максимальних глибин $V_{\max} = 0,2$.

4. За табл. Б.1 визначається для заданих значень ($\gamma = 0,9$; $\delta = 0,1$), необхідна кількість вимірювань $N = 8$.

5. У результаті вимірювання максимальних глибин на 8 ділянках отримано такі значення (мм): 1,5; 1,2; 1,1; 1,7; 1,4; 1,8; 1,3 та 1,5.

6. За формулами (Б.1)–(Б.3) визначається середнє значення максимального пітингу та його коефіцієнт варіації:

$$\bar{h}_{\max} = \sum_{i=1}^N h_{\max} / N = 1,44 \text{ мм}; \quad (\text{Б.1})$$

$$\sigma_{h_{\max}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_{\max.i} - \bar{h}_{\max})^2}{N - 1}} = 0,245 \text{ мм}; \quad (\text{Б.2})$$

$$V_{h_{\max}} = \sigma_{h_{\max}} / \bar{h}_{\max} = 0,17 \quad (\text{Б.3})$$

Отримане значення $V_{h_{\max}}$ не перевищує заздалегідь обраного (0,2), тому достовірність результатів не буде нижчою за задану.

7. Наноситься точка з координатами $M = 100$; $V_h = 0,17$ на сітку координат (рис. Б.1). Точка потрапляє на криву, яка бере початок (при $M = 1$) від значення $V = 0,7$. Отже, коефіцієнт варіації повного розподілу глибин пітингу дорівнює 0,7.

8. За рис. Б.2 на перетині кривої 0,7 з абсцисою $M = 100$ знаходиться значення $E_{h_{\max}} = 3$. Визначається значення середньої глибини пітингів:

$$\bar{h} = \frac{\bar{h}_{\max}}{E_{h_{\max}}} = \frac{1,44}{3} = 0,48 \text{ мм} \quad (\text{Б.4})$$

9. За тією самою кривою знаходиться значення $E_h = 5,1$, що відповідає значенню $M = S/S_0 = 500/0,01 = 5 \cdot 10^4$ (де S – площа поверхні, ураженої пітингом).

Визначається можлива максимальна глибина пітингу на поверхні $S = 5 \text{ м}^2$:

$$h_{\max} = \bar{h} E_{h_{\max}} = 0,48 \cdot 5,1 = 2,45 \text{ мм} \quad (\text{Б.5})$$

Для порівняння знаходимо за табл. 3.6 необхідну кількість вимірювань глибин пітингів, якщо максимальні значення на ділянках візуально не виявляються. У цьому випадку (при знайдений $V = 0,7$) задля забезпечення тієї ж достовірності ($\gamma = 0,9$; $\delta = 0,1$) знадобилося б близько 100 вимірювань, тобто на порядок більше.

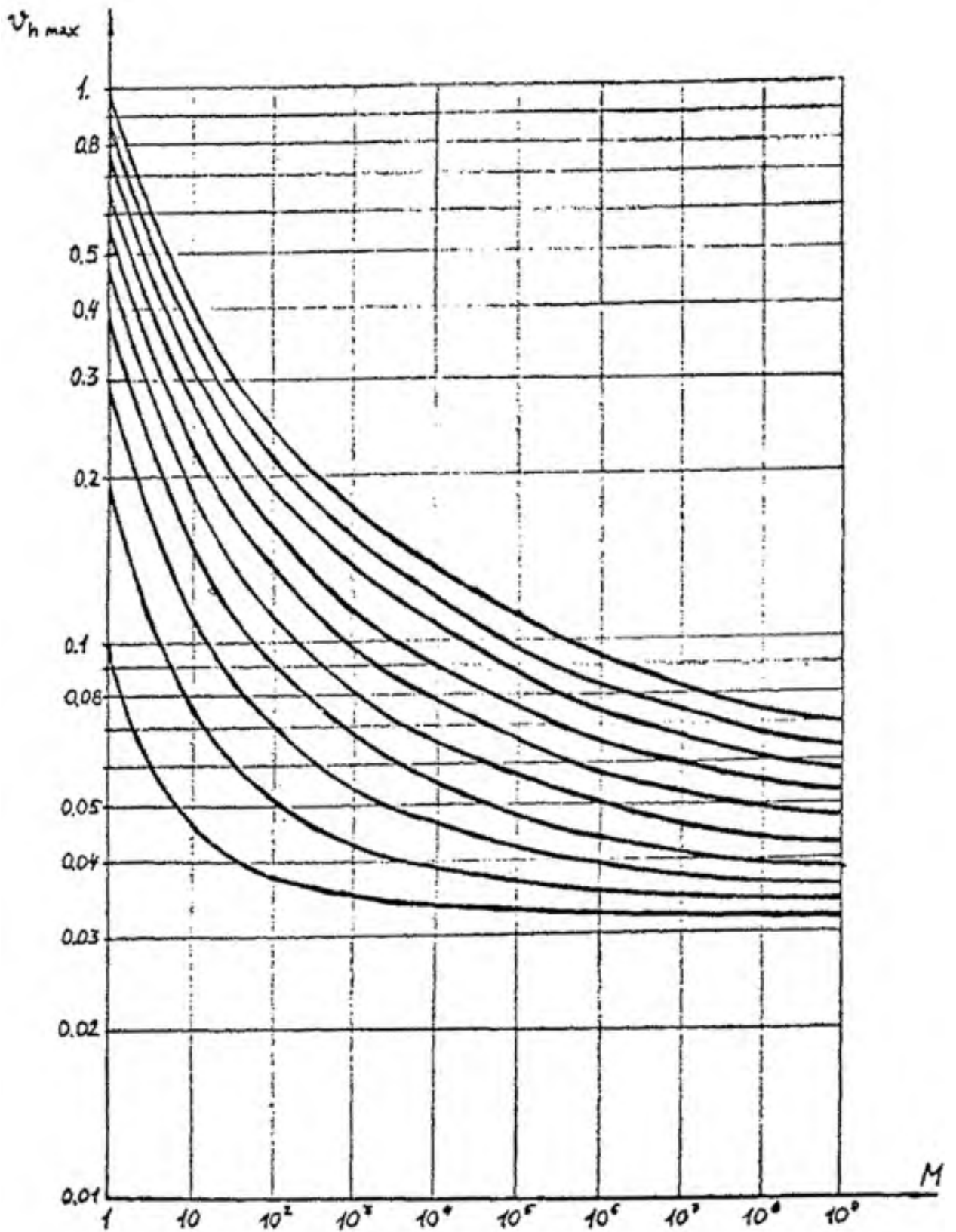


Рисунок Б1 – Коефіцієнт варіації повного розподілу глибин пітингу

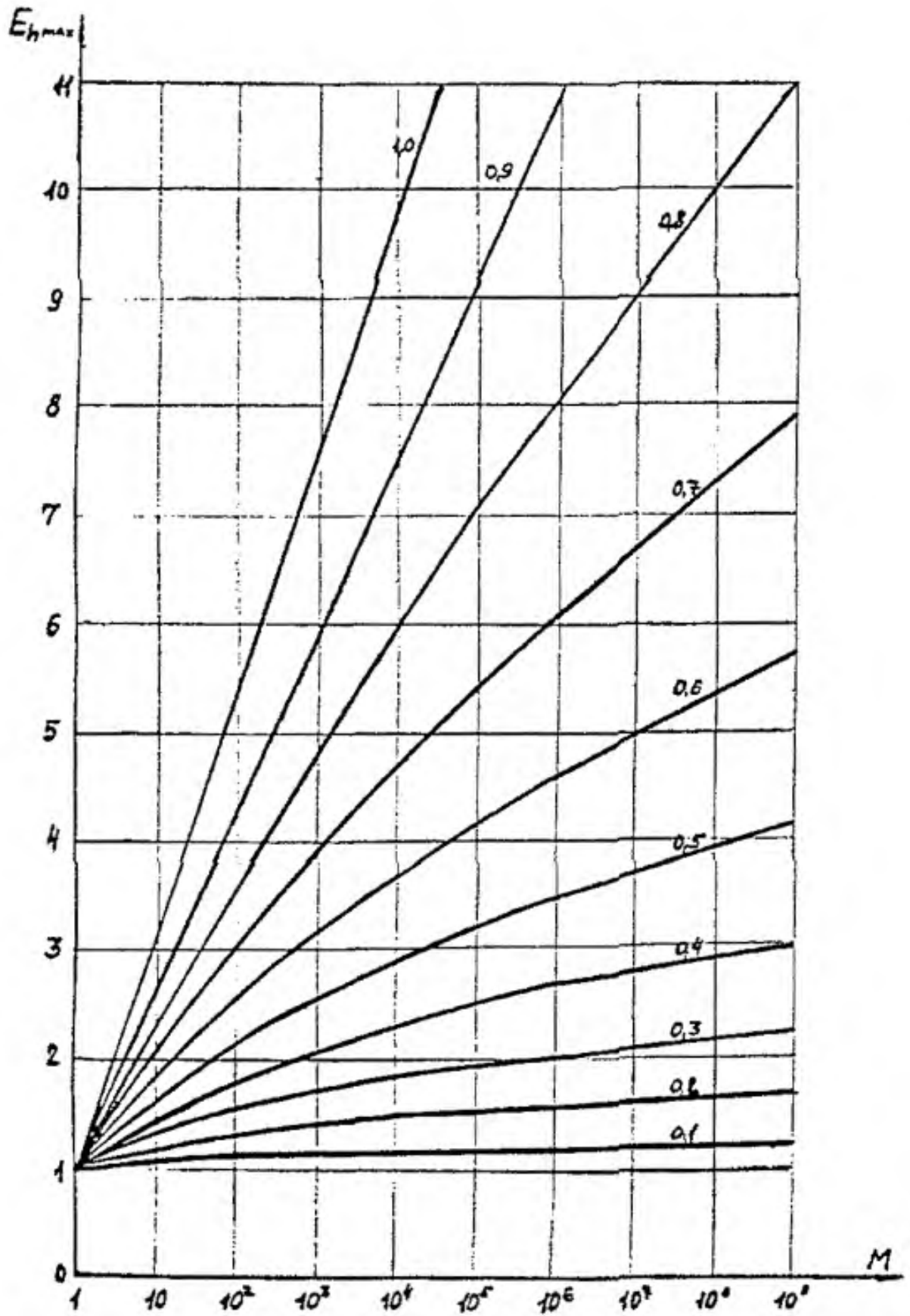


Рисунок Б2 – Графік для визначення середньої глибини руйнування h

ДОДАТОК В

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

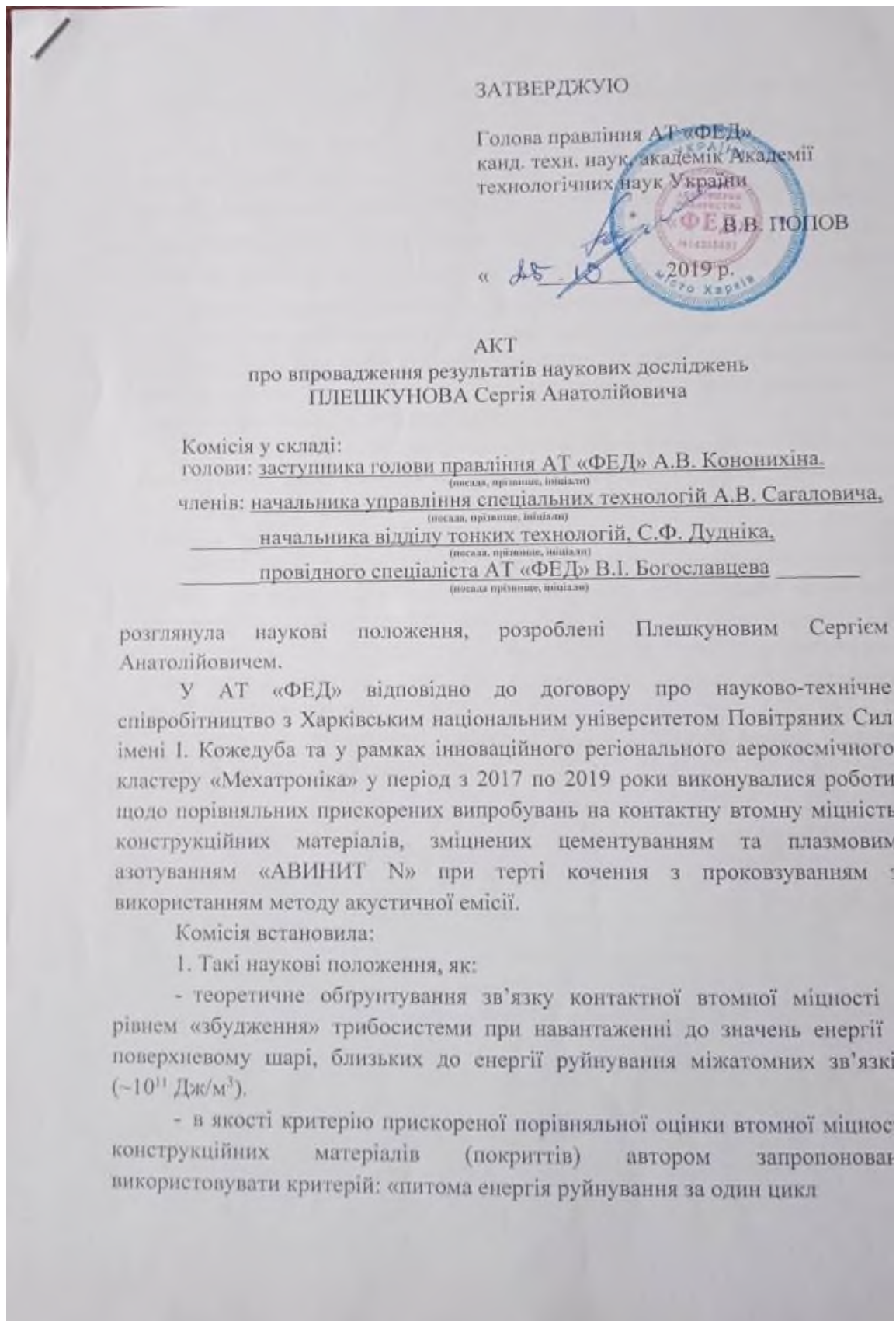


Рис. В.1. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи (1 стор.)

навантаження): $\bar{E}_{\text{пору}} = \frac{E_{\text{макс}} - (E_0 + E_{\text{імп}})}{n_{\text{ц}}}$, де $\bar{E}_{\text{пору}}$ – питома енергія руйнування за один цикл навантаження; $E_{\text{макс}}$ – максимальна питома енергія, при якій матеріал руйнується, $E_{\text{макс}} = \text{const} = 10^{11}$ Дж/м³ (для матеріалів з близькими фізико-механічними властивостями); E_0 – початкова питома енергія руйнування від дефектів, закладених при виготовленні деталі; $E_{\text{імп}}$ – питома енергія імпульсного навантаження; $n_{\text{ц}}$ – кількість циклів до початку втомного руйнування, яке реєструється методом акустичної емісії.

- Науково обґрунтована методика прискореної оцінки показників контактної втомної міцності при проведенні порівняльних випробувань конструкційних матеріалів при терті кочення з проковзуванням з використанням методу акустичної емісії.

2. Запропонована методика використана при проведенні порівняльних випробувань на контактну втомну міцність зразків, зміцнених цементуванням та плазмовим азотуванням «АВІНІТ N» з контактним навантаженням $\sigma_{\text{макс}} = 1000$ МПа.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень можуть служити основою для проведення дослідних робіт з використання плазмових технологій азотування замість традиційної технології цементування для підвищення контактної міцності поверхонь деталей високонавантажених агрегатів трансмісій та насосів-регуляторів шестеренного типу паливних систем повітряних суден.

3. Наукові положення, розроблені особисто Плешкуновим Сергієм Анатолійовичем, впроваджені.

Голова комісії: _____

(підпис)

А.В. КОНОНИХІН

(прізвище, ініціали)

Члени комісії: _____

(підпис)

А.В. САГАЛОВИЧ

(прізвище, ініціали)

(підпис)

С.Ф.ДУДНІК

(прізвище, ініціали)

(підпис)


В.І. БОГОСЛАВЦЕВ

(прізвище, ініціали)

Рис. В.2. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи (2 стор.)

Согласовано

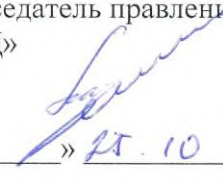
Зам. председателя правления АО
«ФЭД»



Кононыхин А.В.
« 10 » _____ 2019

Утверждаю

Председатель правления АО
«ФЭД»



Попов В.В.
« 25.10 » _____ 2019

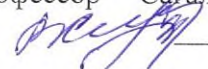
Научно-технический отчет
№ 75-УГК/2019 от 25.10.2019г.

Сравнительные триботехнические испытания на контактную усталостную прочность при трении качения с проскальзыванием поверхностей, упрочненных цементацией и плазменным азотированием АВИНИТ N, с контактными нагрузками $\sigma_{\max} \approx 1000$ Мпа.

От АО «ФЭД»

Руководитель работы:


Главный технический руководитель д.т.н., профессор Сагалович В. В.

 04.10.19

Ответственный исполнитель:

Начальник Управления Специальных Технологий

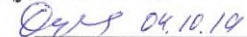
Сагалович А. В.

 04.10.19

Исполнители:

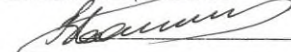
Начальник отдела тонких технологий к.т.н.

Дудник С. Ф.

 04.10.19

Ведущий конструктор

Богославцев В. И



От ХНУПС им. Кожедуба

Научный руководитель к.т.н., доцент

Стадниченко Н. Г.



Ответственный исполнитель:


к.т.н., с.н.с.

Джус Р.М.



Исполнитель:

Плешкунов С.А.



От ГП «Ивченко Прогресс»

Ведущий конструктор

Единович А.Б.

 10.10.19

Харьков, 2019.