

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

Варваров Валерій Володимирович



УДК 621.891

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ТРИБОСИСТЕМ В АГРЕГАТОБУДУВАННІ
ПЕРЕВЕДЕННЯМ ЇХ В РЕЖИМ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА
ЗНОШУВАННЯ

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківський національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Войтов Віктор Анатолійович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
завідувач кафедри транспортних технологій і логістики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Аулін Віктор Васильович,
Центральноукраїнський національний технічний
університет (ЦНТУ),
професор кафедри експлуатації та ремонту машин

кандидат технічних наук
Цимбал Богдан Михайлович,
Національний університет цивільного захисту України,
доцент кафедри охорони праці та техногенно-
екологічної безпеки

Захист дисертації відбудеться «08» квітня 2021 року о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.832.03 при Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: пр. Московський, 45, ауд. 204, м. Харків, 61050.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002.

Автореферат розісланий «02» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю. О. Градиський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Особливо гостро проблема підвищення ресурсу трибосистем стоїть в агрегатобудуванні, перш за все в авіаційному. Так для сучасних літальних апаратів вартість виготовлення паливного насоса коливається в межах 50...70 тис. дол. США, а ремонт даних типів насосів займає практично половину цієї вартості. Тому вимоги до ресурсу агрегатів надзвичайно високі і зростають з кожним роком.

Сучасний розвиток трибоматеріалознавства дозволив сформулювати новий, достатньо ефективний спосіб зниження тертя та зношування різних трибосистем шляхом трибомодифікування поверхневого шару. Метою такого підходу є створення найбільш сприятливих умов мікроконтактної квазіпружної взаємодії, що виникає на рівні мікрорельєфу.

Розгляд квазіпружної взаємодії з позиції нерівноважної термодинаміки дозволив висунути гіпотезу, що така взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виведення з трибосистеми (ТС) накопиченої внутрішньої енергії. Серед цих факторів основний вклад приходиться на кінетичну (хвильову) складову сили тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії мікронерівностей поверхонь, і проковзуванні при їх розгоні. Це дає більш широке розуміння умов досягнення аномально низького тертя та зношування.

Таким чином, дослідження у цьому напрямі є актуальними та присвячені розв'язанню важливої науково-технічної проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09.2011р. № 3715-VI та п.2 постанови Кабінету Міністрів України від 17.05.2012 р. № 397 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012-2016 рр.», планом науково-дослідних робіт ХНТУСГ ім. Петра Василенка та ХНУПС ім. Івана Кожедуба і була складовою частиною НДР «Діагностика-В», ДР №0101U001463.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є підвищення зносостійкості (ресурсу) трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування (АНТЗ).

Відповідно до мети в роботі вирішувалися наступні **завдання**.

1. Розробити модель контактної взаємодії мікронерівностей поверхонь трибоелементів та механізмів накопичення енергії у підповерхневому шарі, сформованому за реологічним принципом Шведова, та визначити механізм формування хвильової складової сили тертя.

2. Розробити та обґрунтувати механізм структурування поверхневого шару ТС для дисипації накопиченої енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Удосконалити структурно-енергетичну модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування.

3. Розробити методичний підхід для розробки способу модифікації поверхневого шару досліджуваних трибосистем для досягнення в них передумов переведення в режим аномально низького тертя та зношування з метою подовження їх ресурсних показників.

4. Виконати комплекс триботехнічних досліджень та провести спільно з АТ «ФЕД» стендові випробування агрегатів з модифікованими трибосистемами за розробленою технологією, розрахувати економічний ефект.

5. Виконати порівняльні дослідження амплітудно-частотних характеристик при нормальному механохімічному терті та зношуванні та при аномально низькому терті та зношуванні, обґрунтувати механізми самоорганізації трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування.

Об'єкт дослідження: процеси тертя та зношування в трибосистемах, які працюють в режимі аномально низького тертя та зношування.

Предмет досліджень: підвищення зносостійкості трибосистем шляхом поверхневого модифікування для досягнення умов АНТЗ.

Методи дослідження: Теоретичні дослідження базувалися на системному аналізі та теорії надійності технічних систем. Експериментальні дослідження ґрунтувалися на теорії планування експерименту і математичної статистики. Дослідження на тертя та зношування проводили за стандартними методиками на серійній машині тертя 2070 СМТ-1. Комплексні металофізичні дослідження проводили з використанням сучасних методів вимірювання шорсткості, мікротвердості, кількісного хімічного складу поверхневого шару. Параметри зносостійкості оцінювалися методом акустичної емісії в реальному масштабі часу та ваговим методом після довготривалих випробувань. Обробка результатів експериментів виконувалася із застосуванням стандартних комп'ютерних програм, розроблених на базі математичної статистики.

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

Вперше:

- проведено амплітудно-частотний аналіз коливань в умовах аномально низького тертя та зношування. Зафіксовано дві області піків амплітудно-частотної характеристики при аномально низькому терті та зношуванні: у низькочастотній області – від молекулярно-механічної складової сили тертя (яка спостерігається і при нормальному терті) та у високочастотній області – від хвильової складової сили тертя (яка притаманна тільки умовам аномально низького тертя та зношування). Зафіксовано рівність амплітудних характеристик коливань від обох складових;

- отримано експериментальні залежності, які дозволяють зафіксувати перехід трибосистеми від аномально низького тертя до негативного тертя (від'ємний коефіцієнт тертя) при зміні умов тертя двократним зниженням діючих контактних навантажень на сталому режимі аномально низького тертя та зношування. Показано, що основним механізмом руйнування поверхонь при негативному терті є значне перевищення хвильової складової сили тертя над молекулярно-механічною за рахунок накопиченої енергії у підповерхневому шарі;

- встановлено реологічну будову поверхневого шару трибосистем, при якій значно зростає хвильова складова сили тертя та виникають умови для переходу трибосистеми до аномально низького тертя та зношування. Доведено, що одна з поверхонь трибосистеми повинна бути квазіжорстким тілом, а друга повинна мати реологічну будову за моделлю Шведова: поверхневий шар – квазіпружний (тіло Гука), підповерхневий шар – пружнопластичний

(комбінація тіл Максвелла та Сен-Венана).

Отримали подальший розвиток:

- структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Для досягнення аномально низького тертя та зношування повинно бути два канали дисипації енергії: перший – на рівні контактної взаємодії, а другий – додатковий – за рахунок накопиченої у підповерхневому шарі енергії.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено практичні рекомендації з модифікування бронзових елементів трибосистем «сталь-бронза» за рахунок насичення їх поверхневого шару кремнієм за певною технологією на етапі фінішної обробки, при якому відбувається направлена зміна реологічної будови поверхневих шарів трибосистем «сталь-бронза» та в них виникають умови аномально низького тертя та зношування, що значно підвищує їх ресурс. Результати роботи впроваджено на підприємстві АТ «ФЕД» при виготовленні приводів-генераторів ГП21КМ літаків сімейства Ан-148/158/178, ресурс яких збільшився більш, ніж в 4 рази.

Особистий внесок здобувача.

Основні результати роботи отримані здобувачем особисто [6, 7]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві здобувачу належать: порівняльна оцінка методом акустичної емісії (АЕ) ресурсних показників ТС після модифікування поверхневого шару [3]; методологія використання акустичної емісії для реєстрації аномально низького тертя та зношування [2]; визначено реологічну будову поверхневих шарів трибосистем при досягненні аномально низького тертя та зношування (АНТЗ) [4]; визначено умови формування імпульсу сили кінетичної взаємодії мікрошорсткостей при настанні рівноваги між хвильовою та молекулярно-механічною складовою сили тертя та запропоновано розрахункову залежність імпульсу сили від хвильової складової, яка враховує вплив зовнішніх факторів [5]; спосіб порівняльної оцінки зносостійкості трибосистем, які працюють в режимі АНТЗ [1]; визначено роль шорсткості поверхонь як фактора саморегулювання при зміні зовнішніх умов тертя та проведено амплітудно-частотний аналіз коливань в умовах аномально низького тертя та зношування. [8, 9].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи та результати наукових розробок доповідались на: VI науковій конференції ХУПС ім. І. Кожедуба «Новітні технології для захисту повітряного простору» (Харків, ХУПС, 2010 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2010 р.); IX науковій конференції ХУПС ім. І. Кожедуба «Новітні технології для захисту повітряного простору» (Харків, ХУПС, 2013р.); Науково-практичній конференції «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки» (Київ, ДНДІА, 2013 р.); Науково-практичній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», (Київ, ЦНДІ ОВТ, 2013 р.); XV науково-технічній конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» (Чернігів, ДНВЦ ЗСУ, 2015 р.); Міжнародній науковій конференції «Перспективи розвитку озброєння і

військової техніки», (Львів: НАСВ, 2017); XX міжнародній науково-технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика», (Київ, НАУ, 2019 р); XV Міжнародному форумі молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» (Харків, ХНТУСГ ім. Петра Василенка).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 9 наукових праць (2 одноосібні), з них 7 статей у фахових виданнях, 2 – у закордонних виданнях, з них 1 – в базі SCOPUS, 9 публікацій матеріалів і тез конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 192 сторінки, у тому числі 3 додатки. Обсяг основного тексту дисертації становить 184 сторінки, 63 рисунка, 16 таблиць. Список використаних джерел нараховує 171 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовані мета і завдання досліджень, наведені основні отримані автором результати, що визначають наукову новизну і практичну значущість роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз інформації щодо механізмів накопичення та дисипації енергії, яка підводиться ззовні до трибо систем (ТС), як факторів зниження тертя та зношування. Проаналізовано термодинамічні умови переходу трибосистем до аномально низького тертя та зношування. Визначено фізичні основи хвильового тертя, шляхи досягнення аномально низького тертя та зношування при зовнішньому терті. Систематизовано відомості про методи контролю аномально низького тертя та зношування.

Аналіз сучасних підходів до зниження тертя та зношування вітчизняних та закордонних вчених показав, що перехід від нормального механо-хімічного тертя та зношування до аномально низького тертя та зношування можливий після формування поверхневого шару з певними реологічними характеристиками. В якості основного джерела перетворення енергії виступають енергетичні дефекти – фонони – кванти хвиль розтягування-стиснення і зсуву (звукові хвилі), які являються основною причиною енергетичного знищення.

Цей аналіз показав, що зараз повністю відсутні дані про направлене модифікування поверхневого шару для досягнення реологічних умов, які забезпечують зворотну пружну трансформацію енергії зовнішнього механічного руху за рахунок формування хвильової складової сил тертя, яка за своїм значенням, при певних умовах, може дорівнювати значенню молекулярно-механічної складової. Тому пошук шляхів досягнення умов аномально низького тертя та зношування в реальних трибосистемах залишається актуальною задачею. На цій підставі обґрунтована мета та сформульовані завдання дослідження.

У **другому розділі** розглянуто методичний підхід, який використано в роботі. Обґрунтовано вибір матеріалів, які застосовуються при виконанні досліджень та методів дослідження. Модифікування трибосистем для досягнення певних реологічних умов трансформації енергії проводили насиченням поверхневих шарів бронзових зразків кремнієм різними методами.

Порівняльні трибологічні дослідження на тертя та зношування проводились на модернізованій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою

«кільце-кільце». Матеріалами для випробувань було обрано сталь 30ХЗВА та бронзи ВБ23НЦ і БрО10С2НЗ з огляду на їх широке використання при виготовленні агрегатів авіаційної техніки (аксіально-поршневих насосів та приводів генераторів літаків сімейства Ан-148/158/178). Робоче середовище при терті – авіаційне паливо ТС-1. При цьому реєстрували момент тертя (з перерахунком у коефіцієнт тертя), середню поверхневу температуру зразків безконтактним методом, ваговий знос за 8 годин випробувань та швидкість зношування у реальному масштабі часу методом акустичної емісії (АЕ).

Для аналізу фізико-механічних властивостей поверхневих шарів проводили вимірювання твердості за методом Роквелла, а після модифікування поверхонь – за методом Віккерса. Мікротвердість вимірювали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 відповідно до ГОСТ 9450-60. Виконувалась непряма оцінка мікротвердості по глибині робочого шару зразків після випробувань. Для цього проводили вимірювання мікротвердості при навантаженнях 0,5; 1 та 2 Н. Шорсткість і профіль поверхні зразків визначали двома методами: за допомогою профілометра-профілографа TR200 фірми JENOPTIK, відповідного стандартам ISO 4287-1997, та фрактографічні особливості поверхонь – на мікроскопі ЛСДФПМ. Мікроструктуру та розподіл компонентів і їх ідентифікацію в поверхневих шарах трибоелементів вивчали на растровому електронному мікроскопі РЭМ-106. Вимірювання амплітудно-частотних характеристик для досліджуваних трибосистем проводили осцилографом Rigol DS1052E з широкосмуговим датчиком акселерометром фірми Brüel & Kjaer типу 4335.

У третьому розділі було розроблено структурно-енергетичну модель перетворення енергії в умовах АНТЗ, яка дає можливість формулювання рекомендацій по структурній модифікації поверхневого шару реальних трибосистем з метою підвищення їх ресурсних показників та коефіцієнту корисної дії. Було сформульовано основні допущення та обмеження, прийняті при розробці моделі. Так, визначено, що для досягнення АНТЗ один з трибоелементів (рухомий) повинен бути квазіжорстким тілом, а інший трибоелемент (нерухомий), повинен мати реологічну будову поверхні за моделлю Шведова. Оскільки в результаті контактної взаємодії ідеально пружних мікровиступів формується хвиля напружень, яка бере участь в процесі дисипації енергії, що підводиться ззовні, то кількісна оцінка сили тертя F_{fr} з урахуванням її хвильової складової F_w , буде мати наступний вигляд:

$$F_{fr} = |F_a + F_d| - |F_w|; \quad F_{fr} \leq |F_w|, \quad (1)$$

де – F_a – молекулярна (адгезійна) складова сили тертя;

F_d – механічна (деформаційна) складова сили тертя.

Хвильова складова F_w є результатом контактної взаємодії, а тому входить у склад деформаційної складової F_d як фактор, який впливає на силу тертя F_{fr} . Однак, враховуючи досвід закордонних вчених, хвильова складова F_w може бути самостійним фактором впливу на силу тертя F_{fr} . У цих експериментах F_w виникала шляхом утворення в поверхневих шарах ТС поверхневих хвиль за допомогою спеціальних генераторів. Тому хвильова складова F_w може бути виділена у рівнянні (1) окремим членом, відокремленим від загальної деформаційної складової F_d . Крім того, такий підхід дає можливість пояснити

короткочасний перехід ТС, яка працює в умовах АНТЗ, в область від'ємного тертя на перехідних режимах.

Розроблено модель контактної взаємодії мікроступів трибоелементів при формуванні хвильової складової сили тертя. Загальна енергія у цьому випадку в результаті пружної взаємодії мікроступів дорівнює:

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho(v_1^2 + v_2^2\delta)}{2}, \quad (2)$$

де E_k – кінетична частина енергії;

E_p – потенційна частина енергії;

ρ – щільність середовища;

v – фазова швидкість хвиль у середовищі (v_1 – при проковзуванні мікроступів поверхні, v_2 – при гальмуванні мікроступів);

δ – відносна деформація.

Для пояснення квазіпружної взаємодії ефективного об'єму мікроступів використовується уявлення її, як марківського процесу з двома дискретними станами, зокрема «двосторонньої реакції», що пропонує можливість в системі тільки перехід $1 \rightarrow 2$ (1-ий стан – відновлення, 2-ий стан – розпад), наприклад, деформації та відновлення первісної форми ефективного об'єму.

Для зазначеного процесу справедливе рівняння А. М. Колмогорова. Вирішуючи його при прийнятих початкових умовах $t = 0, p_1 = 1$ отримано вираз для імпульсу сили на кожному елементарному мікроконтакті.

$$v(x) = \frac{C}{B(x)} e^{\int_0^x \frac{A(S)}{2B(S)} ds}, \quad (3)$$

де C – постійна, що визначається з умов нормування;

A, B – постійні коефіцієнти;

S – питома значення ентропії.

При постійних коефіцієнтах A, B можна прийняти, що:

$$\int_0^{x(t)} \frac{A(S)}{2B(S)} dS = \frac{Ax}{2B} = -\frac{\Delta E_w}{\Theta}, \quad (4)$$

де ΔE_w – енергія розсіювання при контактній взаємодії;

Θ – модуль канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту.

Згідно законів квантової механіки, кожне елементарне збудження можна розглядати як квазічастку – фонон (енергетичний дефект твердого тіла) з квазіімпульсом \vec{v} та енергією:

$$\varepsilon(\vec{v}) = \hbar\omega(\vec{v}/\hbar), \quad (5)$$

де ε – енергія частки, що рухається;

\vec{v} – імпульс руху частки;

\hbar – стала Планка;

ω – частота коливального руху хвилі.

З урахуванням прийнятого структурування поверхні в умовах АНТЗ, енергія розсіювання кожного механічного кванту дорівнює:

$$\Delta E_{MK} = n(\hbar\omega(\vec{v}/\hbar)), \quad (6)$$

де n – ступінь збудження нормального коливання ($n = 0, 1, 2, \dots$). Це кількість фонових з імпульсом $\hbar\vec{q}$ (\vec{q} – хвильовий вектор, напрямок якого співпадає з

напрямок розповсюдження хвилі) та енергією $\hbar\omega$.

Для ТС, яка працює в умовах АНТЗ, енергія розсіювання дорівнює:

$$\Delta E_{TC} = \Delta E_{mk} \hat{\varepsilon}, \quad (7)$$

де $\hat{\varepsilon}$ – кількість механічних квантів, приймаючих участь у взаємодії.

Так як n – будь яке ціле число, то фонони, як і фотони, підпорядковуються статистиці Бозе-Ейнштейна.

Тому підсумковий вираз для імпульсу \vec{v}_{TC} сили тертя трибосистеми, яка працює в режимі АНТЗ, матиме такий вигляд:

$$\vec{v}_{TC} = e \frac{\Delta E_{mk} \hat{\varepsilon}}{\Theta}. \quad (8)$$

За даною моделлю так само формується імпульс сили і від молекулярно-механічної складової сили тертя. Відмінністю є лише те, що від хвильової складової джерелом цього імпульсу $\vec{v}_{TC.k}$ є зміна кінетичної енергії ΔE_k , а джерелом імпульсу сили $\vec{v}_{TC.n}$ від молекулярно-механічної складової є зміна потенційної енергії ΔE_n .

В умовах АНТЗ одночасно виконуються дві роботи. Перша робота з подолання сил тертя від молекулярно-механічної складової сили тертя, яка оцінюється зміною термодинамічного потенціалу ΔG_n . Результатом цієї роботи є зміна (накопичення) потенційної енергії ΔE_n з виділенням тепла Q_n . У результаті взаємодії на плямах фактичного контакту формується імпульс сили $\vec{v}_{TC.n}$.

В процесі проковзування в ТС виконується друга робота внутрішніх сил, яка оцінюється термодинамічним потенціалом ΔG_k . Результатом цієї роботи є зміна кінетичної енергії ΔE_k , яка виділяється з поглинанням із ТС тепла Q_k та формуванням імпульсу сили $\vec{v}_{TC.k}$.

В умовах АНТЗ $\vec{v}_{TC.n} = \vec{v}_{TC.k}$ та підтримується рівновага між виділеною та поглиненою теплотою $Q_n = Q_k$, що пояснюється прагненням будь-якої системи до досягнення мінімуму вільної енергії.

Схематично робота ТС в умовах АНТЗ може бути пояснена рисунком 1.



Рис. 1. Схематичне зображення роботи ТС в умовах АНТЗ

При зміні зовнішніх умов тертя змінюється ступінь збудження ТС – n , яка залежить від кількості механічних квантів $\hat{\varepsilon}$. Будь-яка зміна в ТС, яка виводить її з рівноваги, згідно принципу Ле Шательє ініціює в ТС процеси, які намагаються повернути її у вихідне положення. За ці процеси у моделі відповідає модуль

канонічного розподілу енергії Θ , який регулюється мікрогеометрією поверхневого шару ТС.

Четвертий розділ присвячений вирішенню третьої, четвертої та п'ятої задач дисертаційного дослідження. Для цього було проведено експериментальні дослідження з модифікації поверхневого шару бронзових зразків лабораторних трибосистем. Послідовність обробки поверхонь тертя бронзових зразків включала: безбразивну притирку; модифікацію поверхневого шару обробкою карбідом кремнію за технологією АТ «ФЕД»; модифікацію двохстадійною фінішною обробкою поверхневого шару карбідом кремнію та інструментом з мінералу групи амфіболів (нефриту) з оптимізованим режимом обробки за технологією ПИ 02-17 (АТ «ФЕД»). Виконано комплексні металофізичні дослідження для пояснення фізичної суті переходу трибосистеми до АНТЗ за рахунок появи хвильової складової сили тертя. Це підтверджувалось, також, проведенням порівняльних досліджень амплітудно-частотних характеристик ТС при нормальному механо-хімічному терті та зношуванні та при АНТЗ.

Результати попередніх порівняльних досліджень при різних способах модифікування поверхонь показали (рис. 2, рис. 3), що фінішна обробка бронзових зразків з використанням карбіду кремнію призводить до істотного зниження зносу (у 29 разів) та коефіцієнту тертя (у 2,7 рази); при використанні нефриту – зниження зносу (до 15 разів) та коефіцієнту тертя (у 1,4 рази). При подвійному модифікуванні карбідом кремнію та нефритом знос був більшим за модифікування лише карбідом кремнію, але на сталому режимі за параметрами АЕ та трибологічними параметрами фіксувався режим АНТЗ. Знос виникав на початковому відрізку за рахунок збільшеного припрацювання.

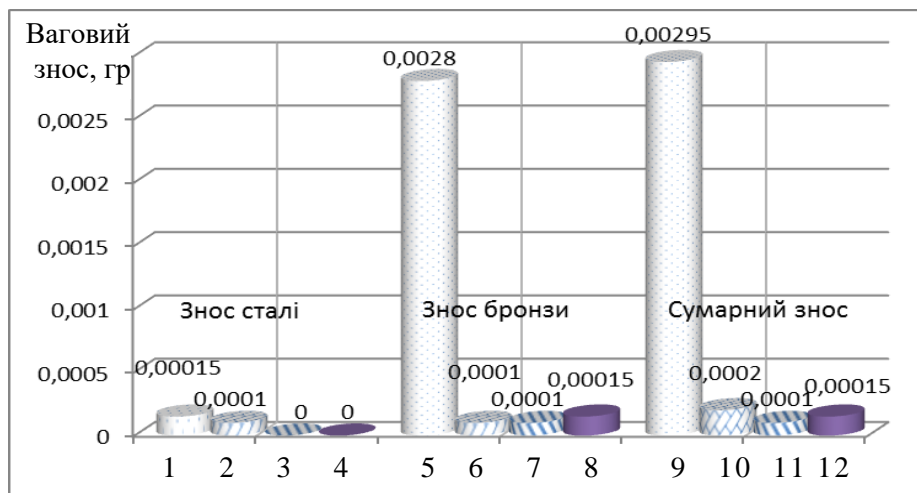


Рис. 2. Ваговий знос елементів трибосистем: 1, 5, 9 – бронза ВБ23НЦ – сталь 30Х3ВА (база); 2, 6, 10 – бронза ВБ23НЦ + нефрит – сталь 30Х3ВА; 3, 7, 11 – бронза ВБ23НЦ+карбід кремнію – сталь 30Х3ВА; 4, 8, 12 – бронза ВБ23НЦ + нефрит + карбід кремнію – сталь 30Х3ВА

Обробка кремнієм формує підповерхневий пружно-пластичний шар (на глибині від 2,5 до 4,0 мкм), а на завершальному етапі при обробці інструментом з нефриту формується пружний поверхневий шар (до глибини 1,6 мкм), що дозволяє отримати реологічну побудови поверхні тертя найбільш наближеної до моделі Шведова (табл. 1). Це пов'язано зі змінами хімічного складу поверхонь після модифікування (рис. 4) (збільшення вмісту кремнію у 100 разів у порівнянні з базовою бронзою до модифікування).

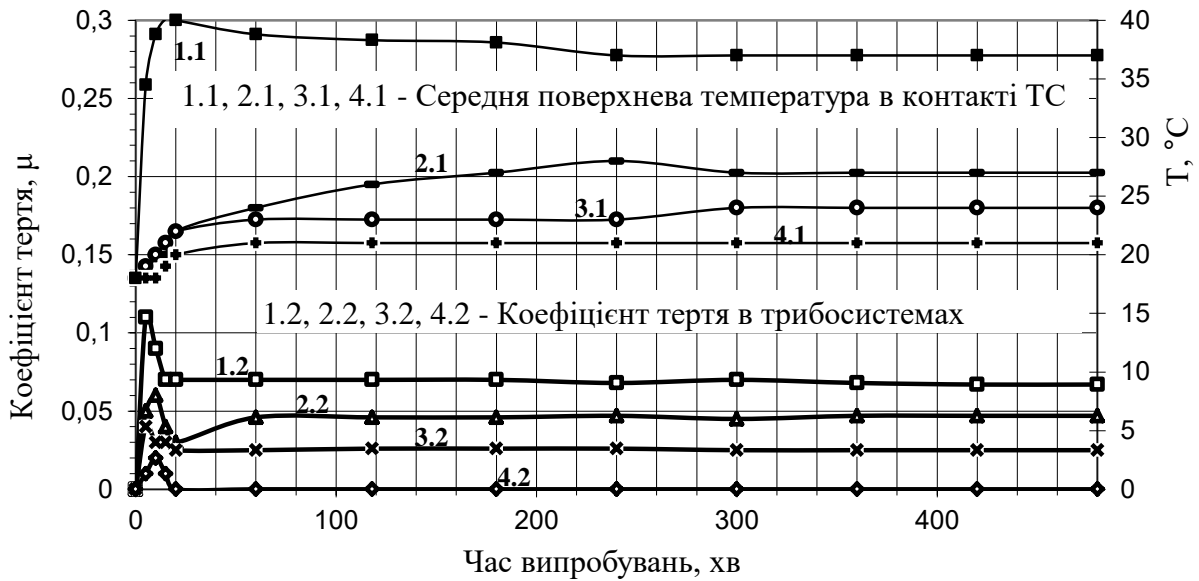


Рис. 3. Коефіцієнт тертя і середня поверхня температура в зоні контактування трибосистеми «бронза ВБ23НЦ – сталь 30Х3ВА» за часом: 1.1, 1.2 – бронза ВБ23НЦ – сталь 30Х3ВА (база); 2.1, 2.2 – бронза ВБ23НЦ + нефрит – сталь 30Х3ВА; 3.1, 3.2 – бронза ВБ23НЦ + карбід кремнію – сталь 30Х3ВА; 4.1, 4.2 – бронза ВБ23НЦ+ПИ 02 17– сталь 30Х3ВА

Таблиця 1. Мікротвердість по глибині поверхневого шару бронзових зразків, модифікованих карбідом кремнію та нефритом

Бронза ВБ23НЦ, модифікування послідовною обробкою карбідом кремнію та нефритом	Навантаження, Н		
	0,5	1,0	2,0
До випробувань	Мікротвердість, Н _μ (МПА)		
	7470	5822	6352
	Глибина відбитку, мкм		
	1,56	2,5	3,9
Після випробувань	Мікротвердість, Н _μ (МПА)		
	7420	5936	6345
	Глибина відбитку, мкм		
	1,55	2,45	3,9

Параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості після традиційної фінішної обробки та фінішної обробки з використанням технології ПИ 02-17 також суттєво відрізняються (рис. 5, табл. 2). Для зменшення часу припрацювання проводили оптимізацію режиму завершальної обробки нефритом для досягнення після неї значень шорсткості, близьких до тих, які забезпечують АНТЗ. Для вирішення поставленої задачі був спланований трьохфакторний експеримент.

Визначено, що оптимальними значеннями щодо параметрів обробки поверхонь бронзових зразків мінералом групи амфіболів до значень мікрощорсткості в межах $R_a=0,04...0,08$ складає: навантаження – 59 Н; лінійна швидкість ковзання – 0,816 м/с; час припрацювання – 5 хв.

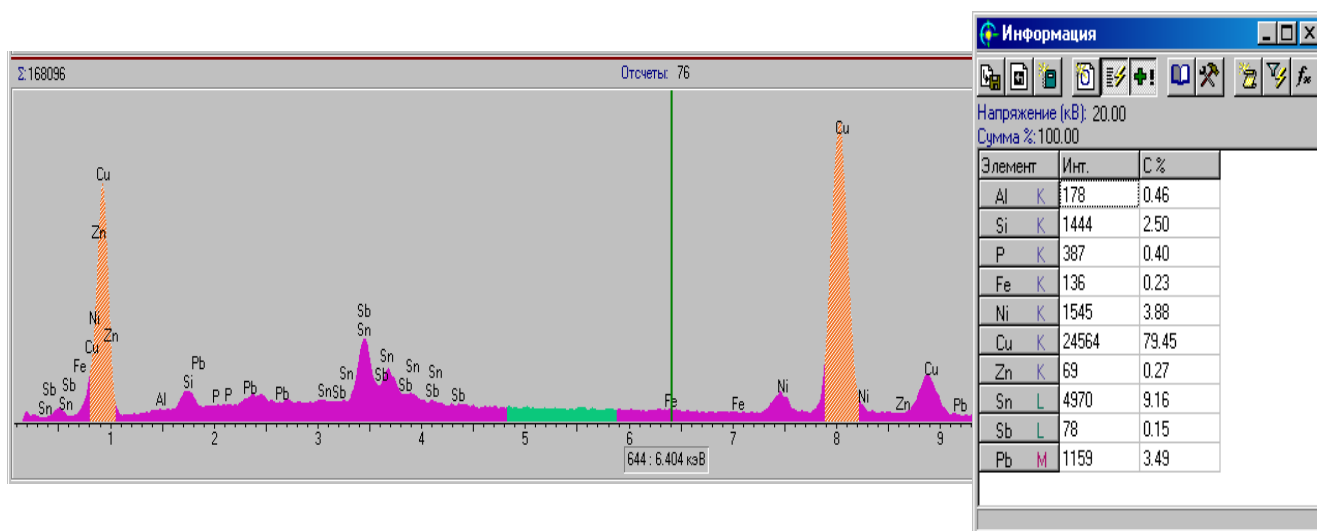


Рис. 4. Хімічний аналіз поверхні бронзового зразка після подвійного послідовного модифікування карбідом кремнію та нефритом

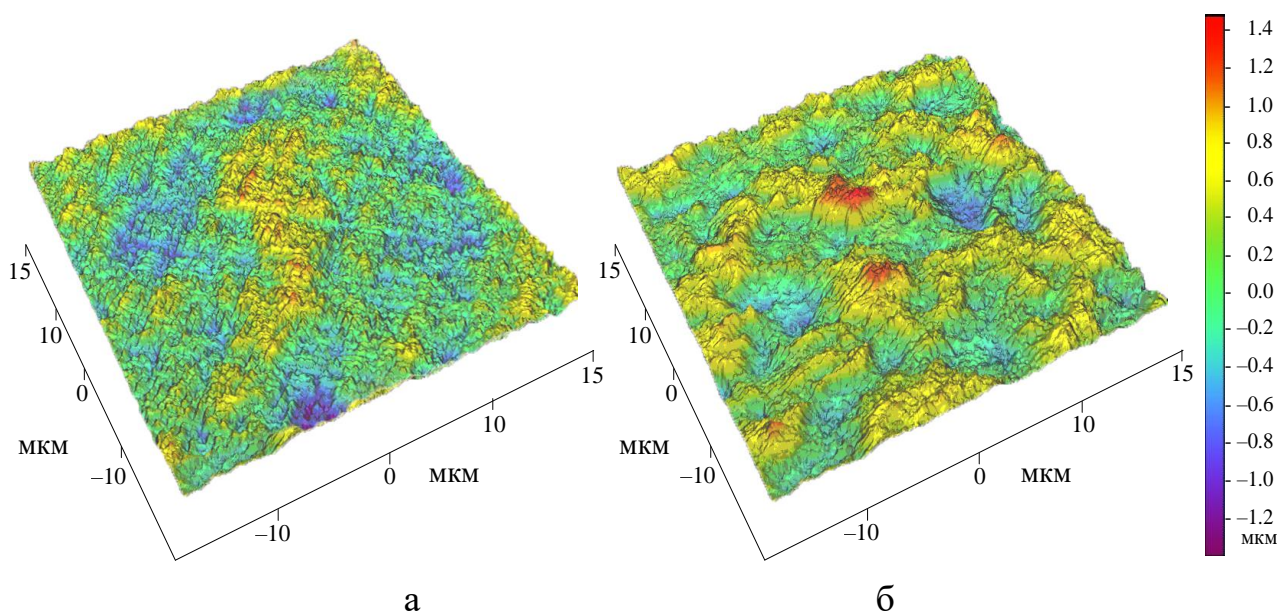


Рис. 5. Топографія поверхонь тертя бронзового трибоелемента: а – традиційна фінішна обробка; б – фінішна обробка з використанням технології ПИ 02-17

Таблиця 2. Середні значення мікроспорсткості бронзового зразка, обробленого за технологією ПИ 02-17 при роботі при навантаженні 10 МПа та 20 МПа

Умови вимірювання	Після обробки ПИ 02-17 (перед випробуваннями)	Після роботи під навантаженням 10 МПа	Після роботи під навантаженням 20 МПа
Параметри	Величина, мкм	Величина, мкм	Величина, мкм
Мінімум профілю	0,045	0,347	0,175
Максимум профілю	0,287	0,648	0,323
Діапазон вимірювань висоти	0,192	0,302	0,148
R_a	0,085	0,05	0,02
R_{max}	0,334	0,295	0,185
R_z	0,277	0,250	0,150
S_m	23,367	19,670	21,630

Для оцінки експлуатаційних показників розробленого способу модифікування проводили випробування на зносостійкість ТС «сталь 30ХВ3А-бронза ВБ23НЦ» (рис. 6), та на задиростійкість (рис. 7), (з використанням бронзи БрО10С2НЗ як такої, яка використовується для більш навантажених пар тертя).

При використанні технології ПИ 02-17, знос на режимі АНТЗ за 8 годин випробування не реєструється ні ваговим методом, ні методом акустичної емісії. Момент тертя (отже, і коефіцієнт тертя), починаючи зі стадії навантаження не збільшується і знаходиться близько нульової позначки. Тепловиділення в цьому випадку також припиняється. При тому, що параметр шорсткості R_a з 0,11 мкм зменшується до 0,05 мкм, тобто відбувається вигладжування практично у 2 рази (див. табл. 2).

Дослідження задиростійкості показали, що несуча здатність в умовах аномально низького тертя та зношування у порівнянні з базовою збільшилася практично в 7 разів (з 3 МПа до 20 МПа).

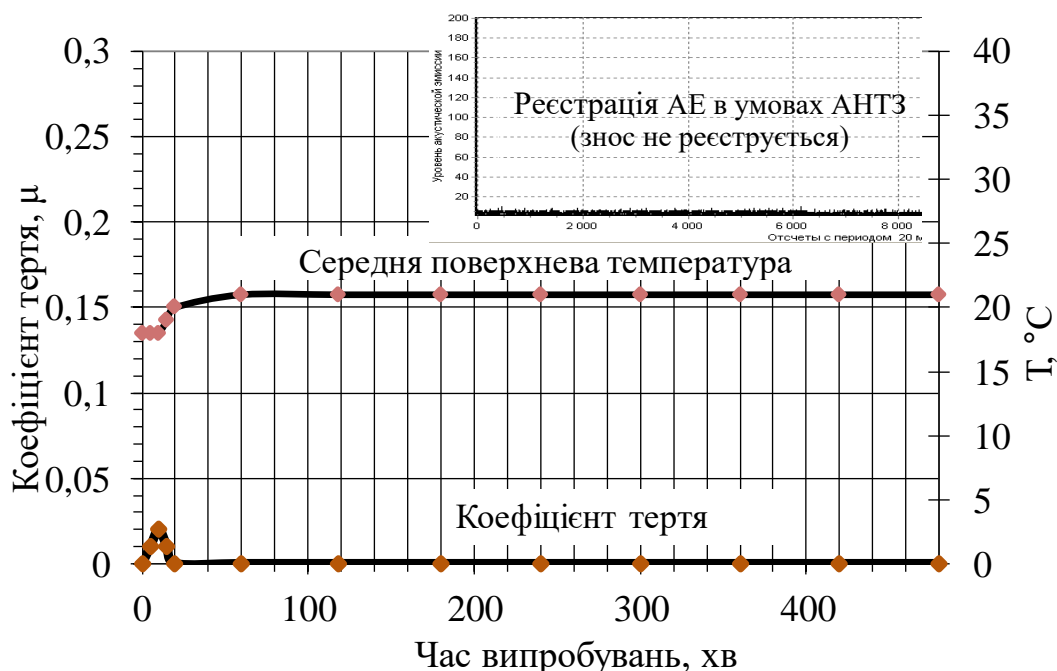


Рис. 6. Коефіцієнт тертя і температура в зоні контактування ТС 30ХВ3А-ВБ23НЦ з фінішною обробкою ПИ 02-17 при випробуваннях на зносостійкість

Мікротвердість по глибині поверхневого шару та зміна хімічного складу базових бронзових зразків, оброблених за технологією ПИ 02-17 при навантаженні 10 МПа та 20 МПа змінюється незначно.

Дослідження амплітудно-частотних характеристик при нормальному механохімічному зношуванні та при аномально низькому терті та зношуванні показали, що амплітудна частотна характеристика при АНТЗ (ПИ 02-17) суттєво відрізняється у порівнянні з базовою трибосистемою (рис. 8).

Дослідження амплітудно-частотних характеристик пружних коливань в діапазоні частот від 0 до 10 кГц показав, що при нормальному механохімічному зношуванні максимальне значення амплітуд коливань знаходиться в діапазоні 400...500 Гц. А при АНТЗ на діаграмі спостерігається два характерні максимуми: перший від 500 до 700 Гц (притаманний нормальному механохімічному зношуванню, генерується молекулярно-механічною

складовою), а другий знаходиться в діапазоні від 6 до 7 кГц (тобто на порядок вище) і відповідає хвильовій складовій сили тертя.

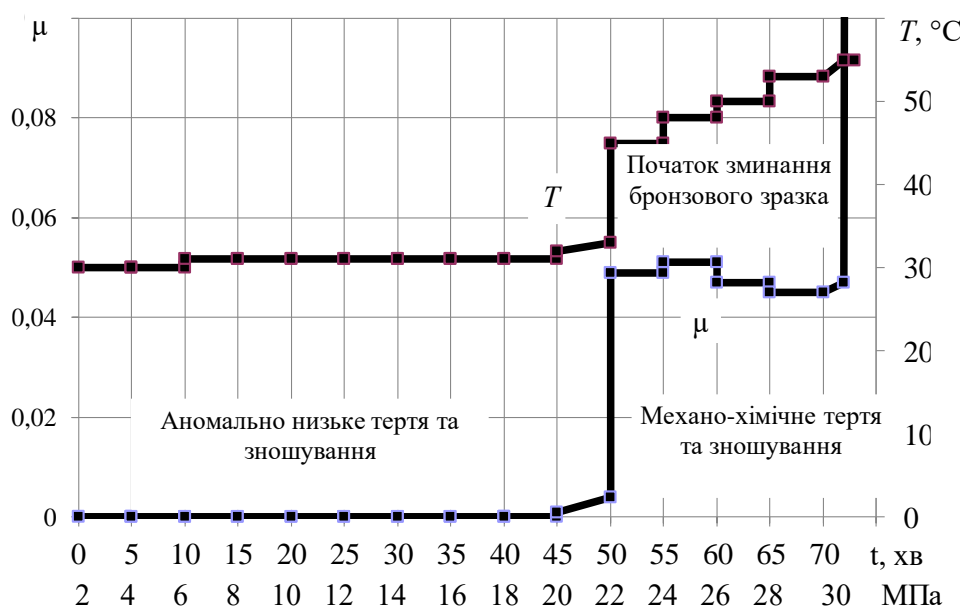


Рис. 7. Коефіцієнт тертя і температура в зоні контактування ТС 30ХВ3А-БрО10С2Н3 з фінішною обробкою ПИ 02-17 при випробуваннях на задиростійкість

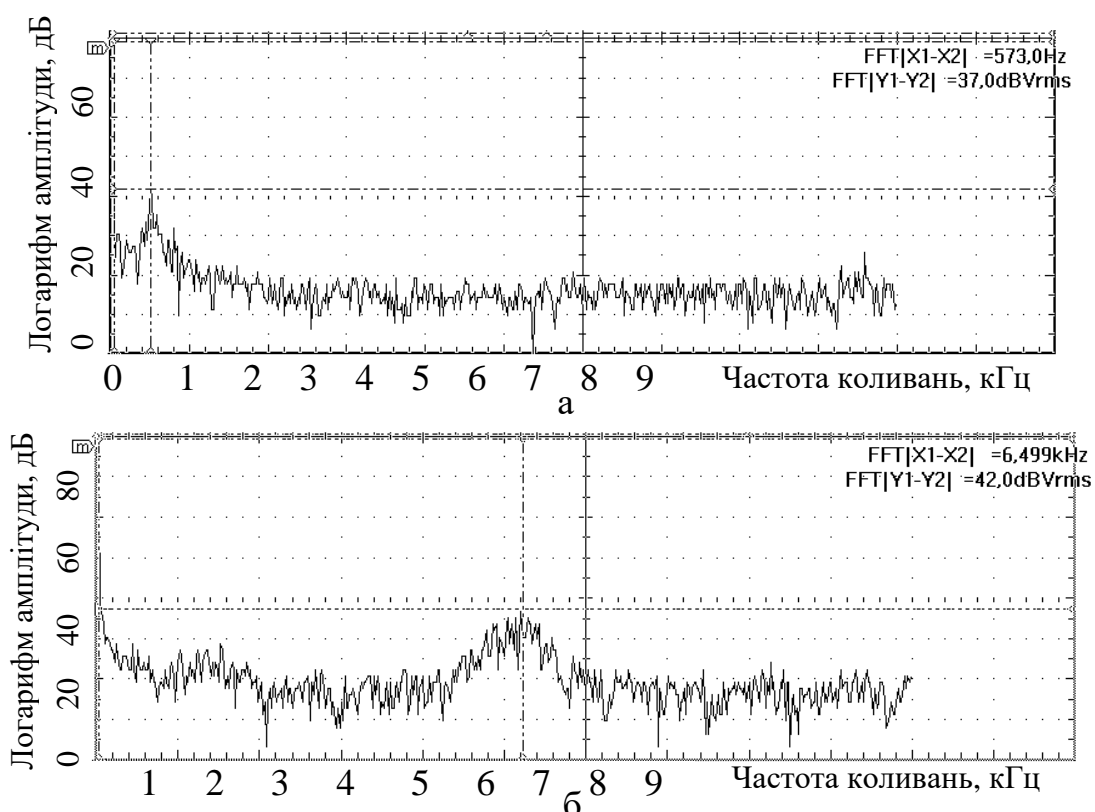


Рис. 8. Порівняльні дослідження АЧХ при АНТЗ: а – ТС, що працює в умовах нормального механохімічного тертя; б – ТС, що працює в умовах АНТЗ

Причому максимальні значення амплітуд для даних ділянок мають рівні значення і становлять 42 дБ, що свідчить про досягнення рівності між імпульсами сили від молекулярно-механічної та хвильової складових сили тертя і дає пояснення наявності аномально низького тертя та зношування.

У п'ятому розділі проведено дослідження механізмів самоорганізації трибосистеми для підтримання режиму АНТЗ при зміні зовнішніх умов роботи трибосистеми (зміна навантаження). Для аналізу використано квантомеханічний підхід до структурування поверхневого шару при формуванні хвильової складової сили тертя.

Характер зміни триботехнічних параметрів при зміні навантаження наведено на рис. 9. В цьому експерименті при досягненні аномально низького тертя та зношування, при навантаженні 20 МПа (рис. 9, а) і роботи на цьому навантаженні на протязі 20 хв. було зменшено до 10 МПа (рис. 9, б). При цьому трибосистема переходить в область «негативного» тертя, тобто змінюється вектор напрямку сили тертя. У цьому випадку порушується рівновага між молекулярно-механічною і хвильовою складовими сили тертя.

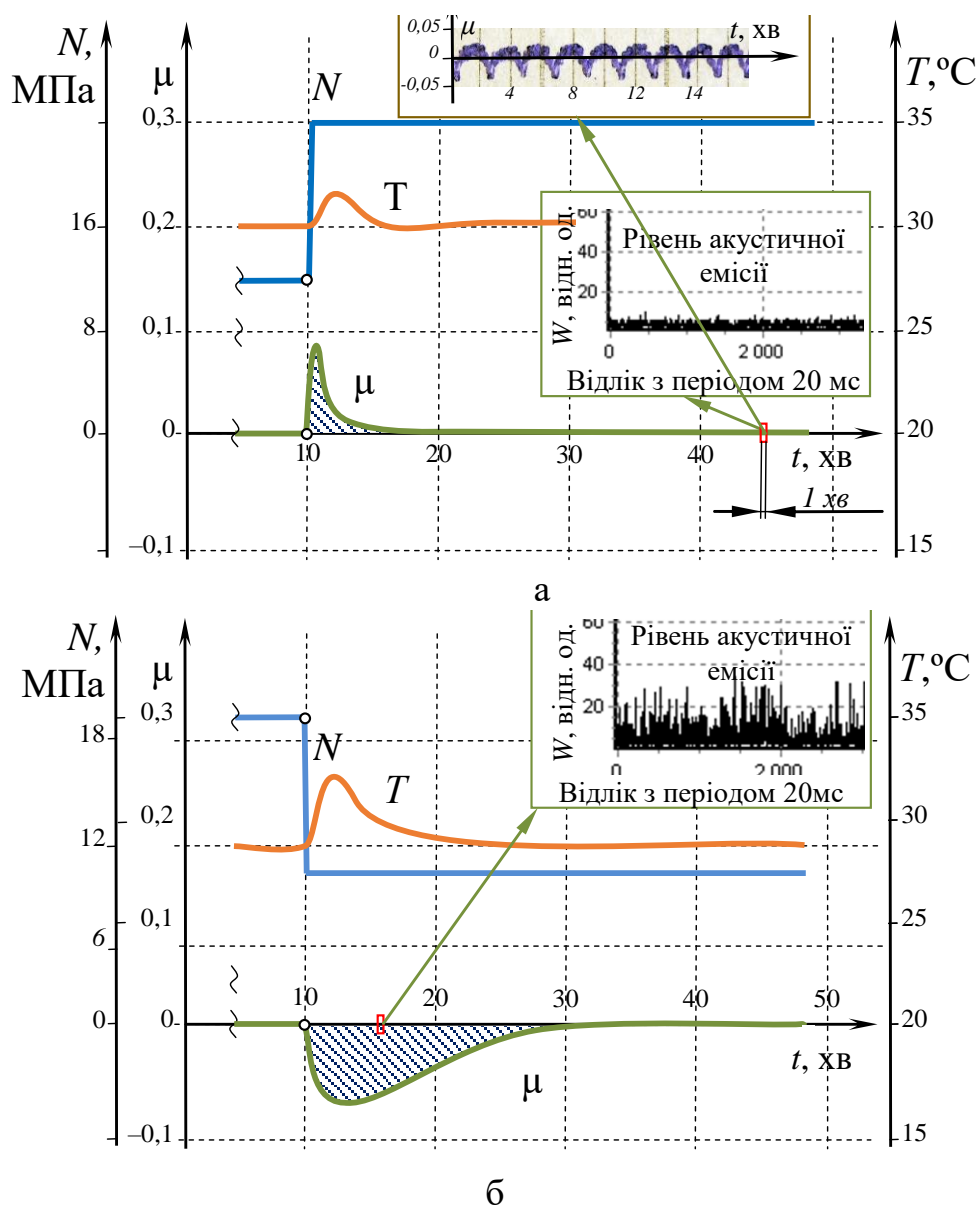


Рис. 9. Триботехнічні характеристики (коефіцієнт тертя, температура, АЕ) за часом в зоні контакту трибосистеми «30Х3ВА – БрО10С2Н3+ПИ 02-17»: а – при збільшенні навантаження з 10 МПа до 20 МПа; б – при розвантаженні з 20 МПа до 10 МПа

Результати вимірювання швидкості зношування методом акустичної емісії показали (див. рис. 9), що зменшення коефіцієнта тертя в цьому випадку

супроводжується збільшенням температури і швидкості зношування. Фізика зношування на нерівноважному режимі тертя при розвантажуванні має кардинальну відмінність в порівнянні з нормальним механохімічним тертям.

Площа під огинаючою коефіцієнта тертя щодо осі абсцис (див. рис. 9), являє собою частку енергії, яка «знищується» тертям у вигляді збереженої прихованої енергії, по відношенню до роботи зовнішніх сил (енергії зовнішнього відносного руху). При навантаженні ця енергія запасується в поверхневому шарі, а при розвантаженні вона з поверхневого шару вивільнюється, що супроводжується процесами поверхневого руйнування (зношування), які мають іншу фізичну картину (частки зносу виникають на поверхні в результаті «мікровибуху»).

Саморегулювання трибосистем, які працюють в умовах АНТЗ, здійснюється по каналу структурної ентропії S_c . Характер контактної взаємодії на плямах фактичного контакту наведено на рис. 10. Наявність саме антигравітаційної складової N_{wi} дає пояснення значного збільшення несучої здатності при переведенні ТС до АНТЗ.

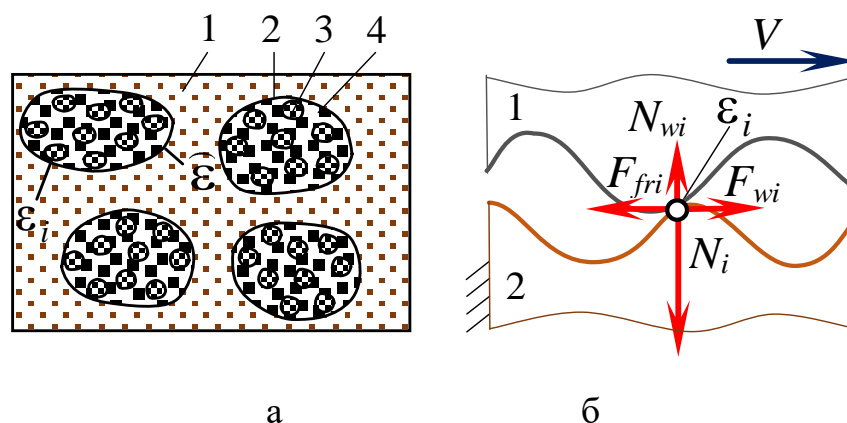


Рис. 10. Особливості поверхневого шару трибоелементів, що працює в умовах аномально низького тертя та зношування: а – топографія поверхні тертя: 1 - номінальна площа контакту; 2 – фактична пляма контакту; 3 – окремо взаємодіючі елементи ансамблю, ε_i ; 4 – механічні кванти на плямі контакту, $\bar{\varepsilon}$; б – одиничний контакт: F_{fri} – імпульс сили від молекулярно-механічної складової; F_{wi} – імпульс сили на плямі контакту, який виникає при проковзуванні, N_i – узагальнена гравітаційна складова сили тертя; N_{wi} – антигравітаційна складова, яка зменшує коефіцієнт тертя і виникає при проковзуванні

Однією з умов самоорганізації нерівноважних дисипативних структур на режимі АНТЗ є наявність флуктуацій коефіцієнта тертя (див. рис. 9), безпосередньо пов'язаного з параметрами мікрогеометрії.

Основоположною термодинамічною умовою досягнення рівноважного стану ТС є структурна ентропія, величина якої дорівнює:

$$S_c \left(\frac{P_{c1}^*}{P_{c2}^*} \right) = \sum_{i=1}^m P_{c1_i}^* \log P_{c2_i}^* ,$$

де P_{c1}^* і P_{c2}^* – оптимальна структурна фрактальна організація системи до і після зміни зовнішніх умов (у нашому випадку – навантаження).

Прийmemo, що функціональними одиницями в системі служать не окремі елементи, а їх агрегати – ансамблі шорсткостей ε_i на плямах фактичного контакту.

Проводячи аналіз реакції ТС на зміну зовнішніх умов, приходимо до висновку, що на першому етапі адаптації до нових умов зовнішнього середовища (на етапі навантаження) $s \in S$, трибосистема дезорганізується і її структурна ентропія досягає величини:

$$S_c(P_{c1}^*, P_{c2}^*) = P_{c1}^* + kI\left(\frac{P_{c1}^*}{P_{c2}^*}\right),$$

де k – коефіцієнт пропорційності, залежить від властивостей матеріалу;

$I(P_{c1}^*/P_{c2}^*)$ – кількість інформації.

На другому етапі адаптації трибосистема встановлює нову організацію імовірнісних ансамблів, яка оптимально відповідає новій умові зовнішнього середовища $s \in S$ в сенсі принципу максимуму надійності (умови аномально низького тертя та зношування).

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження впроваджено на АТ «ФЕД» та реалізовано при збільшенні ресурсу приводів-генераторів ГП21КМ для літаків сімейства Ан-148/158/178. Економія від впровадження технології ПИ 02-17 для експлуатуючої організації при доведеному збільшенні ресурсу у 4 рази складає 75000 дол. США тільки на одному агрегаті.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове-практичне завдання з визначення факторів, які сприяють роботі реальних трибосистем «сталь-бронза» в умовах аномально низького тертя та зношування (що значно підвищує їх ресурс), а також розробки способу переведення їх до таких умов шляхом попередньої модифікації поверхонь.

При виконанні роботи отримані наступні основні результати.

1. В результаті аналізу літературних джерел встановлено, що на даний час в експериментальній і теоретичній трибології наявність хвильової складової представляється як додатковий фактор дисипації енергії, що підводиться ззовні, який не має значного впливу. Але, на основі аналізу механізмів дисипації зовнішньої енергії, що підводиться до трибосистеми, як факторів зниження тертя в різноманітних областях живої та неживої природи уточнено роль хвильової складової тертя та зношування. При певних термодинамічних умовах в трибосистемах формується достатньо значна хвильова складова сили тертя, яка істотно зменшує молекулярно-механічну складову. Теоретично визначено, що перехід від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького тертя та зношування, можливий після формування поверхневого шару з певними реологічними характеристиками. В якості основного джерела перетворення енергії виступають енергетичні дефекти – фонони – кванти хвиль розтягування-стиснення і зсуву (звукові хвилі), які являються основною причиною енергетичного знищення. Величина енергії в умовах аномально низького тертя та зношування оцінюється з точки зору квантової теорії величиною механічного кванту $\hat{\varepsilon}$ – мінімального числа атомів, здатних

забезпечувати такий їх конфігураційний розподіл, який має властивості зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху.

2. Теоретично встановлено, що при зміні зовнішніх умов тертя змінюється ступінь збудження ТС – n , яка залежить від кількості механічних квантів ε . Будь-яка зміна в ТС, яка виводить її з рівноваги, згідно принципу Ле Шательє ініціює в ТС процеси, які намагаються повернути її у початкове положення. За ці процеси в розробленій моделі відповідає модуль канонічного розподілу енергії Θ , який регулюється мікрогеометрією поверхневого шару ТС. Таким чином відбувається саморегулювання в трибосистемах в умовах аномально низького тертя та зношування при зміні зовнішніх умов, що знайшло експериментальне підтвердження.

3. Встановлено, що контактна взаємодія шорсткостей за моделлю твердого тіла у вигляді міжатомних зв'язків дає можливість оцінити співвідношення молекулярної та механічної складових енергії при квазіпружній контактній взаємодії. Основний внесок (до 75%) припадає на механічну складову, яка оцінюється імпульсом сили на плямі контакту і залежить від енергії контакту в стані зчеплення, ступеня збудження трибосистеми та енергій зовнішніх та внутрішніх сил. Умовою досягнення АНТЗ є рівність робіт, які виконують зовнішні та внутрішні сили в умовах контактної взаємодії.

4. Експериментально визначено основні напрямки та методи дослідження механізмів дисипації енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Обрано комплексні металофізичні дослідження для розкриття суті фізичних процесів, які відбуваються при переході від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького при проведенні комплексних досліджень. Оптимізацією реологічної будови поверхневого шару реальних трибосистем вдалося досягти умов, коли дисипативний об'єм в умовах контактної взаємодії здатний зворотно трансформувати (розсіювати) енергію зовнішнього руху при досягненні умов АНТЗ. Дану технологію можна віднести до розряду ресурсозберігаючих з високим ступенем енергоефективності.

5. Дослідження амплітудно-частотних характеристик пружних коливань досліджуваних трибосистем в діапазоні частот від 0 до 10 кГц дозволили встановити, що максимальне значення амплітуд коливань при нормальному механохімічному зношуванні знаходиться в діапазоні 400...500 Гц. При дослідженні аномально низького тертя та зношування на діаграмі спостерігаються два характерні максимуми: перший від 500 до 700 Гц, другий від 6 до 7 кГц, тобто на порядок вище. Причому максимальні значення амплітуд для даних ділянок мають рівні значення і становлять 42 дБ. Пік у першому діапазоні відображає енергетику від молекулярно-механічної складової сили тертя, а другий – візуалізує хвильову складову сили тертя. Встановлено, що наявність практичної рівності максимальних значень амплітуд свідчить про досягнення рівності між імпульсами сили від молекулярно-механічної та хвильової складових сили тертя, що дає пояснення наявності аномально низького тертя та зношування.

6. Розроблено технологію модифікування поверхонь тертя бронзових зразків в трибосистемі «сталь-бронза» шляхом насичення поверхневого шару кремнієм в процесі фінішної обробки деталей. Комплексні фізичні дослідження

доказали, що при нормальному механохімічному зношуванні формується позитивний градієнт твердості по глибині поверхневого шару, у той час як при аномально низькому терті та зношуванні спостерігається від'ємний градієнт: поверхневий шар – пружний, підповерхневий – пружно-пластичний (реологічна модель Шведова).

7. Структурна самоорганізація при досягненні аномально низького тертя та зношування направлена на підтримання трибосистеми в цьому режимі роботи шляхом структурування поверхневого шару, спрямованого на підтримання максимальної зносостійкості. При цьому при підвищенні навантажень поверхня істотно вигладжується на відміну від нормального механохімічного зносу.

8. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження впроваджено на АТ «ФЕД» та реалізовано при збільшенні ресурсу приводів-генераторів ГП21КМ для літаків сімейства Ан-148/158/178. Проведені стендові випробування повністю підтверджують наукові положення досягнення аномально низького тертя та зношування. Так, використання даного модифікування дозволило зменшити тепловиділення агрегату на 15%.

Подальші ресурсні випробування показали практично повну відсутність зношування трибоелементів, які оброблені за технологією ПИ 02-17, що дозволяє експлуатувати агрегат за технічним станом при збільшенні міжремонтного ресурсу у 4 рази. Економічний ефект від впровадження наукових результатів може бути оцінена наступними розрахунками. Вартість капітального ремонту агрегату ГП21КМ, за оцінками АТ «ФЕД», становить 25000 дол. США. Тому економія від впровадження технології ПИ 02-17 для експлуатуючої організації при доведеному збільшенні ресурсу у 4 рази складає 75000 дол. США тільки на одному агрегаті.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях

1. Запорожець В.В., Стадніченко В.М., Трошін О.М., Варваров В.В., Стадніченко М.Г. Прискорена методика визначення зносостійкості нанопокриттів в трибосистемах з використанням інформативних параметрів акустичної емісії. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба*. 2010. № 3(25). С. 19-24.

2. Сігайло Г.П., Кравцов А.Г., Варваров В.В. Експрес-методика визначення ресурсних показників мастильних матеріалів у процесі експлуатації. *Наука і техніка ПС ЗС України*. 2014. № 4(17). С. 112-114.

3. Варваров В.В., Усачева О.А., Кравцов А.Г. Ускоренные методы оценки эффективности технологических решений для повышения износостойкости агрегатов гидравлических систем авиационной техники. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба*. 2015. № 1(42). С. 22-24.

4. Войтов В.А., Стадніченко В.М., Варваров В.В. Теоретичні та природні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба*. 2019. № 2(60). С. 113-125.

5. Стадніченко В.М., Варваров В.В., Вахнюк С.А. Структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. №16. – С. 88-101.

6. Варваров В.В. Механізми самоорганізації в трибосистемах, які працюють в умовах аномально низького тертя та зношування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2019. № 2(58). С. 70-79.

7. Варваров В.В. Про фізичний сенс коефіцієнта тертя в умовах аномально низького тертя та зношування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2020, №189. С. 6-12.

У закордонних виданнях

8. 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, pp. 156-165.

9. 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), pp. 1-18. (в базі SCOPUS).

Матеріали і тези конференцій

1. Стадніченко В.М. Прогнозування ресурсу трибосистем з використанням інформативних параметрів АЕ / В.М. Стадніченко, М.Г. Стадніченко, В.В. Варваров // VI наук. конфер. ХУПС ім. І.Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору». – Х.: ХУПС, 2010. – С. 55.

2. Стадніченко Н.Г. Границы применения параметров PV при выборе режимов испытаний на трение и износ, моделирующих работу реальных ТС при модернизации военной техники / М.Г. Стадніченко, В.М. Стадніченко, В.В. Варваров // Міжнар. наук.-техніч. конф. «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки». – К: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2010. – С. 243–244.

3. Стадніченко Н.Г. Методические аспекты применения метода акустической эмиссии в трибодиагностике / Н.Г. Стадніченко, О.Н. Трошин, В.Н. Стадніченко, В.В. Варваров и др. // IX наук. конференція ХУПС ім. І.Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору». – Х.: ХУПС, 2013. – С. 76–77.

4. Стадніченко В.Н. Методология применения метода акустической эмиссии для прогнозирования ресурса агрегатов авиационной техники / В.Н. Стадніченко, В.В. Варваров // Наук. практич. конф. «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки» – К: ДНДІА, 2013. – С. 27.

5. Варваров В.В. Методология прогнозування ресурсу трибосистем по результатам прискорених лабораторних і стендових випробувань / В.В. Варваров // Наук. практич. конф. «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» – К: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2013. – С. 358–359.

6. Варваров В.В. Прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів силових елементів планера / В.В. Варваров, О.О. Фененко // XV науково-технічна конференція «Створення та модернізація озброєння та військової техніки в сучасних умовах». – Чернігів: ДНВЦ ЗСУ. – 2015. – С. 180-181.

7. Войтов В.А. Методика прискореної оцінки ресурсних показників агрегатів паливної автоматики на стадії їх розробки / В.А.Войтов, В.В. Варваров, М.Г. Стадніченко // Міжнародна наукова конференція «Перспективи розвитку озброєння і військової техніки». Львів: НАСВ, 2017. – С. 24-25.

8. Стадніченко В.М. Перспектива створення в агрегатобудуванні матеріалів, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування / В.М. Стадніченко, В.В. Варваров // XX міжнар. науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика». – К.: НАУ, 2019. – С. 20-21.

9. Варваров В.В. Аналіз механізмів дисипації зовнішньої енергії при аномально низькому терті та зношуванні / В.В.Варваров // XV Міжнар. форум молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі». – Х.: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2019. – С. 11.

АНОТАЦІЯ

Варваров В.В. Підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» (131 – Прикладна механіка). – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Україна, Харків, 2021.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове-практичне завдання підвищення зносостійкості (ресурсу) трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування. Визначено реологічну будову поверхневого шару трибосистем при якій виникають умови для переходу до аномально низького тертя та зношування. Розроблено модель контактної взаємодії трибоелементів на рівні мікрошорсткості, визначено роль шорсткості поверхонь, як фактора саморегулювання при зміні зовнішніх умов тертя. Проведено амплітудно-частотний аналіз коливань в умовах аномально низького тертя та зношування. Зафіксовано та дано пояснення переходу трибосистем від аномально низького тертя та зношування до негативного тертя при зміні умов тертя та аналіз механізму руйнування поверхонь при негативному терті. Розроблено практичні рекомендації з модифікування бронзових елементів трибосистем «сталь-бронза», при якому відбувається направлена зміна реологічної будови поверхневих шарів та в них виникають умови аномально низького тертя та зношування, що значно підвищує їх ресурс. Результати роботи впроваджено на АТ «ФЕД» при виготовленні приводів-генераторів ГП21КМ літаків сімейства Ан 148/158/178, ресурс яких збільшився більш, ніж в 4 рази.

Ключові слова: аномально низьке тертя і зношування, трибосистема, молекулярно-механічна складова сили тертя, хвильова складова сили тертя, реологія поверхневого шару, самоорганізація в трибосистемах.

АННОТАЦИЯ

Варваров В.В. Повышение ресурса трибосистем в агрегатостроения переводом их в режим аномально низкого трения и износа. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах» (131 – Прикладная механика). - Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Украина, Харьков, 2021.

В диссертационной работе решена актуальная научная-практическая задача по определению факторов, способствующих работе реальных трибосистем «сталь-бронза» в условиях аномально низкого трения и износа (что значительно повышает их ресурс), а также разработка способа перевода их в такие условия путем предварительной модификации поверхностей.

На основе анализа механизмов диссипации внешней энергии, как факторов снижения трения в различных областях природы, уточнена роль волновой составляющей силы трения. При определенных термодинамических условиях в ТС формируется достаточно значительная волновая составляющая силы трения, которая существенно уменьшает молекулярно-механическую. Оптимизацией реологического построения поверхностного слоя удалось достичь условий, когда диссипативный объем способен обратно трансформировать (рассеивать) энергию внешнего движения. Практически удалось реализовать «идеальные» условия диссипации внешней энергии, подводимой по волновому каналу и избежать процесса изнашивания в ТС и избавиться от внешнего трения. Определено реологическое построение поверхностного слоя трибосистем, при котором значительно возрастает волновая составляющая силы трения и возникают условия для перехода трибосистемы к аномально низкому трению и износу (АНТИ). Разработана модель контактного взаимодействия трибоэлементов на уровне микрошероховатости, определены условия формирования импульса силы трения для кинетического взаимодействия микрошероховатостей при наступлении равновесия между волновой и молекулярно-механической составляющими силы трения. Определена роль шероховатости поверхностей, как фактора саморегулирования при изменении внешних условий трения. Выполнен амплитудно-частотный анализ колебаний в условиях АНТИ. Экспериментально зафиксирован переход ТС от аномально низкого трения к отрицательному трению (отрицательный коэффициент трения) при изменении условий трения двукратным снижением действующих контактных нагрузок на установившемся режиме АНТИ. Разработаны практические рекомендации по модификации бронзовых элементов трибосистем «сталь-бронза» за счет насыщения их поверхностного слоя кремнием по определенной технологии на этапе финишной обработки, при котором происходит направленное изменение реологического строения поверхностных слоев трибосистем «сталь-бронза» и в них возникают условия АНТИ, что значительно повышает их ресурс. Результаты работы внедрены на АТ «ФЕД» при изготовлении приводов генераторов ГП21КМ самолетов семейства Ан-148/158/178, ресурс которых увеличился более чем в 4 раза, а тепловыделение этих агрегатов значительно уменьшилось.

Ключевые слова: аномально низкое трение и изнашивание, трибосистема, молекулярно-механическая составляющая силы трения,

волновая составляющая силы трения, реология поверхностного слоя, самоорганизация в трибосистемах.

ABSTRACT

Varvarov V.V. Increasing the tribosystems resource in aggregation by switching them to abnormally low friction and wear. - On the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering (Doctor of Philosophy), specialty 05.02.04 "Rubbing and Wearing in Machines". - Petr Vasylenko Kharkiv National Technical University of the Agriculture, Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis deals with the actual scientific and practical problem of increasing the wear resistance (resource) of tribosystems in aggregation by transferring them to the mode of abnormally low friction and wear. The rheological construction of the surface layer of the TS under which conditions for the transition to abnormally low friction and wear (ALFW) is determined. A model of contact interaction of triboelements at the micro roughness level is developed, the role of surface roughness as a factor of self-regulation in changing external friction conditions is determined. The amplitude-frequency analysis of oscillations in the conditions of abnormally low friction and wear is carried out. The explanation of the transition of the vehicle from the ALFW to the negative friction at changing friction conditions and the analysis of the mechanism of destruction of surfaces at negative friction are recorded and given. Practical recommendations for the modification of the bronze elements of the steel-bronze tribosystems have been developed. The results of the work were introduced at PJSC "FED" in the manufacture of actuators-generators GP21KM aircraft of the family AN-148/158/178, whose resource increased more than 4 times.

Keywords: abnormally low friction and wear, tribosystem, molecular-mechanical component of friction force, wave component of friction force, rheology of surface layer, kinetic interaction of roughness, self-organization in tribosystems, non-abrasive fine.