

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Ауліна Віктора Васильовича, професора кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету на дисертаційну роботу Варварова Валерія Володимировича на тему:

"Підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування", що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 "Тертя та зношування в машинах"

Актуальність теми. Проблема підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні, перш за все в авіаційному, є нагальною для сучасних літальних апаратів, вартість виготовлення паливного насоса яких коливається в межах 50...70 тис. дол. США. В той час їх ремонт складає практично половину вартості їх виготовлення. Тому до ресурсу агрегатів ставляться надзвичайно високі вимоги, які зростають з кожним роком.

Розвиток трибоматеріалознавства дозволив сформулювати достатньо ефективний спосіб зниження тертя та зношування різних трибосистем агрегатів шляхом модифікування поверхневого шару. Це дає можливість створити найбільш сприятливі умови мікроконтактної квазіпружної взаємодії спряжень деталей на рівні мікрорельєфу.

Нерівноважна термодинаміка дозволяє стверджувати, що квазіпружна взаємодія може призводити до виведення з трибосистеми накопиченої внутрішньої енергії, тобто спостерігаються антидисипативні процеси. Серед факторів цих процесів основна частка приходить на кінетичну (хвильову) складову сили тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування під час молекулярно-механічної взаємодії мікронерівностей поверхонь та проковзуванні при їх розгоні. Зазначене обумовлює розуміння умов досягнення аномально низького тертя та зношування, а їх реалізація істотно підвищить ресурс трибосистем в агрегатобудуванні.

Дослідження у цьому напрямі є безумовно актуальним при розв'язанні важливого науково-прикладного завдання переведення трибосистем агрегатів в режим аномально низького тертя та зношування.

Зв'язок теми з науковими програмами, планами і темами. Виконання роботи здійснювалось у відповідності 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.

Наукова новизна результатів дисертації та їх значення для практики. Дисертаційна робота Варварова Валерія Володимировича є завершеним, самостійно виконаним науковим дослідженням, характеризується високим рівнем актуальності, єдністю змісту, свідчить про особистий внесок здобувача в розв'язання науково-прикладного завдання, містить елементи наукової новизни і має теоретичне

та практичне значення.

У дисертації здобувачем одноосібно запропоновано та з системних позицій обґрунтовано амплітудно-частотний аналіз коливань в умовах аномально низького тертя та зношування (АНТЗ). Зафіксовано дві області піків амплітудно-частотної характеристики при аномально низькому терті та зношуванні: у низькочастотній області – від молекулярно-механічної складової сили тертя (нормальне тертя) та у високочастотній області – від хвильової складової сили тертя (аномально низьке тертя та зношування); виявлено рівність амплітудних характеристик коливань від обох складових; при зміні умов тертя двократним зниженням діючих контактних навантажень отримано експериментальні залежності переходу трибосистеми від аномально низького тертя до негативного тертя (від'ємний коефіцієнт тертя) на сталому режимі аномально низького тертя та зношування.

Показано, що основним механізмом руйнування поверхонь при негативному терті є перевищення хвильової складової сили тертя над молекулярно-механічною за рахунок накопиченої енергії у підповерхневому шарі. Встановлено реологічну будову поверхневого шару елементів трибосистем, при якій значно зростає хвильова складова сили тертя і виникають умови для переходу трибосистеми до АНТЗ. Доведено, що у трибосистемі одна зі спряжених поверхонь повинна бути квазіжорстким тілом, а друга поверхня – мати реологічну будову за моделлю Шведова. При цьому поверхневий шар є квазіпружний (тіло Гука), а підповерхневий шар – пружнопластичний (комбінація тіл Максвелла та Сен-Венана). Подальший розвиток отримала структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Для реалізації таких умов необхідна наявність двох каналів дисипації енергії: перший – на рівні контактної взаємодії, а другий – за рахунок енергії, накопиченої у підповерхневому шарі.

Розроблені практичні рекомендації з модифікування бронзових елементів трибосистем "сталь-бронза" насиченням їх поверхневих шарів кремнієм на етапі фінішної обробки за певною технологією. При цьому відбувається направлена зміна реологічної будови поверхневих шарів трибосистем "сталь-бронза" та виникають умови АНТЗ, що значно підвищує їх ресурс.

Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджено на АТ "ФЕД" при виготовленні приводів-генераторів ГП21КМ літаків сімейства Ан-148/158/178, ресурс яких збільшився більш, ніж в 4 рази.

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у роботі. Грунтуючись на аналізі стану і проблем процесів тертя та зношування в трибосистемах, які працюють в режимі АНТЗ, визначено мету, об'єкт, предмет і сформульовано основні завдання дослідження. При цьому виявлено істотне підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим АНТЗ.

Результати проведених досліджень доповідались та обговорювались на вітчизняних і зарубіжних міжнародних науково-практичних конференціях. Основні результати роботи опубліковані в статтях у фахових вітчизняних і зарубіжних виданнях. Про достовірність отриманих результатів свідчить достатній ступінь відповідності результатів теоретичних розрахунків експериментальним даним, одержаних з використанням сучасних методик досліджень, а також їх відповідність

науково-технічним джерелам інформації та даним інших дослідників.

Наукова цінність отриманих результатів. Наукова цінність отриманих результатів розв'язання науково-практичного завдання полягає в наступному: розроблено модель контактної взаємодії мікронерівностей поверхонь трибоелементів та механізм накопичення енергії у їх підповерхневому шарі, сформованому за реологічним принципом Шведова, та визначено механізм формування хвильової складової сили тертя; розроблено та обґрунтовано механізм структурування поверхневого шару трибосистеми для дисипації накопиченої енергії в умовах АНТЗ; удосконалено структурно-енергетичну модель перетворення енергії в умовах АНТЗ; розроблено методичний підхід для реалізації способу модифікації поверхневого шару досліджуваних трибосистем для досягнення передумов переведення їх в режим АНТЗ з метою подовження ресурсних показників; виконано комплекс триботехнічних досліджень та проведено спільно з АТ "ФЕД" стендових випробувань агрегатів з модифікованими трибосистемами за розробленою технологією; виконано порівняльні дослідження амплітудно-частотних характеристик при нормальному механохімічному і АНТЗ; обґрунтовано механізм самоорганізації трибосистем, що працюють в умовах АНТЗ.

Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях та на науково-практичних конференціях. Основні результати проведених досліджень опубліковано у 9 наукових працях, із них 2 – одноосібні, 1 стаття – у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus, 7 статей у фахових виданнях, 9 тез доповідей, що додатково відображають результати роботи.

В опублікованих працях повністю викладено основні положення дисертаційної роботи, а саме: порівняльна оцінка методом акустичної емісії ресурсних показників трибосистем після модифікування поверхневого шару; методика використання акустичної емісії для реєстрації АНТЗ; визначено реологічну будову поверхневих шарів трибосистем при досягненні АНТЗ; 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; запропоновано спосіб порівняльної оцінки зносостійкості трибосистем, які працюють в режимі АНТЗ; визначено роль шорсткості поверхонь як фактора саморегулювання при зміні зовнішніх умов тертя та проведено амплітудно-частотний аналіз коливань в умовах АНТЗ.

Загальна оцінка дисертації та автореферату. Дисертація складається з анотацій на українській та англійській мовах, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи складає 196 сторінок. Дисертація містить 16 таблиць, 63 рисунки і 3 додатки. Список використаних джерел нараховує 171 найменування.

Оцінка змісту дисертації та автореферату.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету, предмет, об'єкт, завдання, зазначено методи дослідження, з'ясовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

Перший розділ присвячено аналізу інформації щодо механізмів накопичення та дисипації енергії, яка підводиться ззовні до трибосистем, як факторів зниження тертя

та зношування. Проаналізовано термодинамічні умови переходу трибосистем до АНТЗ. Визначено фізичні основи складової хвильового тертя та значені шляхи досягнення АНТЗ при зовнішньому терті. Розглянуто основні методи контролю АНТЗ. З'ясовано, що перехід від нормального механохімічного до АНТЗ можливий після формування поверхневого шару з певними реологічними характеристиками. Показано, що в якості основного джерела перетворення енергії виступають такі енергетичні дефекти як фонони – кванти хвиль розтягу-стиску та зсуву (звукові хвилі), які є основною причиною перетворення енергії. Виявлено недостатність даних 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 при певних умовах, може дорівнювати молекулярно-механічній складовій тертя. Виявлення умов досягнення АНТЗ в реальних трибосистемах та їх шляхів реалізації є безумовно актуальним науково-практичним завданням.

У другому розділі розглянуто методичний підхід. Обґрунтовано вибір матеріалів, трибосистем до виявлення умов реалізації аномально низького тертя та зношування. та методів їх дослідження. Зазначено, що модифікування трибосистем для досягнення певних реологічних умов трансформації енергії проводили насиченням поверхневих шарів бронзових зразків кремнієм різними методами.

Трибологічні дослідження на тертя та зношування проведені на модернізованій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою "кільце-кільце", матеріалами зразків сталь 30ХЗВА, бронзи ВВ23НЦ, БрО10С2НЗ та робочим середовищем – авіаційне паливо ТС-1.

Фізико-механічні властивості поверхневих шарів оцінювали за результатами вимірювання твердості методами Роквелла і Віккерса, а мікротвердість – на установці ПМТ-3. Шорсткість і профіль поверхні зразків визначені за допомогою профілометра-профілографа TR200 фірми JENOPTIK та мікроскопу ЛСДФПМ. Мікроструктуру та розподіл компонентів в поверхневих шарах трибоелементів визначали на растровому електронному мікроскопі РЭМ-106. Вимірювання амплітудно-частотних характеристик проводили на осцилографі Rigol DS1052E з широкосмуговим датчиком акселерометром фірми Brüel & Kjaer типу 4335.

В третьому розділі запропоновано структурно-енергетичну модель перетворення енергії в умовах АНТЗ, сформульовано основні допущення та обмеження, прийняті при розробці цієї моделі. Визначено, що для досягнення АНТЗ одним з трибоелементів (рухомий) повинен бути квазіжорстким тілом, а інший (нерухомий) – реологічну будову поверхні за моделлю Шведова.

Наведено також розроблену модель контактної взаємодії мікровиступів трибоелементів при формуванні хвильової складової сили тертя. Для пояснення квазіпружної взаємодії ефективного об'єму мікровиступів використано уявлення марківського процесу з двома дискретними станами, що пропонує в системі перехід 1→2 відновлення, розпад. Для цього пропонується рівняння А. М. Колмогорова, вирішуючи яке для початкових умов $t = 0$, $p_1 = 1$, отримано вираз імпульсу сили на кожному елементарному мікроконтакті.

Показано, що в умовах АНТЗ одночасно виконуються дві роботи: подолання сил тертя від молекулярно-механічної складової сили тертя та проковзування від

внутрішніх сил тертя. Результатом першої роботи є зміна (накопичення) потенціальної енергії з виділенням тепла і на плямах фактичного контакту формується імпульс сили. Результатом другої роботи є зміна кінетичної енергії, яка виділяється з поглинанням із ТС тепла та формуванням імпульсу сили.

Зазначимо, що в умовах АНТЗ імпульси зазначених сил зрівноважуються та підтримується рівновага між виділеною та поглинутою теплотою, що пояснюється прагненням системи до досягнення мінімуму вільної енергії. Визначено також, що при зміні зовнішніх умов тертя змінюється ступінь збудження ТС, який залежить від кількості механічних квантів. В такій ситуації 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. Доведено, що за ці процеси у моделі відповідає модуль канонічного розподілу енергії, який регулюється мікрогеометрією поверхневого шару елементів ТС.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження модифікації поверхневого шару бронзових зразків лабораторних трибосистем. Визначена послідовність обробки поверхонь тертя бронзових зразків: безабразивне притирання; модифікація поверхневого шару обробкою карбідом кремнію; модифікація двохстадійною фінішною обробкою поверхневого шару карбідом кремнію та інструментом з мінералом групи амфіболів (нефрити) з оптимізованим режимом обробки за технологією ПИ 02-17 (АТ "ФЕД"). Для пояснення фізичної суті переходу трибосистеми до АНТЗ виконані комплексні металофізичні дослідження. Підтверджено, що дослідженнями амплітудно-частотних характеристик ТС визначено перехід від нормального механохімічного тертя та зношування до АНТЗ.

Результатами порівняльних досліджень при різних способах модифікування поверхонь елементів ТС показано, що фінішна обробка бронзових зразків з використанням карбіду кремнію призводить до істотного зниження зносу (у 29 разів) та коефіцієнту тертя (у 2,7 рази), а 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 акустичної емісії та трибологічними параметрами зафіксовано режим АНТЗ.

Визначено, що 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). Це дозволило отримати реологічну побудову поверхні тертя найбільш наближеної до моделі Шведова за рахунок зміни хімічного складу поверхонь ТС після модифікування.

Показано, що параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості після традиційної фінішної обробки та фінішної обробки з використанням технології ПИ 02-17 також суттєво відрізняються. Для вирішення цього завдання сплановано трифакторний експеримент. Визначено, що оптимальними значеннями щодо параметрів обробки поверхонь бронзових зразків при цьому є: навантаження – 59 Н; лінійна швидкість ковзання – 0,816 м/с; час припрацювання – 5 хв.

При використанні технології ПИ 02-17, на режимі АНТЗ за 8 годин випробування ні ваговим методом, ні методом акустичної емісії не реєстрували знос.

Момент тертя (отже, і коефіцієнт тертя), починаючи зі стадії навантаження не збільшується і знаходиться близько нульової позначки. Тепловиділення також припиняється. Параметр шорсткості R_a з 0,11 мкм зменшується до 0,05 мкм, тобто відбувається вигладжування практично у 2 рази.

Дослідженнями задиристості показано, 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). 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 практично не змінюється.

Визначені амплітудно-частотні характеристики 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 ТС. Показано, що при нормальному механохімічному зношуванні максимальне значення амплітуд коливань знаходиться в діапазоні 400...500 Гц, а в умовах АНТЗ на діаграмі спостерігається два характерні максимуми: перший від 500 до 700 Гц (нормальне механохімічне зношування, яке генерується молекулярно-механічною складовою), а другий знаходиться в діапазоні від 6 до 7 кГц відповідає хвильовій складовій сили тертя. 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. Останнім пояснюється наявність аномально низького тертя та зношування.

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

Результати вимірювання швидкості зношування методом акустичної емісії показали, що зменшення коефіцієнта тертя в цьому випадку супроводжується збільшенням температури і швидкості зношування. Фізика зношування на нерівноважному режимі тертя при розвантажуванні істотно відрізняється від нормального механохімічного тертя. Визначено, що при навантаженні енергія зовнішнього відносного руху запасується в поверхневому шарі, а при розвантаженні – вивільнюється з нього, що супроводжується процесами поверхневого руйнування (зношування).

Показано, що саморегулювання ТС, які працюють в умовах АНТЗ, здійснюється по каналу структурної ентропії.

Однією з умов самоорганізації нерівноважних дисипативних структур на режимі АНТЗ є наявність флуктуацій коефіцієнта тертя, безпосередньо пов'язаного з параметрами мікрогеометрії. Функціональними одиницями в ТС служать не окремі елементи, а їх агрегати – ансамблі шорсткостей на плямах фактичного контакту. Проводячи аналіз реакції ТС на зміну зовнішніх умов, визначено, що на першому етапі адаптації до нових умов зовнішнього середовища (на етапі навантаження), ТС дезорганізується. На другому етапі адаптації ТС встановлює нову організацію імовірнісних ансамблів, яка оптимально відповідає новій умові зовнішнього середовища в сенсі принципу максимуму надійності (умови АНТЗ).

Загальні висновки містять вісім пунктів, з яких до результатів теоретичних досліджень відносять п. 1-3, а до експериментальних досліджень – п.4-8.

Автореферат відповідає змісту дисертації і достатньо повно розкриває сутність дисертаційної роботи.

Зауваження до дисертаційної роботи та автореферату:

1. В розділі 1 фактично йде мова про аналіз умов виникнення аномально низького тертя та зношування за оглядом літературних джерел як з експериментальної, так і з теоретичної точок зору, а тому розділ правильно було назвати "Аналіз умов досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології".

2. Для більш ефективного сприйняття матеріалу п.1.1, розділ 1, слід було звести механізми зниження тертя та зношування в трибосистемах у єдиній блок-схемі. Це стосується і термодинамічних умов переходу трибосистемах до аномально низького тертя та зношування у п.1.2. Також необхідно було врахувати термофлуктуаційну теорію руйнування С.М. Журкова.

3. В п.1.4 представлені не всі основні існуючі методи оцінки зносостійкості і прогнозування ресурсу трибосистем.

4. Огляд побудованої структурної схеми теоретичних та експериментальних досліджень слід було представити в окремому пункті, наприклад 2.1.

5. Потребують розширення викладення методик вимірювань п.п.2.33-2.36, розділ 2, а у п.2.4 – конкретизації факторів, результуючих ознак, а також загального вигляду рівняння регресії.

6. На стор. 87; п.3.1, зазначено, що завдяки хвильової складової сили тертя частину зовнішнього тертя, що компенсується, переводить у внутрішнє тертя. Не зрозуміло про яку фізичну характеристику йде мова, про силу, енергію чи роботу.

7. Не зовсім зрозуміло зміст рівності (3.7), її використання та зв'язок з формулою (1.5). Також слід було пояснити як з формул (3.13) і (3.15) отримано формули для коефіцієнтів тертя на сторінках 99 та 104.

8. Слід було проаналізувати результати отриманих фрактографій поверхонь трибоелементів, представлених на рис. 4.2, 4.6, 4.10, 4.14, зв'язавши їх з результатами визначення величини зносу, рівня акустичної емісії, коефіцієнта тертя, температури та мікротвердості.

9. В п.4.2 необхідно чітко визначити фактори у натуральному і безрозмірному масштабах, а також з'ясувати отриманий вигляд рівняння регресії для трьох факторів і як отримані значення оптимальних параметрів обробки поверхонь бронзових зразків.

10. Бажано було інтегрально поєднати результати досліджень зносостійкості (п.4.3), задиростійкості (п.п.4.3.2) та амплітудно-частотних характеристик (п.4.4) для виявлення переходу трибосистеми до аномально низького тертя та зношування.

11. Потребують обґрунтування умови самоорганізації поверхневих структур при аномально низькому терті та зношуванні, їх особливості та використання стохастичного диференціального рівняння для елементів ансамблю і структурної ентропії.

Підсумковий висновок по дисертації. Дисертаційна робота Варварова Валерія Володимировича на тему: "Підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування" є завершеним науковим дослідженням, що дає можливість вирішити актуальне наукове-практичне завдання підвищення зносостійкості (ресурсу) трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування. Тема, зміст дисертації і автореферату відповідають паспорту спеціальності 05.02.04 – Тертя та зношування в машинах. За актуальністю і науковою новизною, обґрунтованістю наукових положень та практичних результатів, ступенем апробації результатів дослідження на конференціях і у фаховій літературі представлена дисертаційна робота відповідає існуючим вимогам до кандидатських дисертацій, а її автор, Варваров Валерій Володимирович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – Тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри експлуатації та
ремонту машин Центральноукраїнського
національного технічного університету

Віктор АУЛІН

Підпис професора кафедри експлуатації та ремонту машин, доктора технічних наук Ауліна В.В. засвідчую:

Проректор Центральноукраїнського національного технічного університету,

доктор економічних наук, професор



Олександр ЛЕВЧЕНКО