Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 621.9.031 DOI: 10.30748/zhups.2019.60.15

В.А. Войтов[1], В.М. Стадниченко[2], В.В. Варваров[3]

[1] *Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, Харків*
[2] *Національний авіаційний університет, Київ*
[3] *Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИРОДНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЯГНЕННЯ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В ТРИБОЛОГІЇ

У статті достатньо докладно проаналізовані теоретичні та експериментальні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології з позиції сучасних фізичних теорій і квантомеханічного підходу до пояснення дисипації енергії при зовнішньому терті. Проведений аналіз дозволив висунути гіпотезу про існування хвильової складової сили тертя, яка може бути використана в поясненні аномально-низького тертя в трибології.

Ключові слова: *аномально низьке тертя і знос, "нульове" тертя, "негативне" тертя, від'ємне тертя, трибосистема, ентропійний насос, молекулярно-механічна складова сили тертя, хвильова складова сили тертя.*

Вступ

Постановка проблеми. Тертя присутнє в численних фізичних явищах, у всіх масштабах. Іноді воно використовується, щоб поліпшити наше життя, але у більшості випадків необхідно зменшити його для того, щоб зменшити механічну енергію дисипації та зношування поверхонь тертя. Близько від однієї третини до половини всієї світової енергії перетворюється в механічне тертя [1]. Втрати у промисловості розвинених країн внаслідок тертя й супутнього зношування машин і механізмів становлять 4...5 % відсотків національного доходу. Більшість машин (80 %) виходять із ладу через зношеність механізмів [2]. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машини в кілька разів перевищують її вартість: для автомобілів в 6 разів; для літаків до 5 разів; для металорізальних верстатів до 8 разів. На ремонт тракторів задіяне в 4 рази більше виробничих потужностей, чим на їхнє виготовлення. Легковий автомобіль, що має масу 1000 кг, стає непридатним для ремонту, якщо втрата його маси від зношування складе 1 кг, а до списання трактора Т-130 на запасні частини для ремонту й технічного обслуговування потрібно витратити стільки ж металу, скільки він важить сам – $12 \cdot 10^3$ кг [3].

Особливо гостро ця проблема стоїть в агрегатобудуванні, перш за все в авіаційному. Наявність прецизійних пар тертя з високолегованих та кольорових металів вимагає використання високоточного обладнання та високої кваліфікації спеціалістів, ця обставина призводить до високої вартості виготовлення агрегатів. 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. Як приклад, за рішенням ДП "Антов" ресурс сучасних агрегатів аксіально-поршневої групи (паливні насоси, гідравлічні насоси, гідроприводи і т.д.) повинен складати без ремонту не менше 12 000 год, що призвело до необхідності розробки та використання у цьому напрямку нових технологій основаних на нанесенні зносостійких покриттів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні досягнення структурно-енергетичної [4] і молекулярно-механічної [5] теорій тертя та зношування дозволяють розглядати трибосистему як генератор з перетворення механічної енергії в теплову. Всі заходи, що направлені на підвищення зносостійкості трибосистем, прямо або побічно направлені на підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) даного теплового генератора, і в цьому напрямі визначилося два основні шляхи. Перший – зменшення частки енергії, яка витрачається на руйнування поверхневого шару за рахунок вдосконалення мастильного матеріалу, структур матеріалів, нанесення різного роду зносостійких покриттів [4]; другий – вдосконалення умов контактної взаємодії, зменшення коефіцієнта тертя і, як наслідок, зменшення абсолютної величини зовнішньої енергії, що підводиться до трибосистеми [6–7].

Другий шлях є більш перспективним. Сучасний розвиток трибоматеріалознавства [3] дозволив сфор-

© Войтов В.А., Стадниченко В.М., Варваров В.В., 2019

мулювати новий, достатньо ефективний спосіб зниження тертя та зношування різних трибосистем шляхом трибомодифікування поверхневого шару [6; 8]. Метою такого трибомодифікування є створення найбільш сприятливих (сумісних, за Гаркуновим [9]) умов мікроконтактної квазіупружної взаємодії, що виникає на рівні мікрорельєфу.

Розгляд квазіупружної взаємодії з позиції нерівноважної термодинаміки дозволив авторам робіт [10–11] висунути гіпотезу, що така взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виведення з трибосистеми 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 і проковзуванні при їх розгоні.

Докладне вивчення теоретичних досліджень у цьому напрямку, разом з аналізом відомих природних дисипативних властивостей квазіупружної взаємодії може дати більш глибоке розуміння цього ефекту. Це дає більш широке розуміння умов досягнення аномально низького тертя та зношування та може дозволити розробити універсальну теорію застосування цього явища у трибології.

Мета статті. Таким чином, дослідження у цій галузі є актуальними та присвячені розв'язанню важливої науково-технічної проблеми. Метою статті є проаналізувати всі існуючі на даний час у трибології теоретичні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування разом з аналізом відомих природних явищ прояву такого ефекту.

Виклад основного матеріалу

Проведемо аналіз механізмів дисипації енергії, що підводиться ззовні до трибосистеми, як фактор зниження тертя в різноманітних областях живої та неживої природи

Використання таких ефектів, як "нанозносне тертя" [12–13] може бути покладено в основу створення трибосистем, що мають високий ресурс і максимальну надійність.

При цьому, найбільше значення набувають питання утворення на поверхнях фрикційного контакту різних тонких плівкових шарів, особливостей їх мастильної дії, а також процесів самовпорядкування поверхонь фрикційного контакту, наслідком яких є утворення на поверхнях тертя фрактальних просторових і тимчасових структур, у тому числі ротаційних [8; 14].

Автор робіт із нелінійної термодинаміки і самовпорядкування нерівноважних систем Ілля Пригожин встановив, що деякі відкриті системи в умовах, далеких від рівноваги, стають нестабільними [15–16], їх макроскопічні властивості при цьому радикально змінюються [17–18]. В триботехнічних системах це проявляється в утворенні дисипативних структур двох типів.

До першого типу відносяться рівноважні структури, що утворюються в процесі припрацювання, їх формування досягається мінімальним виробництвом ентропії. До дисипативних структур другого типу відносять нерівноважні, які визначаються знаком надмірного виробництва ентропії, умовою утворення яких є підведення додаткової зовнішньої енергії [19]. Дані структури працюють за принципом підтримки максимальної надійності при зміні зовнішніх умов тертя, це досягається підтримкою рівності динамічних процесів "плюс-" і "мінус дисипації" [10; 20]. Як показано в роботах [8; 14], кожному окремому випадку відповідає свій термодинамічний поріг самовпорядкування, який чітко розділяє класи рівноважних і нерівноважних дисипативних структур, які виникають при великих відхиленнях від положення рівноваги. Саме тут виявляється ефект самовпорядкування і когерентна поведінка підсистем, яка виражається в переході трибосистеми до роботи в умовах нанозношування. По суті, це відкриття нових областей у фізиці тертя та зношування, де термодинамічно можливим є самовпорядкування нових структур, яке призводить до більш досконалого механізму тертя, ніж граничне.

Під самовпорядкуванням в синергетиці розуміється здатність будь-яких об'єктів проявляти властивості, характерні для поведінки біологічних і соціальних об'єктів, причому їх зусилля мають чітко виражену спрямованість на підтримку порядку і організованості [17].

Слід зазначити, що самовпорядкування не є універсальною властивістю матерії, а існує лише за певних внутрішніх і зовнішніх умов. Разом з тим, ця властивість не пов'язана з яким-небудь особливим класом речовин: ефект Бенара, феномен Гюйгенса, лазери, перехід від ламінарної течії до турбулентної, і є доказом цього твердження.

Останній приклад особливо цікавий стосовно триботехніки. Було помічено, що дельфіни при плаванні розвивають швидкість, значно більшку за ту, яку можна було чекати з урахуванням їх геометричної форми. Цей феномен обумовлений тим, що тіло дельфіна володіє малим опором тертю, і пояснюється пружністю шкіри, яка дозволяє граничному шару води на тілі дельфіна залишатися ламінарним навіть при дуже великих числах Рейнольдса [21]. Дана ідея підказана самою природою і використана авторами роботи [23] для пояснення ефектів аномально низького тертя при застосуванні ревіталізантів. Сучасна теоретична і експериментальна трибологія все частіше звертається до пояснення природних феноменів зниження сили тертя для застосування у техніці.

Американськими вченими Баретом і Тріатафілом створені моделі риб, які розвивають тягу і ілюс-

трують механізми зниження опору тертя [39]. У процесі створення тяги, зниження коефіцієнта опору моделі досягало 70% у порівнянні з опором обтічної нерухомої моделі. При аналізі отриманих результатів був зроблений висновок про існування двох механізмів зниження коефіцієнта опору тертя моделі: перший механізм пов'язаний з виникаючим уздовж тіла моделі негативним градієнтом динамічного тиску, другий (гіпотетичний) – із системою вихорів, які формуються поблизу тіла моделі, що коливається (хвильова складова опору тертя).

Інший природний феномен аномально низького тертя, відомий як Парадокс Грея. Між носовою поверхнею дельфіна і зустрічною водою в русі якимось чином виникає і постійно діє негативний градієнт гідродинамічного тиску, тобто дельфін в русі як би наздоганяє постійно тікаючу від нього зустрічну воду [39]. Для здійснення подібного характеру взаємодії об'єктів, що рухаються в рідині, А.Ф.Дзюбою розроблена технологія (рис. 1), суть якої полягає в тому, що зменшення гідродинамічного опору при русі судна досягається за рахунок створення хвиль пружного стиснення від носової поверхні по зустрічній рідині [22]. Реалізація даного підходу в сучасному суднобудуванні дозволяє при існуючій потужності двигунів і тому ж споживанні палива збільшити більш ніж в два рази їх швидкість ходу.

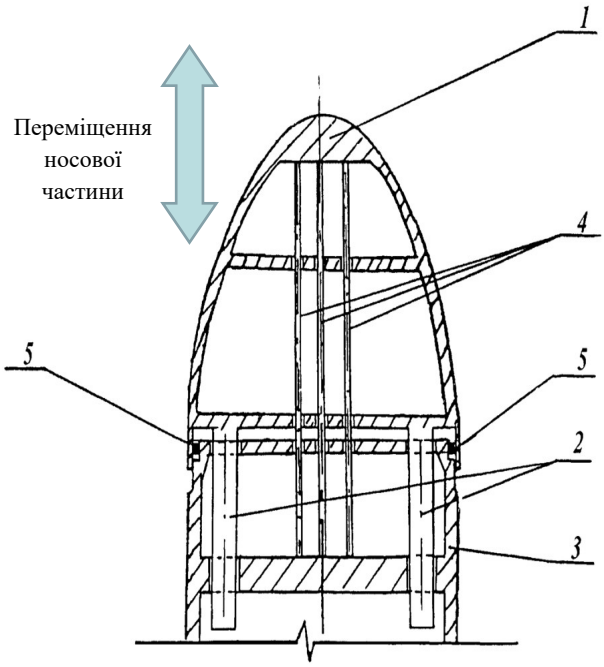

Рис. 1. Зменшення гідродинамічного опору при русі судна за рахунок створення хвиль пружного стиснення від носової поверхні по зустрічній рідині: 1 – носова частина корпусу; 2 – напрямні консолі; 3 – циліндрична частина; 4 – пружні стрижні; 5 – сальник

На підставі приведеного вище ефекту проводяться розробки перспективних літальних і підводних апаратів з повною ламінарізацією граничного шару. Це дає можливість знизити коефіцієнт опору тіла до оточуючого середовища у вісім і більше разів.

Подібний підхід був використаний і при проектуванні та створенні нових костюмів LZR Racer для спортсменів-пловців [52]. Їх виготовляють з особливою високотехнологічної тканини, що складається з переплетених ниток еластану-нейлону і поліуретану. Технологія запатентована фірмою Speedo. Для тестування костюма використовувалася аеродинамічна труба і інше випробувальне обладнання NASA, а для аналізу течі потоку рідини – програмне забезпечення фірми ANSYS.

Дещо іншим способом зменшується тертя при рухах акули. Шкіра акул вкрита плакоїдною лускою (рис. 2). При кожному русі риби шкіра згинається і деформується, рифлені зубчики зміщуються один щодо одного. У переднього краю гнучкого фрагмента шкіри формується невелике завихрення. Якщо ж цей фрагмент шкіри обробити піскоструминним апаратом і тим самим зруйнувати її поверхневу мікроструктуру, то завихрення починає формуватися набагато далі від краю. Тобто наявність мікроструктури призводить до утворення зони розрідження біля поверхні об'єкта.

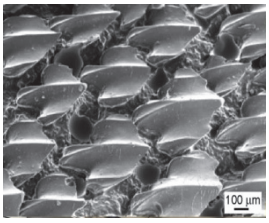

Рис. 2. Плакоїдна луска шкіри акули

Таким чином, аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженню високошвидкісного руху тіл у воді показав, що у всіх випадках ефект зниження сил тертя досягається генеруванням різними способами пружних хвиль. Н. Тесла один з перших звернув увагу в техніці на роль хвильової складової контактного взаємодії при русі твердих тіл [24]. На відміну від звичайних турбін, в яких потік, рухаючись, потрапляє на лопаті або поршні, в турбіні Н. Тесли застосовується безліч жорстких “ідеально” пружних металевих дисків, що не розсікають вихровий потік під гострим кутом, а ковзають паралельно потоку. При цьому вони приводяться в рух завдяки особливого роду тяжінню, яке виникає між поверхнею диска і рухомим газом або рідиною. Це тяжіння, що є гальмуючим фактором для літальних і інших рухомих апаратів, викликане “поштовхом рідини у шорстку поверхню твердої речовини” [24], по суті це і є хвильова складова сили зовнішнього тертя.

Елементи нових уявлень містяться і у системному підході Ханина, у відповідності з яким усі процеси у природі реалізуються у відповідних системах і протікають так, що взаємодія їх компонентів

носить коливальний характер і намагаються проходити з мінімальними втратами енергії, тобто з максимальним ККД [25].

Погоджуючись з цим висновком, можна вважати, що автор [25] уперше розглянув хвильовий канал дисипації енергії як фактор самоорганізації та дисипації зовнішньої підведеної енергії.

При розробці технологій триботехнічного відновлення, які направлені на створення на поверхні тертя металокерамічного шару, верхній підшар є абсолютно пружним (окисел алюмінію), а підповерхневий шар находиться в стані близькому до аморфного (металосилікат) [8; 26].

Дисипація зовнішньої енергії, що підводиться при терті в даній трибосистемі, відбувається за рахунок пружнопластичних циклічних деформацій металокерамічного шару в контактній області і названа ефектом хвилі, що “біжить”, яка і обумовлює практичну нанозносність трибосистеми [23; 27].

Методи зниження сили тертя за рахунок використання пружних хвиль різної природи, які набули останнім часом поширення в трибології, є фактором зниження зовнішнього впливу на трибосистему [28–29].

Вперше цей фактор дисипації використаний у моделі фрикційної взаємодії авторами [30]. В цій моделі сили взаємодії зубців шорсткості при проковзуванні викликають локальні коливання. Накладання коливань на систему взаємодіючих виступів може істотно зменшувати силу тертя.

При цьому можливо досягнення резонансного ефекту при співпадінні власних частот поверхневих коливань і примушуючої частоти, яка формується за рахунок періодичних взаємодій нерівностей. Нажаль, при усій важливості отриманого висновку, дана ідея не отримала подальшого теоретичного розвитку та експериментального підтвердження.

В даний час цей ефект почав широко використовуватися при конструюванні сучасних трибоелементів озброєння (високошвидкісні судна і торпеди) [31]. У той же час внесок хвильової складової, що генерується безпосередньо при взаємодії трибоелементів при їх русі, до теперішнього часу залишається незаслужено недооціненим [4; 12; 18], і це пов’язано, перш за все, з необхідністю створення спеціальних засобів, як випробування, так і реєстрації триботехнічних параметрів, в реальному часі випробування, що дозволяють оцінювати показники аномально низького тертя та зношування.

Останнім часом при вивченні аномально низького тертя та зношування із залученням сучасних фізичних теорій [11; 32–33] особливу увагу приділено саме квазіупружності імпульсної взаємодії, що виникає в поверхневому шарі при певній його реологічній побудові.

Імпульсні взаємодії викликають не тільки коливання, але і поверхневі хвилі, які при певних умовах стають основним каналом дисипації зовнішньої енергії, що підводиться при зовнішньому терті.

Проводячи аналіз роботи трибосистем в умовах аномально-низького тертя та зношування рядом вчених [20–21; 34–36], використовувалися хвилі різної природи до структурування поверхневого шару, однак, як канал дисипації зовнішньої енергії, ця складова зовнішнього тертя не розглядалася.

Одна з перших спроб залучення хвильової складової як каналу дисипації виконана в роботі [35]. Автор вважає, що в умовах аномально-низького тертя та зношування на поверхні утворюється квазіупружний шар, в центральній частині якого гіпотетично можлива гідродинамічна деформація, а на периферії в перехідній зоні слід очікувати інтенсивну ротаційну пружнопластичу деформацію, аналогічну структурі вихреутворення в пристіночному шар і при перетіканні рідини. Такий підхід, на наш погляд, можна вважати окремим випадком прояву хвильової складової сили тертя, як каналу дисипації зовнішньої енергії, що підводиться.

Досягнення в області нанотрибології широко узагальнені в роботі [37]. Проводячи термодинамічний аналіз умов рівноважної самоорганізації трибосистем, які піддаються вібраційним впливам, М.Носоновські і В.Мортазаві прийшли до важливого висновку [29; 38–39], що самоорганізація подібних трибосистем здійснюється по термодинамічному каналу виробництва надлишкової ентропії $(1/2)\delta^2\dot{S} \geq 0$, а досягнення умов аномально низького тертя в цьому випадку регулюється величиною імпульсу сили $dS \geq 0 \Rightarrow \vec{F}\vec{V} \leq 0 \Rightarrow \mu \geq 0$.

Даний теоретичний підхід отримав подальший розвиток в роботі [40] в якій показано вплив частотної вібрації на тертя та зношування трибосистеми кремній по нітриду кремнію. Трібометр дозволяв генерувати як нормальні, так і тангенціальні коливання по відношенню до площини тертя. Встановлено, що в діапазоні частот від 4 до 6 кГц спостерігається зниження коефіцієнта тертя від 1 до 0,1, як для нормальної, так і для тангенціальної складової коливань, а також зменшення зносу. Причому в цьому діапазоні амплітуда коливань не становить вирішального значення на зниження сили тертя, починаючи з певної граничної величини.

Аналіз самого ефекту зниження тертя та зношування проводився без зв’язку з фізико-механічними властивостями досліджуваних матеріалів та механізмами дисипації зовнішньої енергії, що підводиться, хоча реологія поведінки матеріалів врахована на кінематичній схемі досліджуваних трибосистем. Підтвердженням правильності такого підходу показано в роботі [41]. Також, як і в роботі

[40], де досліджували вплив мікрозміщень трибоелемента при вібрації в умовах сухого тертя.

Так при розробці нових конструкційних матеріалів [42] вважається доцільним створювати структури, які містять тверді частки, розподілені у відносно м'якій основі. Такими частками можуть бути карбіди кремнію, заліза, легуючих елементів та складні карбіди. Помічено, що наявність у структурі даних матеріалів твердих часток дозволяє уникнути заїдання, зменшити коефіцієнт тертя та знизити інтенсивність зношування. Однак, у даній роботі ці ефекти не отримали теоретичного обґрунтування.

Як об'єкт досліджень взята велика група матеріалів від скла до конструкційної сталі. Встановлено оптимальну область мікрозміщень в якій для всіх досліджуваних матеріалів спостерігалося мінімальне значення відносного коефіцієнта тертя (відношення коефіцієнта тертя при русі до коефіцієнта тертя спокою). При початкових умовах тертя він дорівнює одиниці, а при терті в певних умовах мікрозміщень досягає аномально низьких значень. Нажаль, пояснення цього ефекту із залученням сучасних фізичних теорій зроблено не було.

Проводячи аналіз робіт з дослідження ультразвукових і вібраційних коливань в трибології [29; 38–39], можна зробити висновок, що практично у всіх цих роботах хвильова складова введена в вираз для сили тертя зі знаком мінус, а в роботах [18; 38], вона присутня у вигляді кінцевого результату при зовнішньому хвильовому впливі на трибосистему.

Сила зовнішнього тертя, що направлена проти руху в трибосистемі, відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя та зношування (узагальненою І.В. Крагельським [5] і прийнятою більшістю вчених світу в області трибології), складається з двох складових: молекулярної (адгезійної) F_a і механічної (деформаційної) F_d. Ці складові сили тертя F_{fr} при русі твердих тіл "конфліктують" одна з одною:

$$F_{fr} = F_a + F_d . \qquad (1)$$

При вигладжуванні поверхні із застосуванням методів фінішної обробки, вдається істотним чином понизити механічну складову сили тертя. Але в тих, же пропорціях росте молекулярна складова, яка на етапі припрацювання ініціює адгезійно-когезійне руйнування поверхневого шару трибосистеми. В результаті припрацювання формується рівноважний стан, який відповідає даним умовам тертя (навантаження, швидкість ковзання, температура і т.д.). Це, у свою чергу, визначає величину зовнішньої енергії, яка підводиться до трибосистеми, і, як наслідок, визначає швидкості утворення і руйнування вторинних структур [4] на поверхнях тертя, тобто їх зносостійкість.

Узагальнення великої кількості результатів дослідження граничного тертя [43] показує, що значення коефіцієнтів граничного тертя для різних поєднань матеріалів змащувальних середовищ, відповідно до кривої Герсі-Штрібека, знаходиться в діапазоні 0,005…0,02.

Таким чином, при найпоширеніших режимах тертя і мащення у формуванні сили тертя беруть участь як поверхневий шар елементів трибосистеми, так і змащувальне середовище.

В даний час, у ряді робіт представлені результати експериментальних досліджень з показниками сили тертя, що далеко виходять за ці рамки у бік зменшення [44–45]. Тому пошук теоретичних передумов для переходу зовнішнього тертя з "нормальної області" до аномально низького тертя є своєчасною і актуальною задачею.

Головним аргументом противників теоретичного підходу до можливості досягнення в реальних трибосистемах аномального низького тертя та зношування (нульове тертя, від'ємне тертя) є трактування безповоротності перетворення молекулярно-механічної складової сили тертя в термічну складову.

Розглянемо більш докладно виконання умови законів збереження відносно до аномально низькому тертю та зношуванню у трибології.

Критерій безповоротності K (відповідно до [10]), який визначає відносну роль ефекту тертя, тобто ступеня безповоротності процесу перенесення узагальненої кінетичної взаємодії ΔE через систему, може бути знайдений шляхом співставлення кількості тепла дисипації з роботою входу ΔE в систему. Для системи кінцевої довжини маємо:

$$K = -\frac{\Delta P}{P_2}, \qquad (2)$$

де $\Delta P = P_1 - P_2$.

Із структури критерію безповоротності (2) безпосередньо витікає, що ефект безповоротності залежить тільки від сили і притому від двох її значень P_1 і P_2, або, що те ж саме, від значень величин ΔP і P_2. Ніякі інші характеристики процесу на ступінь його безповоротності не впливають. Із збільшенням сили P_2 і зменшенням різниці ΔP ступінь безповоротності падає.

Відношення (2) показує, яку частку від загальної роботи входу відповідного роду складає робота тертя. Тому він названий критерієм безповоротності процесу. Критерій безповоротності є відношенням різниці сил, під дією якої відбувається перенесення узагальненої кінетичної взаємодії ΔE, до значення сили на вході в систему.

Якщо у (2) різниця ΔP співставляється з величиною P_2, то ступінь безповоротності процесу є

великим і процес виявляється істотно необоротним. Умова протікання необоротного процесу має вигляд $K \approx 1$. При цьому робота тертя співставиться з основною роботою входу ΔE в систему.

Ефект тертя зменшується до нуля, якщо P_2 прагне до нескінченності або ΔP – до нуля. Перший шлях досягнення оборотності у принципі неприступний, оскільки неможливо мати нескінченно велику силу, другий – практично не реалізований, оскільки при сильному зменшенні величини ΔP інтенсивність процесу перенесення ΔE виходить гранично низькій.

Про зв'язок між інтенсивністю перенесення ΔE і різницею сил ΔP, що характеризує ефект безповоротності, можна судити по формулі:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta P}{R}. \quad (3)$$

З цієї формули виходить, що при необмеженому зменшенні ΔP, пов'язаному із зниженням ефекту тертя, повинен необмежено зростати час Δt протікання одиниці ΔE через систему. Відзначений зв'язок між ΔP і Δt створив уявлення про те, що оборотні процеси є нескінченно повільні процеси. Це уявлення в загальному випадку є невірним, оскільки з (3) видно, що нескінченно повільний процес можна здійснити при кінцевій різниці ΔP і нескінченно великому опорі R системи. Такий процес є хоча і нескінченно повільним, але істотно необоротним.

Із зменшенням критерію K ступінь безповоротності процесу зменшується. В межі, коли критерій K прагне до нуля, процес стає оборотним. Отже, оборотному процесу відповідає умова $K<<1$. При цьому робота тертя суттєво мала, порівняно з основною роботою входу ΔE в систему.

Останнім часом для пояснення аномально низького тертя та зношування використовується хвильовий підхід при аналізі енергетичного обміну між поверхнями, що труться. Так в [34] поверхневий шар елементів трибосистеми представляється у вигляді енергетичних осередків представлених їх шорсткістю. При русі поверхонь в кожний момент часу відбувається велика кількість зіткнень мікровиступів. В кожній мікрозоні утворюється тепло, яке розсіюється за законами дисипації. Разом з цим автори звертають увагу, що нагрів мікровиступів відбувається зі швидкістю не більше, ніж десять градусів за секунду, а охолоджування – зі швидкістю тисячі градусів за секунду, що обумовлює формування структури поверхневого шару, який володіє певною гетерогенністю, що пов'язано з нерівномірністю розподілу енергії по висоті мікровиступу. Виходячи з цих міркувань представлена будова поверхневого шару складається з чотирьох зон. Детальний розгляд зон поверхневого шару приводить до висновку, що цей шар є композитом, властивості якого повинні враховуватися при аналізі процесів тертя та зношування.

В даній роботі динаміка кінетичної взаємодії мікровиступів на всій поверхні контакту не розглядалася. Відомо, що будь-яка система, яка складається з дуже великого числа елементів (часток), переходитиме від стану менш імовірного до стану більш імовірного. Термодинамічно це відповідає зменшенню ентропії системи S відповідно до формули Больцмана [46–47]:

$$S = k \cdot \ln W \quad (4)$$

де k – постійна Больцмана;

W – термодинамічна імовірність.

Якщо повернутися до реакції трибосистеми на імпульсну динамічну взаємодію, то відповідно до принципу Ле Шательє, трибосистема переходить в такий стан, в якому ефект зовнішньої взаємодії ослаблюється. Результуюча стану трибосистеми в цьому випадку диктується цими двома основоположними термодинамічними принципами. Тому зростання "вагового значення" хвильової складової сил тертя, яка входить в загальне рівняння із знаком "мінус", є термодинамічно передбаченим.

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 з урахуванням хвильової складової сили тертя F_w, буде мати наступний вигляд:

$$F_{fr} = \left|F_a + F_d\right| \le \left|F_w\right|. \quad (5)$$

Хвильова складова сили тертя F_w є тим "ентропійним насосом", який частину зовнішнього тертя, що не компенсується, переводить у внутрішнє тертя.

Характер взаємодії одиничних мікрошорсткостей представлена моделлю реології Гука [48]. Проведемо аналіз формування хвильової складової в даних умовах контакту. В умовах відсутності взаємного переміщення сили притягання і відштовхування між атомами в другому елементі урівноважені.

Для аналізу контактної взаємодії шорсткостей елементів трибосистеми скористаємося моделлю твердого тіла у вигляді міжатомних зв'язків. Руйнування зв'язку, що виникає (молекулярно-механічна складова сил тертя), такого тіла відбувається за рахунок розриву цих зв'язків при досягненні зовнішньою силою, яка діє на тіло, певного значення.

Якщо зовнішня дія на тіло відсутня, то притягання і відштовхування між атомами в елементах трибосистем знаходяться в рівноважному стані. При цьому атоми знаходяться на відстані один від одного r_0. Цьому положенню рівноваги відповідає міні-

мальне значення потенційної енергії E міжатомної взаємодії. При розтяганні атомного зв'язку за рахунок тертя між шорсткостями на деяку відстань $r - r_0 = \Delta r$ потенційна енергія росте, а сила тяжіння F намагається повернути атоми в початкове положення, тут r – кінцева міжатомна відстань; r_0 – початкова міжатомна відстань. Щоб розірвати зв'язок, потрібно віддалити атоми на достатню відстань, де сила притягання дорівнюватиме нулю.

Роботу, необхідну для розриву (енергію активації розриву зв'язку його дисоціації) позначимо символом D. Залежність потенційної енергії E від відстані між атомами в матеріалі елементів, що взаємодіють, доцільно показати рівнянням Морзе [25]:

$$E = D\left(2e^{-b(\Delta r)} - e^{-2b(\Delta r)}\right), \qquad (6)$$

де b – постійна.

Оскільки сила тяжіння F є похідною від енергії $E(r)$ по r, то

$$F = -\frac{d}{dr}\left[E(r)\right].$$

Максимальне значення цієї сили F_m можна вважати граничним значенням, при якому атоми знаходяться в стані стійкої або нестійкої рівноваги. Іншими словами, це стан, при якому відбувається або не відбувається руйнування зв'язку.

Для потенціалу Морзе:

$$F(\Delta r) = 4F_m\left(e^{-b(\Delta r)} - e^{-2b(\Delta r)}\right), \qquad (7)$$

де $F_m = 0,5bD$.

Значення максимального розтягування Δr_m відповідно:

$$\Delta r_m = -\frac{1}{b}\ln\frac{1}{2}.$$

Якщо D дорівнює енергії, яка вивільняється при руйнуванні зв'язків, тобто енергії сублімації, то можна знайти величину максимального значення сили притягання, і ті значення, при яких атоми знаходитимуться в стані стійкої або нестійкої рівноваги.

Якщо помітити зовнішню силу, що розтягує, як f, то при дії цієї сили атоми будуть в положенні стійкої рівноваги, лише у разі подолання силового бар'єру, для чого необхідно підвести додаткову енергію $E(f)$. Значенню сили f при двох значеннях Δr відповідають два значення потенційної енергії. Знайдемо їх з (6) і (7), замінивши $F\Delta r$ на f і підставивши $z = e^{-b\Delta r}$ в (7), отримаємо рівняння $z^2 - z + f/4F_m = 0$.

Звідси знайдемо значення z_1 і z_2 і відповідні їм значення $\Delta r_{1,2}$:

$$\Delta r_{1,2} = \frac{1}{b}\ln\frac{2}{1 \pm \sqrt{1 - \frac{f}{F_m}}}.$$

Підставляючи Δr_1 і Δr_2 в (6) знайдемо пружну енергію, яка виділяється при руйнуванні зв'язків. Різниця значень пружної енергії при $\Delta r = 0$ і $\Delta r_{1,2}$, тобто кількість енергії $E(f)$, необхідної для подолання силового бар'єру, знайдемо по формулі

$$E(f) = E(\Delta r_{1,2}) - E_0 = 0,25D\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{f}{F_m}}\right)^2, \qquad (8)$$

де E_0 – мінімальне значення потенційної енергії.

З (8) витікає, що для досягнення межі міцності зв'язку необхідно підвести кількість енергії, що дорівнює лише четверті енергії дисоціації [25], тобто

$$E(F_m) = 0,25D. \qquad (9)$$

Таким чином, для розриву зв'язків, що виникають (молекулярної і механічної складової сили тертя) міжатомних зв'язків потрібно достатньо енергоємне джерело зовнішньої механічної сили з урахуванням кількості елементарних зв'язків для реальних систем.

Проте величина цієї енергії, що виділяється при розриві одиничного зв'язку, складає лише четверть від величини енергії (9), яка затрачується на подолання сил тертя.

Сформульовані умови досягнення рівності хвильової і молекулярно-механічної складової сили тертя, тобто досягнення нульового тертя, при поверхневому аналізі можна зробити висновок, що дана трибосистема є вічним двигуном третього роду. Проте це не так. Проводячи аналіз механізмів дисипації енергії, що ззовні підводиться до трибосистеми необхідно враховувати як зовнішнє тертя, так і внутрішнє. Внутрішнє тертя визначається фізико-механічними властивостями матеріалів, визначаючи можливості їх взаємодії з навколишнім середовищем. Зовнішнє тертя відповідає фактичній реалізації взаємодії в трибосистемі і навколишнім середовищем.

Отже, різниця між внутрішніми і зовнішніми ступенями свободи полягає в тому, що внутрішні ступені свободи визначаються можливостями взаємодій, що розташовуються (потенційно закладеними в системі), з навколишнім середовищем; зовнішні ж ступені свободи відповідають фактично взаємодіям, що реалізується між системою і навколишнім середовищем.

Оскільки критерієм безповоротності трибосистем є робота сил тертя, то її виробництво розгляда-

ється автором Вейником на рівні елементарної взаємодії мікрошорсткостей.

Одна з них представлена у вигляді абсолютно жорсткого тіла, яке при дії на нього сил молекулярно-механічної взаємодії не деформується. А другу шорсткість можна представити у вигляді пружини з певною жорсткістю *c*, яка за рахунок сил молекулярно-механічної взаємодії періодично займає два положення, в одному з яких пружина не напружена, а в іншому стисла або розтягнута на величину Δl. При цьому робота пружної сили пружини *A*, між двома її положеннями може бути визначена по формулі:

$$A = \pm\frac{1}{2}c\left(\Delta l\right)^2 .$$

Знак "плюс" береться у разі розвантаження пружини (деформація змінюється від Δl до 0), знак мінус – при навантаженні (деформація змінюється від 0 до Δl).

Отримана формула залишається справедливою і у тому випадку, коли вільний кінець пружини рухається уздовж будь-якої криволінійної траєкторії, послідовно займаючи положення m_1 і m_2.

Якщо пружина деформована в обох даних положеннях (в кінцевому – на величину Δl_2, в початковому – на Δl_1, то має місце формула:

$$A_{m_1 m_2} = -\frac{c}{2}\left[\left(\Delta l_2\right)^2 - \left(\Delta l_1\right)^2\right]. \qquad (10)$$

З урахуванням прийнятої моделі результат, що розглядається кожної взаємодії у вигляді енергетичного осередку, то вираз (10) представляє собою елементарну роботу кінетичного нанополя.

Узагальнену роботу ΔA сил тертя, можна представить виразом узагальненої сили *P* на узагальнену кінетичну взаємодію ΔE за певний період роботи трибосистеми:

$$\Delta A = P\Delta E . \qquad (11)$$

В структурно-енергетичній теорії тертя та зношування загальноприйнятим є термін "механохімічний знос", який являється результатом різних видів робіт (механічної, термічної, електричної, хімічної, кінетичної і пов'язаної з нею хвильової і т.д.). Кожна дана робота специфічна, неповторювана і не може бути підмінена ніякою іншою. Роботі кожного даного роду відповідає пов'язана з нею і з відповідним механізмом дисипації енергія *U*, яка може бути представлена виразом:

$$dU = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta A_i . \qquad (12)$$

Робота зіставляється зі зміною енергії системи. Отже, робота є кількісною мірою взаємодії системи і навколишнього середовища, тобто кількісну міру дії навколишнього середовища на систему і навпаки. На цій підставі роботу іноді називають кількістю дії [10].

Робота є характерним прикладом величини, яка не є властивістю системи в прийнятому вище значенні. Робота представляє собою функцію процесу: вона виконується в процесі перенесення і перетворення різних видів енергій трибосистеми. У момент закінчення процесу робота припиняється, а в процесі дисипації підведеної до трибосистеми енергії продовжується в достатньо тривало в часі [49]. Про якісну і кількісну сторону виконаної в процесі, що закінчився, роботи трибосистеми можна судити по непрямих ознаках. По змінах перерахованих вище механізмів дисипації підведеної механічної енергії через узагальнену силу з урахуванням суперпозиції енергетичного складання, кожної з перерахованої раніше сил механізмів дисипації.

З (12) видно, що позитивна робота супроводжується збільшенням енергії системи, при цьому обидві величини dU і ΔA являються позитивними. Енергія зростає, якщо над системою роботу виконує навколишнє середовище. Отже, позитивною вважається робота, що виконується навколишнім середовищем.

В більшості випадків (термічна, електрична, хімічна, магнітна і т.д. узагальнені рухи) форм перетворення енергій відповідає позитивній роботі оцінюваних позитивним приростом ΔE.

Разом з тим є узагальнені рухи, для яких позитивна робота, пов'язана із зростанням енергії системи, супроводжується зменшенням ΔE, тобто переходом її з системи в оточуюче середовище. До числа таких узагальнених рухів відноситься, хвильова складова дисипації енергії, що ззовні підводиться.

При роботі трибосистеми енергія від зовнішнього тертя передається в об'єм елементів трибосистем повздовжніми хвилями у хвильовій складовій (5). Якщо в поверхневому шарі в результаті балансу між молекулярно-механічною і хвильовою складовою, поверхневий шар знаходиться в квазірівноважному стані, то повздовжня складова в локальних енергетичних осередках через різниці подовжніх швидкостей на межах розділу досягши цієї різниці $\Delta\nu_{кр}$ призводить до миттєвого руйнування матеріалу в даній зоні. Що було зареєстровано експериментально [38] при роботі трибосистеми в умовах від'ємного тертя. Враховуючи цю обставину цілком логічний висновок, що від'ємного тертя в даному випадку немає – ми спостерігає від'ємний вектор додатку сили тертя. І руйнівним механізмом дисипації (зношування і зростання середньо поверхневої температури) є внутрішнє тертя. Оскільки питання утворення і трансформації хвиль якнайповніше розроблено в електротехніці з відповідною термінологією, проведемо аналіз правомірності використовування її при аналізі хвильової складової сили тертя.

Так в розділі електротехніки [50], що присвячений режиму роботи довгої лінії в залежності від

величини коефіцієнта віддзеркалення виділяють три режими: перший режим хвилі, що біжить, другий режим стоячих хвиль і третій режим комбінованих хвиль. Виникнення того або іншого режиму в лінії залежить від величини і характеру опору навантаження і його співвідношення з хвильовим опором.

Висновки

До розвитку теоретичного і прикладного підходу до переводу роботи трибосистем умов з нормального механохімічного до аномально низького тертя та зношування необхідно притягнення більш глибоких досліджень в області фізики твердого тіла, матеріалознавства та нерівноважної термодинаміки.

Проведений аналіз аномально-низького тертя в трибології показав, що прийнята на сьогоднішній час молекулярно-механічна теорія зношування практично ставить бар'єр в поясненні нульового, а тим більше від'ємного тертя, що реєструється при випробуваннях. Для подолання даного бар'єру висунута гіпотеза про існування хвильової складової сили тертя, яка отримала подальше теоретичне обґрунтування і експериментальне підтвердження.

Проведенні дослідження дають основу вважати, що закон збереження енергії (третій закон термодинаміки) при нульовому і від'ємному терті не порушується.

Дисипація енергії відбувається по каналу хвильової складової сили тертя, яка формує на поверхні розділу кінетичне нанополе складовими якого при аномально-низькому терті є процеси дисипації і антидисипації, що йдуть з поглинанням та виділенням енергії, по аналогії з екзотермічною і ендотермічною реакцією в хімії [52].

Список літератури

1. Amiri M. On the thermodynamics of friction and wear – a review / M. Amiri, M.M. Khonsari // Entropy. – 2010. – Vol. 12. – P. 1021-1049.
2. Yunhui M. Research on friction-coatings with activated ultra-thick tin-base / M. Yunhui, T. Dehua, W. Xicheng, et al. // Advances in Tribology. – 2010. – P. 915-919.
3. Денисова Н.Е. Триботехническое материаловедение и триботехнология / Н.Е. Денисова, В.А. Шорин, И.Н. Гонтарь и др. // Под общей редакцией Н.Е. Денисовой. – Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2006. – 248 с.
4. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.
5. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Запорожець В.В. Механізм дисипації енергії при терті металокерамічного шару в технологіях триботехнічного відновлення деталей машин і механізмів / В.В. Запорожець, В.М. Стадніченко, О.М. Трошін // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – № 2(22). – Х.: ХУПС. – С. 113-118.
7. Трошин О.Н. Методические аспекты неравновесной самоорганизации трибосистем / О.Н. Трошин, В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1(37). – С. 233-241.
8. Запорожец В.В. О механизмах подвижности металлокерамического слоя в технологиях триботехнического восстановления деталей / В.В. Запорожец, В.М. Стадниченко, О.Н. Трошин // Військово-технічний збірник. – Львів: АСВ, 2010. – № 3. – С. 101-106.
9. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). – 5-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд. МСХА, 2002. – 632 с.
10. Вейник А.И. Термодинамическая пара / А.И. Вейник. – Минск: Наука и техника, 1973. – 383 с.
11. Федоров С.В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма / С.В. Федоров // Известия КГТУ. – 2007. – № 11. – С. 22-31.
12. Запорожец В.В. Идентификация наноизносных режимов трения с использованием метода акустической эмиссии / В.В. Запорожец, В.Н. Стадниченко // Технологические системы. – 2012. – № 4. – С. 42-56.
13. Запорожец В.В. Теоретические и экспериментальные основы акустико-эмиссионной идентификации механизмов изнашивания и прогнозирования ресурса трибосистем / В.В. Запорожец, В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин // Проблеми трибології. – 2013. – № 1. – С. 16-29.
14. Запорожец В.В. Механізми припрацювання пар тертя в об'ємних гідромашинах в умовах нанозношування в присутності трибовідновлюючих сумішей / В.В. Запорожец, В.Н. Стадниченко // Проблеми трибології. – 2013. – № 4. – С. 92-95.
15. Николис Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин; Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 344 с.
16. Пригожин И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
17. Арнольд В.И. Теория катастроф / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 2000. – 128 с.
18. Стадниченко В.Н. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин, Н.Г. Стадниченко // Збірник наукових праць ХУПС. – 2011. – № 1(27) – С. 51-61.

19. Бершадский Л.И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем / Л.И. Бершадский // Трение и износ. – 1992. – № 6. – С. 1077-1094.

20. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания / В.И. Владимиров // Физика износостойкости поверхностей металлов: Сб. науч. тр. Физико-технический институт. – 1988. – С. 8-41.

21. Шлихтинг И.И. Теория пограничного слоя / И.И. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

22. Дзюба А.Ф. Технология 2-кратного увеличения скорости хода тихоходных судов (сухогрузов, танкеров, супертанкеров) [Електронний ресурс] / А.Ф. Дзюба. – Ростов-на-Дону, 2010. – 35 с. – Режим доступу: http://www.relga.ru/tgu/upload/Media/4160.pdf.

23. Стадниченко В.Н. Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия, полученного с помощью ревитализантов / В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко, Р.Н. Джус // Вестник науки и техники. – 2004. – № 1(16). – С. 18-27.

24. Тесла Н. Утраченные изобретения Николы Тесла / Н. Тесла. – М.: Эксмо, 2009. – 288 с.

25. Ханин М.В. Механическое изнашивание материалов / М.В. Ханин. – М.: Изд. стандартов, 1984. – 152 с.

26. Войтов В.А. Технологии триботехнического восстановления – обзор и анализ перспектив / В.А. Войтов, Н.Г. Стадниченко, Р.Н. Джус // Проблеми трибології. – 2005. – № 2. – С. 67-74.

27. Трошин О.Н. Неравновесная самоорганизация в трибосистемах // Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: Збірник тез доповідей 15 науково-технічної конференції від 17-18 вересня 2015 р. / ДНВЦ ЗС України. – Чернігів: ФОП Брагинець О.В., 2015. – С. 178-179.

28. Трошин О.Н. Научная парадигма достижения аномально низкого трения в трибологии / О.Н. Трошин // Вісник ХНТУСГ. – 2017. – № 184. – С. 102-110.

29. Nosonovsky M. Friction-Induced Vibrations and Self-Organization. Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact / M. Nosonovsky, V. Mortazavi. – Boca Raton: Taylor & Francis Group. – 2014. – 331 p.

30. Буданов Б.В. Взаимосвязь трения и колебаний / Б.В. Буданов, В.А.Кудинов, Д.М.Толстой // Трение и износ. – 1980. – №1. – С. 79-89.

31. Пат. 2397101 С1 РФ, МПК B63B 1/36 (2006.01) Устройство для увеличения скорости хода судна / Дзюба А.Ф. ; патентообладатель: Дзюба А.Ф. – № 2009121794/11; заявл. 08.06.2009; опубл. 20.08.2010, бюл. № 23.

32. Запорожець В.В. Фізичні основи нерівноважного самовпорядкування в трибосистемі / В В. Запорожець, В.М. Стадниченко, О.М. Трошін // Технологические системы. – 2013. – № 4(65). – С. 62-70.

33. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова. – М.: РАН, 1992. – 160 с.

34. Васильев А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, А.М. Дальский, Ю.М. Золотаревский. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.

35. Погодаев Л.И. Структурно-энергетические модели поведения (надежности) материалов при импульсном нагружении [Электронный ресурс] / Л.И. Погодаев // Трение, износ, смазка. – 2013. – Т. 15, № 57. – Режим доступа: http://www.tribo.ru/.

36. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности: монографія / Б.В. Протасов. – Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1979. – 152 с.

37. Bhushan B. Nanotribology and Nanomechanics an Introduction / B. Bhushan. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – 1148 p.

38. Stadnichenko V.M. Gray's Paradox and Wave Solutions in Explaining Anomalously Low Friction and Wear in Tribology / V.M. Stadnichenko, O.M. Troshin // International Journal of Materials Science and Applications. – 2016. – № 1. – P. 23-30.

39. Стадниченко В.Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловым потоком / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин // Вісник технічного університету "ХПІ". – 2007. – № 17. – С. 49-62.

40. Gutowski P. Computational Model for Friction Force Estimation in Sliding Motion at Transverse Tangential Vibrations of Elastic Contact Support / P. Gutowski, M. Leus // Tribology International. – 2015. – № 1. – P. 455-462.

41. Starcevic J. Simulation of the influence of ultrasonic in-plane oscillations on dry friction accounting for stick and creep / J. Starcevic, A.E. Filippov // Physical Mesomechanics. – 2012. – № 3. – P. 330-332.

42. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания [Электронный ресурс] / В.И. Владимиров // Трение, износ, смазка. – 2008. – № 2. – С. 7-31. – Режим доступа: http://www.tribo.ru/.

43. Справочник по триботехнике: Т. 1. Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

44. Конюшая Ю.П. Открытия советских ученых / Ю.П. Конюшая. – М.: Московский рабочий, 1979. – 688 с.

45. Стадниченко В.Н. Прогнозирование ресурса трибосистем, работающих в режиме наноизнашивания, методом акустической эмиссии / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин, А.В. Приймак // Збірник наукових праць ХУПС. – 2010. – № 4(26). – С. 41-48.

46. Бокштейн Б.С. Атомы блуждают по кристаллу / Б.С. Бокштейн. Под ред. Л.С. Асломазова. – М.: Наука, 1984. – 208 с.

47. Макаров З.Ю. Рациональный статус случайности в научном детерминизме / З.Ю. Макаров // Філософія науки: традиції та інновації. – 2014. – № 2(10). – С. 60-73.

48. Рейнер М. Реология / М. Рейнер; пер. с англ. – М.: Наука, 1965. – 224 с.

49. Баранов А.В. Самоорганизация трибосистем при граничном трении металлов / А.В. Баранов, В.А. Вагнер, С.В. Тарасевич и др. // Ползуновский вестник. – 2009. – № 2. – С. 155-158.

50. Шимони К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М.: Книга по требованию, 2012. – 776 с.

51. Pursell C.W. From playgrounds to PlayStation: the interaction of technologyand play [Electronic resource] / C.W. Pursell. – J.Hopkins Univ.Press. – Baltimore, Meryland, 2015. – Available at: https://jhupbooks.press.jhu.edu/title/playgrounds-playstation.

52. Мала гірнича енциклопедія / за ред. В.С. Білецького. – Донецьк: Схід. видав. дім, 2013. – Т. 3. – 644 с.

References

1. Amiri, M. and Khonsari, M.M. (2010), On the thermodynamics of friction and wear – a review, *Entropy*, Vol. 12, pp. 1021-1049.

2. Yunhui, M., Dehua, T., Xicheng, W. and Qinghua, L. (2010), Research on friction-coatings with activated ultra-thick tin-base, *Advances in Tribology*, pp. 915-919.

3. Denisova, N.E., Shorin, V.A., Gontar, I.N., Volchihina, N.I. and Shorina, N.S. (2006), "*Tribotehnicheskoe materialovedenie i tribotehnologiya*" [*Tribotechnical material science and tribotechnology*], Penza state univ., Penza, 248 p.

4. Kostetskiy, B.I., Nosovskiy, I.G. and Karaulov, A.K. (1976), "*Poverhnostnaya prochnost materialov pri trenii"* [*Surface strength of materials under friction*], Tehnika, Kyiv, 296 p.

5. Kragelskiy, I.V., Dobyichin, M.N. and Kombalov, V.S. (1977), "*Osnovyi raschetov na trenie i iznos*" [*Basics of calculations for friction and wear*], Mashinostroenie, Moscow, 526 p.

6. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.N. and Troshin, O.M. (2010), "Mehanizm disipatsiyi energiyi pri terti metalokeramichnogo sharu v tehnologiyah tribotehnichnogo vidnovlennya detaley mashin i mehanizmiv" [Mechanism of dissipation of energy in the friction of the metal-ceramic layer in the technologies of tribotechnical restoration of machine parts and mechanisms], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 2(22), pp. 113-118.

7. Troshin, O.N., Stadnichenko, V.N., Stadnichenko, N.G., Zhukov, R.A. and Krasnitskiy, S.V. (2014), "Metodicheskie aspektyi neravnovesnoy samoorganizatsii tribosistem" [Methodical aspects of non-equilibrium tribosystem self-organization], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 1(37), pp. 233-241.

8. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.M. and Troshin, O.N. (2010), "*O* mehanizmah podvizhnosti metallokeramicheskogo sloya v tehnologiyah tribotehnicheskogo vosstanovleniya detaley" [About the mechanisms of mobility of the metal-ceramic layer in the technologies of tribotechnical restoration of parts], *Military-Technical Collection*, No. 3, pp. 101-106.

9. Garkunov, D.N. (2002), "*Tribotehnika (konstruirovanie, izgotovlenie i ekspluatatsiya mashin*" [*Tribotechnics (design, manufacture and operation of machines)*], Izdatelstvo MSHA, Moscow, 632 p.

10. Veynik, A.I. (1973), "*Termodinamicheskaya para*" [*Thermodynamic pair*], Nauka i tehnika, Minsk, 383 p.

11. Fedorov, S.V. (2007), "Obschie zakonomernosti evolyutsii treniya s pozitsiy samoorganizatsii i sinergizma" [General regularities of the evolution of friction from the standpoint of self-organization and synergism], *Izvestiya KGTU*, No. 11, pp. 22-31.

12. Zaporozhets, V.V. and Stadnichenko, V.N. (2012), "Identifikatsiya nanoiznosnyih rezhimov treniya s ispolzovaniem metoda akusticheskoy emissii" [Identification of nano-wear friction modes using the method of acoustic emission], *Tehnologicheskie sistemy*, No. 4, pp. 42-56.

13. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.M. and Troshin, O.N. (2013), "Teoreticheskie i eksperimentalnyie osnovyi akustiko-emissionnoy identifikatsii mehanizmov iznashivaniya i prognozirovaniya resursa tribosistem" [Theoretical and experimental fundamentals of acoustic emission identification of wear mechanisms and tribosystem resource prediction], *Problems of tribology*, No. 1, pp. 16-29.

14. Zaporozhets, V.V. and Stadnichenko, V.N. (2013), "MehanIzmi pripratsyuvannya par tertya v ob'emnih gidromashinah v umovah nanoznoshuvannya v prisutnosti tribovidnovlyuyuchih sumishey" [Mechanisms of working of friction pairs in volumetric hydrofoils under conditions of nanosilence in the presence of tribo-reducing mixtures], *Problems of tribology*, No. 4, pp. 92-95.

15. Nikolis, G. and Prigozhin, I. (2000), "*Poznanie slozhnogo"* [*Exploring Complexity*], Mir, Moscow, 344 p.

16. Prigozhin, I. and Stengers, I. (1984), "*Poryadok iz haosa: Novyiy dialog cheloveka s prirodoy"* [*Order out of chaos: Man's new dialogue with nature*], Progress, Moscow, 432 p.

17. Arnold, V.I. (2000), "*Teoriya katastrof*" [*The theory of catastrophes*], Nauka, Moscow, 128 p.

18. Stadnichenko, V.N., Troshin, O.N., Stadnichenko, N.G., Priymak, A.V. and Prosyanik, I.I. (2011), "Klassifikatsiya vidov nanoiznosa po znacheniyu koeffitsienta dissipatsii podvodimoy vneshney energii k tribosisteme" [Classification of types of nano-bearing by the value of the coefficient of dissipation of the supplied external energy to the tribosystem], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 1(27), pp. 51-61.

19. Bershadskiy, L.I. (1992), "O samoorganizatsii i kontseptsiyah iznosostoykosti tribosistem" [About self-organization and concepts of wear resistance of tribosystems], *Friction and Wear*, No. 6, pp. 1077-1094.

20. Vladimirov, V.I. (1988), "Problemyi fiziki treniya i iznashivaniya" [Problems of friction and wear physics], *Fizika iznosostoykosti poverhnostey metallov: Sb. nauch. tr. Fiziko-tehnicheskiy institut*, pp. 8-41.

21. Shlihting, I.I. (1974), "*Teoriya pogranichnogo sloya*" [*Theory of the boundary layer*], Nauka, Moscow, 712 p.

22. Dzyuba, A.F. (2010), "*Tehnologiya 2-kratnogo uvelicheniya skorosti hoda tihohodnyih sudov (suhogruzov, tankerov, supertankerov*)" [*The technology of 2-fold increase in the speed of low-speed vessels (dry cargo, tankers, supertankers)*], Rostov-na-Donu, 35 p., available at: http://www.relga.ru/tgu/upload/Media/4160.pdf (accessed 1 March 2012).

23. Stadnichenko, V.N., Stadnichenko, N.G., Dzhus, R.N. and Troshin, O.N. (2004), "Ob obrazovanii i funktsionirovanii metallokeramicheskogo pokryitiya, poluchennogo s pomoschyu revitalizantov" [On the formation and functioning of a cermet coating obtained using revitalizants], *Bulletin of Science and Technology*, No. 1(16), pp. 18-27.

24. Tesla, N. (2009), "*Utrachennyie izobreteniya Nikolyi Tesla*" [*The lost inventions of Nikola Tesla*], Eksmo, Moscow, 288 p.

25. Hanin, M.V. (1984), "*Mehanicheskoe iznashivanie materialov*" [*Mechanical wear of materials*], Izd. Standartov, Moscow, 152 p.

26. Voytov, V.A. Stadnichenko, N.G., Dzhus, R.N., Stadnichenko, V.N. and Bilyik, V.P. (2005), "Tehnologii tribotehnicheskogo vosstanovleniya – obzor i analiz perspektiv" [Tribotechnical recovery technologies – review and analysis of perspectives], *Problems of Tribology*, No. 2, pp. 67-74.

27. Troshin, O.N. (2015), "Neravnovesnaya samoorganizatsiya v tribosistemah" [Nonequilibrium self-organization in tribosystems], *Creation and modernization of armament and military equipment in modern conditions: Collection of Abstracts of 15 Scientific and Technical Conferences*, DNVTs ZS Ukrayini, FOP Braginets O.V., Chernigiv, pp. 178-179.

28. Troshin, O.N. (2017), "Nauchnaya paradigma dostizheniya anomalno nizkogo treniya v tribologii" [The scientific paradigm of achieving abnormally low friction in tribology], *Journal of HNTUSG*, No. 184, pp. 102-110.

29. Nosonovsky, M. and Mortazavi, V. (2014), *Friction-Induced Vibrations and Self-Organization. Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 331 p.

30. Budanov, B.V., Kudinov, V.A. and Tolstoy, D.M. (1980), "Vzaimosvyaz treniya i kolebaniy" [The relationship of friction and vibrations], *Friction and Wear*, No. 1, pp.79-89.

31. Dzyuba, A.F. (2006), Pat. 2397101 S1 RF, MPK V63V 1/36 (2006.01) "*Ustroystvo dlya uvelicheniya skorosti hoda sudna*" [*Device to increase the speed of the ship*], No. 2009121794/11, stated 08.06.2009, published 20.08.2010, newsletter No. 23.

32. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.M. and Troshin, O.M. (2013), "Fizichni osnovi nerivnovazhnogo samovporyadkuvannya v tribosistemi" [Physical foundations of unsustainable self-order in tribosystems], *Technological Systems*, No.4 (65), pp. 62-70.

33. Ivanova, V.S. (1992), "*Sinergetika: prochnost i razrushenie metallicheskih materialov*" [*Synergetics: strength and destruction of metallic materials*], RAN, Moscow, 160 p.

34. Vasilev, A.S. Dalskiy, A.M., Zolotarevskiy, Yu.M and Kondakov, A.I. (2005), "*Napravlennoe formirovanie svoystv izdeliy mashinostroeniya*" [*Directional formation of the properties of engineering products*], Mashinostroenie, Moscow, 384 p.

35. Pogodaev, L.I. (2013), "Strukturno-energeticheskie modeli povedeniya (nadezhnosti) materialov pri impulsnom nagruzhenii" [Structural and energy models of behavior (reliability) of materials under pulsed loading], *Friction, Wear, Grease*, Vol. 15, No. 57, available at: www.tribo.ru/ (accessed 17 March 2015).

36. Protasov, B.V. (1979), "*Energeticheskie sootnosheniya v tribosopryazhenii i prognozirovanie ego dolgovechnosti*" [*Energy relations in tribo-conjugation and prediction of its durability*], Saratov University, Saratov, 152 p.

37. Bhushan, B. (2005), *Nanotribology and Nanomechanics an Introduction*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1148 p.

38. Stadnichenko, V.M. and Troshin, O.M. (2016), Gray's Paradox and Wave Solutions in Explaining Anomalously Low Friction and Wear in Tribology, *International Journal of Materials Science and Applications*, Vol. 5, No. 1, pp. 23-30.

39. Stadnichenko, V.N. and Troshin, O.M. (2007), "Sinergeticheskaya kontseptsiya samoorganizatsii v tribologicheskih sistemah pri upravlenii teplovyim potokom" [Synergetic concept of self-organization in tribological systems in the management of heat flow], *Bulletin of the Technical University* "*KhPI*", No. 17, pp. 49-62.

40. Gutowski, P. and Leus, M. (2015), Computational Model for Friction Force Estimation in Sliding Motion at Transverse Tangential Vibrations of Elastic Contact Support, *Tribology International*, Vol. 90, No. 1, pp. 455-462.

41. Starcevic, J. and Filippov, A.E. (2012), Simulation of the influence of ultrasonic in-plane oscillations on dry friction accounting for stick and creep, *Physical Mesomechanics*, Vol. 15, No. 3, pp. 330-332.

42. Vladimirov, V.I. (2008), "Problemyi fiziki treniya i iznashivaniya" [Problems of friction and wear physics], *Friction, Wear, Grease*, Vol. 10, No. 2, pp. 7-31, available at: www.tribo.ru/ (accessed 22 March 2011).

43. Hebda, M. and Chichinadze, A.V. (1989), "*Spravochnik po tribotehnike: v 3 t. T.1. Teoreticheskie osnovy*" [*Tribotech Handbook: in 3 vol. Vol. 1. Theoretical basis*], Mashinostroenie, Moscow, 400 p.

44. Konyushaya, Yu.P. (1979), "*Otkryitiya sovetskih uchenyih*" [*Discoveries of Soviet scientists*], Moscow Worker, Moscow, 688 p.

45. Stadnichenko, V.N., Troshin, O.N., Priymak, A.V., Kisel, E.A., Veretelnikov, R.S. and Gurzhiy, K.A. (2010), "Prognozirovanie resursa tribosistem, rabotayuschih v rezhime nanoiznashivaniya, metodom akusticheskoy emissii" [Predicting the resource of tribosystems operating in the nanodelivery mode using the acoustic emission method], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 4(26), pp. 41-48.

46. Bokshteyn, B.S. (1984), "*Atomyi bluzhdayut po kristallu in Richardson*" [*Atoms wander around the crystal*], Nauka, Moscow, 208 p.

47. Makarov, Z.Yu. (2014), "Ratsionalnyiy status sluchaynosti v nauchnom determenizme" [The rational status of randomness in scientific determinism], *Philosophy of Science: traditions and innovations*, No. 2(10), pp. 60-73.

48. Reyner, M. (1965), "*Reologiya*" [*Rheology*], Nauka, Moscow, 224 p.

49. Baranov, A.V., Vagner, V.A., Tarasevich, S.V. and Byikova, O.V. (2009), "Samoorganizatsiya tribosistem pri granichnom trenii metallov" [Self-organization of tribosystems during boundary friction of metals], *Polzunov messenger*, No. 1-2, pp. 155-158.

50. Shimoni, K. (2012), "*Teoreticheskaya elektrotehnika*" [*Theoretical Electrical Engineering*], Book on demand, Moscow, 776 p.

51. Pursell, C.W. (2015), *From playgrounds to PlayStation: the interaction of technologyand play*, J.Hopkins Univ.Press, Baltimore, Meryland, available at: https://jhupbooks.press.jhu.edu/title/playgrounds-playstation (accessed 11 May 2016).

52. Biletskiy, V.S. (2013), "*Mala girnicha entsiklopediya: Tom 3*" [*Small mining Encyclopedia*: *Vol. 3*], Eastern Publishing House, Donetsk, 644 p.

Надійшла до редколегії 16.04.2019
Схвалена до друку 21.05.2019

Відомості про авторів:

Войтов Віктор Анатолійович
доктор технічних наук професор
завідувач кафедри
Харківського національного технічного університету
сільського господарства ім. П. Василенка,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0003-4661-115X

Стадниченко Вячеслав Миколайович
доктор технічних наук професор
професор
Національного авіаційного університету,
Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3450-3899

Варваров Валерій Володимирович
курсовий офіцер
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0003-1273-5605

Information about the authors:

Viktor Voytov
Doctor of Technical Sciences Professor
Head of the Department
of Petro Vasilenko National
Technical University of Agriculture,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-4661-115X

Vyacheslav Stadnychenko
Doctor of Technical Sciences Professor
Professor
of National Aviation University,
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-3450-3899

Valeriy Varvarov
Course Officer
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Forces University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-1273-5605

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИРОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДОСТИЖЕНИЯ АНОМАЛЬНО НИЗКОГО ТРЕНИЯ И ИЗНОСА В ТРИБОЛОГИИ

В.А. Войтов, В.Н. Стадниченко, В.В. Варваров

В статье достаточно подробно проанализированы теоретические и экспериментальные предпосылки достижения аномально низкого трения и износа в трибологии с позиции современных физических теорий и квантомеханического подхода к объяснению диссипации энергии при внешнем трении. Проведенный анализ позволил выдвинуть гипотезу о существовании волновой составляющей силы трения, которая может быть использована в объяснении аномально-низкого трения в трибологии

Ключевые слова: *аномально низкое трение и износ, нулевое трение, негативное трение, отрицательное трение, трибосистема, энтропийный насос, молекулярно-механическая составляющая силы трения, волновая составляющая силы трения.*

THEORETICAL AND NATURAL PRECONDITIONS TO ACHIEVE ABNORMAL LOW FRICTION AND WEAR IN TRIBOLOGY

V. Voytov, V. Stadnychenko, V. Varvarov

The article presents the theoretical and experimental prerequisites for achieving abnormally low friction and wear in tribology from the perspective of modern physical theories and quantum-mechanical approach to the explanation of energy dissipation under external friction. Modern achievements of structural-energetic and molecular-mechanical theories of friction and wear allow us to consider the tribosystem as a generator of the transformation of mechanical energy into heat. All measures aimed at increasing the wear resistance of tribosystems, directly or indirectly aimed at increasing the efficiency of this heat generator, and in this direction identified two main paths. The first is to reduce the amount of energy expended on the destruction of the surface layer by improving the lubricant, the structures of materials, the application of various types of wear-resistant coatings; the second is the improvement of the conditions of contact interaction, the reduction of the coefficient of friction and, as a consequence, the reduction of the absolute magnitude of the external energy supplied to the tribosystem. The second way is more promising. The modern development of tribomaterial studies allowed formulating a new, rather effective way of reducing friction and wear of different tribosystems by tribomodification of the surface layer. The purpose of such tribodomodification is to create the most favorable (compatible, for Harkunov) conditions of microcontact quasi-elastic interaction that occurs at the level of microrelief. Consideration of quasi-elastic interaction from the position of nonequilibrium thermodynamics allowed the authors of some papers to put forward the hypothesis that such interaction may be an anti-dissipative factor, which leads to the withdrawal of accumulated internal energy from the tribosystem. Among these factors, the main contribution belongs to the kinetic (wave) component of the frictional force, which is formed with a difference in braking rates with molecular-mechanical interaction and slipping when accelerating them.

Keywords: *abnormally low friction and wear, "zero" friction, "negative" friction, tribosystem, entropy pump, molecular-mechanical component of the friction force, wave component of the friction force.*