

Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 621.891

DOI: 10.30748/zhups.2018.55.18

О.М. Трошін, М.Г. Стадніченко, В.О. Приходько, Р.А. Замковий

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

КВАНТО-МЕХАНІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОЯСНЕННЯ АНОМАЛЬНОГО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В ТРИБОЛОГІЇ

У статті представлені теоретичні та експериментальні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології з позиції сучасних фізичних теорій і кванто-механічного підходу до пояснення дисипації енергії при зовнішньому терті.

Ключові слова: аномально низьке тертя та зношування, «негативне» тертя, трибосистема, ентропійний насос, молекулярно-механічна і хвильова складові сили тертя.

Вступ

Постановка проблеми. Проводячи аналіз роботи трибосистем в умовах аномально низького тертя та зношування рядом вчених [1–5], 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 у роботі [3]. Автор вважає, що в умовах аномально низького тертя та зношування на поверхні утворюється квазі-пружний шар, в центральній частині якого гіпотетично можлива гідродинамічна деформація, а на периферії в перехідній зоні слід очікувати інтенсивну ротаційну пружно-пластичну деформацію, аналогічну структурі вихроутворення у пристінковому шарі при течії рідини.

Такий підхід, на наш погляд, можна вважати окремим випадком прояву хвильової складової сили тертя, як каналу дисипації зовнішньо підведеної енергії.

Аналіз основних досягнень і публікацій. Досягнення в області нанотрибології широко узагальнені в роботі [6]. Проводячи термодинамічний аналіз умов рівноважної самоорганізації трибосистем, які піддаються вібраційним впливам М. Носоновські і В. Мортазаві [7–9] прийшли до важливого висновку, що самоорганізація подібних трибосистем здійснюється по термодинамічному каналу виробництва надлишкової ентропії $0,5\delta^2\dot{S} \geq 0$, а досягнення умов аномально низького тертя у 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 у роботі [10], в якій показано вплив частотної вібрації на тертя та зношування трибосистеми «кремнію по нітриду кремнію». Трибометр дозволяє генерувати як нормальні, так і тангенціальні коливання 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 складових коливань, а також зменшення зносу. Причому в цьому діапазоні амплітуда коливань не має 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 і механізмами дисипації зовнішньо підведеної енергії. Підтвердженням правильності такого підходу показано в роботі [11]. Також як і в роботі [10] досліджували вплив мікрозміщень зразка при вібрації в умовах сухого тертя. В якості об'єкта досліджень взята велика група матеріалів від скла до конструкційної сталі.

Встановлена оптимальна область мікрозміщень в якій для всіх досліджуваних матеріалів спостерігалася 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 мікрозміщення досягає аномально низьких значень. На жаль пояснення цього ефекту із залученням сучасних фізичних теорій зроблено не було.

Проводячи аналіз робіт з дослідження ультразвукових і вібраційних коливань в трибології [7–9], можна зробити висновок, що практично у всіх цих роботах хвильова складова сили тертя, уведена в вираз для сили тертя зі знаком мінус [9; 12] і прису-

тня у вигляді кінцевого результату при зовнішньому хвильовому впливі на триботехнічні показники.

Метою досліджень цієї роботи є аналіз впливу коливань, що генеруються в самій трибосистемі як чинник досягнення умов аномально низького тертя та зношування з позиції квантомеханічного підходу для реальних трибосистем.

Виклад основного матеріалу

Результати експериментальних досліджень [8–9; 14] дали підстави для формування гіпотези пояснення аномально низького тертя заснованої на термодинамічному аналізі кінетичного взаємодії квазіпружних тіл [15].

Справжні частоти, що генеруються при терті на рівні контакту мікрошорсткості можуть знаходитись в діапазоні більш високих частот [12] в залежності від швидкості пересування. Причому ці автоколивання можуть надавати вирішальні значення на зниження тертя та зношування, приводячи їх до аномально низького значення при досягненні певного рівня симетрії (гармонійного резонансу) – утворення біжучої і стоячої хвилі реєструються в низькочастотній області.

Термодинамічний аналіз каналів дисипації зовнішньо підведеної енергії проведений у роботах [8; 15] показав, що існують два рівня самоорганізації рівноважна та нерівноважна. У першому випадку, існують дисипативні рівноважні структури, у другому випадку дисипативні нерівноважні структури. Для першого випадку рівновага досягається за допомогою термодинамічної ентропії, в другому випадку саморегулювання відбувається за допомогою надлишкового виробництва ентропії $\delta^2 S$.

На думку авторів [16–18], які проводили аналіз зовнішнього тертя з термодинамічних позицій виробництво надлишкової ентропії, може бути тільки позитивним. У теж час в дослідженнях процесів самоорганізації в хімічних технологіях [19–20] показано, що в умовах нерівноважної самоорганізації виробництва надлишкової ентропії може змінюватися, як в позитивному, так і в негативному напрямку. Тобто визнається одночасне присутність процесів дисипації і антидисипації, які можуть проходити як з виділенням тепла, так і з її поглинанням (рис. 1).

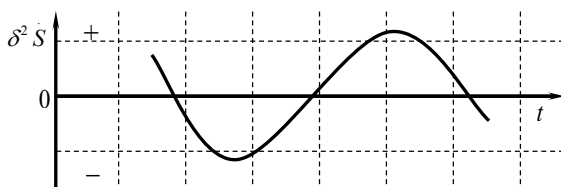


Рис. 1. Виробництво надлишкової ентропії для дисипативних нерівноважних процесів самоорганізації за І. Пригожином [19]

Клас трибосистем, які працюють за цим принципом і створених в результаті природних еволюційно-трансформаційних процесів руху об'єднані автором роботи [21] в групу номінальних трибосистем. Більш правильно було б назвати цю групу трибосистемами наділеними властивостями штучного інтелекту. Цілком логічне застосування до аналізу таких трибосистем крім синергетичного та термодинамічного підходів – кібернетичного, який апелює прямими і зворотними зв'язками, що реалізують принципи біологічної еволюції живої матерії у неживій. Реалізація принципів еволюції такого роду трибосистем, дозволяє реалізувати принцип максимальної надійності при зміні зовнішніх умов тертя (навантажувально-швидкісні, температурні і т. д.), за межою стійкості.

Так проводячи аналіз кінетичної взаємодії такого роду тертьових тіл А. І. Вейником [22] висунута гіпотеза про можливість як нульового, так і негативного тертя в трибології на основі визнання одночасного присутності процесів дисипації і антидисипації при пружній взаємодії елементів трибосистем. Процеси дисипації супроводжується виділенням тепла (при молекулярно-механічному взаємодії контакту). Процес антидисипації супроводжується поглинанням тепла (при прослизанні в контакт). Дані процеси прямого і зворотного напрямку на думку А. І. Вейніка можна трактувати як процеси плюс і мінус тертя, і на цій основі розвивати абсолютно нове трактування тертя. Такої ж думки дотримується автор роботи [21]. Можливість досягнення аномально низького тертя та зношування пов'язується автором даної роботи з незворотним поглинанням енергії деформації за рахунок протікання зворотної пружно-пластичної деформації. Також як і в попередній роботі тепловий ефект при контактному взаємодії визначався сумою двох складових статичної та динамічної питомих компонентів дисипації енергії.

$$q = \Delta u_T + \bar{q},$$

де – Δu_T , \bar{q} статична і динамічна питоми компоненти дисипації енергії, яка підводиться до трибосистемі.

Сучасні уявлення про тертя та зношування з позиції синергетики та термодинаміки нерівноважних систем [9], фізичних теорій дозволили встановити фізичний зміст коефіцієнта тертя, як відношення кінетичної складової зовнішнього тертя до гравітаційної (квазімаса тертя здійснює на шляху руху роботу) [21]. Такий підхід вже включає участь хвильової складової у саморегулюванні енергетичних потоків та їх перетворення (дисипації) у трибосистемах, що володіють штучним інтелектом.

Пояснимо позицію А. І. Вейніка, аналізом кінетичного пружного взаємодії мікрорельєфу при русі трибоелементів. В результаті цих досліджень [21]

В. І. Вейнік прийшов до висновку, що другий закон Ньютона і закон всесвітнього тяжіння – це по суті справи один закон $-dPmDdm = Pxdx$, що виражає дві сторони одного і того ж кінетичного явища:

формула $P_x = m \left(\frac{d\omega}{dt} \right)$ характеризує силу, що діє з

боку приєднуваної маси на систему, а формула

$P_x = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ – силу, що діє з боку системи на масу,

що приєднується. Тому не існує двох різних мас – інерційної і гравітаційної. Є тільки одна кінетична маса, що визначає всі перелічені явища. Цей висновок підтверджується дуже точними гравітаційними експериментами Л. Етвеша, результати показали, що рівність гравітаційної та інертних мас виконується з високою точністю (до $5 \cdot 10^{-9}$), і підтвердили принцип, який пізніше А. Ейнштейн використав при створенні загальної теорії відносності (принцип еквівалентності). Ці дослідження дозволили зробити висновок, що у макросвіті маса володіє континуальними властивостями, в мікросвіті – квантовими. Елементарний квант кінетичного нанополя, а, отже, гравітаційного поля поки невідомий. Очевидно, його величина повинна бути дуже малою (цей факт знайшов підтвердження у відкритті гравітаційних хвиль об'єднаної міжнародної колаборації LIGO Scientific Collaboration і Virgo Collaboration [23]), тому що він у великому числі входить в кожен фотон – цю саму крихітну з усіх відомих частинок.

Грунтуючись на такому підході, аномально низьке тертя слід розглядати як межовий стан матеріального середовища таке ж, як надпровідність, надпластичність і т. д.

Один із шляхів досягнення левітації (антигравітації) – створення умов стоячої хвилі в будь-якому фізичному тілі [8; 24]. Результати такого підходу дозволили реалізувати на практиці досягнення левітації для різних фізичних тіл. На підставі цієї моделі авторами робіт [13; 22] пропонуються принципові схеми безопорних антигравітаційних двигунів різного типу. Досягнення сучасних фізичних теорій у галузі механіки твердого деформуемого тіла дозволяють докорінно змінити уявлення про механізм аномально низького тертя та зношування. До теперішнього часу в якості такого механізму в трибосистемах є підбір трибоелементів створюють у процесі припрацювання позитивний градієнт по твердості. В даний час цими умовами є перехід від пластичного контакту до пружного. Пружна мікродеформація при терті крім теплових флуктуацій, визначає дисипацію механічної енергії коливань. Її поглинання відбувається в матеріалі деталей і в навколишнє середовище.

При певних умовах роботи трибосистем можливе виникнення режиму контактного «антирезона-

нсу» (ефекту біжучої хвилі), який аномально знижує інтенсивність пластичної деформації і накопичення пошкоджуваності. Таким чином, хвильова складова сили тертя може бути як фактором інтенсифікуючим процеси тертя та зношування, так і фактором переходу до аномально низького тертя та зношування.

Етап динамічного навантаження поверхонь тертя, фізики справедливо називають механізмом накачування матеріалу точковими та іншими дефектами, що призводять до зростання внутрішньої енергії. Хвильова складова (енергетичні дефекти – фонони) в умовах аномально низького тертя та зношування навпаки призводить до її зменшення.

Як відомо, в теорії коливань найбільш поширений опис динаміки взаємодії мас рівняннями Лагранжа. Класичним прикладом такого опису є рівняння лінійного осцилятора, збуджуваного гармонійною силою $P(t) = P \sin \omega t$ і чинить пружні коливання з амплітудою $X(t)$.

Енергетичний обмін в цьому випадку може бути оцінений за схемою, запропонованою А. Д. Дубініним [25].

Вперше для аналізу аномально низького тертя використаний кванто-механічний підхід [21], введено поняття механічного кванта – мінімального числа атомів, здатних забезпечувати таке їх конфігураційне розподіл наноструктури, які володіють властивостями зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху. Він також являє собою найменшу структурне утворення в умовах пластичної деформації і утворюється при переході трибосистеми (деформованого об'єму) через гранично активований (критичний) стан внаслідок розвитку самоорганізаційних процесів адаптації трибосистеми. В об'ємі трибосистеми в умовах аномального тертя та зношування (елементарної трибосистеми) кількість таких механічних квантів (трибосистем) дорівнює $0,63 \cdot 10^8$, тобто безпечного числу циклів утоми. Механічний квант сам по собі є динамічним осцилятором дисипативних структур тертя і його лінійний розмір дорівнює радіусу сферичного ідеального кристала $D=7,177$ нм [21].

Власне, механічний квант слід розглядати як елементарну наноструктуру металевого твердого тіла [21].

Такий висновок дає підстави вважати можливим подолання сил тертя при переміщені твердих тіл тільки за рахунок внутрішніх сил. На наш погляд джерелом виникнення цих сил є хвильова складова зовнішнього тертя.

В умовах максимальної сумісності, трибосистема реалізує повний еволюційний цикл пристосування з утворенням найбільш досконалою, дисипативної структури. Поведінка структури підпорядковується рівнянню стану квазіідеального твердого

тіла. Взаємодії між елементами цієї структури мінімізовані станом ідеальної пружності [21].

За аналогією з класичним поняттям кванта введемо поняття механічного кванта $\hat{\varepsilon}$, який буде відповідати за мінімальне число атомів, здатних забезпечити таку наноструктуру, яка володіє властивістю, як сприймати, так і повертати енергію зовнішнього механічного впливу при терті. Механічний квант є найменшим структурним утворенням твердого тіла в умовах деформації. Універсальний обсяг механічного кванта дорівнює $\hat{\varepsilon} = W^3$. Де параметр стану (порядку) трибосистеми W .

Проводячи рішення рівняння енергетичного балансу квазіідеального твердого тіла з урахуванням формули Планка-Больцмана $S = k \ln W$ та з урахуванням реального числа атомних осциляторів N_f в обсязі елементарної трибосистеми, автор [21] прийшов до висновку, сталості величини ймовірності W для всього діапазону сумісного тертя (аномально низького тертя). Величина $\ln W = 3$ і $W = 20,086$ це найменше число лінійних осциляторів в одному з трьох напрямків мінімального адаптивного об'єму тертя, відповідального за аномально низьке тертя (безпечного порогу деформації). Таким чином, досягнення аномально низького тертя має поріг, який, безумовно, буде відобразитися в топологічних (фрактальних) особливостях поверхонь тертя [21].

З іншого боку, приймаючи сенс ентропії S за Больцманом, автором роботи [21] отримана універсальна постійна тертя $R_f = k N_f$, яка за фізичним змістом характеризує «енергетичний розмір» елементарної трибосистеми, що містить в ідеальних умовах однакове число атомних осциляторів (механічних квантів). Один квант випромінювання $W^3 = 8103,644$ атомних осциляторів) – є мінімальна втрата (виродження) (сутність безносності). Отримані результати узгоджуються з аналізом хвильової природи аномально низького тертя та зношування, проведених в роботах [9; 26] і створюють перспективу подальшого розвитку теорії і практики аномально низького тертя та зношування.

Незважаючи на це відкритим залишається питання, яким чином здійснюється саморегулювання трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя при зміні зовнішніх умов тертя?

Дамо пояснення еволюції переходу від нормального до аномально низького тертя з позиції квантового підходу і класичної механіки. Поняття механічного кванта жодною мірою не співвідноситься з величиною енергії елементарних частинок гравітаційного і кінетичного нанополя. Це поріг енергії елементарних частинок (атомів) матеріалів в точці локального контакту здатних генерувати імпульс сили достатній для подолання комбінованої сили

молекулярної і механічної складової сили тертя при взаємному переміщенні елементів трибосистеми.

Виходячи з вище сказаного кількість механічних квантів в елементарній трибосистемі (контактна область на рівні мікрошорсткості трибосистеми) має своє значення. Для переходу до аномально низького тертя та зношування (нульового тертя) величина порога (імпульсу сили) від сукупності механічних квантів трибосистеми повинна бути дорівнювати величині імпульсу сили від молекулярної і механічної складової сили тертя. Це і є умови утворення біжучої хвилі на поверхні контакту трибосистеми.

Якщо в структурно-енергетичній теорії тертя розвинутою Б. І. Костецьким та послідовниками, основним рівнянням досягнення рівноваги при нормальному механохімічному терті є рівність швидкостей утворення і руйнування вторинних структур, то при аномально низькому терті та зношуванні, в рівнянні досягнення стаціонарного стану трибосистеми, є рівність хвильовий і молекулярно-механічної складових сили тертя, що вимірюються відповідними імпульсами сил, що генеруються на локальних точках контакту і зсунутих за фазою [9]. Найбільш природним у поясненні квазіпружної взаємодії ефективного об'єму мікрошорсткостей подання його як марківського процесу з двома дискретними станами, зокрема «Двосторонньої реакції», що пропонує можливість в системі тільки перехід (1 стан x_k – відновлення, 2 стан x_j – розпад), $1 \leftrightarrow 2$ (наприклад, деформації та відновлення первісної форми ефективного обсягу). Використовуючи даний підхід в роботі [9] функція розподілу імпульсів сили тертя на локальних ділянках апроксимується марківським процесом і описується рівністю Фоккера-Планка. На підставі рішення цього рівняння отримано вираз для результуючого імпульсу сили тертя для стаціонарних умов роботи трибосистеми в умовах аномально низького тертя та зношування. Вираз імпульсу сили в цьому випадку не відображає саморегулювання при досягненні рівності між молекулярно-механічною та хвильової складових сил тертя при зміні зовнішніх умов, наприклад, при зміні навантаження. Підсумковий вираз для імпульсу сили тертя буде мати наступний вигляд:

$$v(x(t)) = e^{-\frac{\Delta E(\varepsilon)}{\Theta}}$$

де ΔE – енергія контакту в стані зчеплення; Θ – модуль канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту.

Поняття кількості механічних квантів $\hat{\varepsilon}$ дозволяє стверджувати, що в контактному елементарному обсязі за рівноважну шорсткість відповідає певна кількість механічних квантів, енергія контакту в стані зчеплення залежить від $\hat{\varepsilon}$, $\Delta E = \Delta E(\hat{\varepsilon})$. Мож-

на припустити, що енергія контакту в стані зчеплення має нелінійну залежність.

При зміні навантаження саморегулювання в трибосистемі, яка працює в умовах аномально низького тертя та зношування буде регулюватися кількістю механічних квантів і модулем канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту, а отже структурою і топографією поверхневого шару. Узагальнено з термодинамічної позиції – структурної ентропії.

По суті це величина накладає граничні умови на швидкість взаємного переміщення достатній для квантування енергообміну при еволюції трибосистеми від нормального тертя до аномально низького тертя. Цей висновок добре узгоджується з експериментальними результатами досліджень застосування вібрацій накладених на трибосистему [11] там теж спостерігається поріг щодо швидкості переміщення.

Даний розподіл $v(x(t))$ еквівалентний, але вже не для системи мікророзміщень, а для системи індукованих ними в поверхневих шарах біжучої хвилі в кінетичному нанополі, яке задається модулем канонічного розподілу енергії Θ по всьому взаємодіючим елементарним осциляторам.

Виходячи з вище викладеного цілком припустимою є гіпотеза, що підтримання умов аномально низького тертя та зношування при зміні зовнішніх умов досягається в трибосистемі за рахунок зміни хвилястості рельєфу, що регулює модуль канонічного розподілу енергії.

Причому зміни мікрогеометричних характеристик поверхні в цьому випадку відбувається не в результаті зносу як при нормальному механохімічному зношуванні, а в результаті ротаційної рухомості в області де зовнішнє тертя перетворюється у внутрішнє тертя. Перехід до ротаційної рухомості пояснюється автором [3] граничним зменшенням структурних елементів до наноквантового рівня, що дозволило йому використовувати рівняння гідродинаміки для опису ротаційної рухомості.

Якщо реальну трибосистему представити у вигляді безлічі взаємодіючих механічних квантів (осциляторів), то основною причиною мінімізації величини трибологічних параметрів (швидкості зношування, температури в контактній області, сили тертя і т.д.), буде кінетичне нанополе (реакція взаємодіючих мас на зовнішній вплив, що виникає в локальних точках пружного взаємодії тертьових тіл). При цьому можливе досягнення умов, коли обидва ефекти дисипації і антидисипації суворо рівні між собою.

Проведений аналіз дозволяє вважати, що науковою парадигмою переходу до аномально низького тертя та зношування, є досягнення умов утворення біжучої хвилі в кінетичному нанополі. Це обумовлює

збільшення хвильової складової до абсолютної величини молекулярно-механічної складової сили тертя.

Перевіркою правильності зроблених висновків про можливість досягнення аномально низького тертя та зношування за рахунок дисипації зовнішньо підведеної енергії по хвильовому каналу є їх відповідність із законом збереження енергії, для чого необхідно проаналізувати незворотність енергообміну при аномально низькому терті та зношуванні.

Критерій незворотності $K = -\Delta P/P_2$, ($\Delta P = P_1 - P_2$ тут P_1 та P_2 і сили узагальненої кінетичної взаємодії, відповідно, на вході і на виході контактної взаємодії) показує, яку частину від загальної підведеної роботи входу відповідного роду становить робота тертя. Для випадку, коли хвильова складова сили тертя мала, можливі два шляхи досягнення умов аномально низького тертя та зношування.

У першому випадку, коли критерій K прагне до нуля, процес стає оборотним. Зворотному процесу відповідає умова $K \ll 1$. При цьому робота тертя істотно мала, порівняно з основною роботою входу $\Delta E(\hat{\epsilon})$ в систему.

У другому випадку ефект тертя зменшується до нуля, якщо прагне до нескінченності або ΔP – до нуля. Перший шлях досягнення зворотності в принципі недосяжний, так як неможливо мати нескінченно велику силу, другий – практично не реалізуємо, так як при сильному зменшенні величини ΔP інтенсивність процесу переносу $\Delta E(\hat{\epsilon})$ виходить гранично низьким.

В процесі енергообміну при аномально низькому терті, в якому забезпечується баланс між молекулярно-механічної та хвильової складової сили тертя необхідно враховувати, що хвильовий канал дисипації енергії перетворює незбалансовану частину зовнішнього у внутрішнє тертя [27].

Таким чином, критерій незворотності перетворення енергії при аномально низькому терті не порушується і закон збереження енергії при аномально низькому терті та зношуванні дотримується.

Проведений аналіз механізмів дисипації зовнішньо підведеної енергії дозволяє зробити висновок, що досконалість трибосистем μ (коефіцієнт тертя) при аномально низькому терті оцінюється величиною відношення кінетичної F_{fr} і гравітаційної N складових зовнішнього тертя:

$$\mu = \frac{F_{fr}}{N}, \quad (1)$$

З одного боку – це параметр, що характеризує узагальнено опір відносному переміщенню (руху) поверхонь, він відображає частку енергії, яка «знищується» тертям у вигляді запасеної прихованої енергії ΔU_e , по відношенню до роботи зовнішніх

сил (енергії зовнішнього відносного руху). Навантаження N сприймається як квазімаса тертя, що здійснює на шляху l роботу. З іншого боку – це узагальнена характеристика пошкоджуваності, так як він (коефіцієнт тертя) визначається щільністю прихованою енергією ΔU_e , що характеризує міру дефектності або досконалості структури і є узагальненим параметром міри пошкоджуваності або безносності [21].

Аналіз фізичного змісту коефіцієнта тертя (1) дозволяє висунути наукову парадигму реалізації умов досягнення аномально низького тертя та зношування при зовнішньому терті реальних трибосистем. Досягнення балансу між молекулярно-механічною (F_a – адгезійна складова сили тертя; F_d – деформаційна складова сили тертя) та хвильовою складовою сили тертя F_w

$$F_{fr} = |F_a + F_d| \leq |F_w|$$

можливо наступними шляхами реалізації: 1-й шлях – створення гетерогенних матеріалів, які мають негативний градієнт твердості поверхневого шару; 2-й шлях – створення гетерогенних покриттів закріпленням твердих частинок у пружній матриці; 3-й шлях – створення малогабаритних генераторів для досягнення в трибосистемах умови гармонійного резонансу (утворення біжучої хвилі в кінетичному нанополі).

Проілюструємо досягнення умов аномально низького тертя та зношування за результатами експериментальних досліджень, отриманих вперше в результаті пошуку оптимального навантажувального режиму припрацювання реальних трибосистем [28]. Раніше проведений аналіз дає підстави вважати, що його досягнення можливі тільки при певних реологічних станах реальних трибосистем. Так верхній шар повинен бути ідеально пружним, під ним пружно-пластичний який дозволяє накопичувати й вивільняти енергію її при розриві зовнішнього контакту мікрошорсткості. Технологічно це може бути проведено по Гіндіну-Неклюдову [29].

Для проведення програмного навантаження машина тертя 2070 СМТ-1 була модернізована для регулювання швидкості навантаження в широкому діапазоні значень і можливостей щодо реалізації імпульсного навантаження трибосистеми [30].

Програмне навантаження передбачає витримку відповідності між зростанням навантаження і швидкістю релаксації внутрішніх напружень за рахунок протікання дифузійних і мікрозсувних процесів. Після програмного навантаження метал стає більш однорідним за характером розподілу напруг.

Імпульсне навантаження прикладається до трибосистеми, яка знаходиться в квазірівноважному структурному стані, призводить до спонтанного переходу різних рівнів переміщення пластичних

деформацій субструктурного мікрорівня на мезорівень [3; 31], який суттєво перевищує глибину наклепаного шару.

Інтенсивна пластична деформація в цьому випадку приводить до подрібнення зерен до наноквантового рівня і визначає комплекс механічної поведінки матеріалів (твердість, пластичність і т. д.) [32–33].

Ці рівні квантово розрізняються за ступенем розсіювання енергії за структурним елементам дисипативних структур, що володіють зростаючою ступенем фрактально-геометричної досконалості, в напрямку досягнення умов аномально низького тертя та зношування [21].

Ступінь досконалості дисипативних структур тертя в області сумісності, можливо, оцінювати, порівнюючи розвороти структурних елементів у пропорції до повного обороту (осциляції) механічного (нано) кванта [21].

Для визначення швидкості навантаження на першому етапі проводять ступінчасте навантаження у відповідності з рекомендаціями [29] (рис. 2).

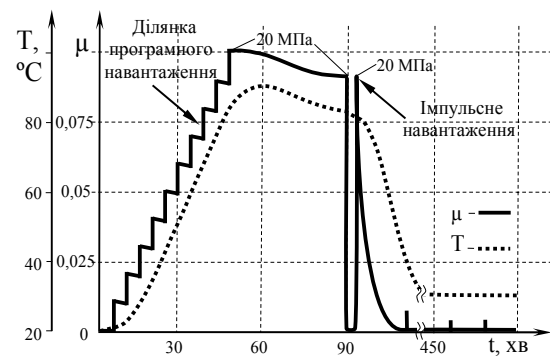


Рис. 2. Характер зміни основних параметрів трибосистеми «30ХГСНА – 30ХГСНА»: T – температура в контакті; μ – коефіцієнт тертя

На першому етапі випробувань, навантаження проводили ступінчато по 2 МПа на кожній зі сходинок до досягнення гранично допустимого навантаження (20 МПа). Перший етап деформації – етап накопичення прихованої енергії деформації до стану передруйнування – близької до критичної щільності прихованої енергії [21].

По мірі зростання у деформованих об'ємах матеріалу щільності прихованої енергії (зміцнення – механічна активація), швидкість процесу деформаційного зміцнення зменшується і асимптотично наближається до нуля. При цьому об'єми деформованого металу характеризуються максимальним зміцненням, за рахунок чого досягається гранично нестійкий термодинамічний стан – точка біфуркації.

При імпульсному навантаженні на другому етапі випробувань проводили повне розвантаження трибосистеми, витримку протягом 30 с при збереженні взаємного переміщення та імпульсного наван-

таження до величини 20 МПа. В цьому випадку для трибосистеми є два шляхи дисипації накопиченої прихованої енергії. Перший шлях – це руйнування деформованого об'єму, пов'язаний з вивільненням накопиченої прихованої енергії деформації в результаті процесів схоплювання [21]. Другий – це шлях природно-еволюційний і найбільш сприятливий – реалізувати дисипативний процес і пристосуватися до зовнішніх умов (принцип максимальної надійності). Тим більше, що система перебувати в умовах що сприяють розвитку другого шляху еволюції – рівномірного всебічного стиснення [34].

У нашому випадку програмне навантаження трибосистеми створює сприятливі умови реалізації еволюції трибосистеми (рис. 2).

Дослідження мікротвердості по глибині поверхневого шару нерухомих елементів трибосистем показало, що після програмного навантаження поверхневий шар має більшу твердість на поверхні 7,7 ГПа, базова трибосистема 4,2 ГПа, і глибина зміцнення збільшується у 2 рази і досягає 75 мкм у порівнянні з базовою трибосистемою 37 мкм.

Особливістю зміни мікротвердості при програмному навантаженні є формування на глибині 20 мкм області, в якій зовнішнє тертя перетворюється у внутрішнє тертя. За аналогією з нанесенням підшару в багатошарових іонно-плазмових покриттях. Саме в цій сфері проявляється наноструктурні особливості елемента трибосистеми працює в умовах аномально низького тертя та зношування ця область є концентратором потенційної енергії при контактній взаємодії, яка перетворюється в кінетичну, що формує кінетичне нанополе, і хвильову складову сили тертя. З термодинамічних позицій ця область виконує функцію ентропійного насоса перетворюючого зовнішнє тертя у внутрішнє. Практична значимість виявленого ефекту полягає у можливості його реалізації при конструюванні багатошарових іонно-плазмових та інших зносостійких покриттів.

Принципово важливим є оцінка триботехнічних показників трибосистем переведених в умови аномально низького тертя та зношування. Для цього проводили тривалі (8-ми годинні) випробування на зносостійкість даних трибосистем.

Дослідженню піддавалися трибоелементи зі сталі 30ХЗВА і бронзи ВБ23НЦ. В якості робочого середовища використовувався авіаційний гас ТС-1. Умови випробувань: навантаження при роботі в стаціонарних умовах: навантаження 12 МПа; лінійна швидкість 1,36 м/с. Дана трибосистема переводилася в режим аномально низького тертя та зношування у відповідності з програмним навантаженням суть якого викладена раніше.

Результати досліджень зносостійкості даних трибосистем показали, що їх робота в умовах аномально низького тертя та зношування в 5,27 разів

ефективніше, що підтверджується вимірюваннями вагового зносу після 8-ми годин випробувань і середньої швидкості зношування, що реєструється по параметру усередненої спектральної потужності акустичної емісії [13]. Для базової і при програмному навантаженні трибосистем ці показники сумарного вагового зносу складають 0,00395 гр, і 0,00075 гр, відповідно. Зношування в даному випадку здійснюється на початковому етапі програмного навантаження (припрацювання) і практично припиняється на заключному етапі імпульсного навантаження.

Пояснення роботи трибосистеми в умовах аномально низького тертя та зношування з позиції класичної теорії тертя, а саме переходом від граничного до гідродинамічного тертя спочатку не може дати позитивного результату оскільки сила тертя в умовах переходу до гідродинамічного тертя має більше значення ніж при граничному терті. Крім того використання різних змащувальних матеріалів мають істотну відмінність як за протизносними і фізико-хімічними властивостями (моторна олива М10Г₂к і гас ТС-1 в даному експерименті не становлять істотного впливу на роботу трибосистеми. Не знаходить пояснення також короточасний перехід трибосистеми з умов аномально низького тертя до «негативного» відображеної в роботі [9]. Ефект зміни напрямку сили тертя який спостерігається у даній роботі також може бути пояснений за допомогою досліджень топологічних (фрактальних) особливостей поверхневого шару.

На поверхні тертя, це явище може бути оцінено зміною рівня фрактальної досконалості.

Порівняльний фрактальний аналіз на поверхнях тертя нерухомого зразка при роботі трибосистеми в умовах нормального тертя і аномально низького (рис. 3) показав, що при нормальному терті головний вектор траєкторій Редже із збільшенням $\times 1000$, має нахил горизонтальної осі 15 градусів. У той же час при аномально низькому терті та зношуванні (рис. 3, б) головний вектор нейтральний (близько 90 градусів) по відношенню до напрямку руху трибосистеми.

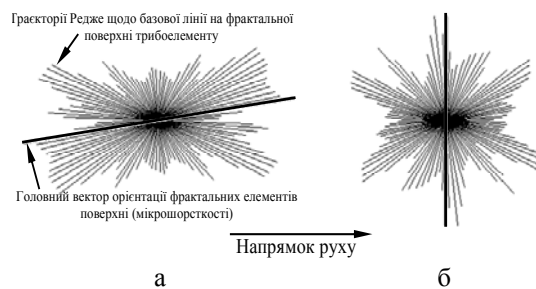


Рис. 3. Фур'є-аналіз розподілу орієнтацій мікрорельєфу поверхонь тертя трибоелемента сталі 30ХГСНА: а – при нормальному терті; б – при аномально низькому терті

Експериментальні дослідження проведені при програмному навантаженні повністю підтверджує теоретичні дослідження С. В. Федорова представлених у вигляді структурно-енергетичної діаграми еволюції тертьових поверхонь при переході до аномально низького тертя та зношування. Таким чином проведений теоретичний і експериментальний аналіз аномально низького тертя в трибології показав, що кванто-механічний похід до пояснення аномально низького тертя та зношування в трибології дає подальший поштовх до розвитку молекулярно-механічної та структурно-енергетичної теорії тертя та зношування, а також перспективу в розвитку нанотехнологій зносостійких покриттів.

Висновки

1. Згідно висунутої гіпотези існування хвильової складової сили тертя фізичний зміст коефіцієнта

тертя подається як відношення кінетичної і гравітаційної складових сил тертя. При переході до аномально низького тертя та зношування кінетична складова є пріоритетною.

2. Наноструктурні особливості поверхневих шарів при аномально низькому терті, обумовлено переходом від класичного дислокаційного механізму пластичної деформації до ротаційного.

3. Кванто-механічний підхід до аналізу дисипації зовнішньо підведеної енергії дозволяє сформулювати наукову парадигму досягнення аномально низького тертя та зношування в реальних трибосистемах засновану на рівновазі хвильової і молекулярно-механічної складових сили тертя.

4. Уточнено фізичне тлумачення механічного кванта, як постійної енергетичної складової елементарної взаємодії трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування.

Список літератури

1. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности: моногр. / Б.В. Протасов. – Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1979. – 152 с.
2. 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.
3. Погодаев Л.И. Структурно-энергетические модели поведения (надежности) материалов при импульсном нагружении / Л.И. Погодаев // Трение, износ, смазка. – 2013. – Т. 15, №57. – Режим доступа: <http://www.tribo.ru/>
4. Шлихтинг И.И. Теория пограничного слоя / И.И. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
5. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
6. Bhushan B. Nanotribology and Nanomechanics an Introduction / B. Bhushan // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 1148 p.
7. Nosonovsky M. Friction-Induced Vibrations and Self-Organization. Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact / M. Nosonovsky V. Mortazavi // Taylor & Francis Group. – 2014. – 331 p.
8. Стадниченко В.Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловым потоком / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин // Вісник технічного університету «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 17 – С. 49-62.
9. 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. – Vol. 5. – № 1. – P. 23-30.
10. 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. – Vol. 90. – №1. – P. 455-462.
11. 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. – Vol. 15. – №3. – P. 330-332.
12. Стадниченко В.Н. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин, Н.Г. Стадниченко и др. // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2011. – №1. – С. 51-61.
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 // Проблемы трибологии. – Хмельниц.: ХНУ, 2013. – № 1. – С. 16-29.
14. Трошин О.М. Гипотеза в пояснении аномально низького тертя та зношування в трибології / О.М. Трошін // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2015. – Вип. 12. – С. 178-190.
15. Трошин О.Н. Методические аспекты неравновесной самоорганизации трибосистем / О.Н. Трошин, В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко и др. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2014. – №1(37). – С. 233-241.
16. Полак Л.С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах / Л.С. Полак, А.С. Михайлов. – М.: Наука, 1983. – 286 с.

17. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова. – М.: Изд. РАН, 1992. – 160 с.
18. Структурно-энергетическая модель изнашивания / Л.И. Погодаев и др. // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 2. – С. 168-172.
19. Николис Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 344 с.
20. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах: пер. с англ. / Г. Хакен – М.: Мир, 1985. – 423 с.
21. Федоров С.В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма / С.В. Федоров. – В кн.: Известия КГТУ. – Калининград, 2007. – №11. – С. 22-31.
22. Вейник А.И. Термодинамическая пара / А.И. Вейник. – Мн.: Наука и техника, 1973. – 383 с.
23. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B.P. Abbott et. al. // Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).
24. Сухонос С.И. Кипящий вакуум Вселенной, или Гипотеза о природе гравитации / С.И. Сухонос. – М.: Новый Центр, 2000. – 152 с.
25. Беркович П.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / П.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; под ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
26. Методические аспекты неравновесной самоорганизации трибосистем / О.Н. Трошин, В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко и др. // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1. – С. 233-241.
27. Шевеля В.В. Трибохимия и реология износостойкости: моногр. / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко. – Хмельниц.: ХНУ, 2006. – 278 с.
28. Стадниченко В.Н. Методика проведения ускоренных ресурсных испытаний аксиально-поршневых гидромашин с применением метода акустической эмиссии / В.Н. Стадниченко, З.Я. Лурье, А.И. Жерняк // Сборник научных трудов ХГПУ. Информационные технологии: Наука, техника, технология, образование, здоровье. – 1998. – Вып. 6. – Ч. 2. – С. 64-78.
29. Гиндин И.А. Физика программного упрочнения / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов. – К.: Наукова думка, 1979. – 184 с.
30. Рубан И.В. Автоматизация процессов лабораторных и стендовых испытаний в триботехнике / И.В. Рубан, О.Н. Трошин, С.В. Смирнов и др. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2010. – №3 (23). – С. 150-153.
31. Васильев А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, Ю.М. Дальский, А.И. Золотаревский. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
32. Юркова А.И. Исследование механизма диспергирования железа при интенсивной пластической деформации трением / А.И. Юркова, А.В. Белоцкий, А.В. Бякова // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2006. – Т. 4, вып. 2. – С. 483-500.
33. Mechanical behavior of nanostructured iron fabricated by severe plastic deformation under diffusion flow of nitrogen / A. Yurkova, A. Belotsky, A. Vyakova et. al. // Materials Science Forum. – 2006. – Vols. 503-504. – P. 645-650.
34. Бриджман П.В. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд. Иностранная литература, 1995. – 444 с.

References

1. Protasov, B.V. (1979), “Energeticheskiye sootnosheniya v tribosopryazhenii i prognozirovaniye yego dolgovechnosti” [*Energy relationships in tribosuppression and prediction of its longevity: monograph*], Saratov, Izd. Sarat. un-ta, 152 p.
2. Vladimirov, V.I. (1988), “Problemy fiziki treniya i iznashivaniya” [The problems of physics of friction and wear], *Physics of wear resistance of metal surfaces*, Sb. nauch. tr. Fiziko-tekhnicheskiiy institut, pp. 8-41.
3. Pogodayev, L.I. (2013), “Strukturno-energeticheskiye modeli povedeniya (nadezhnosti) materialov pri impul'snom nagruzhении” [Structural-energy models of behavior (reliability) of materials under impulse loading], *Treniye, iznos, smazka*, T. 15, No. 57. <http://www.tribo.ru/>
4. Shlikhting I.I. (1974), “Teoriya pogranichnogo sloya” [The boundary layer theory], Nauka, Moscow, 712 p.
5. Vasil'yev, A.S. and others (2005), “Napravlennoye formirovaniye svoystv izdeliy mashinostroyeniya” [Directional formation of the properties of engineering products], Moscow, Mashinostroyeniye, 384 p.
6. Bhushan, B. (2005), Nanotribology and Nanomechanics an Introduction, *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg*, 1148 p.
7. Nosonovsky, M. (2014), Friction-Induced Vibrations and Self-Organization Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact, *Taylor & Francis Group*, 331 p.
8. Stadnichenko, V.N. and Troschin, O.N. (2007), “Sinergeticheskaya kontseptsiya samoorganizatsii v tribologicheskikh sistemakh pri upravlenii teplovym potokom” [Synergetic concept of self-organization in tribological systems in the management of heat flow], *Bulletin of the Technical University «KHPI»: zb. nauk. pr. Temat. vip.: Tekhnologii v mashinobuduvanni*, Kharkiv, KHPI, No. 17, pp. 49-62.
9. Stadnichenko, V.M. and Troschin, O.N. (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.
10. 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.
11. Starcevic, J. (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.

12. Stadnichenko, V.N., Troschin, O.N. and Stadnichenko, N.G. (2011), "Klassifikatsiya vidov nanoiznosa po znacheniyu koeffitsiyenta 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, pp. 51-61.
13. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.N. and Troshin, O.N. (2013) "Teoreticheskiye i eksperimental'nyye osnovy akustiko-emissionnoy identifikatsii mekhanizmov iznashivaniya i prognozirovaniya resursa tribosistem" [Theoretical and experimental bases of acoustic-emission identification of mechanisms of wear and prediction of the resource of tribosystems], *Problems of tribology*, Khmel'nits., KHNU, No. 1, pp. 16-29.
14. Troshin, O.M. (2015), "Gipoteza v poyasnenni anomal'no niz'kogo tertya ta znoshuvannya v tribologii" [Hypothesis in explaining abnormally low friction and wear in tribology], *Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems*, No. 12, pp. 178-190.
15. Troshin, O.N., Stadnichenko, V.N. and Stadnichenko, N.G. (2014), "Metodicheskiye aspekty neravnovesnoy samoorganizatsii tribosistem" [Methodical aspects of nonequilibrium self-organization of tribosystems], *Systems of Arms and Military Equipment*, KHUPS, Kharkiv, No. 1 (37), pp. 233-241.
16. Polak, L.S. and Mikhaylov, A.S. (1983), "Samoorganizatsiya v neravnovesnykh fiziko-khimicheskikh sistemakh" [Self-organization in nonequilibrium physico-chemical systems], Nauka, Moscow, 286 p.
17. Ivanova, V.S. (1992), "Sinergetika: prochnost' i razrusheniye metallicheskih materialov", Moscow, RAN, 160 p.
18. Pogodayev, L.I. (2001), "Strukturno-energeticheskaya model' iznashivaniya" [Structural and energy model of wear], *Friction and wear*, T. 22, No. 2, pp. 168-172.
19. Nikolis, G. and Prigozhin, I. (1990), "Poznaniye slozhnogo" [Cognition is difficult], Mir, Moscow, 344 p.
20. Khaken, G. (1985), "Sinergetika: iyerarkhii neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh" [Synergetics: a hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices], Mir, Moscow, 423 p.
21. Fedorov, S.V. (2007), "Obshchiye zakonomernosti evolyutsii treniya s pozitsiy samoorganizatsii i sinergizma" [General patterns of evolution of friction from the standpoint of self-organization and synergism], V kn.: *Izvestiya KGTU, Kaliningrad*, No. 11, pp. 22-31.
22. Veynik, A.I. (1973), "Termodinamicheskaya para" [Thermodynamic pair], Mn., Nauka i tekhnika, 383 p.
23. Abbott, B.P. (2016), Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102.
24. Sukhonos, S.I. (2000), "Kipyashchiy vakuum Vseleynoy, ili Gipoteza o prirode gravitatsii" [The boiling vacuum of the universe, or the hypothesis about the nature of gravity], Novyy Tsentr, Moscow, 152 p.
25. Berkovich, P.I. and Gromakovskiy, D.G. (2000), "Tribologiya. Fizicheskiye osnovy, mekhanika i tekhnicheskiye prilozheniya" [Tribology. Physical basics, mechanics and technical applications], Samara, Samar. gos. tekhn. un-t, 268 p.
26. Troshin, O.N., Stadnichenko, N.G. and others (2014), "Metodicheskiye aspekty neravnovesnoy samoorganizatsii tribosistem" [Methodical aspects of nonequilibrium self-organization of tribosystems], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 1, pp. 233-241.
27. Shevelya, V.V. and Oleksandrenko, V.P. (2006), "Tribokhimiya i reologiya iznosostoykosti: monograph" [Tribocchemistry and Rheology of wear resistance: monograph], KHNU, Khmel'nits., 278 p.
28. Stadnichenko, V.N., Lur'ye, Z.Ya., and Zhernyak, A.I. (1998), "Metodika provedeniya uskorennykh resursnykh ispytaniy aksial'no-porshnevnykh gidromashin s primeneniym metoda akusticheskoy emissii" [The method of conducting accelerated resource tests of axial-piston hydraulic motors using the method of acoustic emission], *Sbornik nauchnykh trudov KHGPU. Informatsionnyye tekhnologii: Nauka, tekhnika, tekhnologiya, obrazovaniye, zdorov'ye*, No. 6, Ch. 2, pp. 64-78.
29. Gindin, I.A. and Neklyudov, I.M. (1979), "Fizika programnogo uprochneniya" [Physics of software hardening], Naukova dumka, Kyiv, 184 p.
30. Ruban, I.V., Troshin, O.N., and Smirnov, S.V. (2010), "Avtomatizatsiya protsessov laboratornykh i stendovykh ispytaniy v tribotekhnike" [Automation of laboratory and bench testing in tribotechnics], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 3(23), pp. 150-153.
31. Vasil'yev, A.S., Dal'skiy, Yu.M. and Zolotarevskiy, A.I. (2005), "Napravlennoye formirovaniye svoystv izdeliy mashinostroyeniya" [Directional formation of the properties of engineering products], Mashinostroyeniye, Moscow, 384 p.
32. Yurkova, A.I., Belotskiy, A.V. and Byakova, A.V. (2006), "Issledovaniye mekhanizma dispergirovaniya zheleza pri intensivnoy plasticheskoy deformatsii treniyem" [Study of the mechanism of iron dispersion with intense plastic deformation by friction], *Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies*, T. 4, No. 2, pp. 483-500.
33. Yurkova, A., Belots'ky, A. and Byakova A. (2006), Mechanical behavior of nanostructured iron fabricated by severe plastic deformation under diffusion flow of nitrogen, *Materials Science Forum*, Vol. 503-504, pp. 645-650.
34. Bridzhman, P.V. (1995), "Issledovaniya bol'shikh plasticheskikh deformatsiy i razryva" [Studies of large plastic deformations and rupture], Inostrannaya literatura, Moscow, 444 p.

Надійшла до редколегії 15.01.2018
Схвалена до друку 20.02.2018

Відомості про авторів:

Трошін Олег Миколайович

кандидат технічних наук
старший викладач
Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І.
Кожедуба, Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0662-5947>
e-mail: aviaton@mail.com

Стадніченко Микола Григорович

кандидат технічних наук доцент
науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4613-6256>
e-mail: tribo1807@gmail.com

Приходько Володимир Олегович

курсант Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2270-7181>
e-mail: larkin5437@gmail.com

Замковий Руслан Андрійович

курсант Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3528-1717>
e-mail: xenkok099@spaces.ru

Information about the authors:

Oleg Troshin

Candidate of Technical Sciences
Senior Instructor
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0662-5947>
e-mail: aviaton@mail.com

Mykola Stadnichenko

Candidate of Technical Sciences Assistant Professor
Researcher of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4613-6256>
e-mail: tribo1807@gmail.com

Volodymyr Prikhodko

Cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2270-7181>
e-mail: larkin5437@gmail.com

Ruslan Zamkovy

Cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3528-1717>
e-mail: xenkok099@spaces.ru

**КВАНТО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ПОХОД К ОБЪЯСНЕНИЮ
АНОМАЛЬНОГО НИЗКОГО ТРЕНИЯ
И ИЗНОСА В ТРИБОЛОГИИ**

О.Н. Трошин, Н.Г. Стадніченко, В.О. Приходько, Р.А. Замковой

В статье представлены теоретические и экспериментальные предпосылки достижения аномально низкого трения и износа в трибологии с позиции современных физических теорий и кванто-механического подхода к объяснению диссипации энергии при внешнем трении.

Ключевые слова: аномально низкое трение и износ, «отрицательное» трение, трибосистема, энтропийный насос, молекулярно-механическая и волновая составляющие силы трения.

**THE QUANTUM-MECHANICAL APPROACH TO THE EXPLANATION
OF THE ANOMALOUS LOW FRICTION AND WEAR IN TRIBOLOGY**

O. Troshin, M. Stadnichenko, V. Prikhodko, R. Zamkovy

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.

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