

ГІПОТЕЗА В ПОЯСНЕННІ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В ТРИБОЛОГІЇ

У статті наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень аномально низького тертя з позиції термодинаміки нерівноважних процесів, що виникають в умовах пружної взаємодії мікрорельєфу елементів трибосистем. Висунуто гіпотезу про існування хвильової складової сили тертя.

Постановка проблеми. Сучасні досягнення структурно-енергетичної [1] і молекулярно-механічної [2] теорій тертя та зношування дозволяють розглядати трибосистему як генератор з перетворення механічної енергії в тепло. Так, результати калометричних досліджень [1, 3] показують, що більше 95% енергії, яка підводиться до трибосистеми, перетворюється в тепло, а близько 5% нагромаджується в поверхневому шарі, надалі витрачається на структурні перетворення і частково дисипується каналом руйнування, що супроводжується акустичними, електромагнітними та іншими видами випромінювання [4].

Усі заходи, що стосуються підвищення зносостійкості трибосистем, прямо або побічно спрямовані на підвищення ККД даного теплового генератора, і в цьому напрямі визначилося два основні шляхи. Перший – зменшення частки енергії, яка витрачається на руйнування поверхневого шару, за рахунок удосконалення мастильного матеріалу, структур матеріалів, нанесення різноманітних зносостійких покриттів [1]; другий – удосконалення умов контактної взаємодії, зменшення коефіцієнта тертя і, як наслідок, зменшення абсолютної величини зовнішньої енергії, що підводиться до трибосистеми [5, 6].

Огляд останніх досліджень і публікацій. Сила зовнішнього тертя, направлена проти руху в трибосистемі, відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя та зношування (узагальненої І. В. Крагельським і прийнятої більшістю вчених світу в галузі трибології), складається з двох компонентів: молекулярної (адгезійної) F_a і механічної (деформаційної) F_d [2]. Ці складові сили тертя F_f при русі твердих тіл «конфліктують» одна з одною:

$$F_f = F_a + F_d. \quad (1)$$

При вигладжуванні поверхні із застосуванням методів фінішної обробки вдається істотним чином знизити механічну складову сили тертя. Але в тих самих пропорціях росте молекулярна складова, яка на етапі припрацювання ініціює адгезійно-когезійне руйнування поверхневого шару трибосистеми. У результаті припрацювання формується рівноважний стан, який відповідає даним умовам тертя (навантаження, швидкість

ковзання, температура тощо). Це, у свою чергу, визначає величину зовнішньої енергії, яка підводиться до трибосистеми, і, як наслідок, встановлює швидкості утворення і руйнування вторинних структур [1] на поверхнях тертя, тобто їх зносостійкість.

Узагальнення великої кількості результатів дослідження граничного тертя [7] показує, що значення коефіцієнтів граничного тертя для різних поєднань матеріалів мастильних середовищ, відповідно до кривої Герсі – Штрибека, знаходиться в діапазоні 0,005–0,02.

Аналізуючи роботу трибосистем в умовах аномально низького тертя та зношування, багато вчених [8–12] використовували хвильові підходи до структурування поверхневого шару, однак як канал дисипації зовнішньої енергії, яка підводиться, ця складова не розглядалася.

Одну з перших спроб дослідження хвильової складової як каналу дисипації зроблено в роботі [10]. Автор вважає, що в умовах аномально низького тертя та зношування на поверхні утворюється квазіпружний шар, у центральній її частині гіпотетично можлива гідродинамічна деформація, а на периферії в перехідній зоні слід очікувати інтенсивну ротаційну пружно-пластичну деформацію, аналогічну структурі вихроутворення в пристінковому шарі при течії рідини. Такий підхід, на наш погляд, можна вважати окремим випадком прояву хвильової складової сили тертя.

Формулювання завдання дослідження. Таким чином, при найпоширеніших режимах тертя і змащування у формуванні сили тертя беруть участь як поверхневий шар елементів трибосистеми, так і мастильне середовище. На даний час у ряді робіт викладено результати експериментальних досліджень з показниками сили тертя, що далеко виходять за ці рамки у бік зменшення [13, 14]. Тому пошук теоретичних передумов для переходу зовнішнього тертя з «нормальної області» до аномально низького тертя є своєчасним і актуальним завданням, вирішенню якого присвячено дану статтю.

Виклад основного матеріалу. Головним аргументом супротивників теоретичного підходу до можливості досягнення в реальних трибосистемах аномально низького тертя та зношування (нульове або від’ємне тертя) є трактування безповоротності перетворення молекулярно-механічної складової сили тертя в термічну.

Критерій безповоротності відповідно до [15], що визначає відносну роль ефекту тертя, тобто ступеня безповоротності процесу перенесення узагальненої кінетичної взаємодії ΔE через систему, може бути знайдений шляхом зіставлення кількості тепла дисипації з роботою входу ΔE в системі. Для системи кінцевої довжини маємо

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

де $\Delta P = P_1 - P_2$.

Зі структури критерію безповоротності (2) безпосередньо випливає, що ефект безповоротності залежить тільки від сили і, зокрема, від двох його значень P_1 і P_2 або від значень величин ΔP і P_2 . Ніякі інші характеристики процесу на ступінь його безповоротності не впливають. Зі збільшенням сили P_2 і зменшенням різниці ΔP ступінь безповоротності знижується.

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

Якщо в (2) різниця ΔP зіставляється з величиною P_2 , то ступінь безповоротності процесу є великим і процес виявляється істотно незворотним. Умова перебігу незворотного процесу має вигляд $K \approx 1$. При цьому робота тертя порівнюється 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 зворотності в принципі недосяжний, оскільки не можливо мати нескінченно велику силу, другий – практично не реалізований, оскільки при сильному зменшенні величини ΔP інтенсивність процесу перенесення ΔE гранично низька.

Про зв'язок між інтенсивністю перенесення ΔE і різницею сил ΔP , що характеризує ефект безповоротності, можна судити за формулою

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

З цієї формули випливає, що при необмеженому зменшенні ΔP , пов'язаному зі зниженням ефекту тертя, повинен необмежено зростати час Δt перебігу одиниці ΔE через систему. Зазначений зв'язок між ΔP і Δt пояснює твердження про те, що зворотні процеси є нескінченно повільними. Ця думка в загальному випадку є хибною, оскільки з (3) зрозуміло, 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 незворотним.

Зі зменшенням критерію K ступінь безповоротності процесу зменшується. У межах, коли критерій K прагне до нуля, процес стає зворотним. Отже, зворотному процесу відповідає умова $K \ll 1$. При цьому робота тертя суттєво мала, порівняно з основною роботою входу ΔE в систему.

Останнім часом для пояснення аномально низького тертя та зношування використовують хвильовий підхід при аналізі енергообміну між поверхнями, що труться. Так, у [12] поверхневий шар елементів трибосистеми зображено у вигляді енергетичних осередків, описаних їх шорсткістю. При русі поверхонь у кожний момент часу відбувається велика кількість зіткнень мікроставів. У кожній мікрзоні утворюється тепло, яке розсіюється за законами дисипації. Разом з цим, автори звертають увагу, що нагрів мікроставів відбувається зі швидкістю не більше ніж десять градусів за секунду, а охолодження – 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 мікроставу. Виходячи з цих міркувань, наведена будова поверхневого шару складається з чотирьох зон, детальний їх розгляд дає підстави для висновку, що цей шар є композитом, властивості якого повинні враховуватися при аналізі процесів тертя та зношування.

У даній роботі динаміка кінетичної взаємодії мікрровиступів на всій поверхні контакту не розглядається. Відомо, що всяка система, яка складається з дуже великої кількості частинок, переходить від стану менш імовірного до більш імовірного. Термодинамічно це відповідає зменшенню ентропії системи (S) відповідно до формули Больцмана [16]:

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

де k – постійна Больцмана;

W – термодинамічна ймовірність.

Якщо повернутися до реакції трибосистеми на імпульсну динамічну взаємодію, то відповідно до принципів зсуву Ле Шательє трибосистема переходить у такий стан, у якому ефект зовнішньої взаємодії послаблюється. Результируюча стану трибосистеми в цьому випадку диктується цими двома основоположними термодинамічними принципами. Тому зростання «вагового значення» хвильової складової сил тертя, введеної в загальне рівняння зі знаком «мінус», є термодинамічно передбаченим.

Оскільки в результаті контактної взаємодії ідеально пружних мікрровиступів формується хвиля напруг, яка бере участь у процесі дисипації енергії, що підводиться зовні, то кількісна оцінка сили тертя з урахуванням хвильової складової сили тертя F_w буде мати такий вигляд:

$$F_f = F_a + F_d - F_w. \quad (5)$$

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 описано моделлю реології Гука [17]. Проведемо аналіз формування хвильової складової в даних умовах контакту. За 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 зовнішньої сили, яка діє на нього, певного значення.

Якщо зовнішня дія на тіло відсутня, то притягання і відштовхування між атомами в елементах трибосистем знаходяться в рівноважному стані. При цьому атоми перебувають на відстані один від одного r_0 . Цьому положенню рівноваги відповідає мінімальне 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 притягання 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, коли 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 [18]:

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

де b – постійна.

Оскільки сила притягання F є похідною від енергії $E(r)$ за r , то

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

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.

З урахуванням граничного значення сили $F_m = 0,5bD$ рівняння потенціалу Морзе набуває такого вигляду:

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

Значення максимального розтягування Δr_m відповідно матиме вигляд:

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

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 знаходяться в стані стійкої або нестійкої рівноваги.

Якщо позначити зовнішню силу, що розтягує, як f , то при дії цієї сили атоми будуть у положенні стійкої рівноваги лише в 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 . Підставивши $z = e^{-b\Delta r}$ у (7), отримаємо рівняння

$$z^2 - z + f/4F_m = 0.$$

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

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

Підставляючи Δr_1 і Δr_2 у (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 за такою формулою:

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

де E_0 – мінімальне значення потенційної енергії.

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

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

Таким чином, для розриву міжатомних зв'язків, що виникають (молекулярної та механічної складової сили тертя), 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, становить лише четверть від величини енергії (9), затраченої на подолання сил тертя. Повертаючись до виразу Больцмана, що описує досягнення можливої симетрії в перенесенні енергії, а також за результатами оцінки цієї взаємодії з використанням статистичного підходу, де в поясненні взаємодії ефективного об'єму мікрошорсткостей, зобразимо процес як марківський з двома дискретними станами, зокрема, «двосторонньої реакції», що пропонує можливість у системі тільки переходу (стан 1 – відновлення (x_k), стан 2 – розпад (x_j), наприклад: 1–2 – деформації та відновлення первинної форми ефективного об'єму).

Сформульовано умови досягнення рівності хвильової та 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 зовні підводиться до трибосистеми, необхідно враховувати як зовнішнє тертя, так і внутрішнє. Внутрішнє тертя визначається фізико-механічними властивостями матеріалів, воно окреслює можливості їх взаємодії з навколишнім середовищем. Зовнішнє тертя відповідає фактичній реалізації взаємодії в трибосистемі та навколишньому середовищі.

Отже, різниця між внутрішніми і зовнішніми ступенями свободи полягає в тому, що внутрішні ступені свободи визначаються можливостями взаємодій, потенційно закладеними в системі, з навколишнім середовищем. Зовнішні ж ступені свободи відповідають фактично взаємодіям, реалізованим між системою і навколишнім середовищем.

Оскільки критерієм безповоротності трибосистем є дія сил тертя, то її виробництво розглянемо на рівні елементарної взаємодії мікрошорсткостей. Одну з них зобразимо у вигляді абсолютно жорсткого тіла, яке при дії на нього сил молекулярно-механічної взаємодії не деформується. А другу шорсткість можна зобразити у вигляді пружини з певною жорсткістю c , яка за рахунок сил молекулярно-механічної взаємодії періодично займає два положення, в одному з яких вона не напружена, а в іншому стиснута або розтягнута на величину Δl . При цьому робота пружної сили пружини A між двома її положеннями може бути визначена за такою формулою:

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

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 в 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 (у кінцевому – на величину Δl_2 , у початковому – на Δl_1), то має місце формула

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

З урахуванням прийнятої моделі результат, що розглядається, кожної взаємодії має вигляд енергетичного осередку, а вираз (10) становить собою елементарну роботу кінетичного нанополя.

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

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

У структурно-енергетичній теорії тертя та зношування загальноприйнятим є термін механохімічний знос, який є результатом різних видів робіт (механічної, термічної, електричної, хімічної, кінетичної та пов'язаної з нею хвильової тощо). Кожна дана робота специфічна, неповторювана і не може бути підмінена ніякою іншою, їй відповідає зв'язана з нею і з відповідним механізмом дисипації U , яка може бути описана виразом:

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

Робота зіставляється зі зміною енергії системи. Отже, вона є кількісною мірою взаємодії системи і навколишнього середовища, тобто кількісною мірою дії навколишнього середовища на систему і навпаки. На цій підставі роботу іноді називають кількістю дії [15].

Робота є характерним прикладом величини, яка не є властивістю системи в згаданому вище значенні. Робота є функцією процесу: вона виконується в ході перенесення і перетворення різних видів енергій трибосистеми. У момент закінчення процесу робота припиняється, а при дисипації підведеної до трибосистеми енергії продовжується досить тривало в часі [19]. Про якісну і кількісну сторону виконаної в процесі, що закінчився, роботи трибосистеми можна судити за непрямими ознаками, за змінами перерахованих вище механізмів дисипації підведеної механічної енергії через узагальнену силу з урахуванням суперпозиції енергетичного складання та кожної з перерахованої раніше сил механізмів дисипації.

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

У більшості випадків форми перетворення енергій узагальнених рухів (термічна, електрична, хімічна, магнітна тощо) відповідають позитивній роботі та оцінюються позитивним приростом ΔE . Разом з тим, є узагальнені рухи, для яких позитивна робота, пов'язана зі зростанням енергії системи, супроводжується зменшенням ΔE , тобто переходом її із системи в навколишнє середовище. До таких узагальнених рухів належить, хвильова складова дисипації енергії, що підводиться зовні.

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

Так, у розділі електротехніки [21], присвяченому режиму роботи довгої лінії, залежно від величини коефіцієнта віддзеркалення виділяють три режими: режим хвилі, що біжить (РХБ); режим стоячих хвиль (РСХ); режим комбінованих хвиль (РКХ). Виникнення того або іншого режиму в лінії залежить від величини і характеру опору навантаження та його співвідношення з хвильовим опором.

Виникнення РХБ, можливе за умови, що лінія, навантажена на чисто активний опір, за величиною дорівнює хвильовому опорю. Основною перевагою РХБ є максимальне значення потужності, яка передається, що обумовлено синфазністю струму і напруги в лінії. РСХ виникає тоді, коли в лінії розповсюджуються назустріч одна одній дві хвилі з однаковою амплітудою. Фізичні процеси в лінії є результатом їх інтерференції. Для цього режиму характерне утворення в лінії таких перетинів, де амплітуда напруги і струму рівна нулю. У лінії також присутні перетини, де ці параметри максимальні, дані значення називають пучностями. Струм і напруги в даному випадку зсунуті за фазою на $\pi/2$, це вказує на те, що в лінії відбувається коливальний процес, пов'язаний з перерозподілом енергії між електричними й магнітними полями, і, що особливо важливо в РСХ, енергія уздовж лінії не передається.

РКХ є за своїми властивостями комбінацією РХБ і РСХ, як строгий математичний аналіз результату інтерференції (складання) двох хвиль з нерівною амплітудою. Як у РСХ, так і в РКХ усі процеси в лінії повторюються через кожні півхвилі.

Проведений аналіз показує, що при переміщенні електричного струму в довгій лінії в РХБ втрати мінімальні, отже, ККД такої лінії максимальний. Тому в лініях довільного навантаження для забезпечення РХБ виконують узгодження, яке здійснюють створенням штучної неоднорідності, що відображає нові відбиті хвилі. Параметри неоднорідності підбирають так, щоб відбиті хвилі в місці їх виникнення виявлялися рівними за амплітудою і протиставленими за фазою тим відбитим хвилям, які надходять у цей перетин від навантаження. У результаті інтерференції обидві хвилі взаємно знищуються, у лінії залишається тільки одна пряма хвиля, що тяжіє до неоднорідності. Таким чином, вдається істотним чином зменшити втрати в лінії.

Тепер проведемо заміну термінів: втрати в лінії на тертя, опір навантаження на молекулярну і механічну складові сили тертя; хвильовий опір, присутній як в електротехніці, так і в трибології. Квазібеззносному тертю відповідає режим роботи теплового генератора з максимальним ККД. У РХБ в електротехніці ККД в лінії також досягає максимальних значень. Виникнення стоячих хвиль в електротехніці пов'язано з перерозподілом між електричними і магнітними полями, а в трибології – з перерозподілом енергії між зовнішнім і внутрішнім тертям у трибосистемі. Програмне навантаження в трибосистемі – це процес перетворення РКХ у РХБ за допомогою структуризації поверхневого шару. В електротехніці узгодженням забезпечується перетворення комбінованих хвиль у хвилю, що біжить, за рахунок створення штучної неоднорідності в лінії (структуризація в лінії). Таким чином, термінологія, прийнята для пояснення процесів аномально низького тертя та зношування в умовах нерівноважної самоорганізації, є абсолютно логічною. Подібні явища (з аналогічною термінологією) спостерігаються при аналізі хвильових ефектів у гідродинаміці й інших галузях фізики.

Результати моделювання для реальної трибосистеми показали можливість досягнення нею умов рівності молекулярно-механічної та хвильової складових сили тертя, тобто досягнення аномально низького тертя та зношування.

Для проведення програмного навантаження стандартна машина тертя 2070 СМТ-1 була модернізована для регуляції швидкості навантаження в широкому діапазоні значень і можливості проведення імпульсного навантаження трибосистеми [22]. Досліджено зразки за схемою кільце-кільце зі сталі 30Х3ВА і бронзи ВБ23НЦ. Як робоче середовище використовувався авіаційний гас ТС-1 з витратою 3,5 л/год. Умови випробувань: навантаження при роботі в стаціонарних умовах – 600 Н; частота обертання привідного вала – 500 хв⁻¹; середньоповерхнева температура елементів трибосистем до випробувань відповідає температурі навколишнього середовища +20 °С. Програмне навантаження проводили згідно з рекомендаціями, викладеними в роботі [6]. Зразки для випробувань були виготовлені з високою якістю обробки поверхонь. Швидкість зношування виміряли в реальному масштабі часу акустико-емісійним методом [22–24].

Для порівняльної оцінки зносостійкості досліджуваних трибосистем використовували середню швидкість зношування (відношення інтегральної величини усередненої потужності акустичної емісії до кількості вимірювань). Результати випробувань базової трибосистеми і трибосистеми, що піддавалася програмному навантаженню, наведено на рис. 1.

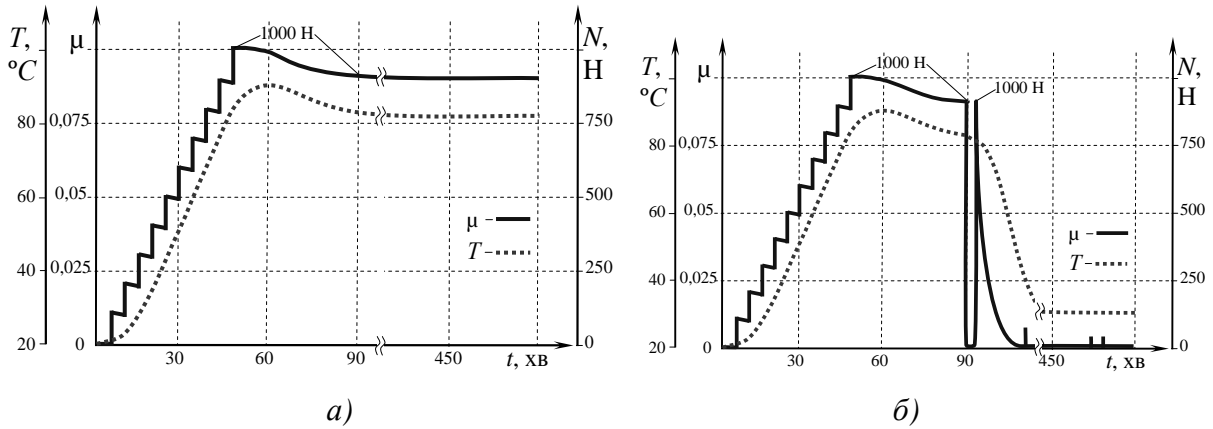


Рис. 1. Характер зміни основних трибологічних параметрів: а) базова трибосистема «Сталь 30ХГСНА – сталь 30ХГСНА»; б) трибосистема «Сталь 30ХГСНА – сталь 30ХГСНА» при програмному навантаженні

Перехід трибосистеми від нормального до аномально низького тертя з використанням програмного навантаження генерує особливий вид хвильового резонансу, який виникає в кінетичному нанополі з утворенням хвилі, що біжить. В умовах рівноважної самоорганізації цей ефект не виникає, йому перешкоджають принципи термодинаміки рівноважних систем, перш за все, утворення позитивного градієнта за твердістю (ефект Ребіндера). Проте дана гіпотеза вимагає детальних металофізичних досліджень поверхневого шару в умовах аномально низького тертя та зношування. З цією метою проведені експериментальні дослідження трибосистем «Сталь 30ХГСНА – сталь 30ХГСНА» в умовах рівноважної самоорганізації (рис. 1а), і нерівноважної самоорганізації із застосуванням програмного навантаження (рис. 1б).

Аналіз отриманої залежності підтверджує існування для однієї й тієї ж трибосистеми двох рівноважних станів: у першому випадку (рис. 1а) після припрацювання середньоповерхнева температура поверхонь тертя $T = 82^{\circ}\text{C}$, а коефіцієнт тертя відповідав значенню $\mu = 0,085$. В умовах нерівноважної самоорганізації після імпульсного навантаження (рис. 1б) протягом півгодини спостерігається різке зниження даних параметрів до наступного рівня $T = 30 \pm ^{\circ}\text{C}$ і приблизно рівне нулю значення коефіцієнта тертя $\mu \approx 0$.

Протягом роботи періодично спостерігалось стрибкоподібне збільшення коефіцієнта тертя (моменту тертя) до $\mu = 0,005$. Даний ефект завжди супроводжує різні трибосистеми, що працюють в режимі аномально низького тертя та зношування. Це ймовірно пов'язано з тим, що для підтримки рівноваги системі необхідне періодичне підкачування енергії, яке здійснюється через короткочасне збільшення сили тертя.

Результати досліджень зносостійкості даних трибосистем показали, що їх робота в умовах нерівноважної самоорганізації при збереженні зовнішніх умов тертя порівняно з базовою трибосистемою, що працює в умовах рівноважної самоорганізації, у 5,27 раза ефективніша, що підтверджується вимірюваннями вагового зносу після 8 годин випробувань і середньої швидкості зношування, яка реєструється за параметрами акустичної емісії. Для базової та при програмному навантаженні трибосистем «Сталь 30ХГСНА – сталь 30ХГСНА» ці показники становлять 0,00395 гр, 23,1 відн. од. і

0,00075 гр, 0,28 відн. од. відповідно. Зношування в даному випадку здійснюється на початковому етапі програмного навантаження (припрацювання) і практично припиняється на заключному етапі імпульсного навантаження.

Дослідження мікротвердості за глибиною поверхневого шару нерухомих елементів даних трибосистем (рис. 2) показало, що після програмного навантаження поверхневий шар має більшу твердість, ніж базова трибосистема, і глибина зміцнення збільшується більше ніж у 2 рази і досягає 75 мкм.

Особливістю зміни мікротвердості при програмному навантаженні є формування на глибині 20 мкм області «проміжного значення» за аналогією з нанесенням підшару в багатошарових іонно-плазмових покриттях. Саме ця область є концентратором потенційної енергії при контактній взаємодії, яка перетворюється в кінетичну, що формує кінетичне нанополе, і хвильову складову сили тертя.

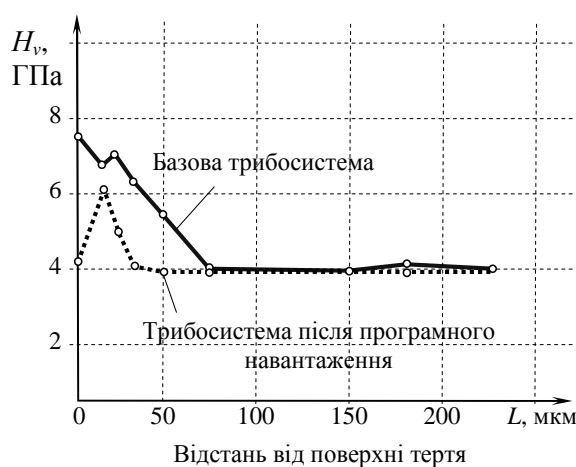


Рис. 2. Характер зміни мікротвердості H_v за глибиною поверхневого шару нерухомого елемента трибосистеми «Сталь 30ХГСНА – сталь 30ХГСНА» після проведення випробування на тертя та зношування

Для здійснення подібного характеру взаємодії об'єктів, що рухаються в рідині, розроблено технологію, 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 [25]. Реалізація даного підходу в суднобудуванні дозволяє при сучасній потужності двигунів і однаковому споживанні пального підвищити більше ніж удвічі їх швидкість ходу.

Висновки. Проведений аналіз аномально низького тертя в трибології показав, що прийнята на сьогоднішній час молекулярно-механічна теорія зношування практично ставить бар'єр в отриманні нульового, а тим більше від'ємного тертя, що реєструється при випробуваннях. Для подолання даного бар'єра висунуто гіпотезу про існування хвильової складової сили тертя, яка отримала подальше теоретичне обґрунтування й 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 за каналом хвильової складової сили тертя, яка формує на поверхні розділу кінетичне нанополе, складовими якого при аномально низькому терті є процеси

дисипації та антидисипації, що йдуть з поглинанням та виділенням енергії, за аналогією з екзотермічною й ендотермічною реакціями в хімії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др. – К. : Техніка, 1976. – 296 с.
2. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Стадниченко В. Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловым потоком / В. Н. Стадниченко, О. Н. Трошин // Вісник технічного університету «ХП». Темат. вип. : Технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Х. : НТУ «ХП». – 2007. – № 17. – С. 49–62.
4. 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.
5. 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 : наук. журн. – Х. : ХУПС, 2010. – № 2 (22). – С. 113–118.
6. Методические аспекты неравновесной самоорганизации трибосистем / О. Н. Трошин, В. Н. Стадниченко, Н. Г. Стадниченко и др. // Системи озброєння і військова техніка : наук. журн. – Х. : ХУПС, 2014. – № 1 (37). – С. 233–241.
7. Справочник по триботехнике : в 3 т. Т. 1. Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989. – 400 с.
8. Протасов Б. В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности / Б. В. Протасов. – Саратов : Изд. Сарат. ун-та, 1979. – 152 с.
9. Владимиров В. И. Проблемы физики трения и изнашивания / В. И. Владимиров // Физика износостойкости поверхностей металлов : сб. науч. тр. – Л. : ФТИ, 1988. – С. 8–41.
10. 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/>
11. Шлихтинг И. И. Теория пограничного слоя / И. И. Шлихтинг. – М. : Наука, 1974. – 712 с.
12. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А. С. Васильев, А. М. Дальский, Ю. М. Золоторевский и др. – М. : Машиностроение, 2005. – 384 с.
13. Конюшая Ю. П. Открытия советских ученых / Ю. П. Конюшая. – М. : Московский рабочий, 1979. – 688 с.
14. Прогнозирование ресурса трибосистем, работающих в режиме наноизнашивания, методом акустической эмиссии / В. Н. Стадниченко, О. Н. Трошин, А. В. Приймак и др. // Зб. наук. праць ХУПС. – Х. : ХУПС, 2010. – № 4 (26). – С. 41–48.
15. Вейник А. И. Термодинамическая пара / А. И. Вейник. – Мн. : Наука и техника, 1973. – 383 с.

16. Бокштейн Б. С. Атомы блуждают по кристаллу / Б. С. Бокштейн ; под ред. Л. Г. Асламазова. – М. : Наука, 1984. – 208 с.
17. Рейнер М. Реология / М. Рейнер ; пер. с англ. – М. : Наука, 1965. – 224 с.
18. Ханин М. В. Механическое изнашивание материалов / М. В. Ханин. – М. : Изд. стандартов, 1984. – 152 с.
19. Самоорганизация трибосистем при граничном трении металлов / А. В. Баранов, В. А. Вагнер, С. В. Тарасевич и др. // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1–2. – С. 155–158.
20. Шимони К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М. : Книга по требованию, 2012. – 776 с.
21. Автоматизация процессов лабораторных и стендовых испытаний в триботехнике / И. В. Рубан, О. Н. Трошин, С. В. Смирнов и др. // Системи озброєння і військова техніка: наук. журн. – Х. : ХУПС, 2010. – № 3 (23). – С. 150–153.
22. Классификация видов износа по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме / В. Н. Стадниченко, О. Н. Трошин, Н. Г. Стадниченко и др. // Зб. наук. праць ХУПС. – Х. : ХУПС, 2010. – № 1 (27). – С. 51–61.
23. Запорожец В. В. Особенности аппаратной регистрации и обработки акусто-эмиссионного излучения при идентификации процессов трения и изнашивания / В. В. Запорожец, В. Н. Стадниченко, О. Н. Трошин // Проблеми трибології. – Хмельницький, – 2014. – № 1. – С. 19–26.
24. Диагностика типовых повреждений агрегатов авиационной техники / О. Н. Трошин, В. Н. Стадниченко, А. А. Андрух и др. // Системи озброєння і військова техніка : наук. журн. – Х. : ХУПС, 2014. – № 2 (38). – С. 33–35.
25. Пат. 2397101 С1 Российская Федерация, МПК В 63 В 1/36 (2006.01) Устройство для увеличения скорости хода судна / Дзюба А. Ф.; заявитель и патентообладатель Дзюба А. Ф. – № 2009121794/11 ; заявл. 08.06.09 ; опубл. 20.08.10, Бюл. № 23.

Подано 11.10.2015

О. Н. Трошин

ГИПОТЕЗА В ОБЪЯСНЕНИИ АНОМАЛЬНО НИЗКОГО ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ В ТРИБОЛОГИИ

В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований аномально низкого трения с позиции термодинамики неравновесных процессов, возникающих в условиях упругого взаимодействия микрорельефа элементов трибосистем. Выдвинута гипотеза о существовании волновой составляющей силы трения.

O. M. Troshin

HYPOTHESIS IN EXPLAINING THE ANOMALOUSLY LOW FRICTION AND WEAR IN TRIBOLOGY

In the article there are the resulted results of theoretical and experimental researches anomalous of low friction from position of thermodynamics of non-equilibrium processes that arise up in the conditions of resilient co-operation of microrelief of elements of the tribosystems. The hypothesis of the existence of the wave component of the friction force.