

УДК 621.891

ПРО ФІЗИЧНИЙ СЕНС КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ В УМОВАХ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ

В. В. Варваров

ON THE PHYSICAL MEANING OF THE COEFFICIENT OF FRICTION UNDER CONDITIONS OF ABNORMALLY LOW FRICTION AND WEAR

V. V. Varvarov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.189.2020.213156>

***Анотація.** Наведено теоретичні дослідження трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя і зношування. На основі аналізу механізмів дисипації зовнішньої енергії, як факторів зниження тертя в різних галузях природи, уточнено роль хвильової складової сили тертя. За певних термодинамічних умов у трибосистемі формується досить значна хвильова складова сили тертя, що істотно зменшує молекулярно-механічну.*

***Ключові слова:** аномально низьке тертя, коефіцієнт тертя, трибосистема, хвильова складова тертя.*

***Abstract.** The theoretical studies of tribosystems (TS) operating under conditions of abnormally low friction and wear are given. On the basis of the analysis of the mechanisms of dissipation of external energy, as factors of friction reduction in different areas of nature, the role of the wave component of friction force is clarified. Under certain thermodynamic conditions, a sufficiently large wave component of the friction force is formed in the TS, which significantly reduces the molecular-mechanical. The wave component F_w of the friction force F_{fr} is the «entropy pump» that converts the non-compensated external friction into the internal friction and accumulates the internal energy in the elastic-plastic layer of the rheological model of Shvedov tribosystem construction. The physical meaning of the friction coefficient for TS operating under conditions of normal mechanochemical wear and abnormally low friction and wear has been determined. It is determined that the main cause of the tribosystems transition to abnormally low friction and wear is the rheological properties of the tribosystem surface layer. In an anomalous-low friction and wear mode tribosystem, an equilibrium and inverse change of some insignificant amount of energy without work is possible. TS heat dissipation in this case approaches zero. When the external friction conditions change, the degree of excitation of tribosystem n , which depends on the number of mechanical quanta, changes. Any change in the tribosystem that puts it off balance, according to Le Chatelier principle, initiates in it processes that try to return it to its original position. For these processes in the developed model is responsible module of canonical energy distribution, which is regulated by microgeometry of the surface layer of TS. It is established that the condition of achieving abnormally low friction and wear is the equality of robots that perform external and internal forces in terms of contact interaction. Structural-energy approach to contact interaction allowed to establish the physical meaning of the coefficient of friction, which generally characterizes the work of external and internal forces in the path of friction tribosystems.*

***Keywords:** abnormally low friction, friction coefficient, tribosystem, wave component friction.*

Вступ. Проблеми зниження сили тертя і зношування при взаємному переміщенні твердих тіл з'явилися і вирішувалися в природі задовго до появи людини.

Сучасна теоретична та експериментальна трибологія все частіше звертається до пояснення природних феноменів зниження сили тертя. Так, аналіз публікацій, присвячених дослідженню високошвидкісного руху у воді дельфінів, акул, ластоногих, свідчить, що зменшення сили тертя в кожному з цих випадків відбувається створенням різними способами пружних хвиль. Цей природний феномен зниження сили тертя відомий як парадокс Грея.

У техніці Н. Тесла одним з перших звернув увагу на роль хвильової складової контактної взаємодії при русі твердих тіл. Цей ефект використаний при розробленні дискового роторно-турбінного двигуна, у якому замість звичайних лопаток-лопатець, що рухаються з кутом атаки до потоку, використовуються пружні диски, що рухаються вздовж потоку. При цьому вони приводяться в рух завдяки тяжінню особливого роду, що виникає між поверхнею диска і рухомим газом або рідиною. Це тяжіння, будучи гальмуючим фактором для літальних та інших рухових апаратів, за словами Н. Тесли, викликане «поштовхом рідини об шорстку поверхню твердої речовини».

Фактично цей «поштовх» являє собою хвильову частину сили зовнішнього тертя. Отже, визначення природи цієї складової є актуальною проблемою, а фізичний сенс коефіцієнта тертя в цьому питанні стає визначальним фактором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. А. І. Вейник у своїй роботі 1973 року висунув припущення, що «квазіпружна взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виведення накопиченої внутрішньої енергії з трибосистеми» (ТС) [1]. Його гіпотеза базувалася на принципах

нерівноважної термодинаміки.

Між цих антидисипативних факторів головний внесок припадає на кінетичну (хвильову) складову сили тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії і проковзуванні при їх розгоні [1].

Фізична модель аномально низького тертя і зношування (АНТЗ) складалася на основі багатьох робіт [2-5]. Але більше за інших у створенні цільної теорії аномально низького тертя і зношування просунувся С. В. Федоров [3-5]. Його праці стали основними узагальнюючими дослідженнями в цьому напрямі. Серед вітчизняних дослідників багато уваги теорії аномально низького тертя і зношування приділяється авторами роботи [2].

Федоровим С. В. для аналізу АНТЗ було запропоновано використовувати поняття «механічного кванта – мінімальної кількості атомів, здатних забезпечувати конфігураційний розподіл наноструктури, що мають властивості зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху» [3-5]. Цей механічний квант «являє собою найменше 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 аномально низького тертя і зношування (елементарної трибосистеми) кількість таких механічних квантів (трибосистем) \bar{E} , тобто безпечна кількість циклів втоми, дорівнює $0,63 \cdot 10^8$. Механічний квант сам по собі є динамічним осцилятором дисипативних структур тертя, і його лінійний розмір дорівнює радіусу сферичного ідеального кристала – $7,177 \text{ нм}$ » [3, 5]. Такий квантомеханічний підхід дозволив автору розглядати цей квант як «елементарну наноструктуру металевого твердого тіла» [3].

Таке припущення дозволило вважати, що сила тертя твердих тіл може бути переборена за рахунок лише внутрішніх сил. Можна вважати, що цими силами виступає саме хвильова складова сили тертя.

Ця гіпотеза дозволила дослідникам розробити рекомендації для створення умов, за яких збільшується хвильова складова і досягаються умови АНТЗ. Рекомендації базуються на особливостях реологічної побудови поверхневого шару трибосистеми. При цьому одна поверхня, що бере участь у терті, є твердим (квазітвердим) тілом, а на другій поверхневий шар модифікований за рахунок методів програмного навантаження, управління тепловим потоком, трибоактивації активними елементами за допомогою

технології фінішної обробки та іншими способами [6, 7].

Дані дослідження подані у вигляді наукової парадигми, що дозволяє переводити трибосистему від нормального механо-хімічного тертя і зношування до АНТЗ [6-8].

Вигляд виразу для визначення сили тертя F_{fr} , де враховано вплив хвильової складової тертя F_w , що робить значний внесок у розсіювання підведеної при терті зовнішньої енергії та, власне, створює передумови для переходу трибосистеми в режим аномально низького тертя і зношування було запропоновано в роботах [9, 10]:

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

де F_a – молекулярна (адгезійна) складова сили тертя;

F_d – механічна (деформаційна) складова сили тертя.

Хвильова складова F_w сили тертя F_{fr} є тим «ентропійним насосом», який частину зовнішнього тертя, що не компенсується, переводить у внутрішнє тертя» [9] і накопичує внутрішню енергію в пружному пластичному шарі реологічної моделі Шведова побудови трибосистеми [4, 9, 10]. Реологічна побудова та механізм дисипації зовнішньої енергії в умовах АНТЗ краще за все ілюструються як квазіпружна взаємодія поверхневого шару і ротаційно-пластична деформація підповерхневого шару, засновані на реологічній моделі Шведова.

Визначення мети та завдання дослідження. Останні досягнення трибології у вивченні АНТЗ можуть дозволити розробляти вузли тертя з кардинально підвищеними показниками

зносостійкості [5, 6]. Але для відпрацювання практичних рекомендацій необхідно мати повне уявлення про фізичну сутність процесів, що відбуваються в ТС при АНТЗ.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження АНТЗ дозволили встановити реологічну побудову поверхневого шару в трибосистемі при переході до АНТЗ [8-10]. Особливості релаксації підведеної при терті енергії за таких умов контактної взаємодії викликають питання щодо пояснення фізичного сенсу коефіцієнта тертя в цьому випадку.

Метою даної роботи є встановлення фізичного сенсу коефіцієнта тертя трибосистем, що працюють в умовах АНТЗ. Для досягнення цієї мети необхідно визначити особливості реології трибосистем при АНТЗ та визначити умови, за яких такі особливості досягаються.

Основна частина дослідження. Розглянемо більш докладно перетворення енергії ΔE_w в контактній взаємодії. У

процесі проковзування на кожному елементарному контакті генерується пружна хвиля. За квантовою механікою, енергія та імпульс, пов'язані з кожним нормальним коливанням (з кожною хвилею), кантуються, тобто можуть приймати лише дискретні значення. Вони стають кратними ($n = 0, 1, 2, \dots$) рівностям Луї де Бройля (дуалізм енергії та імпульсу частки, що рухається) [10], які приймають фізичний сенс відповідно енергії та імпульсу «елементарного збудження» коливального руху у кристалі. Таке елементарне збудження можна розглядати як квазічастинку – фонон (енергетичний дефект твердого тіла) з квазіімпульсом \vec{V} та енергією:

$$\varepsilon(\vec{V}) = \hbar\omega(\vec{V}/\hbar), \quad (2)$$

де ε – енергія частинки, що рухається;

\vec{V} – імпульс руху частки;

\hbar – стала Планка;

ω – частота коливального руху хвилі.

З урахуванням прийнятої моделі структурування поверхні в умовах АНТЗ енергія розсіювання кожного механічного кванта дорівнює

$$\Delta E_{mk} = n(\hbar\omega(\vec{V}/\hbar)), \quad (3)$$

де n – ступінь збудження нормального коливання. Це кількість фононів з імпульсом $\hbar\vec{q}$ (де \vec{q} – хвильовий вектор, напрямком якого співпадає з напрямком розповсюдження хвилі) та енергією $\hbar\omega$.

Для всієї трибосистеми, що працює в умовах АНТЗ, її енергія розсіювання дорівнює

$$\Delta E_{TC} = \Delta E_{mk}\hat{\mathcal{E}}, \quad (4)$$

де $\hat{\mathcal{E}}$ – кількість механічних квантів, що беруть участь у взаємодії [10].

Вираз для імпульсу сили тертя трибосистеми, визначений після розв'язання рівняння Фокера-Планка, що описує марківський процес розподілу імпульсів сили тертя на локальних ділянках плям контакту трибосистеми, було запропоновано в роботах [9, 10].

Замінивши введене в цих роботах позначення імпульсу сили $v(x(t))$ на \vec{V}_{TC} , запишемо підсумковий вираз для імпульсу \vec{V}_{TC} сили тертя трибосистеми, що працює в стаціонарних умовах аномально низького тертя і зношування [9, 10]:

$$\vec{V}_{TC} = e \frac{\Delta E_{mk}\hat{\mathcal{E}}}{\Theta}. \quad (5)$$

По суті ця величина накладає граничні умови на швидкість взаємного переміщення, достатню для квантування енергетичного обміну. Вона є фактором переходу до аномально низького тертя і зношування, якщо імпульс сили від молекулярно-механічної та хвильової складової близький за абсолютним значенням [11].

Враховуючи вищевикладене, можна надати фізичного сенсу коефіцієнту тертя для нормального механохімічного зношування μ_{fr} та АНТЗ μ_w :

$$\mu_{fr} = \frac{F}{N} = \frac{\Delta U}{Nl}, \quad (6)$$

де F – сила тертя $F = \frac{\Delta U}{l}$;

N – нормальне навантаження на трибосистему;

ΔU – зміна внутрішньої енергії поверхневого шару;

l – шлях тертя.

Таким чином, фізичний сенс коефіцієнта тертя нормального механохімічного зношування μ_{fr} має дуалізм, присутній у молекулярно-механічній теорії тертя і зношування [3, 4, 11]. З одного боку, це

параметр, що характеризує опір відносному переміщенню поверхонь, бо він позначає частку енергії, що «знищується» тертям у вигляді запасеної прихованої енергії ΔU відносно роботи зовнішніх сил (параметр Nl узагальнено характеризує роботу зовнішніх сил, що виконують на шляху l роботи). З іншого боку, це узагальнена характеристика пошкоджуваності, бо визначається щільністю прихованої енергії, пов'язаної з пошкоджуваністю.

Аналогічно визначимо коефіцієнт тертя хвильової складової μ_w :

$$\mu_w = \frac{\Delta E_{TC}}{Nl} = \frac{\Delta E_{MK} \hat{\epsilon}}{Nl}. \quad (7)$$

Фізичний сенс у даному випадку характеризує розсіювання кінетичної енергії ΔE_{TC} сил, що виникає при квазіпружній взаємодії, відносно параметра Nl , що узагальнено характеризує роботу внутрішніх сил на шляху тертя l . З іншого боку, це узагальнена характеристика беззносності. При АНТЗ основна складова сили тертя припадає на кінетичну (хвильову) складову, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії шорсткостей і проковзуванні при їх розгоні.

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

Всі процеси, що протікають у ТС, які працюють в умовах АНТЗ, можна подати у вигляді термодинамічного рівняння

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (8)$$

де ΔG – зміна термодинамічного потенціалу ТС, який оцінює роботу при

протіканні всіх процесів у ТС на всіх етапах (утворення та руйнування вторинних структур, дифузійні, хімічні та мікрометалургійні процеси тощо). Відображує максимальну роботу процесу;

ΔH – зміна ентальпії (тепловміст) ТС, характеризує зміну внутрішньої енергії ТС при перетвореннях (або тепловий ефект перетворення). Енергетична складова;

T – температура ТС;

ΔS – зміна ентропії ТС.

Тут $T\Delta S$ – ентропійний член, з яким пов'язана енергія.

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

А в процесі проковзування в ТС виконується друга робота внутрішніх сил, що оцінюється термодинамічним потенціалом ΔG_K . Результатом цієї роботи є зміна кінетичної енергії ΔE_K , що виділяється з поглинанням із ТС тепла Q_K та формуванням імпульсу сили $\vec{V}_{TC.K}$.

В умовах АНТЗ $\vec{V}_{TC.П} = \vec{V}_{TC.K}$ і підтримується рівновага між виділеною та поглиненою теплотою $Q_n = Q_K$, що пояснюється прагненням будь-якої системи до мінімуму вільної енергії.

Схематично робота ТС в умовах АНТЗ може бути пояснена рисунком.

Таким чином, у ТС, що працює в режимі АНТЗ, можлива рівноважна та зворотна зміна деякої незначної кількості енергії без виконання роботи. Даний висновок узгоджується з гіпотезою аномально низького тертя, сформульованою Вейником [1]. Тепловиділення трибосистеми в даному випадку наближується до нуля.

При зміні зовнішніх умов тертя змінюється ступінь збудження ТС n , що

залежить від кількості механічних квантів $\bar{\mathcal{E}}$. Будь-яка зміна в ТС, яка виводить її з рівноваги, за принципом Ле Шательє, ініціює в ТС процеси, що намагаються повернути її у вихідне положення. За ці

процеси в нашій моделі відповідає модуль канонічного розподілу енергії Θ , який регулюється мікрогеометрією поверхневого шару ТС.

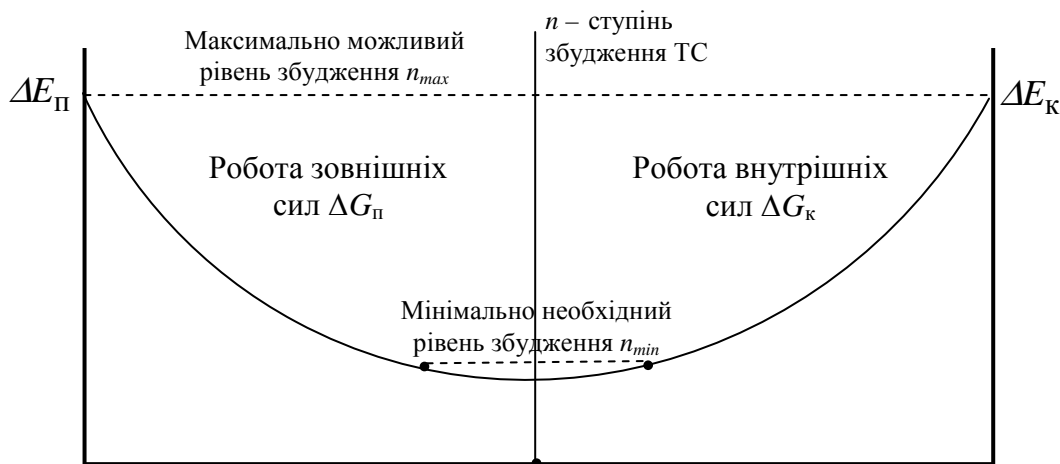


Рис. Схематичне зображення роботи ТС в умовах АНТЗ

Можливість досягнення «нульового тертя» (аномального низького тертя і зношування) у реальних трибосистемах деякі дослідники вважали нонсенсом з причини начебто «безповоротності перетворення молекулярно-механічної складової сили тертя в термічну складову» [1].

Критерій безповоротності K відповідно до роботи [1] визначає відносну роль ефекту тертя, тобто ступеня безповоротності процесу перенесення узагальненої кінетичної взаємодії при гальмуванні та розгоні мікрошорсткості на плямі контакту. При терті одночасно виконуються дві роботи. Перша здійснюється зовнішніми силами для подолання сили тертя і може бути оцінена термодинамічним потенціалом G_n . А друга виконується внутрішніми силами (пружності) у процесі проковзування в ТС й оцінюється термодинамічним потенціалом G_k .

Можливість досягнення умов АНТЗ, за Вейником [1], характеризується критерієм безповоротності

$$K = -\frac{\Delta G}{G_n}, \quad (9)$$

де $\Delta G = G_n - G_k$.

Це відношення показує, яку частину загальної роботи складає робота зовнішніх сил тертя (G_n). Таким чином, автор роботи [1] вважав можливим досягнення АНТЗ тоді, коли робота зовнішніх сил мізерно мала порівняно з загальною роботою зовнішніх сил. Із зменшенням критерію K ступінь безповоротності процесу зменшується. У межі, коли $K \rightarrow 0$, процес стає зворотним. Зворотному процесу відповідає умова $K = -\frac{\Delta G}{G_n} \ll 1$.

При цьому робота тертя мізерно мала порівняно з загальною роботою, виконаною над ТС при контактній взаємодії.

Явища АНТЗ за своєю фізичною природою близькі до явища надпровідності. У першому випадку аналізується тертя, а в другому – опір електричного струму.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження показують, що основною причиною переходу трибосистем до аномально низького тертя і зношування є реологічні властивості поверхневого шару трибосистеми.

В умовах АНТЗ одночасно виконуються дві роботи. Перша – робота з подолання сил тертя від молекулярно-механічної складової сили тертя. Результатом цієї роботи є зміна (накопичення) потенційної енергії ΔE_n з виділенням тепла Q_n . У результаті взаємодії на плямах фактичного контакту формується імпульс сили $\vec{V}_{TC.п}$. А в процесі проковзування виконується друга робота внутрішніх сил. Результатом цієї роботи є зміна кінетичної енергії ΔE_k , що

виділяється з поглинанням із ТС тепла Q_k та формуванням імпульсу сили $\vec{V}_{TC.к}$. В умовах АНТЗ $\vec{V}_{TC.п} = \vec{V}_{TC.к}$ і підтримується рівновага між виділеною та поглиненою теплотою $Q_n = Q_k$.

Установлено, що умовою досягнення аномально низького тертя і зношування є рівність робіт, які виконують зовнішні та внутрішні сили в умовах контактної взаємодії.

Структурно-енергетичний підхід до контактної взаємодії дозволив встановити фізичний сенс коефіцієнта тертя, що узагальнено характеризує роботу зовнішніх і внутрішніх сил на шляху тертя трибосистем.

Список використаних джерел

1. Вейник А. И. Термодинамическая пара. Минск: Наука и техника, 1973. 383 с.
2. Запорожець В. В., Стадниченко В. М., Трошин О. М. Механізм дисипації енергії при терті металокерамічного шару в технологіях триботехнічного відновлення деталей машин і механізмів. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків, 2010. № 2 (22). С. 113–118.
3. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. В кн.: *Известия КГТУ*. Калининград, 2007. № 11. С. 22–31.
4. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. *Вестник науки и образования Северо-запада России (Научный рецензируемый электронный журнал)*. Калининград, 2016. Т. 2. № 1. С. 1–14. URL: <http://vestnik-nauki.ru>. Дата оновлення: 07.11.2016.
5. Fedorov S.V. Nano-Structural Standard of Friction and Wear. *Tribology in Industry*. 2018. Vol. 40 (2). P. 225-238.
6. The effects of stored energy on wear resistance of friction stir processed pure Ti / L. Jiang et al. *Results in Physics*. Vol. 12. 2019. March. P. 1276-1284.
7. Bhushan B. *Nanotribology and Nanomechanics an Introduction*. Springer-Verlag, Heidelberg : Berlin, 2005. 1148 p.
8. Stadnychenko V., Varvarov V. Results of Theoretical and Experimental Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems. *Advances in Materials*. 2019. Vol. 8. №4. P. 156-165.
9. Войтов В. А., Стадниченко В. М., Варваров В. В. Теоретичні та природні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2019. № 2(60). С. 113-125.
10. Войтов В. А., Стадниченко В. М., Варваров В. В., Вахнюк С. А. Структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2019. № 16. С. 88-101.

11. Tarasov V. E. Tarasova V. V. Time-dependent fractional dynamics with memory in quantum and economic physics. *Annals of Physics*. 2017. August. Vol. 383. P. 579-599.

Варваров Валерій Володимирович, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. E-mail: varvarov-@ukr.net.
Тел: +380577021715. ORCID iD: 0000-0003-1273-5605.

Varvarov Valerii Volodymyrovych, Senior Research of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Forces University.
E-mail: varvarov-@ukr.net. Tel: +380577021715. ORCID iD: 0000-0003-1273-5605.

Статтю прийнято 05.12.2019 р.

increased strength, sulfate resistance, freeze-thaw resistance and weather resistance in comparison
