

УДК 621.9.031

DOI: 10.30748/soivt.2019.58.09

В.В. Варваров

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

## МЕХАНІЗМИ САМООРГАНІЗАЦІЇ В ТРИБОСИСТЕМАХ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

*У статті представлені теоретичні та експериментальні дослідження трибосистем, які працюють в умовах аномального тертя та зношування при зміні зовнішніх умов їх роботи. Виконано порівняльний аналіз механізмів самоорганізації трибосистем, які працюють в умовах нормального механохімічного і аномально низького тертя та зношування для визначення умов переходу до такого режиму. Визначено ще один можливий спосіб переведення трибосистем до умов аномально низького тертя та зношування шляхом модифікації поверхневого шару бронзових зразків фінішною обробкою мінералом групи амфіболів (нефрити).*

**Ключові слова:** тертя, зношування, самоорганізація, трибосистеми, трибоелемент, модифікація.

### Вступ

Сучасний розвиток трибології і перш за все такого розділу як трибоматеріалознавство [16] дозволило сформулювати новий достатньо ефективний спосіб зниження тертя та зношування в різних трибосистемах в результаті трибомодифікування поверхневого шару [18–19]. Метою такого трибомодифікування є створення найбільш сприятливих (сумісних, за Гаркуновим) умов мікроконтактної квазіупружної взаємодії, що виникає на рівні мікрорельєфу [17].

Розгляд квазіупружної взаємодії з позиції нерівноважної термодинаміки дозволив автору роботи [5] висунути гіпотезу, що квазіпружна взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виродження накопиченої внутрішньої енергії з трибосистеми (ТС). Серед цих факторів основний вклад припадає на кінетичну (хвильову) складову сили тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії і проковзуванні при їх розгоні. За такого механізму ТС переходить до аномально низького тертя та зношування. Експериментальні дослідження умов досягнення такого аномально низького тертя та зношування є дуже актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичну основу в розробці фізичної моделі аномально низького тертя та зношування створили роботи авторів [7–8; 14–15].

Федоровим С.В. [14] для аналізу аномально низького тертя використаний квантомеханічний підхід, введено поняття механічного кванта – мінімального числа атомів, здатних забезпечувати такий конфігураційний розподіл наноструктури, які володіють властивостями зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху.

Цей квант також являє собою найменше структурне утворення в умовах пластичної деформації і утворюється при переході ТС (її деформованого об'єму) через гранично активований (критичний) стан внаслідок розвитку самоорганізаційних процесів адаптації ТС. В обсязі трибосистеми в умовах аномально низького тертя і зносу (елементарної трибосистеми) кількість таких механічних квантів (трибосистем) дорівнює  $0,63 \cdot 10^8$ , тобто безпечному числу циклів втоми. Механічний квант сам по собі є динамічним осцилятором дисипативних структур тертя і його лінійний розмір дорівнює радіусу сферичного ідеального кристала  $D_Q = 7,177$  нм [14]. Власне, механічний квант слід розглядати як елементарну наноструктуру металевого твердого тіла [14].

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

На основі даних праць розроблені рекомендації щодо реологічних особливостей поверхневого шару трибосистем для створення умов, які збільшують хвильову складову і дозволяють досягнути умов аномально низького тертя та зношування. В даному випадку одна з поверхонь, що працюють в трибосистемі представляє собою квазітверде тіло, а на другому трибоелементі поверхневий шар, реологічно представлений моделлю Шведова (рис. 1), який модифікований за рахунок різноманітних методів (програмне навантаження, управління тепловим потоком, трибоактивації активними елементами, технології фінішної обробки та ін.) [6; 10; 12–13]. Дані дослідження представлені у вигляді наукової парадигми переведення трибосистем від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького тертя та зношування [12].

В роботі [14] показано вплив частотної вібрації на тертя та зношування трибосистеми “кремній по нітриду кремнію”. Трибометр дозволяв генерувати як нормальні, так і тангенціальні коливання по відношенню до площини тертя. Встановлено, що в діапазоні частот від 4 до 6 кГц спостерігається зниження коефіцієнта тертя від 1 до 0,1, як для нормальної, так і для тангенціальної складової коливань, а також зменшення зносу. Причому в цьому діапазоні амплітуда коливань не робить вирішального значення на зниження сили тертя, починаючи з певної граничної величини. Аналіз самого ефекту зниження тертя та зношування проводився без зв'язку з фізико-механічними властивостями досліджуваних матеріалів та механізмами дисипації зовнішньої енергії, що підводиться, хоча реологія поведінки матеріалів врахована на кінематичній схемі досліджуваних трибосистем.

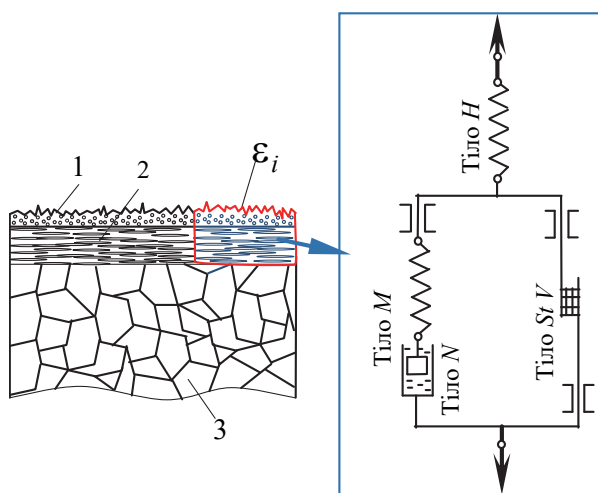


Рис. 1. Реологічні і фрактографічні особливості поверхневого шару трибоелементів, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування: а – реологічні особливості (1 – квазіпружний поверхневий шар тіла  $H$  (Гука); 2 – наноструктурування шар ( $\epsilon_i$  – окремо взаємодіючі елементи ансамблю); 3 – основа); б – реологічна модель (Шведова) лінійного осцилятора в поверхневому шарі, що працює за принципом аномально низького тертя та зношування

Підтвердженням правильності такого підходу показано в роботі [15], де також, як і в [1], досліджували вплив мікрозміщень трибоелемента при вібрації в умовах сухого тертя. Як об’єкт досліджень взята велика група матеріалів від скла до конструкційної сталі. Встановлено оптимальну область мікрозміщень, в якій для всіх досліджуваних матеріалів спостерігалось мінімальне значення відносного коефіцієнта тертя (відношення коефіцієнта тертя при русі до коефіцієнта тертя спокою). При початкових умовах тертя він дорівнює одиниці, а при терті в

певних умовах мікрозміщень досягає аномально низьких значень. На жаль пояснення цього ефекту із залученням сучасних фізичних теорій зроблено не було.

Проводячи аналіз робіт з дослідження ультразвукових і вібраційних коливань в трибології [2–17; 11], можна зробити висновок, що практично у всіх цих роботах хвильова складова сили тертя, введена у вираз для сили тертя зі знаком мінус, в роботах [17; 9] присутня у вигляді кінцевого результату при зовнішньому хвильовому впливі на трибосистему.

Інший шлях досягнення аномально низького тертя та зношування, більш ефективніший з нашої точки зору, – за рахунок трибомодифікації поверхневого шару в результаті управління тепловим потоком [11], програмного навантаження [31–32], або спеціальної фінішної обробки [31–32]. У даному випадку трибосистема представляє собою рухомий елемент – квазіжорстке тіло, а на нерухомому формується поверхневий шар з певним градієнтом фізико-механічних властивостей, близький до моделі Шведова [31–32].

Оскільки в результаті контактної взаємодії ідеально пружних мікровиступів формується хвиля напружень, яка бере участь в процесі дисипації енергії, що підводиться ззовні, то кількісна оцінка сили тертя  $F_{fr}$  з урахуванням її хвильової складової  $F_w$ , буде мати наступний вигляд:

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

де  $F_a$  – молекулярна (адгезійна) складова сили тертя;

$F_d$  – механічна (деформаційна) складова сили тертя.

Хвильова складова сили тертя формується в даному випадку за рахунок перетворення накопленої внутрішньої енергії поверхневого шару в результаті кінетичної взаємодії. Аналіз цієї взаємодії з використанням двостадійної схеми приводить до формування векторної величини імпульсу сили.

Використовуючи даний підхід, в роботі [17] функція розподілу імпульсів сили тертя на локальних ділянках апроксимується марківським процесом і описується рівнянням Фоккера-Планка.

На підставі рішення цього рівняння отримано вираз 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 і хвильовою складовими силами тертя при зміні зовнішніх умов, наприклад, при зміні навантаження. Тому підсумковий

вираз для імпульсу сили тертя  $v(x(t))$  матиме такий вигляд:

$$v(x(t)) = e^{-\frac{\Delta E(\bar{\varepsilon})}{\Theta}}, \quad (2)$$

де  $\Delta E$  – енергія контакту в стані зчеплення;

$\bar{\varepsilon}$  – кількість механічних квантів;

$\Theta$  – модуль канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту.

Введене в роботах [14; 22] поняття механічного кванта  $\bar{\varepsilon}$  дозволяє стверджувати, що в контактному елементарному об'ємі за рівноважну шорсткість відповідає певна кількість механічних квантів, відповідно енергія контакту в стані зчеплення залежить від кількості  $\bar{\varepsilon}$ :

$$\Delta E = \Delta E(\bar{\varepsilon}). \quad (3)$$

У результаті взаємодії формується результуюча векторна величина імпульсу сили хвильової складової сили тертя. Аналогічним чином формується результуюча величина імпульсу сили від молекулярно-механічної сили тертя зсунутих за фазою. Таким чином, при зміні навантаження саморегулювання в трибосистемі, що 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, що потребує експериментального підтвердження і подальшого теоретичного обґрунтування з позицій термодинаміки.

**Мета статті.** Метою даної роботи є порівняльний аналіз механізмів самоорганізації трибосистем, які працюють в умовах нормального механохімічного і аномально низького тертя та зношування для визначення фізичної сутності механізмів самоорганізації трибосистеми, що працює в даних умовах.

## Виклад основного матеріалу

Експериментальні дослідження проводили на машині тертя 2070 СМТ-1, тертя ковзання, матеріал зразків – сталь 30Х3ВА та бронза ВБ23НЦ. Умови проведення випробувань: умови граничного мащення (витрата робочої рідини 3,5 л/год). Робоче середовище – авіаційний гас ТС-1. Лінійна швидкість – 1,36 м/с. Спочатку випробуванню підлягала базова трибосистема “30Х3ВА–ВБ23НЦ” (з використанням безабразивної фінішної обробки бронзового трибоелементу для досягнення потрібної частоти поверхнею зразків та притирання сталевого зразку алмазною пастою). Результати вимірювань шорсткості бронзових зразків після обробки наведено у табл. 1. В процесі випробувань мікрогеометричні характеристики сталевого зразка змінювались незначно, тому для аналізу не використовувались.

Таблиця 1

Середні значення мікрошорсткості бронзового зразка після обробки (перед випробуваннями)

Бронза ВБ23НЦ	
Параметри	Величина, мкм
Мінімум профілю	0,045
Максимум профілю	0,287
Діапазон вимірювань висоти	0,192
$R_a$	0,055
$R_{max}$	0,334
$R_z$	0,277
$S_m$	23,367

Результати трибологічних випробувань (на задиростійкість) представлені графічно на рис. 2 як середнє по випробуваннях трьох однакових пар зразків. В процесі ступінчатого навантаження трибосистеми по 0,2 МПа, проводили витримку на кожній ступені протягом 5 хв. Методом акустичної емісії [21] за цей період контролювали відсутність переходу до задиру. Після реєстрації перших ознак відхилення більш ніж від значення 50 відн. од. виконували розвантаження трибосистеми. Таким чином реєстрували максимальне значення несучої здатності (3 МПа). Максимальне значення температури відповідало 70...80°C.

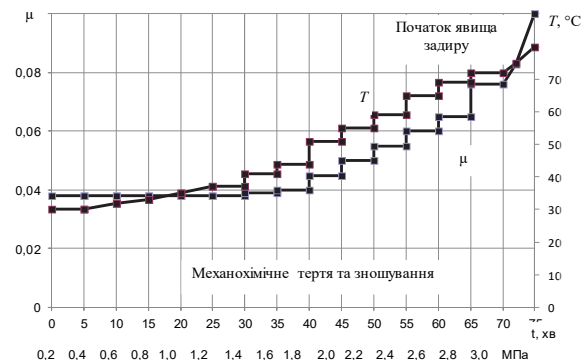


Рис. 2. Коефіцієнт тертя  $\mu$  і температура в зоні контактування базової трибосистеми з використанням безабразивної фінішної обробки бронзового трибоелементу

Аналіз результатів мікрогеометричних характеристик шорсткості поверхні бронзового трибоелемента до випробувань (табл. 1) та після них під різними навантаженнями (табл. 2–3) вказує на те, що при збільшенні навантаження, параметри шорсткості суттєво зростають ( $R_a$  збільшується на 22%). З позиції молекулярно-механічної теорії тертя та зношування [27] це пояснюється процесами самоорганізації, направленими на зменшення молекулярної складової сил тертя (1), яка має тенденцію до зростання в цьому випадку.

Таблиця 2

Середні значення мікросорсткості бронзового зразка після роботи на навантаженні 1,6 МПа

Параметри	Величина, мкм
Мінімум профілю	0,330
Максимум профілю	0,147
Діапазон вимірювань висоти	0,476
$R_a$	0,086
$R_{max}$	0,464
$R_z$	0,407
$S_m$	30,798

Таблиця 3

Середні значення мікросорсткості бронзового зразка після роботи на навантаженні 3 МПа

Параметри	Величина, мкм
Мінімум профілю	0,499
Максимум профілю	0,152
Діапазон вимірювань висоти	0,651
$R_a$	0,110
$R_{max}$	0,628
$R_z$	0,544
$S_m$	30,214

Після проведення базових випробувань проводили аналогічні випробування в трибосистемі з використанням безабразивної фінішної обробки бронзового трибоелемента мінералом групи амфіболів (нефрити) [12–13]. В даному випадку попередні експерименти показали, що питоме навантаження для досягнення задиру необхідно збільшити якнайменше в 10 разів. Тому навантаження трибосистеми на кожній ступені збільшували на 2 МПа, з витримкою протягом 5 хв. Процес зміни шорсткості відбувається за рахунок пластичної деформації та зношування, який безпосередньо пов'язаний з нею в умовах нормального механохімічного зношування [26]. Цей процес розповсюджується до границі стійкості даної трибосистеми. Середні значення результатів вимірювань, що отримані за результатами випробувань трьох пар зразків відображені на рис. 3

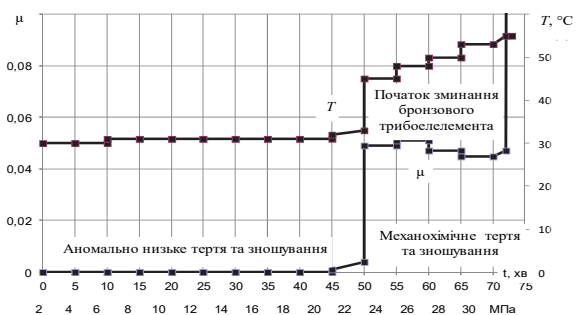


Рис. 3. Коефіцієнт тертя  $\mu$  і температура  $T, ^\circ\text{C}$  в зоні контактування трибосистеми з технологією безабразивної фінішної обробки бронзового трибоелемента мінералом групи амфіболів (нефрити)

Аналіз отриманих результатів показав, що використання технології фінішної обробки мінералами дозволяє працювати трибосистемі в умовах аномально низького тертя та зношування в діапазоні навантажень до 20 МПа. При роботі трибосистеми в умовах аномально низького тертя та зношування тепловиділення практично відсутнє. При збільшенні навантаження до 22 МПа спостерігається перехід від умов аномально низького тертя та зношування до режиму нормального механохімічного тертя та зношування. На наш погляд, це викликано порушенням балансу між молекулярно-механічною та хвильовою складовими сили тертя (1).

Аналіз результатів мікрогеометричних характеристик шорсткості поверхні бронзових трибоелементів, додатково оброблених нефритом, (табл. 4–5), вказує на те, що при збільшенні навантаження до 20 МПа параметри шорсткості суттєво змінюються ( $R_a$  зменшується до 60 %).

Таблиця 4

Середні значення мікросорсткості бронзового зразка при роботі на навантаженні 10 МПа

Параметри	Величина, мкм
Мінімум профілю	0,347
Максимум профілю	0,648
Діапазон вимірювань висоти	0,302
$R_a$	0,050
$R_{max}$	0,295
$R_z$	0,250
$S_m$	19,670

Таблиця 5

Середні значення мікросорсткості бронзового зразка при роботі на навантаженні 20 МПа

Параметри	Величина, мкм
Мінімум профілю	0,175
Максимум профілю	0,323
Діапазон вимірювань висоти	0,148
$R_a$	0,020
$R_{max}$	0,185
$R_z$	0,150
$S_m$	21,630

Для трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування, зміна мікрогеометричних характеристик пов'язана з процесами ротаційної рухомості, що відбувається в об'ємах достатньо більших, ніж пластична деформація при нормальному механохімічному зношуванні.

Швидка та значна зміна мікрогеометричних характеристик може бути пояснена аномальним масоперенесенням в поверхневих шарах і переході пластичної деформації від класичного механізму до механізму зернограничного ковзання [30].

Виходячи з результатів експериментальних досліджень (рис. 1), для нормального механохімічного зношування саморегулювання здійснюється по каналу термодинамічної ентропії [6]. В цьому випадку умови стаціонарного зношування забезпечуються дотриманням рівності швидкості приросту і втрат вільної енергії. З позиції структурно-енергетичної теорії тертя та зношування [26] рівність швидкостей утворення і руйнування вторинних структур.

В умовах аномально низького тертя та зношування саморегулювання здійснюється по каналу структурної ентропії, який оцінюється реологічною і фрактальною досконалістю трибосистеми. Загальним для першого і другого випадку є дотримання фундаментального принципу Ле Шательє прийнятого в нерівноважній термодинаміці, згідно з яким будь-який зовнішній вплив, що виводить систему з рівноваги, ініціює в ній процеси, які прагнуть повернути систему в початковий стан.

Грунтуючись на квантомеханічному підході до аналізу взаємодії по безлічі елементів шорсткості, в роботі [22] отримано важливе співвідношення енергії контакту в стані зчеплення і модуля канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту.

Проводячи аналіз виразу для імпульсу сили (2) можна зробити припущення, що саморегулювання при зміні зовнішніх умов тертя буде виконуватись шляхом наноструктурування поверхневого шару за рахунок зміни кількості механічних квантів  $\varepsilon$  і зміна напрямку узагальненого імпульсу сили  $v(x(t))$  в результаті зміни канонічного розподілення енергії по поверхні контакту  $\Theta$  шляхом саморегулювання параметрами мікрошорсткості (табл. 3–4). Достатньо логічно припустити, що при певних умовах мікроструктурні зміни можуть привести до зміни вектора імпульсу сили від хвильової складової строго протилежно силі від молекулярно-механічної складової, тобто структура матеріалу веде себе аналогічно парусу, який дозволяє пливати судну проти вітру.

Виходячи з викладеного вище, цілком припустимою є гіпотеза, що підтримка умов аномально низького тертя та зношування при зміні зовнішніх умов досягається в трибосистемі за рахунок зміни фрактальних і мікроструктурних показників (хвилястість, шорсткість і т.д.) мікрорельєфу і наноструктурування підповерхневих шарів, що регулюють модуль канонічного розподілу енергії  $\Theta$ . Ці зміни можуть бути оцінені структурною ентропією. Ротаційна рухомість реалізується в підповерхневому шарі.

Фундаментальною величиною, яка визначає стійкість трибосистеми в умовах нерівноважної самоорганізації є виробництво надлишкової ентропії  $P[\delta^2\dot{S}]$  [24]. Слід зазначити, що при дослідженні

нерівноважної самоорганізації хромонікелевих сплавів при управлінні тепловим потоком має місце як негативний, так і позитивний приріст надлишкового виробництва ентропії, пов'язаний з флуктуаціями напружено деформованого стану поверхневого і підповерхневого шарів трибосистем, викликаного зміною механізму дифузії легуючих елементів в поверхнях контакту трибосистеми. Внаслідок цього зміна приросту виробництва надлишкової ентропії  $\delta^2\dot{S}$  за часом носить коливальний характер.

У разі нерівноважної самоорганізації трибосистеми “30Х3ВА – ВБ23НЦ” після фінішної обробки мінералом [12–13] виробництво надлишкової ентропії трибосистеми  $\delta^2\dot{S} \leq 0$  має вигляд, наведений на рис. 4.

При рівноважній самоорганізації слідуючи теоремі про мінімальне виробництво ентропії, дана величина  $\delta^2\dot{S}$  після наноструктурних і мікрореологічних змін наближається до нуля, це і пояснює кардинальну відмінність стійкості даних трибосистем від базових.

При зміні навантаження (рис. 2–3) в бік збільшення або зменшення, ми змінюємо питому потужність тертя  $\omega$  і таким чином змінюється щільність прихованої внутрішньої енергії,  $U^*$ .

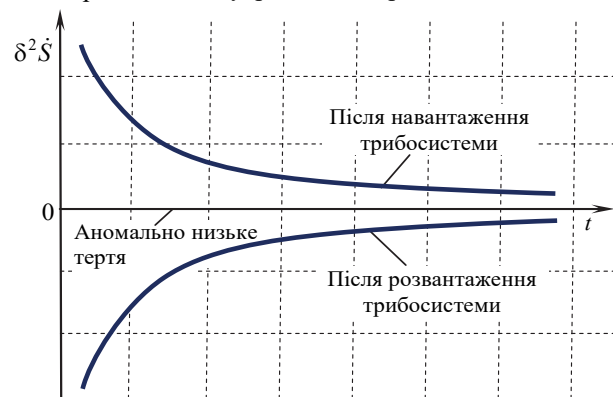


Рис. 4. Зміна приросту виробництва надлишкової ентропії  $\delta^2\dot{S}$  за часом, в умовах нерівноважного самовпорядкування трибосистеми “30Х3ВА після фінішної обробки – ВБ23НЦ після фінішної обробки мінералом”

В результаті цього порушується баланс між молекулярно-механічною та хвильовою складовими сил тертя в рівнянні (1). Відповідно до принципу Ле Шательє, повернення до рівноважного стану у даній ТС відбувається за рахунок зміни тензора напружень  $\sigma_{ik}$  і тензора деформацій  $\varepsilon_{ik}$ , що може оцінюватися параметрами структурної ентропії  $S_c$  поверхневого шару. Такий висновок витікає з результатів вимірювань мікрогеометричних характеристик (табл. 3–4).



Таким чином, саморегулювання трибосистем, які працюють в умовах аномально низького тертя та зношування, здійснюється по каналу структурної ентропії  $S_c$  (зміна щільності внутрішньої (прихованої) енергії,  $\Delta U^*$  за рахунок статичної та динамічної складової внутрішньої енергії).

Однією з умов самоорганізації нерівноважних дисипативних структур [12] є наявність флуктуацій  $\sigma_{ik}$  і  $\varepsilon_{ik}$ , а отже, коефіцієнта тертя, безпосередньо пов'язаного з ними. З огляду на те, що робота з подолання сил тертя дорівнює зміні вільної енергії з протилежним знаком, можна записати ймовірність утворення флуктуацій [18, 28–29]:

$$W = e^{-\frac{\Delta U}{RT}} = e^{-\frac{\Delta S}{R}} e^{-\frac{U}{RT}}, \quad (4)$$

де  $\Delta U$  – зміна внутрішньої енергії;

$\Delta S$  – зміна ентропії, що пов'язана з утворенням флуктуацій;

$R$  – універсальна газова стала;

$T$  – середня поверхнева температура ТС.

По суті, дотримання принципу Ле Шательє в умовах аномально низького тертя та зношування, зводиться до досягнення рівноважного стану шляхом регулювання числа механічних квантів на плямах фактичного контакту.

При аномально низькому терті та зношуванні доречно говорити не лише про виробництво ентропії і внутрішньої енергії матеріалу, але і про їх знищення по хвильовому каналу.

Принципи саморегулювання трибосистем подібного роду при зміні зовнішніх умов мають свої особливості.

Для простоти розглянемо випадок, коли в трибосистемі верхній рухомий трибоелемент представляє собою ідеальне тверде тіло, а нерухомий складається з однорідних елементів (рис. 1, а), енергетичний обмін відбувається за реологічною моделлю Шведова (рис. 1, б).

Покладемо, що функціональними одиницями в системі служать не окремі елементи, а їх агрегати – ансамблі  $\varepsilon_i$ . Будемо вважати, що ансамбль  $\varepsilon_i$  складається з  $i$ -их однотипних елементів  $\hat{\varepsilon}$  (механічних квантів), що знаходяться в  $i$ -му енергетичному стані ( $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  – число можливих станів елементів). Кінетика енергетичного обміну процесу, яка підпорядковується стохастичному диференційному рівнянню [23; 25]:

$$\frac{dx_j^i}{dt} = f_{ij}(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) - g_{ij}(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i), \quad (5)$$

де  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i$  – миттєві кількості енергії кінетичної взаємодії оціненого сумарною величиною енергії фононів, що мають квантову

природу вихідного, проміжного і кінцевого співвідношення імпульсів сили від молекулярно-механічної та хвильової складових сил тертя на окремих взаємодіючих елементах ансамблю  $\varepsilon_i$ , які формують кінетичне нанополе, як продукт симетрії кінетичної і гравітаційної складових сили тертя на всій поверхні;

$f_{ij}$  – функція, що описує швидкість досягнення рівноваги при зміні зовнішніх умов енергетичного обміну між хвильовими складовими від молекулярно-механічної і хвильової складової сили тертя  $F_w$   $j$ -го структурного стану елемента трибосистеми;

$g_{ij}$  – функція, що описує порушення цієї рівноваги.

Для простоти також припустимо, що ці реакції на зміну зовнішніх умов призводять до перерозподілу енергетичного обміну між елементами ансамблів та майже миттєвій зміні його структурного та функціонального стану.

Введемо цілочисельні функції  $v(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_m(t)]$  (тут  $v_i(t)$  – число однакових ансамблів  $\varepsilon_i$  в кожний момент часу  $t$ ) [23]. Тоді мірою організації трибосистеми може служити структурна ентропія [25]:

$$S_c(P_c) = -\sum_{i=1}^m P_{c_i} \ln P_{c_i}, \quad (6)$$

де  $P_{c_i}(t) = v_i(t) / \sum_{j=1}^m v_j(t)$ .

Таким чином, на першому етапі адаптації до нових умов зовнішнього середовища  $s \in S$  трибосистема дезорганізується і її структурна ентропія досягає величини [23]:

$$S_c(P_1^*, P_2^*) = H(P_1^*) + kI\left(\frac{P_1^*}{P_2^*}\right), \quad (7)$$

де  $P_1^*$  і  $P_2^*$  – оптимальна організація системи до та після її зміни;

$k$  – коефіцієнт пропорційності;

$I(P_1^*/P_2^*)$  – кількість інформації.

На другому етапі адаптації трибосистема встановлює нову організацію імовірнісних ансамблів, яка оптимально відповідає новій умові зовнішнього середовища  $s \in S$  в сенсі принципу максимуму надійності (умови аномально низького тертя та зношування) [23].

Початкова дезорганізація системи при її адаптації до нових умов зовнішнього середовища викликана тим, що встановлення нової структури поверхневого шару, передбачає структурну перебудову як на нано-, так і на мезорівнях.

Експериментально встановлено, що в залежності від переходу до більш напружених, або легких умов роботи відбувається накопичення, або розсіювання, або продукування додаткових енергетичних ресурсів при структуруванні.

В результаті чого за короткий час відбувається адаптація до нових умов зовнішнього тертя, при дотриманні основного принципу рівності між молекулярно-механічною і хвильовою складовими сил тертя.

Основоположною термодинамічною умовою досягнення цього балансу є структурна ентропія, величина якої дорівнює [23]:

$$S_c \left( \frac{P_1^*}{P_2^*} \right) = \sum_{i=1}^m P_i^* \log P_i^* . \quad (8)$$

Структурування, яке обумовлює досягнення даних умов, є умовами утворення біжучої хвилі і отримало тлумачення в електротехніці [33].

Експериментальним підтвердженням правомірності такого підходу є оцінка топологічних особливостей поверхневого шару трибосистеми, що працює в умовах нормального механохімічного зношування і після переведення даної трибосистеми в умови аномально низького тертя та зношування при управлінні тепловим потоком (рис. 5).

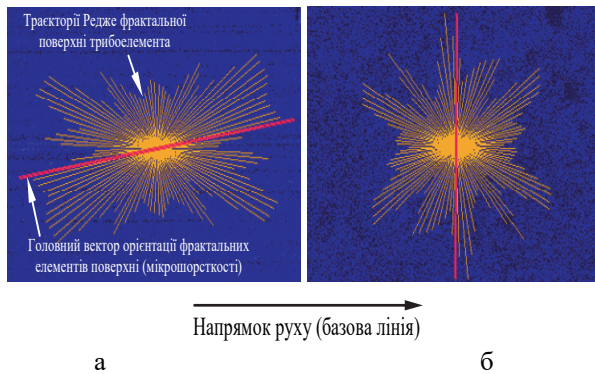


Рис. 5. Фур'є-аналіз розподілу орієнтацій елементарних осередків мікрорельєфу поверхонь тертя бронзового трибоелемента ВБ23НЦ, представлений у вигляді траєкторій Редже:  
а – при нормальному терті;  
б – при аномально низькому терті

Програма Фур'є-аналізу структурної організації поверхневого шару [20], використана в цьому випадку, дозволяє оцінити рівень орієнтації об'ємних структурних елементів в двомірному просторі, а також рівень різноманітності за розміром і формою на наноструктурному рівні (аналізуються тільки малорозмірні елементи). Дане дослідження ще раз показує дотримання першого і другого законів термодинаміки при роботі трибосистеми в умовах аномально низького тертя та зношування.

При аномально низькому терті та зношуванні структурна ентропія досягає максимально можливих значень для даної трибосистеми, а величина внутрішньої енергії, безпосередньо пов'язаної з напругою, мінімізується. Ці умови забезпечує хвильова складова сили тертя.

При аномально низькому терті та зношуванні утворення біжучої хвилі обумовлено досягненням рівноваги між інтегральною величиною імпульсу сили від хвильової і молекулярно-механічної складових сили тертя, зсунутих за фазою.

## Висновки

1. Саморегулювання в умовах аномально низького тертя та зношування в трибосистемі відбувається по каналу структурної ентропії.

2. Використання технології модифікації поверхневого шару бронзових зразків шляхом фінішної обробки мінералом групи амфіболів (нефрити) дозволяє змінити реологічну побудову поверхневого шару, яка може бути описана моделлю Шведова, і дає можливість перетворювати підведену ззовні енергію по хвильовому каналу (наявність хвильової складової зовнішнього тертя).

3. Структурна самоорганізація при досягненні аномально низького тертя та зношування направлена на підтримання такого режиму роботи трибосистеми шляхом структурування поверхневого шару, спрямованого на підтримання максимальної надійності роботи.

## Список літератури

1. Денисова Н.Е. Триботехническое материаловедение и триботехнология / Н.Е. Денисова, В.А. Шорин, И.Н. Гонгарь. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 248 с.
2. Запорожец В.В. О механизмах подвижности металлокерамического слоя в технологиях триботехнического восстановления деталей / В.В. Запорожец, В.М. Стадниченко, О.Н. Трошин // Військово-технічний збірник. – 2010 р. – № 3. – С. 101-106.
3. Запорожец В.В. Механізм дисипації енергії при терті металокерамічного шару в технологіях триботехнічного відновлення деталей машин і механізмів / В.В. Запорожець, В.М. Стадниченко, О.М. Трошин // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – № 2 (22). – С. 113-118.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). – 5-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2002. – 632 с.
5. Вейник А.И. Термодинамическая пара / А.И. Вейник. – Минск: Наука и техника, 1973. – 383 с.
6. Федоров С.В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма / С.В. Федоров // Известия Калининградского ГТУ. – 2007. – № 11. – С. 22-31.

7. Иванова В.С. Анализ критических точек трибосистемы на стадии приспособляемости с позиции синергетики / В.С. Иванова, Б.И. Семенов, Э.В. Браун // Вестник машиностроения. 1998. – № 10. – С. 3-11.
8. 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/>
9. Якубов Ф. Синергетика и процессы самоорганизации при трении и изнашивании / Ф. Якубов // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2010. – № 5. – С. 122-133.
10. Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия, полученного с помощью ревитализантов / В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко, Р.Н. Джус, О.Н. Трошин // Вестник науки и техники. – 2004. – № 1(16). – С. 18-27.
11. Запорожець В.В. Фізичні основи нерівноважного самовпорядкування в трибосистемі / В.В. Запорожець, В.М. Стадниченко, О.М. Трошін // Технологічні системи. – 2013. – № 4(65). – С. 62-70.
12. Трошин О.Н. Научная парадигма достижения аномально низкого трения в трибологии / О.Н. Трошин // Вісник ХНТУСГ. – 2017. – № 184. – С. 102-110.
13. Трошін О.М. Гіпотеза в поясненні аномально низького тертя та зношування в трибології / О.М. Трошін // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2015. – № 12. – С. 178-190.
14. 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. – № 1. – 2015. – P. 455-462.
15. 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. – Vol. 15. – № 3. – 2012. – P. 330-332.
16. Nosonovsky M. Friction-Induced Vibrations and Self-Organization. Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact / M. Nosonovsky, V. Mortazavi. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014. – 331 p.
17. 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.
18. Стадниченко В.Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловым потоком / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин // Вісник технічного університету "ХПІ". – 2007. – № 17. – С. 49-62.
19. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин, Н.Г. Стадниченко, А.В. Примак, І.І. Просяник // Збірник наукових праць ХУПС. – 2011. – № 1(27). – С. 51-61.
20. Troshin O. The Scientific Paradigm of Achieving Anomalously Low Friction in Tribology / O. Troshin // The Development of Technical Sciences. – 2018. – P. 28-31.
21. Stadnichenko V. Analysis of the Dissipation Processes of External Input Energy in Conditions of Anomalous Low Friction and Wear / V. Stadnichenko, O. Troshin // Friction. – 2018. – Vol. 156. – P. 220-235.
22. Zaporozhets V. Automated Systems for Tribodiagnostics of Contact Interactions / V. Zaporozhets, V. Stadnichenko // Journal of Friction and Wear. – 2015. – № 3. – P. 241-248.
23. Gao W. Thermomechanics of monolayer graphene: Rippling, thermal expansion and elasticity / W. Gao, R. Huang // J. Mech. Phys. Solids. – 2014. – Vol. 66. – P. 42-58.
24. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
25. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.
26. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопрежении и прогнозирование его долговечности: моногр. / Б.В. Протасов. – Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1979. – 152 с.
27. Бокштейн Б.С. Атомы блуждают по кристаллу / Б.С. Бокштейн. Под ред. Л.С. Асломазова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 208 с.
28. Николис Г. Познавание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 344 с.
29. Пригожин И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
30. Оптико-структурный машинный анализ изображений / К.М. Богданов, К.А. Яновский, Ю.Г. Козлов и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
31. Джус Р.М. Термодинамічна інтерпретація квазібеззносності покриття, отриманих мінеральними добавками до мастильних матеріалів / Р.М. Джус, В.М. Стадниченко, О.М. Трошін // Збірник наукових праць НЦ ВПС ЗСУ. – 2004. – № 7. – С. 68-73.
32. Шимони К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М.: Книга по требованию, 2012. – 776 с.
33. Filonenko S.F. Research of influence of thermal resistance of elements of tribosystem on wearproofness of friction units / S.F. Filonenko, V.N. Stadnichenko, O.N. Troshin // Proceeding of the fourth world congress "Aviation in the XXI-st century" "Safety in aviation and space technology. – 2010. – Vol. 1. P. 12.1-12.4.

## References

1. Denisova, N.E., Shorin, V.A. and Gontar, I.N. (2006), "Tribotechnicheskoe materialovedenie i tribotekhnologiya" [Tribotechnical material science and tribotechnology], Penza State Univ., Penza, 248 p.
2. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.M. and Troshin, O.N. (2010), "O mehanizmah podvizhnosti metallokeramicheskogo sloya v tehnologiyah tribotekhnicheskogo vosstanovleniya detaley" [About the mechanisms of mobility of the metal-ceramic layer in the technologies of tribotechnical restoration of parts], *Military-Technical Collection*, No. 3, pp. 101-106.
3. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.N. and Troshin, O.M. (2010), "Mehanizm disipatsiyi energii pri terti metaloke-amichnogo sharu v tehnologiyah tribotekhnicheskogo vidnovlennya detaley mashin i mehanizmv" [Mechanism of dissipation of energy in the friction of the metal-ceramic layer in the technologies of tribotechnical restoration of machine parts and mechanisms], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 2 (22), pp. 113-118.



4. Garkunov, D.N. (2002), "Tribotekhnika (konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin)" [Tribotechnics (design, manufacture and operation of machines)], Publishing House of MSHA, Moscow, 632 p.
5. Veynik, A.I. (1973), "Termodinamicheskaya para" [Thermodynamic pair], Science and Technology, Minsk, 383 p.
6. Fedorov, S.V. (2007), "Obschie zakonomernosti evolyutsii treniya s pozitsiy samoorganizatsii i sinergizma" [General regularities of the evolution of friction from the standpoint of self-organization and synergism], *Izvestiya KGTU*, No. 11, pp. 22-31.
7. Ivanova, V.S., Semenov, B.I. and Braun, E.V. (1998), "Analiz kriticheskikh toчек tribosistemy na stadii prispoblivayemosti s pozitsiy sinergiki" [Analysis of the critical points of the tribosystem at the stage of adaptability from the position of synergetics], *Mechanical Engineering Bulletin*, No. 10, pp. 3-11.
8. Pogodaev, L.I. (2013), "Strukturno-energeticheskie modeli povedeniya (nadezhnosti) materialov pri impulsnom nagruzhenii" [Structural and energy models of behavior (reliability) of materials under pulsed loading], *Friction Wear Grease*, Vol. 15, No. 57, available at: [www.tribo.ru/](http://www.tribo.ru/) (accessed 17 March 2015).
9. Yakubov, F. (2010), "Sinergetika i protsessy samoorganizatsii pri trenii i iznashivanii" [Synergetics and processes of self-organization at friction and wear], *Modern Technologies in Mechanical Engineering*, No. 5, pp. 122-133.
10. Stadnichenko, V.N., Stadnichenko, N.G., Dzhus, R.N. and Troshin, O.N. (2004), "Ob obrazovanii i funktsionirovanii metallokeramicheskogo pokrytiya, poluchennogo s pomoshchyu revitalizantov" [On the formation and functioning of a cermet coating obtained using revitalizants], *Bulletin of Science and Technology*, No. 1(16), pp. 18-27.
11. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.M. and Troshin, O.M. (2013), "Fizichni osnovi nerivnovazhnogo samovoryadkuvannya v tribosistemi" [Physical foundations of unsustainable self-order in tribosystems], *Technological Systems*, No. 4(65), pp. 62-70.
12. Troshin, O.N. (2017), "Nauchnaya paradigma dostizheniya anomalno nizkogo treniya v tribologii" [The scientific paradigm of achieving abnormally low friction in tribology], *Journal of HNTUSG*, No. 184, pp. 102-110.
13. Troshin, O.M. (2015), "Gipoteza v poyasnenii 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.
14. 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.
15. Starcevic, J. and Filippov, A.E. (2012), Simulation of the influence of ultrasonic in-plane oscillations on dry friction accounting for stick and creep, *Physical Mesomechanics*, Vol. 15, No. 3, pp. 330-332.
16. Nosonovsky, M. and Mortazavi, V. (2014), *Friction-Induced Vibrations and Self-Organization. Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, Boca Raton, 331 p.
17. Stadnichenko, V.M. and Troshin, O.M. (2016), Gray's Paradox and Wave Solutions in Explaining Anomalously Low Friction and Wear in Tribology, *International Journal of Materials Science and Applications*, Vol. 5, No. 1, pp. 23-30.
18. Stadnichenko, V.N. and Troshin, O.N. (2007), "Sinergeticheskaya kontseptsiya samoorganizatsii v tribologicheskikh sistemakh pri upravlenii teplovym potokom" [Synergetic concept of self-organization in tribological systems in heat flow control], *Bulletin of the Technical University "KHPP"*, No. 17, pp. 49-62.
19. Stadnichenko, V.N., Troshin, O.N., Stadnichenko, N.G., Priymak, A.V. and Prosyaniuk, I.I. (2011), "Klassifikatsiya vidov nanoiznosa po znacheniyu koeffitsienta dissipatsii podvodimoy vneshney energii k tribosisteme" [Classification of types of nano-bearing by the value of the coefficient of dissipation of the supplied external energy to the tribosystem], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 1(27), pp. 51-61.
20. Troshin, O. (2018), The Scientific Paradigm of Achieving Anomalously Low Friction in Tribology, *The Development of Technical Sciences*, pp. 28-31.
21. Stadnichenko, V. and Troshin, O. (2018), Analysis of the Dissipation Processes of External Input Energy in Conditions of Anomalous Low Friction and Wear, *Friction*, Vol. 156, pp. 220-235.
22. Zaporozhets, V. and Stadnichenko, V. (2015), Automated Systems for Tribodiagnostics of Contact Interactions, *Journal of Friction and Wear*, No. (3)36, pp. 241-248.
23. Gao, W. and Huang, R. (2014), Thermomechanics of monolayer graphene: Rippling, thermal expansion and elasticity, *J. Mech. Phys. Solids*, No. 66, pp. 42-58.
24. Kragelskiy, I.V., Dobyichin, M.N. and Kombalov, V.S. (1977), "Osnovnyy raschetov na trenie i iznos" [Basics of calculations for friction and wear], Mashinostroenie, Moscow, 526 p.
25. Kostetskiy, B.I., Nosovskiy, I.G. and Karaulov, A.K. (1976), "Poverhnostnaya prochnost materialov pri trenii" [Surface strength of materials under friction], Tehnika, Kyiv, 296 p.
26. Protasov, B.V. (1979), "Energeticheskie sootnosheniya v tribosopryazhenii i prognozirovaniye ego dolgovechnosti" [Energy relations in tribo-conjugation and prediction of its durability], Saratov University, Saratov, 152 p.
27. Bokshiteyn, B.S. (1984), "Atomy bluzhdayut po kristallu in Richardson" [Atoms wander around the crystal], The Science. Main edition of the physical and mathematical literature, Moscow, 208 p.
28. Nikolis, G. and Prigozhin, I. (2000), "Poznanie slozhnogo" [Exploring Complexity], Mir, Moscow, 344 p.
29. Prigozhin, I. and Stengers, I. (1984), "Poryadok iz haosa: Novyy dialog cheloveka s prirodoy" [Order out of chaos: Man's new dialogue with nature], Progress, Moscow, 432 p.
30. Bogdanov, K.M., Yanovsky, K.A. and Kozlov, Yu.G. (1984), "Optiko-strukturnyy mashinnyy analiz izobrazheniy" [Optical-structural machine image analysis], Mashinostroenie, Moscow, 280 p.
31. Dzhus, R.M., Stadnichenko, V.M. and Troshin, O.M. (2004), "Termodinamichna Interpretatsiya kvazIbezsnosti pokrit, otrimanih mineralnimi dobavkami do mastilnih materialiv" [Thermodynamic interpretation of quasi-integrity coatings obtained by mineral additives to lubricants], *Scientific Works of of the Scientific Center of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, No. 7, pp. 68-73.
32. Shimoni, K. (2012), "Teoreticheskaya elektrotehnika" [Theoretical Electrical Engineering], Book on Demand, Moscow, 776 p.
33. Filonenko, S.F., Stadnichenko, V.N. and Troshin, O.N. (2010), Research of influence of thermal resistance of elements of tribosystem on wearproofness of friction units, *Proceeding of the fourth world congress "Aviation in the XXI-st century" "Safety in aviation and space technology"*, Vol. 1, NAU, pp. 12.1-12.4.

Надійшла до редколегії 25.04.2019  
Схвалена до друку 18.06.2019

**Відомості про автора:**

**Варваров Валерій Володимирович**

курсний офіцер Харківського національного  
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-1273-5605>

**Information about the author:**

**Valeriy Varvarov**

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

**МЕХАНИЗМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ В ТРИБОСИСТЕМАХ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ  
АНОМАЛЬНО НИЗКОГО ТРЕНИЯ И ИЗНОСА**

В.В. Варваров

*В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования трибосистем, работающих в условиях аномально низкого трения и износа при изменении внешних условий их работы. Выполнен сравнительный анализ механизмов самоорганизации трибосистем, работающих в условиях нормального механохимического и аномально низкого трения и износа для определения условий перехода к такому режиму. Определен еще один возможный способ перевода трибосистем к условиям аномально низкого трения и износа путем модификации поверхностного слоя бронзовых образцов финишной обработкой минералом группы амфиболов (нефрит)*

**Ключевые слова:** трение, износ, самоорганизация, трибосистемы, трибоэлемент, модификация.

**MECHANISMS OF SELF-ORGANIZATION IN TRIBOSYSTEMS WHICH WORK UNDER ANOMALICALLY  
LOW FRICTION AND WEAR**

V. Varvarov

*The modern development of the tribology and especially such a section as tribomaterialology has allowed formulating a new rather effective way of reducing friction and wear in various tribosystems as a result of tribomodification of the surface layer. The purpose of this work is a comparative analysis of the mechanisms of self-organization of tribosystems, which operate under conditions of normal mechanochemical and abnormally low friction and wear to determine the physical nature of the mechanisms of self-organization of a tribosystem operating in these conditions. Theoretical and experimental studies of tribosystems that operate under conditions of abnormal friction and wear when external conditions of their work are changed are presented. A comparative analysis of the mechanisms of self-organization of tribosystems, which operate under conditions of normal mechanochemical and abnormally low friction and wear, is carried out in order to determine the conditions for transition to such a regime. Another possible method of transfer of tribosystems to conditions of abnormally low friction and wear by the modification of the surface layer of bronze samples by finishing the mineral of the group of amphiboles (nephritis) is determined. It is determined that self-regulation under conditions of abnormally low friction and wear in a tribosystem occurs through the channel of structural entropy. Using the technology of modification of the surface layer of bronze samples by finishing the mineral with a group of amphiboles (nephrite) allows you to change the rheological construction of the surface layer, which can be described by the Shvedov model, and makes it possible to convert the energy brought up from the outside by a wave channel (the presence of the wave component of external friction). Structural self-organization in achieving an abnormally low friction and wear is aimed at maintaining such a mode of operation of the tribosystem by structuring the surface layer, aimed at maintaining maximum reliability of work.*

**Keywords:** friction, wear, self-organization, tribosystems, triboelement, modification.