



ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НЕРІВНОВАЖНОГО САМОВПОРЯДКУВАННЯ В ТРІБОСИСТЕМІ

В статті проведений аналіз різних механізмів самовпорядкування поверхонь фрикційного контакту та встановлені умови їх протікання та зміни. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовані методичні рішення для управління процесами тертя і зношування шляхом реалізації різних механізмів дисипації зовнішньої енергії. Визначено, що найперспективнішим напрямом теоретичних досліджень переходу трібосистем в "нанозносний" режим тертя є вивчення природи самовпорядкування нерівноважних процесів, що виникають не тільки при управлінні тепловими потоками в трібосистемах, але і при управлінні кінетичними взаємодіями поверхонь фрикційного контакту.

Ключові слова: трібосистема; не рівноважна самовпорядкування; мінус-, плюс-тертя; знос; дисипація; антидисипація; ентропія; ентальпія.

Введення

Працездатність устаткування, що використовується в нафтохімічній, газопереробній, енергетичній, аерокосмічній і інших галузях народного господарства, в значній мірі залежить від гарантованої надійності виробів, що працюють в умовах високих механічних і температурних навантажень, та в умовах агресивних середовищ.

Використовування таких ефектів, як «нанозносне тертя» [1, 2] може бути покладено в основу створення трібосистем, що мають високий ресурс і максимальну надійність. При цьому, найбільше значення набувають питання утворення на поверхнях фрикційного контакту різних тонких плівкових шарів, особливостей їх мастильної дії, а також процесів самовпорядкування поверхонь фрикційного контакту наслідком яких є утворення на поверхнях тертя фрактальних просторових і тимчасових структур, у тому числі ротаційних [3,4].

Автор робіт із нелінійної термодинаміки і самовпорядкування нерівноважних систем Ілля Пригожин встановив, що деякі відкриті системи в умовах далеких від рівноваги, стають нестабільними [5–8], їх макроскопічні властивості при цьому радикально змінюються. В тріботехнічних системах, це проявляється в утворенні дисипативних структур двох типів. До першого типу відносяться рівноважні структури, що утворюються в процесі припрацювання, їх формування досягається мінімальним виробництвом ентропії. До дисипативних структур другого типу відносять не рівноважні, що визначаються знаком

надмірного виробництва ентропії, умовою і утворення яких є підведення додаткової зовнішньої енергії [9]. Дані структури працюють за принципом підтримки максимальної надійності при зміні зовнішніх умов тертя, це досягається підтримкою рівності динамічних процесів плюс і мінус дисипації [10]. Як показано в роботах [3, 4] кожному окремому випадку, відповідає свій термодинамічний поріг самовпорядкування, який чітко розділяє класи рівноважних і не рівноважних дисипативних структур, що виникають при великих відхиленнях від положення рівноваги. Саме тут виявляється ефект самовпорядкування і когерентна поведінка підсистем, яка виражається в переході трібосистеми до роботи в умовах нанозносу. По суті, це відкриття нових областей у фізиці тертя і зносу, де термодинамічною можливою є самовпорядкування нових структур, яка приводить до більш досконалого механізму тертя, ніж граничне.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Під самовпорядкуванням в синергетиці розуміється здатність будь-яких об'єктів проявляти властивості характерні для поведінки біологічних і соціальних об'єктів, причому їх зусилля мають чітко виражену спрямованість на підтримку порядку і організованості [7].

Слід зазначити, що самовпорядкування не є універсальною властивістю матерії, а існує лише за певних внутрішніх і зовнішніх умов. Разом з тим, ця властивість не пов'язана з яким-небудь особливим класом речовин: ефект Бенара, феномен Гойгенса,

лазери, перехід від ламінарної течії до турбулентної, і є доказом цього твердження. Останній приклад особливо цікавий стосовно тріботехніки. Було помічено, що дельфіни при плаванні розвивають швидкість, значно більше тїєї, яку можна було чекати з урахуванням їх геометричної форми. Цей феномен обумовлений тим, що тіло дельфіна володіє малим опором тертю, і пояснюється пружністю шкіри, яка дозволяє граничному шару води на тілі дельфіна залишатися ламінарним навіть при дуже великих числах Рейнольдса [11]. На підставі приведеного вище ефекту, проводяться розробки перспективних літальних і підводних апаратів з повною ламіризацією граничного шару. Це дає можливість понизити коефіцієнт опору тіла до оточуючого середовища в сім і більш разів. Дана ідея, що підказана самою природою використана авторами роботи [12] при розробці технологій тріботехнічного відновлення, яка направлена на створення на поверхні тертя металокерамічного шару, верхній підшар якого є абсолютно пружним (окисел алюмінію), а підповерхневий шар знаходиться в стані близькому до аморфного (металосилікат). Дисипація зовнішньої енергії, що підводиться, при терті в даній трібосистемі відбувається за рахунок пружнопластичних циклічних деформацій металокерамічного шару в контактній області, і названа ефектом хвилі, що «біжить», яка і обумовлює практичну нанозносність трібосистеми [12].

Поняття аттрактора, яке широко використовується в синергетиці, авторами роботи [5] трактується як кінцева область неминучого сходження фазових траєкторій руху складної системи. Аттрактором може виступати або точка (стійкий аттрактор), або інша складніше утворення, тобто певна область, усередині якої, траєкторії системи скоюють довільні і невіддатливі регулярному опису блукання.

Допоміжну роль грають поняття хаосу і порядку. Вони вживаються як характеристики, що описують взаємовплив процесів, і також характеризують явище самовпорядкування: «Сам хаос має тонку, іноді невидиму для зовнішнього спостерігача структуру, наприклад, в турбулентній течії. А порядок – це організований хаос». Синергетика дає своє особливе значення поняттю хаосу, як потенційної можливості вибору, чинника сприяючого переходу системи на інший рівень порядку, організованості. І порядок, і хаос є невід'ємними складовими частинами і продуктами корельованих еволюційних процесів.

Для того, щоб у відкритій системі відбувалася структуризація, тобто радикально зростала впорядкованість, експорт ентропії повинен перевищити деяке критичне значення. Для експорту ентропії, що перевищує її внутрішню продукцію, необхідний свого роду «ентропійний насос», що викачує ентропію з відкритої системи, або перерозподіляючи її між елементами з різним ентропійним ресурсом. Такий насос може діяти або ззовні, або зсередини.

Проводячи аналіз робіт [5, 9, 14, 15] можна записати термодинамічні умови роботи цього насоса:

$$deF > dE + TdiS$$

де deF – відтік вільної енергії; dE – зміна внутрішньої енергії; T – температура системи; diS – ентропія, вироблена усередині системи.

Таким чином, для того, щоб відбувся експорт ентропії, її відтік з системи, необхідним є подача вільної енергії в кількості, що перевищує зміну внутрішньої енергії і внесок, який визначається продукцією ентропії.

Якщо розглядається процес при непостійному об'ємі, але при постійному тиску, необхідним є використання вільної енергії Гіббса. В цьому випадку рівняння ентропійного насоса буде мати вигляд:

$$deG > dH + TdiS$$

де deG – зміна вільної енергії Гіббса системи; dH – зміна ентальпії системи.

Оскільки, в стаціонарних умовах, внутрішня енергія, або ентальпія не змінюється, $deF = -deG > TdiS > 0$, то для підтримки стаціонарного стану системи, необхідно вводити в систему вільну енергію.

Дана умова, дає пояснення появі за певних умов дисипативних структур, проте, вона не дає можливості пояснити ні механізми їх утворення, ні їх поведінки. Особливе значення в світлі цього отримує поняття структури, яке є основним для всіх наук, що займаються тими або іншими аспектами процесів самовпорядкування, при будь-якому ступені спільності і припускаючи якусь «жорсткість» об'єкту – здатність зберігати тотожність самому собі при різних зовнішніх і внутрішніх змінах.

Якщо використовувати термінологію нелінійної термодинаміки [10], можна сказати, що всі системи містять підсистеми, які постійно флюктують. Іноді окрема флуктуація або комбінація флуктуацій може стати (в результаті позитивного зворотного зв'язку) настільки сильною, що існуюча раніше організаційна структура не витримує і руйнується. В цей переломний момент, що зветься точкою біфуркації, принципово неможливо передбачити, в якому напрямі відбуватиметься подальший розвиток: чи стане стан системи хаотичним, або вона перейде на новий, більш диференційований і більш високий рівень впорядкованості, або організації, яка зветься дисипативною структурою.

У зв'язку з цим надзвичайно важливою є оцінка стійкості не рівноважних станів дисипативних структур. Дана задача вирішена на основі рівняння балансу надмірного виробництва ентропії [10].

Постановка задачі

Проведений вище аналіз термодинамічних умов роботи трібосистем дає нам підставу припустити наявність двох механізмів самовпорядкування: рів-



новажного впорядкованого, при якому ступінь нерівноважності зменшується, а енергія виділяється, і не рівноважного впорядкованого, при якому ступінь нерівноваги зростає, а енергія затрачується. Кожній гілці самовпорядкування відповідають свої окремі види дисипативних структур, що утворюються на поверхнях тертя. Рівноважно впорядковані, що виникають в процесі первинного і вторинного припрацювання в трібосистемах [12], і нерівноважно впорядковані, що виникають в трібосистемі за межею стійкості за рахунок цілеспрямованої дії ззовні (теплофізичне, силове, електрофізичне, радіаційне і ін.) [15].

Цілеспрямована дія ззовні, приводить трібосистему в сильно впорядкований і далекий від початкового стан. З позиції фізики твердого тіла цей перехід пов'язаний з поступовим подоланням наявного потенційного бар'єру, і може розглядатися, як фазовий перехід другого роду. Штучно збуджуючи трібосистему доцільно визначати двома стабільними станами що характеризуються відповідно рівнями енергії тертя E_1 і E_2 , а також енергетичним бар'єром Q . Спонтанний перехід системи з початкового положення в рівноважний стан E_1 , можливий за допомогою звичайного припрацювання. Проте мимовільний перехід трібосистеми в стан E_2 не відбувається, оскільки ці стани розділяє енергетичний бар'єр $Q > E_1$, подолання якого за рахунок сили тертя практично неможливе. Для радикального зниження рівня сили тертя і інтенсивності зношування необхідна додаткова дія на трібосистему з енергією, що забезпечує подолання бар'єру Q і подальший перехід системи в стан E_2 . Для дисипативних структур другого роду, де стійкі стани на різних навантажено-швидкісних режимах досягаються рівновагою плюс і мінус дисипації, такого роду переходи з одного рівня на інший цілком досяжні.

Цінність такого підходу при аналізі дисипативних структур і процесів самоорганізації трібосистем полягає в більш глибокому розумінні зв'язку тертя з основними законами природи, виробленню методичних рішень для управління процесами тертя і зношування, що є основною задачею фундаментальних і прикладних досліджень в даній області науки і техніки.

Основні матеріали дослідження

Приведені нижче дослідження ґрунтуються на науковій гіпотезі в основі, якої покладена енергетична модель тертя і зношування [12, 16]. Дана гіпотеза дає можливість при описі динаміки будь-яких макроскопічних систем, через зміни термодинамічних потенціалів, враховувати адсорбційні, дифузійні і інші ефекти.

Стосовно опису процесів тертя і зношування, функціональна залежність швидкості зношування від термодинамічних чинників має вигляд:

$$J = f(U, S, t)$$

де J – інтенсивність зношування; U – внутрішня енергія; S – ентропія; t – час.

В основу даної гіпотези встановлені наступні ідеї:

- в поверхневому шарі матеріалу, що зношується, можна виділити ефективний об'єм взаємодій, що знаходиться в стані локальної динамічної рівноваги;
- процеси тертя і зношування можуть бути описані рівняннями енергетичного балансу;
- швидкість деструкції контролюється швидкістю виробництва ентропії.

Рівняння балансу ентропії для локальної області (локальна термодинамічна рівновага) має вигляд:

$$cdS/dt + dvS$$

де cdS/dt – швидкість приросту ентропії в даній області; $divS$ – швидкість відтоку ентропії з даної області в оточуюче середовище, або контртіло.

Проте подібна модель, не враховує той факт, що в процесі деформації активуються дисипативні процеси, в результаті яких перед руйнуванням поверхні фрикційного контакту самовпорядковуються, та у ряді випадків замість очікуваного хаосу і деструкції спостерігається поява високовпорядкованих структур, що ймовірно пов'язано з тим, що з системи безперервно «відкачується» ентропія, утворювана в ході накопичення дефектів. Крім того, відомий факт, що на стадії вичерпання пластичності переважна роль відводиться колективним процесам, що охоплюють масштаб більший, ніж розміри локальних областей усередині осередків дислокацій, врахування яких в даній моделі не передбачено.

Принципово важливим при оцінці термодинамічних процесів в трібосистемах є врахування взаємовпливу основних факторів.

Завдяки різниці температур виникає тепловий потік відмінний від нуля. В процесах виробництва ентропії завжди присутній потік, тобто зміна деякої фізичної величини, і сила, що створює цей потік. В цьому випадку потоком є потік енергії dE/dt . Рушійна сила – різниця температур:

$$1/T_2 - 1/T_1 \quad T_2/T_1 T_2.$$

Таким чином, можливо, представити функцію дисипації енергії у вигляді:

$$\sigma = dE/dt(1/T_2 - 1/T_1).$$

Оскільки σ – виробництво ентропії до одиниці об'єму, то E – енергія, що доводиться на одиницю об'єму.

Умова $\sigma > 0$ виконується. Дійсно, dE/dt – потік теплової енергії від T_1 до T_2 позитивний при $T_1 > T_2$, але при цьому $1/T_2 - 1/T_1 > 0$. Навпаки, якщо $T_1 < T_2$, але при цьому $1/T_2 - 1/T_1 < 0$.

Функція дисипації виражається виробництвом потоку і сили, що його викликає, вона є універсальною, як для електричних, хімічних явищ, так, і для

трібосистем. Даний факт дозволяє припустити припущення про застосовність функції дисипації при описі напружено-деформованого стану поверхневого шару матеріалів фрикційних вузлів в процесі їх роботи.

Грунтуючись на кібернетичній моделі саморегулювання трібосистем [17], слід зазначити, що в ній саморегулювання трібосистеми здійснюється за допомогою негативного зворотного зв'язку по каналу ентальпії. Проте дослідження процесів самовпорядкування відкритих термодинамічних систем [5, 6] дозволяють припустити можливість самовпорядкування системи і по каналу позитивного зворотного зв'язку, роль якої грає структура поверхневих шарів матеріалів, які модифікуються при терті.

Наприклад, перехід від мікропластичної деформації при терті до – проковзуванням утворених ультрадисперсних фрагментів різного масштабу відносно один одного відбувається через точку біфуркації із зміною механізму реології дисипації накопиченої внутрішньої енергії [3]. Іншим прикладом подібного саморегулювання трібосистем є зародження при пластичній деформації матеріалу ротаційних структур, і аномальне масоперенесення в поверхневих шарах [17]. Перехід від деформації ковзання до ротаційної деформації, аналогічний перехід від ламінарного перебігу рідини до турбулентного. Точкою біфуркації в цьому випадку є досягнення критичної густини дислокацій.

Ротаційна деформація полягає в розбитті матеріалу на взаємно розорієнтовані об'єми, подальше зменшення їх розміру і збільшення кутів їх розорієнтації. Ротаційна пластичність протікає за рахунок зародження і розповсюдження лінійних дефектів дислокацій. Останнє при поворотах грають ту ж роль, що, і дислокації при зсувах. З аналізу роботи [18] виходить, що великим і особливо циклічним деформаціям властиві ротаційні механізми пластичності.

Існують і складніші механізми саморегулювання відкритих термодинамічних систем, які в трібології не знайшли практичного застосування. Одним з таких механізмів саморегуляції з позитивним зворотним зв'язком є механізм висхідної дифузії, ефект Горського. Управляючим параметром, при якому проявляються напрями градієнта дифузії, при досягненні критичного значення між напругами розтягання і стиснення на поверхні і в глибині деформованої пластини.

Вельми цікавим, як з теоретичною, так і з практичної сторони є термодинамічний аналіз кінетичної взаємодії квазіпружних тіл проведених автором в роботі [10].

Розглядаючи механізми дисипації енергії в безопорному двигуні Толчина, автор роботи [10] прий-

шов до важливого висновку про можливість отримання некомпенсованої сили тільки за рахунок різниці в стані тіл, що соударяються. Розглянутий випадок недотримання закону збереження кількості руху може бути застосований для істотного зниження параметрів, що характеризують процеси зношування в трібосистемах.

Якщо розглянути локальні взаємодії мікрошорсткостей в контактній області трібосистеми, за аналогією з прикладом розглянутому в даній роботі, то ефект дисипації (кількість тепла дисипації Q_d) при пружній взаємодії мікрошорсткостей за умов рівності взаємодіючих мас (мікрошорсткостей на поверхні) рухомого і нерухомого тіл, що труть, можна оцінити наступним виразом [10]:

$$Q_d = (1/2)\delta P_{md}m = (1/2)m(\omega_c^2 - \omega^2), \quad (1)$$

де δP_{md} – різниця кінетичних енергій; m – приєднувана (від'єднувана) маса; ω_c – початкова швидкість; ω – кінцева швидкість;

Розглянемо шляхи дисипації зовнішньої енергії, що підводиться до трібосистемі, при пружній взаємодії мікрошорсткостей.

При пружному ударі Q_d залежить від ступеня досконалості удару. В умовах абсолютного пружного удару тіл об нерухому перешкоду швидкість маси до удару рівна її швидкості після удару. Гальмування маси супроводжується виділенням тепла дисипації в кількості Q_d , а її розгін до колишньої швидкості – поглинанням тієї ж кількості тепла – Q_d . В результаті ефект екранування (дисипації) перетворюється в нуль. Це виходить з (1), якщо підставити в неї сумарний потік кінетичної складової від загальної енергії тіла, то він буде рівним нулю. Окрім кінетичної складової в кожному тілі присутня субстанціональна і гравітаційна складові. Разом з тим наявність в (1) різниці квадратів швидкостей свідчить про надзвичайну важливість того факту, яка зі швидкостей вище – початкова або кінцева. Якщо при ударі початкова швидкість c більше кінцевої v , тобто активність кінетичної складової від загальної енергії тіла внаслідок ефекту екранування падає, тоді теплота дисипації позитивна, вона виділяється (плюс-тертя). Якщо початкова швидкість c менше кінцевої v , тобто активність кінетичної складової від загальної енергії тіла внаслідок ефекту екранування зростає, тоді теплота дисипації, негативна, вона поглинається (мінус-тертя). Під мінус-тертям необхідно розуміти зменшення сили тертя.

Енергетика поверхні не дозволяє розглядати шорсткість тільки з геометричних позицій. В теорії дисипації енергії відомий цікавий фізичний ефект створення осередків Бернара. Якщо до поверхні постійно підводиться енергія, то по

досягненні її певного значення виявляється необхідною її більш інтенсивна віддача (розсіяння) в оточуюче середовище. Виникає біфуркація з подальшим самовпорядкуванням структури поверхні, при цьому мимовільно поверхня розбивається на окремі елементи, кожний з яких дисипатує більш інтенсивно, ніж до біфуркації. Це дозволило авторам роботи [19] проаналізувати енергообмін між поверхнями, що труться, шляхом представлення шорсткостей у вигляді енергетичних осередків, кожна з яких віддає енергію в контртіло, і сприймає її від контртіла. Даний енергообмін оцінюється при усереднених по всій поверхні енергетичних потоках. У випадку якщо розглядати ці потоки локально, то також досяжні умови плюс і мінус-тертя [10].

Якщо реальну трібосистему представити у вигляді нескінченної безлічі взаємодіючих пружних мікрошорсткостей, то мінімізації величини параметрів (швидкість зношування, температура контактної області, сила тертя і ін.), визначатиметься характеристиками кінетичного нанополя (реакція маси, на зовнішню дію, що виникає в локальних точках пружної взаємодії на рівні мікрошорсткості тіл, що труться), в якому можливо досягнення умов, коли обидва ефекти екранування строго рівні між собою. При цьому робота сил нанополя завжди рівна роботі уповільнення, або прискорення маси, але знаки цих робіт протиставлені. Оцінка величини напруг і пов'язаної з ним сили тертя на поверхні контакту може бути оцінена за допомогою інформаційно-статистичної моделі.

Кількість дисипативної складової $d\Theta_d$ – тепла, що виділилося або поглиненого, прямопропорційна зміні активності кінетичної складової нанополя dP_d , і величині перенесеного тепла в результаті локальних взаємодій dE , і обернено пропорційна абсолютній температурі носія, яка може бути описана стохастичними рівняннями, підсумкові рішення яких можуть бути представлені рівнянням [10]:

$$d\Theta_d = dQ_d / T = -dP_d dE / T,$$

В даний час при оцінці напруженого стану поверхневого шару оперують рівнем напруг певних знаків, що стискають або розтягують у всьому ефективному об'ємі взаємодії, які врівноважуються в перетині контактуючих тіл.

У разі кінетичного нанополя величина локальних напруг може бути представлена ефектом кавітації рідини, коли одночасно існують мікрообласті з високим і низьким тиском, підсумкова величина напруги нестационарна. Якщо реалізувати дані умови в трібосистемі, то сумарна зміна температури і сили тертя при зміні навантаження в контактній області також буде близько до нуля.

Таким чином, висунута в роботі [10] гіпотеза квазіпружної взаємодії поверхонь, що супроводжується

ефектами мінус-тертя містять в собі перспективи розвитку, як та дає можливість рішення основного прикладного питання – мінімізації тертя і зношування широкого кола трібосистем сучасних машин і механізмів.

Існування ефектів тертя і антитертя, дисипації і антидисипації примушує по-новому розглядати проблему безповоротності процесів в трібосистемах, і на цій основі розвивати фундаментальний підхід до тертя і зношування. Використовування цих ефектів, виходячи з роботи [10] дасть можливість, граючи на взаємному впливі різних ступенів свободи, не тільки знищувати кінетичне і механічне тертя, але і отримувати вигоду в кінетичній і механічній роботі за рахунок різних видів робіт. Самовпорядкування для такого роду трібосистем здійснюється за каналом надмірного виробництва ентропії [20]. Зміна приросту виробництва надмірної ентропії $(\delta^2 S)_{tc}$ в часі для не рівноважних процесів описаних вище носить коливальний характер. Тобто знак визначатиме співвідношення процесів дисипації і антидисипації. Фундаментальною величиною, яка визначає стійкість трібосистеми в умовах нерівноважного самовпорядкування, є виробництво надмірної ентропії.

Підводячи підсумок аналізу механізмів дисипації зовнішньої енергії, що підводиться, в трібосистемах можна схематично оцінити їх ефективність при різних методичних рішеннях, схема представлена на рис. 1.

Вельми важливими для аналізу процесів самовпорядкування трібосистеми є не тільки кінетичні взаємодії, що виникають на субмікроскопічному, і більш тонкому рівні, але, і поведінка поверхневого шару після зупинки трібосистеми. З роботи [21] виходить, що зупинка трібосистеми приводить до виключення дезорганізації граничного шару, а процеси, направлені на самовпорядкування ще якийсь час продовжують діяти, що приводить до ще більшого впорядкування поверхонь фрикційного контакту і, як наслідок – зменшення сили тертя при повторному навантаженні.

Ця обставина дозволяє використовувати методологію програмного навантаження [22], для переведення трібосистеми на більш високий рівень самовпорядкування при виводі її за межі стійкості. Програмне навантаження передбачає дотримання повної відповідності між ростом навантаження, що прикладається, і швидкістю релаксації внутрішніх напружень за рахунок протікання дифузійних і мікросуєвних процесів. Після програмного навантаження метал становиться більш однорідним по характеру розподілення напружень. Структура програмно-зміцнених матеріалів є механічно більш рівноважною, ніж вихідний матеріал, і має підвищений опір початку пластичної деформації і одночасно меншою схильністю до крихкості руйнуванню [22].

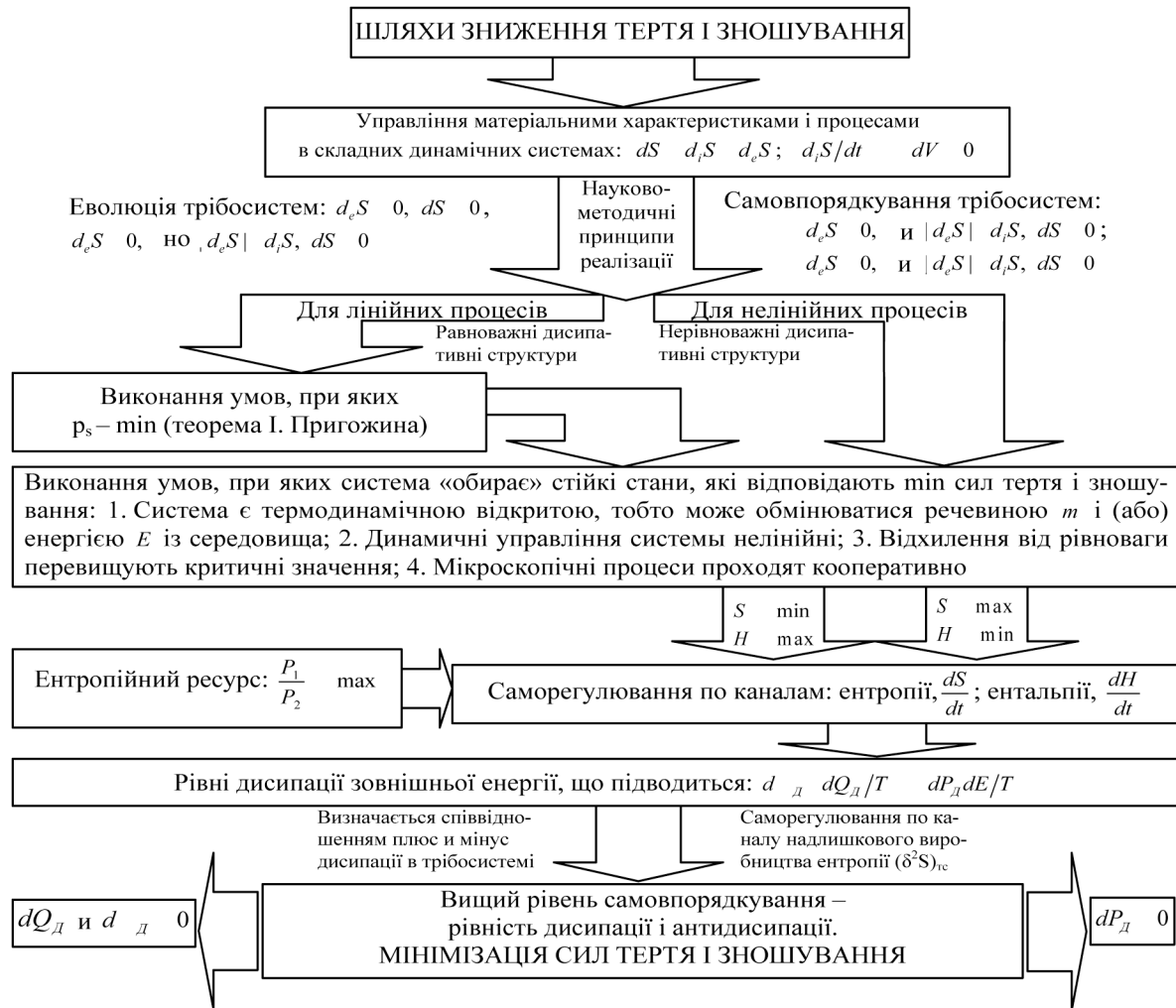


Рис. 1. Методичний підхід до управління процесами тертя і зношування

В той же час імпульсне навантаження, яке прикладається до трібосистем, що знаходяться в згаданому структурному стані, приводить до спонтанного переходу різних рівнів переміщення пластичних деформацій субструктурного мікрорівня на мезорівень, при цьому суттєво збільшується глибина наклепаного шару. При цьому має місце стрибкоподібно зміна властивостей матеріалів трібосистеми тобто перехід подібний до фазових перетворень. В цьому випадку на поверхні ймовірно утворюється квазіпружний шар в центральній її частині гіпотетично можливе гідродинамічна деформація, а на периферії в перехідній зоні слід очікувати інтенсивну ротаційну пружнопластичну деформацію, аналогічну структурі вихроутворення в пристіночній шарі при течії рідини [23].

Використання рівнянь механіки рідини [23] для описування особливостей ротаційної (турбулентної) структури в металічних матеріалах, а також інтенсивності зовнішнього імпульсного впливу перспек-

тивно по двом обставинам. По-перше, із-за близькості фізичної картини і масштабів дисипації енергії пристіночному шарі рідини і в об'ємах твердих матеріалів, де проходить дисипація енергії мікроударного навантаження шляхом ротацій. По-друге, із-за випадкового характеру процесу енергетичного обміну між ядром потоку рідини і ламінарним підшаром у вигляді струйних викидів рідини від стінки, аналогічного характеру стохастичних зовнішніх впливів на поверхню деталей при граничному терті.

Проведений вище аналіз механізмів дисипації енергії, що підводиться до трібосистеми дозволяє сформулювати шляхи досягнення вищого рівня самовпорядкування в трібосистемі шляхом програмного навантаження, рис. 2.

Таким чином можлива експериментальна перевірка гіпотези існування нанозносного тертя шляхом досягнення рівноваги дисипації і антидисипації діючих напруг в кінетичному нанополі, що виникає в поверхневому шарі при досягненні певних умов, які

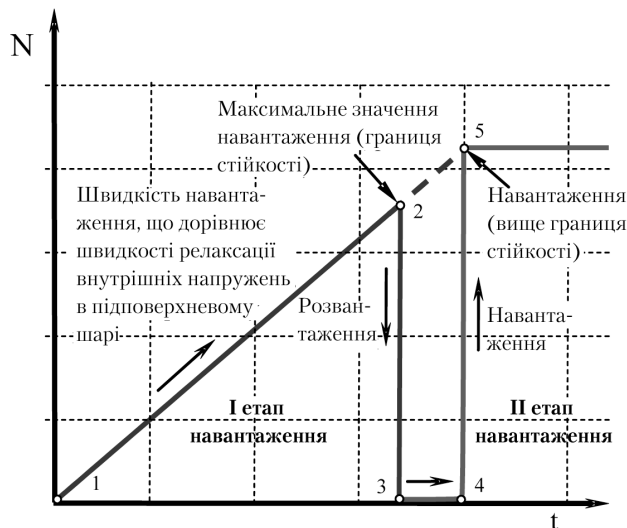


Рис. 2. Програмне навантаження при переході трибосистеми на вищий рівень не рівноважного самовпорядкування: 1 – початок навантаження; 2 – границя стійкості по переходу до пошкодження; 3, 4 – досягнення максимального однорідного розподілу напружень в поверхневому шарі; 4 – імпульсне навантаження; 5 – точка біфуркації переходу трибосистеми на вищий рівень самовпорядкування

розглянуті вище. При зміні зовнішніх умов, така трибосистема повинна підтримувати максимальний рівень надійності (мінімізація тертя і зношування) за рахунок негативного зворотного зв'язку, підтримуючи постійні параметри кінетичного нанополя. Саморегулювання у цьому випадку відбувається по каналу надмірного виробництва ентропії, рис. 1.

Попередні експериментальні дослідження, що проведені для хромопідкелевих сталей на плоских парах тертя дали позитивні результати, одна для того щоб результати мали стійку повторюваність необхідно створення автоматизованої системи трибодіагностики, що дозволить реалізувати дану програму навантаження, і більш детально вивчити структури по глибині поверхневого шару та на основі чого розробити фізико-математичну модель квазібеззносного антифрикційного тертя.

Висновки

Пріоритет даного роду дослідження заснований на необхідності вироблення методичних рішень для управління процесами тертя і зношування в умовах не рівноважного самовпорядкування. Проведений аналіз термодинамічних умов не рівноважного самовпорядкування в трибосистемах при різних механізмах дисипації енергії, що підводиться ззовні, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Найперспективнішими напрямками теоретичних досліджень для кардинального зниження тертя і зношування слід шукати у вивченні природи самовпорядкування нерівноважних процесів, що виника-

ють не тільки при управлінні тепловими потоками в трибосистемах, але і при управлінні кінетичними взаємодіями поверхонь фрикційного контакту.

2. Важливим етапом практичної реалізації досліджень не рівноважного самовпорядкування в трибосистемі є глибокі і усесторонні експериментальні та металофізичні дослідження не рівноважних структур поверхневих шарів, які можуть бути використані як рекомендації при створенні тонкоплівкових антифрикційних зносостійких покриттів на поверхнях тертя, що одержують в рамках різних технологій їх нанесення;

3. Поставлені вище задачі вимагають принципово нового підходу до експериментальних досліджень, як по каналам вимірювання параметрів трибосистеми, так і по каналам зворотних зв'язків їх регулювання, себто створення автоматизованих систем трибодіагностики із зворотнім зв'язком.

Література

- [1] Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Идентификация “наноизносных” режимов трения с использованием метода акустической эмиссии. // Технологические системы, – 2012. – №4. – С. 42–56.
- [2] Запорожец В. В., Стадниченко В. Н., Трошин О. Н. Теоретические и экспериментальные основы акустико-эмиссионной идентификации механизмов изнашивания и прогнозирования ресурса трибосистем. // Проблемы трибологии. – 2013р. – № 1. – С. 16–29.
- [3] Запорожец В. В., Стадниченко В. М., Трошин О. Н. О механизмах подвижности металлокерамического слоя в технологиях триботехнического восстановления деталей // Військово-технічний збірник / Академія Сухопутних військ, Львів: АСВ, – 2010р. – №3. – С. 101–106.
- [4] Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Механізми припрацювання пар тертя в об'ємних гідромашин в умовах нанозношування в присутності трибовідновлюючих сумішей // Проблемы трибологии. – 2013р. – № 4. – С. 92–95.
- [5] Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 345 с.
- [6] Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
- [7] Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 2000. – 128 с.
- [8] Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 423 с.
- [9] Бершадский Л. И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем //Трение и износ. – Т.13, №6, 1992. – с 1077–1094.
- [10] Вейник А. И. Термодинамическая пара. – Мн.: Наука и техника, 1973. – 383 с.

- [11] Шлихтинг И. И. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
- [12] Стадниченко В. Н., Стадниченко Н. Г., Джус Р. Н., Трошин О. Н. Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия, полученного с помощью ревитализантов // Вестник науки и техники, 2004г. – В.1 (16). – С. 59–64.
- [13] Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 192 с.
- [14] Малинецкий Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 2002. – 256 с.
- [15] Стадниченко В. Н., Трошин О. Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловыми потоками // Вестник. – X., 2007. – Вып. 17 : Технологии в машиностроении. – С. 49–62.
- [16] Машков Ю. К., Мамаев О. А., Суриков В. И. Структурно-энергетическая самоорганизация в процессах синтеза трения композитов на основе на основе политетрафторэтилена // Трение и износ. – Т.23, №6, 2002. – С. 661–666.
- [17] Протасов Б. В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности. Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 152 с.
- [18] Владимиров В. И. Проблемы физики трения и изнашивания //Физика трения износостойкости поверхности металлов: Сб. науч. тр. – Л.: 1988. – С. 8–41.
- [19] Васильев А. С., Дальский А. М., Золотаревский Ю. М., Кондаков А. И. Направленное формирование свойств изделий машиностроения. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
- [20] В.Н. Стадниченко, О. Н. Трошин, Н. Г. Стадниченко, А. В. Приймак, И. И. Просяник Классификация видов износа по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, Харків: ХУПС – 2010. – С. 51–61.
- [21] Баранов А. В., Вагнер В. А., Тарасевич С. В., О. В. Быкова О. В. Самоорганизация трибосистем при граничном трении металлов //Ползуновский вестник №1–2, 2009. – С. 155–158.
- [22] Гиндин И. А., Неклюдов И. М. Физика программного упрочнения. – К.: Наук. думка, 1979. – 184 с.
- [23] Погодаев Л. И., Ежов Ю. Б., Сергеев Л. Л., Касьянова Н. Р. Трение, износ, смазка. Электронный ресурс. – Том 15, №57. – 2013. – www.tribo.ru.

Zaporojets V.V., Stadnychenko V.M., Troshyn O.M.

National Aviation University. Ukraine, Kyiv

THE PHYSICAL BASIS OF NONEQUILIBRIUM SELF-ORGANIZATION IN TRIBOSYSTEM

The paper analyzes the different mechanisms of the self-organization of the surfaces of the frictional contact and the conditions of their flow and change are established. According to the results of theoretical and experimental studies methodological solutions to manage the friction and wear processes through the implementation of the various external energy dissipation mechanisms are presented. It was determined that the most promising direction of theoretical researches of the transition of tribosystems to "nanowearless" mode of friction is the study of nature of the self-organization of no-equilibrium processes that occur not only in the management of the heat flow in tribosystems, but also in the management of kinetic friction contact surface interactions

Keywords: tribosystems; no-equilibrium self-organization; minus - plus - friction; wear; dissipation; antydissipation; entropy; enthalpy.

References

- [1] Zaporojets V.V., Stanychenko V.N. Identifikatsiya "nanoiznosnikh" rejimov treniya s ispolzovaniem metoda akusticheskoy emisii.// Tehnologicheskie sistemy, – 2012. – №4. – P. 42–56. (In Russian)
- [2] Zaporojets V.V., Stanychenko V.N., Troshyn O.N. Teoreticheskie i eksperimentalnie osnovy akustiko-emissionnoy identifikatsiy mekhanizmov iznashivaniya i prognozirovaniya resursa tribosistem. // Problemy tribologii. – 2013г. – №1. – P. 16–29. (In Russian)



- [3] Zaporjets V. V., Stanychenko V. N., Troshin O. N. O mekhanizmaxh podvijnosti metallokeramicheskogo sloya v tehnologiyakh tribotekhnicheskogo ustanovleniya detaley // viyskovo-tekhnichniy zbrnik / Akademiya Sukhoputnykh viysk, Lviv: ASV, – 2010r. – №3. – P. 101–106. (In Russian)
- [4] Zaporjets V.V., Stanychenko V.N. Mekhanizmi pripratsuvannya par tertya v obemnykh gidromashinakh v umovakh nanoznoshuvannya v prisutnosti tribovidnovluuchikh sumishey // Problemy tribologii. – 2013r. – № 4. – P.92–95. (In Russian)
- [5] Nikolis G., Prigojin I. Poznanie slojnogo. Vvedenie: Per. s angl. – M.: Mir, 1990. – 345 p. (In Russian)
- [6] Prigojin I. Poryadok iz khaosa: Noviy dialog cheloveka s prirodoy. – M.: Progress, 1986. – 432 p. (In Russian)
- [7] Arnold V.I. Teoriya katastrof. M.: Nauka, 2000. – 128 p. (In Russian)
- [8] Khaken G. Sinergetika: ierarkhii neustoychivosti v samoorganizuyushkhsya sistemakh i ustroystvakh: Per. s angl. – M.: Mir, 1985. – 423 p. (In Russian)
- [9] Bershadskiy L.I. O samoorganizatsii i kontsepsyakh iznosostoykosti tribosistem //Trenie i iznos. – T.13, №6, 1992. – P. 1077–1094. (In Russian)
- [10] Veynik A.I. Termodinamicheskaya para. – Mn.: Nauka i tekhnika, 1973. – 383 p. (In Russian)
- [11] Shlikhting I.I. Teoriya pogranchnogo sloya. – M.: Nauka, 1974. – 712 p. (In Russian)
- [12] Stadnychenko V.N., Stadnychenko N.G., Djus R.N., Troshin O.N. Ob obrazovanii i funktsionirovanii metallokeramicheskogo pokritiya, poluchennogo s pomoshiyu revitalizantov// Vestnyk nauki i tekhniki, 2004r. – V.1 (16). – P. 59–64.
- [13] Volkenshteyn M.V. Entropiya i informatsiya. – M: Nauka, 1986. – 192 p. (In Russian)
- [14] Malinetskiy G.G. Khaos. Struktury. Vycheslitelnyy eksperiment. M.: Nauka, 2002. – 256 p. (In Russian)
- [15] Stadnychenko V.N., Troshin O.N. Sinergeticheskaya kontseptsiya csamoorganizatsii v tribologicheskikh sistemakh pri upravlenii teplovimy potokami // Vestnik. – Kh., 2007. – Vyp. 17 : Tekhnologii v mashinostroenii. – P. 49–62. (In Russian)
- [16] Mashkov J.K., Mamaev O.A., Surikov V.I. Strukturno-energeticheskaja samoorganizacija v processah sinteza trenija kompozitov na osnove politetraforjetilena //Trenie i iznos. – T. 23, №6, 2002. – P. 661–666. (In Russian)
- [17] Protasov B.V. Energeticheskie sootnosheniya v tribosopryajenii i prognozirovanie ego dolgovechnosti. Izd-vo Sarat. yun-ta, 1979. – 152 p. (In Russian)
- [18] Vladimirov V.I. Problemy fiziki treniya i iznashivaniya //Fizika treniya iznosostoykosti poverkhnosti metallov: Sb. nauch. tr. – L.: 1988. – P. 8–41. (In Russian)
- [19] Vasiliev A.S., Dalskiy A.M., Zolatarevskiy J.M., Kondakov A.I. Napravlennoe formovanie svoystv izdeliy v mashinostroenii. – M: Mashinostroenie, 2005. – 384 p. (In Russian)
- [20] V.N. Stadnychenko, O.N. Troshin Klasifikatsiya vidov nanoiznosa po znacheniyu koefitsienta disipatsii podvodimoy vneshney energii k tribosisteme //Zbirnik naukovikh pratz Kharkivskogo universitetu Povitryanikh Sil, Karkiv: KhUPS– 2010. – P. 51–61. (In Russian)
- [21] Baranov A.V., Vagner V.A., Tarasevich S.V., O.V. Bikova Samoorganizatsiya rtribosistem pri granichnom trenii metallov //Polzunoskiy vestnyk №1–2, 2009. P. 155–158. (In Russian)
- [22] Gindin I.A., Nekludov I.M. Fizika programnogo uprochneniya. – K.: Nauk. dumka, 1979. – 184 p. (In Russian)
- [23] Pogodayev L.I., Ejov J.B. Trenie, iznos, smazka. Elektronniy resurs. – Tom 15, №57. – 2013. – www.tribo.ru