

В.О. Кім, д.т.н., проф.
*Комсомольський-на-Амури державний технічний університет,
м. Комсомольськ-на-Амури Хабаровського краю (Росія)*

Ф.Я. Якубов, д.т.н., проф.
Кримський державний індустріально-педагогічний інститут

ЕНЕРГЕТИКА ПРОЦЕСУ САМООРГАНІЗАЦІ ПРИ ТЕРТІ ТА ЗНОШУВАННІ

Розглянуто принципи положення енергетики процесу самоорганізації при терті та зношуванні. Подано узагальнені кінетичні залежності силових і теплових параметрів тертя, шорсткості та інтенсивності зношування поверхні тертя.

Самоорганізація є фундаментальним явищем природи. Суть цього явища полягає в тому, що під дією зовнішнього збудження будь-яка термодинамічно відкрита нелінійна система перебудовується таким чином, що її відповідна реакція максимально компенсує причину, що викликала таку внутрішню зміну. У живій природі процеси самоорганізації виявляються в пристосуванні й еволюції біологічних об'єктів до мінливих зовнішніх умов. У техніці і технології процеси самоорганізації найбільш яскраво виявляються в тріботехнічних системах і полягають у формуванні вторинних контактних структур при терті та зношуванні. Процеси тертя і зношування реалізуються на тлі підвищених градієнтних співвідношень температури, напруг, концентрації легуючих елементів і дефектів кристалічної будови, і представляють складну сукупність фізико-хімічних явищ. Тертя і зношування, без сумніву, можна віднести до нерівноважних термодинамічних процесів, тому реакція самоорганізації, що протікають у них, неминучі й обов'язкові. Внутрішнім проявом самоорганізації при терті є наступні процеси:

- формування вторинних структур із більш високою міцністю та зносостійкістю у порівнянні з вихідною;
- розвиток рівноважної шорсткості незалежно від вихідної мікрогеометрії поверхонь тертя;
- підвищення фактичної площі контакту за рахунок прироблювального зносу, і, як наслідок цього, зниження контактних навантажень;
- реалізація ефекту вибіркового переносу тощо.

Зовнішнім проявом самоорганізації є зниження і стабілізація практично всіх енергетичних, силових і тріботехнічних параметрів процесу тертя і зношування, зокрема, коефіцієнта тертя, температури, інтенсивності зношування тощо. Загальні закономірності самоорганізації зручно аналізувати з позицій системного підходу, суть якого полягає в наступному. Під тріботехнічною системою розуміють сукупність матеріальних об'єктів, взаємодіючих між собою контактно-механічним чином, при цьому в точках контакту відбувається розрив лінійних швидкостей взаємодіючих тіл і через ці зони здійснюється взаємне енергомасоперенесення. Прості трібосистеми складаються з двох об'єктів. До них можна віднести вузли тертя катання і ковзання, що працюють без змащення; взаємодію поверхні зі сухою абразивною масою; взаємодію інструмента з оброблюваним матеріалом при різанні всуху тощо. Складні трібосистеми доповнюються активним зовнішнім середовищем, такими як мастильно-охолоджувальні речовини, і джерелами енергії, що вводяться штучно. Будь-яка система розбивається на підсистеми більш високого порядку. Так тріботехнічну систему можна розбити на підсистеми контактної взаємодії, що об'єднані за режимними, структурними, геометричними та іншими ознаками споріднення. Вони, у свою чергу, складаються з підсистем ще більш високого порядку, у рамках яких реалізуються мікроструктурні процеси, в тому числі і масоперенесення. Функціонування підсистеми будь-якого рівня (порядку) можна описати рівняннями енергобалансу і кінетики, що відображають взаємодію вхідних у дану підсистему компонентів і їх внутрішній структурно-енергетичний стан. У результаті взаємодії між собою компонентів підсистеми частина енергії затрачається на зміну характеру їхнього поводження, а інша частина – на зміну їхнього внутрішнього стану. Остання представляє енергію, загублену для зміни кінетики взаємодії компонентів підсистеми між собою, але вона є основною складовою енергобалансу підсистеми наступного більш високого рівня (порядку). Підсистеми кожного рівня характеризуються своїми найбільш інформативними енергетичними параметрами в абсолютних, питомих, градієнтних та інших співвідношеннях, використовуваних для опису енергетичних балансових і кінетичних рівнянь, що відображають першу і другу засади

термодинаміки. Об'єднання енергетичних співвідношень, що відображають функціонування підсистем різних рівнів, припустимо, але не є доцільним через наявність в одному рівнянні величин різних порядків, тому кожен підсистему незалежно від її рівня необхідно описувати своїм термодинамічним рівнянням. Підсистеми низького рівня описуються рівняннями енергобалансу в абсолютних величинах або їхніх потоках. Підсистеми високих рівнів є щільністю енергетичних потоків, а підсистеми більш високих порядків – питомими енергетичними параметрами або їх градієнтними вираженнями. Розглядаючи процеси тертя і зношування, до підсистеми першого рівня віднесемо взаємодію з'єднаних деталей, як матеріальних об'єктів з ідентифікованими геометричними межами, однорідними фізико-механічними властивостями, з відомими законами зовнішнього навантаження і руху кожної крапки, і, отже, заданим розривом швидкостей у трібосистемі. Окреме тріботехнічне з'єднання є індивідуальною підсистемою першого порядку. До підсистем другого рівня (порядку) можна віднести зони фрикційних взаємодій на реальних участках контакту. Кількість підсистем другого рівня відповідає кількості плям фактичного контакту. Геометричні межі взаємодіючих об'єктів даних підсистем визначаються зоною, охопленою структурно-енергетичними змінами. До підсистеми третього рівня віднесемо мікрооб'єм контактної і приконтактної зон, що охоплені структурно-енергетичними змінами трібопроцесу. На відміну від підсистем першого і другого рівня, що передбачають взаємодію як мінімум двох твердофазних об'єктів, компонентами підсистеми третього порядку є одне твердофазне утворення, еволюція структури якого відбувається за рахунок пронизуючих його потоків енергії і речовини. Еволюція систем, що самоорганізуються, є кінетичним процесом, що закінчується або її повною деградацією (руйнуванням), або виходом на принципово відмінне від вихідного стану положення стійкої чи хиткої динамічної рівноваги. Напрямок розвитку процесу самоорганізації визначається критерієм Пригожина-Гленсдорфа, що подається у такому вигляді:

$$\frac{\partial P}{\partial t} \leq 0, \tag{1}$$

де P – виробництво ентропії, t – час процесу. Відповідно до цього критерію в будь-якій нерівноважній системі мимовільні процеси йдуть так, що швидкість зміни виробництва ентропії, обумовлена зміною термодинамічних сил, зменшується. Стаціонарні або стійкі термодинамічні процеси характеризуються мінімальним виробництвом ентропії. У випадку відкритості термодинамічної системи можливе виробництво негентропії за рахунок обміну зі зовнішнім середовищем енергією та масою. Таким способом критерій Пригожина-Гленсдорфа відображає природне прагнення будь-якого кінетичного процесу йти по шляху найменших енергетичних втрат і він застосовується до еволюційного аналізу трібосистем незалежно від їхнього рівня. Стосовно процесу тертя, то стійкі або стаціонарні стани в підсистемі першого рівня виявляються в стабілізації силових і температурних параметрів при виході в зону сталого періоду. У підсистемах другого рівня стійкість пов'язується з формуванням «рівноважної» шорсткості тіл тертя, зі зниженням силових і теплових питомих навантажень за рахунок збільшення фактичної площі контакту. У цих процесах особлива роль відводиться прироблювальному зношуванню, що призводить до оптимізації мікрорельєфу контакту. У підсистемах третього рівня стійкість виявляється у вигляді процесу формування вторинних дисипативних структур. Рівняння енергетичного балансу для підсистеми першого рівня представляється в абсолютних енергетичних величинах або їхніх потоках, а саме:

$$(\bar{F} \cdot \bar{V}_C) \cdot t = W + \Pi ; \tag{2a}$$

чи

$$\bar{F}_{TP} \cdot \bar{V}_C = Q + \dot{\Pi} , \tag{26}$$

де F – зусилля контактної взаємодії; V_C – швидкість ковзання; W – кількість тепла, що виділилося в процесі контактної взаємодії; Π – механічна складова енергобалансу трібоз'єднання; Q – тепловий потік; $\dot{\Pi}$ – потік механічної енергії. Останні доданки рівнянь (2) представляють енергетичні витрати на поверхневі структурні зміни та їхнє зношування. В абсолютному вираженні вони не перевищують 1,5...3,0 % від роботи тертя і від них можна відмовитися, тоді рівняння (2) матимуть вигляд:

$$(\bar{F} \cdot \bar{V}_C) \cdot t = W ; \tag{3a}$$

$$\bar{F}_{TP} \cdot \bar{V}_C = Q . \tag{36}$$

Отримані рівняння відображають баланс між роботою тертя і виділеним теплом або процес дисипації підведеної механічної енергії та використовуються при розв'язку теплових задач трибоніки. На рис. 1 представлені узагальнені кінетичні залежності силових і теплових параметрів тертя. Збільшення виробництва ентропії δP визначає режим функціонування трибосистеми. Період прироблювання характеризується зниженням δP , період сталого спрацювання- стабілізацією, а катастрофічне зношування – різким зростанням. Термодинаміка підсистем другого рівня розглядає балансові співвідношення, що відображають трансформацію недисипативної частини потоку механічної енергії, що подається у такому вигляді:

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial M \partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 A_{zm}}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 W}{\partial M \partial t}, \quad (4)$$

де U – внутрішня енергія; A_{zm} – робота зносу; M – маса взаємодіючих об'єктів контактної взаємодії.

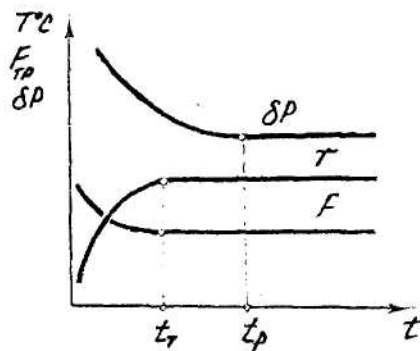


Рис. 1. Узагальнені кінетичні залежності силових і теплових параметрів тертя (T – температура, $F_{тр}$ – сила тертя, δP – збільшення ентропії)

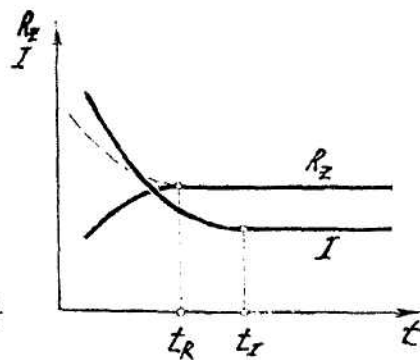


Рис. 2. Узагальнені кінетичні залежності шорсткості (R_z) і інтенсивності зношування (I) поверхні тертя

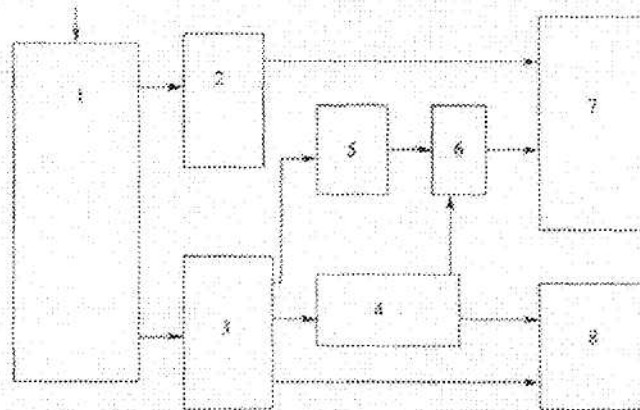


Рис. 3. Структурна схема трибосистеми третього рівня: 1 – поглинена пружна енергія деформації; 2 – необоротні енергетичні форми; 3 – оборотні енергетичні форми; 4 – внутрішній мікроструктурний масоперенос; 5 – енергетичні витрати на руйнування (знос); 6 – продукти руйнування (зносу); 7 – необоротні енергетичні втрати; 8 – вторинні дисипативні структури

Процес поглинання (чи виділення) пружної внутрішньої енергії контактними шарами активний у початковий момент фрикційної взаємодії або в період прироблювання, а після закінчення цього етапу його інтенсивність падає до нуля, періодично відновлюючись в міру розкриття нових контактних шарів за рахунок зношування. Отже, у сталому процесі тертя енергетичні витрати на формування вторинних структур стають величинами більш низького порядку в порівнянні з іншими доданками рівняння (4). Тоді рівняння енергетичного балансу підсистеми другого рівня при сталому процесі зношування матиме вигляд:

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial M \partial t} = \frac{\partial^2 A_{zm}}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 W}{\partial M \partial t} \quad (5)$$

Зовнішнім проявом самоорганізації в підсистемах другого рівня є стабілізація інтенсивності зношування (рис. 2), що встановлюється в останню чергу після повної стабілізації всіх силових, теплових і мікрогеометричних параметрів трибоз'єднання. Поява будь-якого збуджуваного фактора у трибосистемі призводить до дестабілізації інтенсивності зношування. ермодинаміка підсистеми третього рівня відображає процес трансформації нетеплової складової зовнішнього потоку механічної енергії в незворотні енергетичні втрати і внутрішні структурно-енергетичні перетворення, що відбуваються в контактних шарах при терті. В узагальненому варіанті цей процес можна представити наступною функціональною схемою (рис. 3). Вся підведена механічна енергія поглинається поверхневим шаром тіла тертя у вигляді пружної енергії деформації. У результаті контактні структури переходять у нерівноважний стан. Паралельно з етапом поглинання пружної внутрішньої енергії починається її трансформація в інші енергетичні форми. Наприклад, в акустичну, магнітну, електричну, теплову тощо. Усі можливі енергетичні форми можна розділити на два види: зворотні і незворотні. Незворотні – це такі види енергій, що у своєму розвитку досягли стану, при якому потенційно неможлива їхня подальша трансформація в інші форми. Вони не можуть бути задіяні в процесах перетворення структур і безповоротно залишають підсистему, розсіюючись у навколишньому середовищі. До таких видів, у першу чергу, можна віднести теплову, акустичну і світлову енергії. Незворотні енергетичні форми є домінуючими у всіх триботехнічних і деформаційних процесах. Зворотні – це такі енергетичні форми, що не досягли стану повного виродження і мають потенційні можливості для перетворення в інші енергетичні види. Вони контролюють процеси структурних перетворень і у своїй подальшій еволюції наближаються до незворотних форм. Енергомасоперенесення, що відбувається в рамках підсистеми третього рівня, стимулюється градієнтними співвідношеннями температур, напруг, хімічного потенціалу тощо. Напрямок енергомасоперенесення протилежний вектору градієнта хімічного потенціалу, тому в ході розвитку процесу відбувається його зниження. Отже, енергомасоперенесення, реалізоване у підсистемі третього рівня, представляє одну з форм дисипації поглиненої механічної енергії. Зменшення маси за рахунок мікроруйнування (зносу) відноситься також до дисипативних явищ, тому що внутрішня енергія віднесена частками зносу й енергетичні витрати на здійснення роботи зношування залишають підсистему третього рівня. Рівняння, що описує процес дисипації внутрішньої енергії, подається у вигляді:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = B^* \frac{\partial \mu}{\partial n} + a_u \frac{\partial^2 W}{\partial M \partial t}, \quad (6)$$

де μ – хімічний потенціал матеріалу; n – переміщення в напрямку максимального градієнта хімічного потенціалу; B^* – коефіцієнт енергомасоперенесення (за аналогією з коефіцієнтами дифузії та теплопровідності); a_u – питома робота зношування. Вираз (6), із фізичної точки зору, є рівнянням перенесення, при цьому перший доданок описує процеси енергомасоперенесення, що реалізовані за рахунок градієнтних співвідношень, зокрема, дифузійне масоперенесення і теплопровідність, а друге – конвективне масоперенесення або поверхневе руйнування. Рівняння (6) можна перетворити так:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{a_u} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - B^* \frac{\partial \mu}{\partial n} \right). \quad (7)$$

З (7) випливає, що зношування можна знизити як за рахунок зменшення зовнішнього енергетичного впливу, так і інтенсифікації внутрішнього енергомасоперенесення.

КІМ Володимир Олексійович – доктор технічних наук, професор Комсомольського-на-Амурі державного технічного університету, м. Комсомольськ-на-Амурі Хабаровського краю – Росія.

Наукові інтереси:

– процеси самоорганізації технологічних систем.

ЯКУБОВ Февзі Якубович – доктор технічних наук, професор, ректор Кримського державного індустріально-педагогічного інституту, м. Сімферополь Автономної Республіки Крим – Україна.

Наукові інтереси:

– синергетика та нелінійні явища.