

УДК 621.332.3

# САМООРГАНІЗАЦІЯ СТРУКТУР В ПРОЦЕСІ ДИСИПАЦІЇ

**Д. М. Барановський**

кандидат технічних наук,  
старший викладач  
кафедри експлуатації і ремонту машин  
Кіровоградського національного  
технічного університету,  
пр. Університетський, 8, м. Кіровоград,  
Україна, 25006  
**Контактний тел.:** 8 (095) 253-20-73  
**E-mail:** denisbaranovskiy@mail.ru

*На основі теорій термодинаміки, теорії Пригожина, теореми Ляпунова приведено аналіз можливості процесу самоорганізації дисипативних структур в системах тертя. Показано, що для протікання процесу самоорганізації без зносу потрібно на одному з контактуючих тіл трибосистеми довести структуру матеріалу до максимальної кількості рухомих дислокацій, тим самим зменшити кількість нерухомих.*

*Ключові слова:* самоорганізація, процеси дисипації, ентропія, трибо система, вторинні структури.

*На основе теорий термодинамики, теории Пригожина, теоремы Ляпунова приведен анализ реализации процесса самоорганизации диссипативных структур в системах трения. Показано, что для протекания процесса самоорганизации без износа нужно на одном из контактирующих тел трибосистемы привести структуру материала к максимальному количеству подвижных дислокаций, тем самым уменьшить количество неподвижных.*

*Ключевые слова:* самоорганизация, процессы диссипации, энтропия, трибосистема, вторичные структуры.

*On the basis of theories of thermodynamics, the Prigogina theory, the Lyapunova theorems the analysis of realization of process of independent organization of dissipation structures in the systems of friction is resulted. It is shown, that for the flow line of process of independent organization without a wear it is needed on one of contacting bodies of tribosystem to lead the structure of material to the maximal quantity of mobile distributions, the same to decrease the quantity of immobile.*

*Keywords:* independent organization, processes of dissipation, entropy, tribosystem, second structures.

## 1. Вступ

В системах, які складаються з поверхонь тертя та шарів, які прилягають до цих поверхонь тертя одночасно протікають багато процесів, які характеризуються термодинамічними потоками та силами [1].

Всі процеси, що протікають в трибосистемі залежать від тертя, а виробництво ентропії обумовлено цим тертям та складається з виробництв ентропії відповідних потоків.

Процеси, що пов'язані з температурою, яка викликається тертям складаються з фазових переходів та хімічних реакцій. Якщо структура матеріалу знаходиться у невірноваженому стані, то при підвищенні температури система намагається перейти у врівноважений стан.

Таким чином, загальне виробництво ентропії в трибосистемі буде складатися з виробництва ентропії, обумовленого тертям та виробництв ентропії відповідних термодинамічних потоків.

Самоорганізація є фундаментальним явищем природи. Суть цього явища полягає в тому, що під дією зовнішнього збурення будь-яка термодинамічно відкрита нелінійна система перебудовується таким чином, що її

відповідно реакція максимально компенсує причину, що викликала таку внутрішню зміну. У живій природі процеси самоорганізації — це пристосування і еволюція біологічних об'єктів відповідно до змінних зовнішніх умов. У техніці і технології процеси самоорганізації найяскравіше виявляються в триботехнічних системах і полягають у формуванні вторинних контактних структур при терті та зношуванні.

## 2. Мета та задачі досліджень

Провести аналіз процесу самоорганізації при утворенні дисипативних структур та довести, що процес самоорганізації може відбуватися без зносу системи чи навпаки.

## 3. Аналіз проблеми реалізації процесу самоорганізації в трибосистемах

Процеси тертя і зношування реалізуються на фоні підвищених градієнтних співвідношень температури, напружень, концентрації легуючих елементів і дефектів кристалічної будови, і являють складну сукупність фізико-хімічних явищ. Тертя і зношування без сумніву можна віднести до невірноважених термодинамічних процесів, тому самоорганізуючі реакції, що протікають в них, неминучі і обов'язкові. Внутрішнім проявом самоорганізації в трибосистемі є наступні процеси:

- формування вторинних структур з більш високою міцністю і зносостійкістю у порівнянні з початковою;
- розвиток врівноваженої шорсткості незалежно від початкової мікрогеометрії поверхонь тертя;
- підвищення фактичної площі контакту за рахунок припрацювального зносу і, як наслідок цього, зниження контактних навантажень;
- реалізація ефекту вибіркового переносу.

Зовнішнім проявом самоорганізації є зниження і стабілізація практично всіх енергетичних, силових і трибо-технічних параметрів процесу тертя і зношування, зокрема, коефіцієнта тертя, температури, інтенсивності зношування і т. п.

Спробуємо виділити процеси, які протікають разом з тертям, що викликані процесами виготовлення та експлуатації. Основні термодинамічні потоки, що виникають в процесі тертя [2]: потік тепла з зони тертя в тіло, що має більшу теплопровідність  $J_T$ , який викликається градієнтом температури, потік речовини  $J_{\text{реч}}$ , який обумовлений градієнтом хімічних потенціалів та дислокаційний потік  $J_d$ , який обумовлений градієнтом густини дислокацій, тобто виходом дислокацій на поверхню з заповненням вільних місць — вакансій.

Всі перераховані потоки, тобто процеси незворотні, характеризуються позитивним виробництвом ентропії.

В основному, трибосистеми з мащенням характеризуються великим зносом одного тіла. Розглянемо одне тертьове тіло. Його ентропія може змінюватися за рахунок переходу тепла з контакту в тіло, механічної роботи над тілом тертя, приєднанням хімічних сполук зі своєю ентропією та ін., за рахунок зовнішніх впливів — потоку ентропії ( $dS_1$ ).

Ентропія тіла може змінюватися за рахунок виробництва ентропії при розповсюдженні тепла та інших потоків і проходження фізико-хімічних процесів у тілі ( $dS_i$ ).

Виробництво ентропії, згідно другого закону термодинаміки, позитивне ( $dS_i > 0$ ).

Отже, перераховані ефекти приводять до підвищення ентропії тіла. Але при проходженні процесів самоорганізації ентропія тіла повинна знижуватися (якщо однаковий рівень енергії). Зниження ентропії тіла при терті може забезпечуватися процесом зношення. Зниження ентропії в результаті зношування компенсує та перевищує зріст ентропії за рахунок виробництва ентропії та позитивної частини потоку ентропії. Якщо вважати, що припрацювання складається в появі стійких вторинних структур, то воно супроводжується високою інтенсивністю зносу. При терті, зниження ентропії тіла може виникати в результаті зносу, тобто втрати речовини та в результаті перетворень, що відбуваються в поверхневих шарах. При утворенні вторинних структур можливе підвищення чи зниження ентропії вторинних структур в порівнянні з ентропією речовин, що вступають у взаємодію.

Розглянемо обидва варіанти. В початковий момент утворення вторинних структур зміна виробництва ентропії тіла тертя [1]:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_1}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_2}{dt} + \frac{dS_3}{dt} - \left| \frac{dS_4}{dt} \right|, \quad (1)$$

де  $\frac{dS_1}{dt}$  — потік ентропії без урахування масообміну,  $\frac{dS_1}{dt} > 0$ ;  $\frac{dS_i}{dt}$  — виробництво ентропії без урахування перетворень в поверхневих шарах;  $\frac{dS_2}{dt}$  — зміна виробництва ентропії за рахунок приєднання речовин із своєю ентропією;  $\frac{dS_3}{dt}$  — зміна виробництва ентропії за рахунок перетворення в поверхневих шарах;  $\frac{dS_4}{dt}$  — зміна вироб-

ництва ентропії, пов'язане зі зношенням, тобто з відводом речовини.

Згідно другого закону термодинаміки:  $\frac{dS_i}{dt} > 0$ , речовини зі своєю ентропією приєднуються до тіла, тому  $\frac{dS_2}{dt} > 0$ . Величина виробництва ентропії  $\frac{dS_3}{dt}$  може бути від'ємною чи додатною.

Сума  $\frac{dS_3}{dt}$  та  $\frac{dS_i}{dt}$  складає загальне виробництво ентропії, тому при від'ємному значенні  $\frac{dS_3}{dt}$ :

$$\frac{dS_i}{dt} - \left| \frac{dS_3}{dt} \right| > 0. \quad (2)$$

Оскільки, в процесі зношування із трибосистеми частинки випадають з власною ентропією, то величина  $\frac{dS_4}{dt}$  завжди буде від'ємна.

Ріст вторинних структур супроводжується таким же припрацюванням, тобто процес зношування можна представити наступним чином.

При взаємодії середовища, контртіла та матеріалу тіла тертя утворюються вторинні структури, які зношуються. З умови росту вторинних структур слідує наступне: зношується лише їх частина  $k$  ( $k < 1$ ). У відповідності з цим, можна записати:

$$\frac{dS_4}{dt} = k \frac{dS_2}{dt} + k \frac{dS_3}{dt} + \frac{dS_5}{dt}, \quad (3)$$

де  $\frac{dS_5}{dt}$  — зміна виробництва ентропії тіла за рахунок зносу основи матеріалу.

Розглянемо випадок, коли  $\frac{dS_3}{dt} > 0$ .

Вираз (1) з урахуванням (3) прийме вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_1}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + (1-k) \frac{dS_2}{dt} + (1-k) \left| \frac{dS_3}{dt} \right| - k \left| \frac{dS_5}{dt} \right|. \quad (4)$$

Якщо існує визначена величина зниження виробництва ентропії, то для реалізації процесу самоорганізації з (4) слідує, що для цього потрібен підвищений знос.

Розглянемо випадок, коли  $\frac{dS_3}{dt} < 0$  та запишемо вираз (1) з цим урахуванням:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_1}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + (1-k) \frac{dS_2}{dt} - (1-k) \left| \frac{dS_3}{dt} \right| - k \left| \frac{dS_5}{dt} \right|. \quad (5)$$

В правій частині останнього виразу два від'ємних члени: один зв'язаний зі зносом  $k \left| \frac{dS_5}{dt} \right|$ , інший — з хімічними перетвореннями в поверхневих шарах  $(1-k) \left| \frac{dS_3}{dt} \right|$ . Тому визначена величина виробництва ентропії, як і у рівнянні (4), може бути досягнута при низькому зносі тіл тертя. Відповідно до цього, інтенсивність зношування

неврівноважених вторинних структур буде менше ніж врівноважених.

Зауважимо наступне, що величина  $\frac{dS_1}{dt} - (1-k) \left| \frac{dS_3}{dt} \right|$  завжди повинна бути позитивною.

У стаціонарному стані вторинні структури та процеси, що відбуваються в них, стабілізуються. Кількість речовин, які надійшли до вторинних структур із навколишнього середовища та тіл тертя повинно прирівнюватися кількості речовин, які відторгнулись в процесі зношування, тобто в стаціонарному стані  $k = 1$ .

При цьому в стаціонарному стані вирази (4) та (5) будуть мати однаковий вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_1}{dt} + \frac{dS_2}{dt} - \frac{dS_3}{dt} = 0. \tag{6}$$

З останнього рівняння слідує, що чим менше виробництво ентропії при незмінному потоці ентропії, тим менше буде інтенсивність зношування матеріалу — основи, в тому числі в стаціонарному стані.

#### 4. Критерій проходження самоорганізації в трибосистемах

Єдиним критерієм можливості проходження самоорганізації (утворення дисипативних структур) є втрата трибосистемою термодинамічної стійкості. Згідно [3] система може втратити стійкість в станах далеких від врівноважених, якщо надмірне виробництво ентропії стане негативним. Такий висновок зроблений на основі теореми Ляпунова. В якості функції Ляпунова запропонована друга варіація ентропії, а її похідна за часом рівна надмірному виробництву ентропії:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\delta^2 S) = \sum_n \delta X_n \delta J_n, \tag{7}$$

де  $X_n$  і  $J_n$  — відповідно термодинамічні потоки та сили.

Підставляючи відповідні сили та потоки та беручи похідну похідну за часом, (7) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{2\partial t} \delta^2 S = & - \left( \frac{\partial I}{\partial V} V + I \right)^2 (\delta V)^2 \frac{n^2}{D^* T} + \\ & + \frac{p^2}{T^2 B \lambda} \left( \frac{\partial \mu}{\partial v} v + \mu \right)^2 (\delta V)^2 - \\ & - T \text{grad} \frac{\rho}{T} \left( \left( \frac{\partial}{\partial t} (\delta \rho_g + \delta V_{gs}) \right)^2 + \rho_g V_{gs} \right), \end{aligned}$$

де  $J_T = \mu P v$ ;  $J_{\text{реч}} = n I v$ ;  $J_d = \frac{d\rho}{dt}$ ;  $X_{\text{реч}} = \frac{n I v}{D^* T}$  — термодинамічна сила потоку речовини;  $X_T = -\frac{1}{T^2} \text{grad} T$  — термодинамічна сила теплового потоку;  $\frac{d\rho}{dt} = \rho_g \cdot v_{gs} - \rho_s \cdot v_{sg}$  —

кінетичне рівняння балансу для середньої щільності нерухомих і рухомих дислокацій [4];  $T$  — абсолютна температура;  $\mu_i$  — хімічні потенціали;  $\rho$  — потенціал щільності дислокацій;  $\lambda$  — теплопровідність;  $\mu$  — коефіцієнт тертя;  $P$  — сила тиску в контакті;  $n = \frac{dN}{dV}$  — об'ємна концентрація частинок;  $dV = I S_{\text{кон}} dl$  — нескінченно малий об'єм;  $I$  — інтенсивність зношування;  $v = \frac{dl}{dt}$  — швидкість ковзання;  $S_{\text{кон}}$  — площа контактуючих поверхонь;  $D^*$  — коефіцієнт квазидифузії;  $\rho_s$  та  $\rho_g$  — середні за об'ємом щільності нерухомих та рухомих дислокацій;  $v_{sg}$ ,  $v_{gs}$  — середні швидкості ковзання дислокацій.

Останній вираз показує, що система втратить стійкість, якщо щільність рухомих дислокацій підвищиться або інтенсивність зносу. Перше призведе до процесу самоорганізації практично без зносу з утворенням дисипативних структур далеких від врівноваженості. Якщо буде відбуватися підвищення інтенсивності зношування системи, то воно сягне максимуму, а потім ця інтенсивність різко знизиться та при цьому утворяться дисипативні структури.

Останній вираз показує, що система втратить стійкість, якщо щільність рухомих дислокацій підвищиться або інтенсивність зносу. Перше призведе до процесу самоорганізації практично без зносу з утворенням дисипативних структур далеких від врівноваженості. Якщо буде відбуватися підвищення інтенсивності зношування системи, то воно сягне максимуму, а потім ця інтенсивність різко знизиться та при цьому утворяться дисипативні структури.

#### 5. Висновки

Отже, для протікання процесу самоорганізації без зносу потрібно на одному з контактуючих тіл довести структуру матеріалу до максимальної кількості рухомих дислокацій, тим самим зменшити кількість нерухомих. На вторинних структурах, які можна заздалегідь утворити (існує багато методів) або які самі утворюються, повинні утворюватися вільні місця — вакансії, для виходу рухомих дислокацій на поверхню цих вторинних структур.

#### Література

1. Гершман, И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах [Текст] / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ. — 1995. — Т. 16. — № 1. — С. 61–70.
2. Барановський, Д. М. Теоретичні передумови підвищення надійності системи «контактна підвіска — струмоприймач» зменшенням інтенсивності зношування її елементів після лазерного модифікування [Текст] / Д. М. Барановський // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології (Problems of Tribology)», м. Хмельницький. — 2007. — № 2. — С. 67–70.
3. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций [Текст] / П. Гленсдорф, И. Пригожин. — М.: Мир, 1973. — 273 с.
4. Грешнов, В. М. Прогнозирование разрушения металлов в процессах холодной пластической деформации. Сообщение 1. Приближенная модель пластической деформации и разрушения металлов [Текст] / В. М. Грешнов, Ю. А. Лавриненко, А. В. Напалков // Проблемы прочности. — 1999. — № 1. — С. 76–85.