

0,023, або в 1,13 і 1,15 раз. За швидкості руху $V_{z.m}$ завантажувального транспортера $V_{z.m} > 1,7$ м/с відокремлення вільних домішок практично припиняється.

УДК 621.891:631.31:631.37

СИНЕРГЕТИКА ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ І НАДІЙНОСТІ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ СИСТЕМ І АГРЕГАТИВ МАШИН

В. В. АУЛІН, доктор технічних наук, професор,
С. В. ЛИСЕНКО, кандидат технічних наук, доцент,

І. В. ЖИЛОВА, аспірант,
О. В. ВЕРБИЦЬКИЙ, аспірант

Центральноукраїнський національний технічний університет
E-mail: aulinvv@gmail.com

Трибоспряження деталей систем і агрегатів машин є термодинамічно відкритими нелійними трибосистемами, а умови реалізації процесів і станів самоорганізації вивчає синергетика. При реалізації різних типів самоорганізації під дією зовнішнього впливу матеріали елементів трибосистеми (спряжені деталі і робоче (технологічне) середовище) перебудовуються, формуючи реакції на нього з максимальною компенсацією причини, яка викликала внутрішню зміну. Це подібно до механізму компенсації потоків при електромагнітній індукції. В таких умовах процеси тертя і зношування реалізуються на фоні підвищених градієнтних співвідношень температури, напружень, хімічного потенціалу, концентрації легуючих елементів і дефектів кристалічної будови та супроводжуються складною сукупністю фізико-механічних, фізико-хімічних, трибологічних та реологічних явищ. Оскільки тертя і зношування є нерівноважними термодинамічними процесами, то самоорганізуючі зміни в матеріалах і в трибоспряженні деталей є неминучими і обов'язковими.

Виявлено, що внутрішнім проявом самоорганізації є:

- формування на поверхнях деталей трибоспряження як рівноважних, так і нерівноважних вторинних структур більш високої міцності і зносостійкості, у порівнянні з початковими структурами;
- розвиток рівноважної 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 та ін.

З'ясовано, що зовнішнім проявом самоорганізації в трибосистемах є:

зниження і стабілізація енергетичних, силових і триботехнічних характеристик, зокрема, коефіцієнта тертя, температури, моменту тертя, інтенсивності зношування. При цьому загальні закономірності самоорганізації доцільно аналізувати з позицій системно-спрямованого підходу, поділивши матеріали деталей і робочого (технологічного) середовища на підсистеми локальних областей контактної взаємодії, які об'єднані за режимними, структурними, геометричними та іншими ознаками спорідненості. Локальні області в свою чергу складаються з підсистем – ансамблів, в межах яких реалізуються мікроструктурні процеси, включаючи внутрішній масоперенос.

На поверхнях тертя спряжених деталей і в поверхневих шарах їх матеріалів, одночасно протікає ціла сукупність різноманітних процесів, завдяки яким система втрачає термодинамічну стійкість. Частина з них викликана безпосередньо тертям, а інші – опосередковано відносяться до нього. До першої групи фізичних процесів відносяться тепловідвід, масоперенос із зони тертя, деформація поверхневих шарів та ін. Вони обумовлені, як правило, градієнтами інтенсивних величин (температури, хімічного потенціалу, напруження, концентрації дефектів та ін.), що виникли в результаті тертя та попередньої зміцнювальної або модифікуючої обробки матеріалів деталей. Друга група процесів, згідно рівноважним діаграмам стану матеріалів, проходить при температурі розігрівання поверхневих шарів від роботи сил тертя. В основному, це фазові перетворення або фазові переходи і хімічні реакції. Нагрівання обумовлює кінетичну можливість протікання релаксаційних процесів, рушійні сили яких не пов'язані з тертям, й не залежать від нього, але існують як в зоні тертя, так і в прилеглих шарах і направлені хаотично. Необхідно виділити також процеси, які протікають у зоні тертя, але обумовлені не тертям, а умовами експлуатації. Прикладами таких процесів є процеси, що спостерігаються при терті з вібрацією, опромінюванням та іншими впливами.

З'ясовано за яких умов можлива реалізація ефекту самоорганізації в матеріалах в станах, віддалених від рівноваги. Надлишкове виробництво ентропії при цьому повинне бути від'ємним і узгоджуватися з теоремою Ляпунова:

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

де X_n і J_n – відповідно термодинамічні потоки і термодинамічні сили.

Якщо $\sum_n \delta X_n \delta J_n \leq 0$, то матеріали поверхневих шарів деталей втрачають стійкість й може спостерігатися самоорганізація з утворенням рівноважних і нерівноважних дисипативних структур. При істотності процесів тертя, маємо:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(f_{mp}(v, t) N v)^2}{\lambda_m(v, t) S_{mp} T^2}, \quad (2)$$

де $f_{mp}(v, t)$, S_{mp} – коефіцієнт та площа поверхні тертя; N – навантаження; v – відносна швидкість; $\lambda_m(v, t)$, T – коефіцієнт теплопровідності і температура в зоні тертя. Якщо швидкість руху змінна, а $\lambda_m = \text{const}$, то надлишкове виробництво ентропії становить:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\delta^2 S) = \frac{N^2}{T^2 S_{mp} \lambda_m} \left(\frac{\partial f_{mp}}{\partial v} + f_{mp} \right)^2 (\delta v)^2. \quad (3)$$

Якщо $\lambda_m \neq \text{const}$ і $v \neq \text{const}$, то маємо:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\delta^2 S) = \frac{N^2}{T^2 S_{mp} \lambda_m} \left(\frac{\partial f_{mp}(v, t)}{\partial v} v + f_{mp}(v, t) \right) \left(f_{mp}(v, t) + v \frac{\partial f_{mp}(v, t)}{\partial v} - \frac{f_{mp}(v, t) v}{\lambda_m} \frac{\partial \lambda_m(v, t)}{\partial v} \right) (\delta v)^2. \quad (4)$$

Аналіз рівняння (4) свідчить, що при його додатній правій частині трибосистема не втрачає стійкості, а при від'ємній – втрачає. При від'ємному виробництві ентропії отримуємо умови:

$$\frac{\partial f_{mp}(v, t)}{\partial v} \geq 0, \quad \frac{\partial \lambda_m(v, t)}{\partial v} \geq 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial f_{mp}(v, t)}{\partial v} \leq 0, \quad \frac{\partial \lambda_m(v, t)}{\partial v} \leq 0. \quad (6)$$

Зазначимо, що ці умови є достатніми для реалізації самоорганізації в трибоспряхеннях деталей при наявності синергетичної взаємодії двох або більше процесів в зоні тертя. При цьому система ускладнюється, з'являються нові структури у поверхневому шарі матеріалу деталей та прилеглих шарів робочого (технологічного) середовища.

З точки зору виробництва ентропії в трибосистемах можна створити такі умови, коли абсолютна величина від'ємної ентропії, пов'язаної з тертям, збільшується, але загальне виробництво ентропії не змінюється. Це свідчить про те, що трибосистема ззовні може прийняти енергію великої потужності без істотної зміни інтенсивності зношування, а значна частка роботи сил тертя буде витратитися на нерівноважні процеси. Аналіз самоорганізації матеріалів деталей трибоспряхення та робочого (технологічного) середовища в межах нелінійної термодинаміки підтверджує, що при сильному збудженні рівноважної трибосистеми її поведінка стає різноманітною і нелінійною. В зв'язку з цим більш активним і ефективним шляхом удосконалення трибосистем є об'єднання підходу Шредінгера і нелінійної термодинаміки, а потужне і цілеспрямоване збудження сильно впорядкованими потоками енергії (лазерне випромінювання) або речовини забезпечує перехід її в більш організований і стабільний стан.

Таким чином, віддаленість трибосистем від стану рівноваги обумовлює їх нестійкість й необов'язковість повернення до початкового стану. У точках біфуркацій їх матеріалів поведінка трибосистем стає неоднозначною і виявляється можливими кінетичними фазовими переходами та виникненням нерівноважних дисипативних структур. При цьому спостерігаються: кооперативна поведінка локальних областей матеріалів; істотне відхилення їх стану від стану рівноваги; нелінійність основних процесів; постійний приплив від'ємної ентропії; спонтанна самоорганізація; дія принципу еволюції Пригожина-Гленсдорфа. Зазначене складає сукупність синергетики підвищення зносостійкості і надійності трибоспряхення деталей та середовищ, в якому вони працюють через реалізацію процесів і станів самоорганізації. Крім цього передбачається реалізація синергетичного управління станом трибосистеми і процесами, особливо коли реалізується ефект самоорганізації.