

УДК 621. 0

Венцель Є.С., д.т.н.; Щукін О.В., к.т.н.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРИБОСПОЛУЧЕНЬ МАШИН З ПОЗИЦІЙ НЕРІВНОВАГОВОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ

Отримано математичну модель трибосполучень з позицій нерівновагової термодинаміки, яка зв'язує виробництво ентропії з характеристикам поверхонь тертя і середовища, що змазує їх.

Получена математическа модель трибоузлов с позиций неравновесной термодинамики, которая связывает производство энтропии с характеристиками поверхностей трения и смазывающей среды.

A mathematical model of tribo nodes is derived from the positions of nonequilibrium thermodynamics, which relates the production of entropy to the characteristics of friction surfaces of the lubricating medium.

Постановка проблеми. При дослідженнях процесів тертя та зношування трибосполучення необхідно розглядати їх як динамічну дисипативну систему, у якій реалізується деградація енергії макромеханічного руху, тобто виробляється ентропія.

Розробкою математичних моделей трибосполучень присвячені роботи І.В. Крагельського [1], Б.І. Костецького [2], Г. Польцера і Ф. Майснера [3] та ін. Розроблені цими вченими математичні моделі мають механістичний характер, тобто розглядають взаємозв'язок сил тертя або інтенсивності зношення від навантажень на трибоповерхні, їх механо-хімічні і реологічні характеристики, тобто в ці моделі, практично, не враховують властивості середовища, що змазує. О.О. Литвиновим і А.Я. Шепелем [4] було розроблено узагальнене рівняння виробництва ентропії трибосполучення з урахуванням властивостей середовища, що змазує, але більшість параметрів, що увійшли до цього рівняння, були неявними та складними функціями. Саме тому є цікавим скласти таку математичну модель трибосполучення, яка зв'язувала би параметри поверхні і середовища, що змазує, з показниками тертя та зношування при наближенні трибосполучення до стаціонарного стану.

Метою цієї роботи є отримання математичної моделі трибосполучення з позицій нерівновагової термодинаміки, яка б зв'язувала процеси, що супроводжують тертя та зношення, з деякими показниками поверхонь, що труться, і середовища, що змазує.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення цієї мети

приймемо до уваги, у відповідності з моделлю Л.І. Бершадського [5] трибосполучення включає до себе об'єми поверхней тертя, що збуджуються, і шару, що змащується, в яких реалізується позитивне виробництво ентропії завдяки будь-яких механізмів. У зв'язку з цим можна проаналізувати тенденцію еволюції різних параметрів трибосполучення при його наближенні до стаціонарного стану, використовуючи для цього теорему І. Пригожина [6], згідно до якої виробництво ентропії p_s при наближенні системи до стаціонарного стану прагне до мінімального значення. При цьому слід мати на увазі, що p_s завжди позитивна величина.

Розробка математичної моделі. Як відомо, повне змінення ентропії ds складається з змінення ентропії $d_i s$, що виробляється в середині системи, і ентропії $d_e s$, що обумовлена зовнішнім середовищем. Враховуючи, що виробництво ентропії є частиною повної похідної від ентропії часу, можна записати:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d_i s}{dt} + \frac{d_e s}{dt}, \quad (1)$$

де $\frac{d_e s}{dt} = \frac{1}{T} \cdot \frac{dQ}{dt}$ – потік ентропії.

При наближенні до стаціонарного стану

$$\frac{ds}{dt} \approx 0; \quad \frac{d_i s}{dt} = -\frac{d_e s}{dt} \quad \text{або} \quad p_s = -\frac{1}{T} \frac{dQ}{dt}. \quad (2)$$

У відповідності до першого началу термодинаміки

$$dQ = dU - dA. \quad (3)$$

Для трибосполучення, що працює в умовах гідродинамічного режиму змащення, змінення внутрішньої енергії dU пов'язано зі змінням його температури dT і поверхневої енергії, обумовленої наявністю у зазорі частинок пилу та зносу. Тому можна записати:

$$dU = c \cdot m \cdot dT + \sigma \cdot d(\Omega N), \quad (4)$$

де c – питома теплоємність;

m – маса речовини у зазорі;

σ – питома поверхнева енергія;

Ω – середня площа поверхні окремої частинки у зазорі;

N – число частинок у зазорі.

Робота dA , що виробляється силою в'язкого тертя при переміщенні поверхнею ΔS трибосполучення на величину dL , равна

$$dA = \eta \cdot \text{grad}|\vec{V}| \cdot \Delta S = dl, \quad (5)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості мастила.

Підставляючи (4) і (5) у (3) і (1), отримаємо наступний вираз для виробництва ентропії:

$$p_s = \frac{1}{T} \left[\eta \cdot \text{grad}|\vec{V}| \cdot \Delta S \cdot \frac{dl}{dt} - c \cdot m \frac{dT}{dt} - \sigma \frac{d(\Omega N)}{dt} \right]. \quad (6)$$

Оскільки наближення до стаціонарного стану виробництва ентропії прагне до деякої сталої позитивної величини, яка відповідає її мінімуму і всі додатки у правій частині виразу (6) не залежать один від одного, кожне з цих додатків повинно бути сталою позитивною величиною. Очевидно, що для виконання цієї умови необхідно, щоб

$$\frac{dT}{dt} \leq 0, \quad (7)$$

$$\frac{d(\Omega N)}{dt} \leq 0. \quad (8)$$

Нерівність (7) описує відомий факт зменшення температури трибосполучення при наближенні його до стаціонарного стану.

Для обговорення сенсу нерівності (8) виразимо площу поверхні частинки забруднення через її лінійний розмір L . Очевидно, що

$$\Omega = \zeta \cdot L^2, \quad (9)$$

ζ – формфактор, тобто коефіцієнт пропорційності, що залежить від форми частинки (наприклад, для стержня з лінійними розмірами L , $L/2$ та $L/10$ $\zeta=1,3$).

Тоді (8) приймає вигляд

$$\frac{d(\Omega N)}{dt} = \zeta \cdot L \cdot \left[2 \cdot N \cdot \frac{dL}{dt} + L \cdot \frac{dN}{dt} \right] \leq 0. \quad (10)$$

У зв'язку з тим, що $\left| \sigma \cdot \zeta \cdot L \cdot \left[2 \cdot N \cdot \frac{dL}{dt} + L \cdot \frac{dN}{dt} \right] \right|$ прагне до мінімального значення, середній розмір L частинок зменшується, тобто $dL < 0$.

Таким чином (10) перетворюється у нерівність

$$\frac{dN}{dL} \leq 2 \frac{N}{L}. \quad (11)$$

З урахуванням знаку dL маємо

$$-\frac{dN}{|dL|} \leq -2 \frac{N}{L}. \quad (12)$$

Тоді з (12) отримаємо

$$\frac{dN}{|dL|} \geq 2 \frac{N}{L}. \quad (13)$$

Як можна побачити з нерівності (13) $dN > 0$, тобто при наближенні трибосполучення до стаціонарного стану число N частинок забруднень в зазорі трибосполучення збільшується, а їх середній розмір зменшується, причому чим менша L і більше N , тим ближче трибосполучення до стаціонарного стану.

Враховуючи, що в (6) $dl/dt = V$, а також заміняючи в (6) $\frac{d(\Omega N)}{dt}$ у відповідності до (10)

$$p_S = \frac{1}{T} \left[\eta \cdot V \cdot \text{grad} |\vec{V}| \cdot \Delta S - c \cdot m \frac{dT}{dt} - \zeta \cdot \sigma \cdot L \cdot \left(2N \frac{dL}{dt} + L \frac{dN}{dt} \right) \right]. \quad (14)$$

З урахуванням того, що $\frac{dT}{dt} < 0$ та $\frac{d(\Omega N)}{dt} < 0$, математична модель трибосполучення машин набуває вигляд

$$p_S = \frac{1}{T} \left[\eta \cdot V \cdot \text{grad} |\vec{V}| \cdot \Delta S - c \cdot m \left| \frac{dT}{dt} \right| + \zeta \cdot \sigma \cdot L \cdot \left| 2N \frac{dL}{dt} + L \frac{dN}{dt} \right| \right] \rightarrow 0. \quad (15)$$

Як можна бачити з наведеної математичної моделі, виробництво ентропії у трибосполученнях залежить від певної низки факторів. При цьому, щоб виробництво ентропії наближалось до нуля, що відповідає стаціонарному стану трибосполучення, який характеризується мінімальними значеннями сили тертя та швидкістю зношування, необхідно, щоб зменшувалися температура трибосполучення, в'язкість і маса змащувального середовища. Крім того, наближенню трибосполучення до стаціонарного стану сприяє розмір частинок забруднень: чим він менше, тим швидше настає стаціонарний стан.

Висновки.

Розроблена з позицій нерівновагової термодинаміки математична модель трибосполучення дозволяє аналізувати вплив певної низки факторів (температури, маси змащувального середовища, розмірів частинок забруднень тощо) на наближення трибосполучення до стаціонарного стану, при якому виробництво ентропії прагне до нуля, а сила тертя та швидкість зношування мінімальні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В.Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в иашинах / Б.И. Костецкий. – К.: Техніка, 1970. – 396 с.
3. Польцер Г. Основы трения и изнашивания / Г.Польцер, Ф. Майсснер. – М. : Машиностроение. – 264 с.
4. Литвинов А.А. Обобщенное уравнение производства энтропии в трибосистеме с учетом свойств смазывающей среды / А.А. Литвинов, А.Я. Шепель // Сб. трудов Киевского института инженеров гражданской авиации «Исследование эксплуатационных свойств АВИАГСМ и спецжидкостей». – К. : КИИГА, 1987. – С. 39–41.
5. Бершадский Л.И. О взаимосвязи структурных механизмов и диссипативных потоков при кинетическом (некулоновском) трении и износе / Л.И. Бершадский // Трение и износ. – 1989. – Т.10, №2. – С. 358–364.
6. Гленсдорф Г. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / Г. Гленсдорф, И. Пригожин. – М. : Мир, 1973. – 280 с.