

УДК 621.891

О.М. Трошін, Р.М. Джус, С.А. Мігіков

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РОБОТИ ДИСИПАЦІЇ В ТРІБОСИСТЕМАХ

В статті розглянута можливість побудови математичної моделі в енергетичному аспекті, що враховує фізико-механічні і геометричні характеристики поверхонь трібоелементів, яка дозволяє проводити розрахунки, визначаючи навантаженість в трібосистемах. Отримана інформація дасть можливість конструктору на етапі проектування нових конструкцій трібосистем або на етапі ремонту зношених елементів розрахунковим шляхом оцінити більш навантажений елемент в трібосистемі.

**Ключові слова:** трібосистема, дисипація, ентропія.

### Вступ

Елементи трібосистеми зазвичай складаються з різномірних матеріалів, кожний з яких має свої фізико-механічні і теплофізичні характеристики, геометричні параметри мікрорельєфу поверхонь тертя [1]. Всі поверхні утворені в результаті, будь якого технологічного процесу (обробки різанням, тиском або литва), мають нерівності різної форми і розмірів [2]. При русі тіл трібосистеми в зонах силового контакту між нерівностями виникають сили опору руху, обумовлені тим, що деформація поверхонь елементів трібосистеми завжди супроводжується дисипацією енергії.

Відомо, що велика частина роботи сил тертя розсіюється у вигляді тепла, проте мала його частка близько одного відсотка, нагромаджується в матеріалі у вигляді внутрішньої потенційної енергії. При терті двох трібоелементів, енергетично навантажуються той з них, поверхня, якого більш м'яка [1]. Відповідно в більш м'якому матеріалі елемента трібосистеми внутрішня потенційна енергія більше, ніж в твердому. Це у свою чергу веде до нерівномірного зношування елементів трібосистеми. Відповідно ця обставина обмежує ресурс трібосистеми за більш м'яким матеріалом.

Таким чином, більш твердий елемент трібосистеми зноситься трохи, не виробляючи свого можливого терміну експлуатації.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Згідно [1] дослідження в аспекті ентропії вельми обмежені. В той же час слід констатувати, що вже є достатня кількість досліджень в області термодинаміки необоротних процесів, в яких поняття: породжувана ентропія, потік ентропії і виробництво ентропії розглянуто достатньо детально.

Енергетичні моделі з'явилися на основі термодинамічного аналізу процесу зношування [2 – 3]. Параметрами цих моделей є основні термодинамічні характеристики матеріалу поверхневого шару: енергія, ентропія, температура і т.д. Розрахункову зале-

жність цього типу містять в своїй основі рівняння балансу енергії (ентропії) [4].

І якщо при описі процесу, що характеризується порцією енергії, одним з визначальних параметрів стану є ентропія, то для процесів, що характеризуються енергетичним потоком, таким параметром є потік ентропії, що характеризується виробництвом ентропії або швидкістю породження ентропії [1].

**Постановка задачі.** Метою даної роботи є розробка математичної моделі розподілу швидкості роботи дисипації в трібосистемах, розглянувши задачу з погляду енергетичного аспекту, яка враховуватиме всі вище представлені явища. Це дозволить визначити енергетичну залежність швидкості роботи дисипації між елементами трібосистеми і шляхом моделювання визначити трібоелемент в спряженні, який зноситиметься з більшою швидкістю.

### Викладання основного матеріалу

Для будь-якого суцільного середовища будь-яку кінцеву масу або об'єм можна розглядати як складову частину системи [5], причому відповідні основні частини системи є елементами об'єму або маси.

Для визначення енергетичної складової і її кількісної оцінки скористаємося виразом [5], що визначає швидкість зміни роботи (швидкість роботи дисипації)  $P$  вироблюваної полем напруг  $\sigma$  на одиницю маси середовища  $\rho$

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma \dot{\epsilon}, \quad (1)$$

де  $\dot{\epsilon}$  – швидкість деформації.

Деформація в зоні контакту не однорідна, вона різна в різних точках площі контакту і в різних напрямках. Приймемо, що характерною деформацією є максимальна осьова деформація  $\epsilon_{z_{\max}}$  [6]:

$$\epsilon_{z_{\max}} = 1,5(1 + \mu)(0,86 - 1,05\mu) \frac{\sigma \delta t \dot{\epsilon}}{\dot{A}}, \quad (2)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\sigma_{\delta\dot{\epsilon}}$  – фактична напруга в зоні контакту;  $E$  – модуль подовжньої пружності.

Точка з максимальною осьюовою деформацією знаходиться на осі симетрії на відстані  $0,2d_{\delta\dot{\epsilon}}$  від площини контакту [7], а глибина зони, охопленою помітною деформацією, складає  $0,5$  діаметра площі контакту [8].

Метод розрахунку площі контакту між шорсткими поверхнями елементів трібоспряження визначається прийнятою моделлю шорсткої поверхні.

Для розрахунку фактичної площі контакту використовується метод опорної кривої поверхні. У разі пружного контакту застосовуємо вираз [9]:

$$d_{\delta\dot{\epsilon}} = \frac{2r}{\sqrt{v}} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}}{k_v} \Delta^v p_c \theta \right]^{\frac{1}{2v+1}}, \quad (3)$$

де  $r$  – радіус закруглення вершин нерівностей;  $v$  – параметр степеневі апроксимації кривої опорної поверхні;  $p_c$  – контурний тиск;  $k_v$  – числовий коефіцієнт залежний від  $v$ ;  $\Delta$  – безрозмірний комплекс, що характеризує шорсткість поверхні;  $\theta = \frac{1-\mu^2}{E}$  – пружна постійна матеріалу.

Згідно [6] швидкість деформації  $\dot{\epsilon}$  можна розрахувати, як

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{z_{\max}}}{t}$$

В нашому випадку отримаємо остаточний вираз швидкості деформації  $\dot{\epsilon}$  дорівнює

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{z_{\max}}}{t} = 1,5 \cdot (1+\mu) \cdot (0,86 - 1,05\mu) \cdot \frac{\sigma_{\delta\dot{\epsilon}}}{\text{А}} \cdot \frac{v_{\dot{\epsilon}}}{d_{\delta\dot{\epsilon}}}, \quad (4)$$

де  $v_{\dot{\epsilon}}$  – швидкість ковзання.

Для визначення фактичних напруг  $\sigma_{\text{фпк}}$  в зоні пружного контакту елементів трібоспряження скористаємося виразом [9]:

$$\sigma_{\text{фпк}} = p_r = p_c^{\frac{1}{2v+1}} \left[ \frac{2^{1/2v} k_v \Delta^{1/2}}{\sqrt{\pi} \theta} \right]^{\frac{2v}{2v+1}}. \quad (5)$$

Вираз (1) є основною розрахунковою залежністю швидкості роботи дисипації в елементах трібо-системи і дозволяє згідно [6] перейти до визначення швидкості виробництва ентропії.

$$P^{(i)} = X_k^{(i)} \dot{x}_k = \frac{dW^{(i)}}{dt} = \vartheta \frac{d^{(i)}S}{dt} \geq 0. \quad (6)$$

З виразу (6) виходить, що швидкість роботи дисипації  $P^{(i)}$  є деякою функцією від швидкості, яку Г. Циглер назвав дисипативною функцією системи.

Дисипативна функція залежить від  $\dot{x}_k$  і від стану системи, її передісторії і визначається величиною необоротних сил  $X_k^{(i)}$ , які виявляються тільки на макроскопічному рівні ( $k = 1, 2, \dots, n$ ).

В [6] доведено, що швидкість породження ентропії визначається температурою  $\vartheta$  і тепловим потоком  $q_k$

Це дозволяє ввести в модель дисипативну функцію

$$D(q_k) = \vartheta \frac{d^{(i)}S}{dt} = - \frac{1}{\rho\vartheta} \vartheta_k q_k \geq 0. \quad (7)$$

Величини  $\vartheta_k/\rho\vartheta$  слід тлумачити як сили, відповідні для одиниці маси.

Слідуючи, [5] називатимемо  $V_{jk}$  швидкістю деформації суцільного середовища.

Напружений стан в суцільному середовищі описується ейлеревим полем напруг  $\sigma_{jk}(y_e, t)$ , розподіл густини  $\rho(y_e, t)$ , де  $y_e$ , координата положення точки у просторі та часі  $t$ . Тоді швидкість зміни роботи, вироблюваної полем напруг на одиницю маси середовища рівна

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{jk} V_{jk}. \quad (8)$$

З урахуванням формул (6) і (7) можна записати

$$P = \frac{1}{\rho} \sigma_{jk} V_{jk} = - \frac{1}{\rho\vartheta} \vartheta_k q_k \geq 0. \quad (9)$$

З виразу (9) видно, що механічна складова швидкості роботи дисипації будь-якого суцільного середовища одиничної маси рівна швидкості породження ентропії одиничної маси даного суцільного середовища.

Всупереч загальноприйнятій точці зору, ентропія не є мірою безладдя [10]. Швидкість зміни ентропії є інтегральною мірою швидкості процесів перетворення, різних видів енергій один в одного [10]. В нашому випадку механічна енергія взаємодії поверхонь тертя перетворюється в основному на теплову енергію.

Вираз (9) є основною розрахунковою залежністю математичної моделі по визначенню швидкості роботи дисипації в елементах трібо-системи, де швидкість деформації суцільного середовища поверхонь тертя,  $V_{jk}$  визначається виразом (4), а напружений стан суцільного середовища поверхонь тертя,  $\sigma_{jk}$  визначається виразом (5), який розраховується через контурний тиск  $p_c$ .

Для визначення виду контакту і контурного тиску в основних існуючих трібосистемах скористаємося розрахунковою залежністю [11].

В зоні контакту мікронерівностей пластичні деформації з'являються в точці, де максимальні нормальні напруги досягають тиску текучості, які відповідають контурному тиску.

$$p_c = \frac{5,4}{\Delta^2} \frac{HB^5(1-\mu^2)^4}{E^4}. \quad (10)$$

Збільшення контурного тиску до значень, обчислених у формулі (10), де нормальні напруги досягають тиску текучості, яка приблизно рівна твердості матеріалу по Бринеллю, перевищення якого викликає пластичні деформації, вираз має такий вигляд:

$$p_c = \frac{14,5HB^5(1-\mu^2)^4}{\Delta^2 E^4}. \quad (11)$$

Починаючи з контурних тисків, що перевищує значення, визначені по формулі (10), на контакті одночасно матимуть місце пружні і пластичні деформації, при перевищенні значень визначених у формулі (11), мають місце пластичні деформації.

### ВИСНОВКИ

Отримана інформація дасть можливість конструктору на етапі проектування нових конструкцій трібосистем або на етапі ремонту зношених елементів розрахунковим шляхом оцінити більш навантажений елемент в трібосистемі. Такий елемент обмежуватиме ресурс трібосистеми, оскільки матиме більшу швидкість зношування.

Це дозволить прийняти рішення на застосування конструктивних або технологічних засобів під-

вищення його зносостійкості. Такий напрям можна назвати – «управління ресурсом трібосистеми».

### Список літератури

1. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности / Б.В. Протасов. – Саратов, 1979. – 152 с.
2. Фляйшер Г.К. К вопросу о количественном определении трения и износа / Г.К. Фляйшер // Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. – М., 1982. – С. 285-296.
3. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. – К.: Техника, 1976. – 296 с.
4. Гериман И.С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И.С. Гериман, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 1. – С. 61-70.
5. Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды / Г. Циглер. – М.: Мир, 1966. – 136 с.
6. Айнбиндер С.Б. Введение в теорию трения полимеров / С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина. – Рига: Зинатне, 1978. – 224 с.
7. Динник А.Н. Избранные труды. Т. 1. / А.Н. Динник. – К.: Изд-во АН УССР, 1958. – 148 с.
8. Боуден Ф. Трение и смазка твердых тел: пер. с англ. / Ф. Боуден, Д. Тейлор. – М.: Машиностроение, 1963. – 540 с.
9. Крагельский И.Г. Основы расчетов на трение и износ / И.Г. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
10. Хайтун С.Д. Механика и необратимость / С.Д. Хайтун. – М.: Янус, 1996. – 448 с.
11. Крагельский И.Г. Узлы трения машин / И.Г. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

Надійшла до редколегії 30.03.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РАБОТЫ ДИССИПАЦИИ В ТРИБОСИСТЕМАХ

О.Н. Трошин, Р.Н. Джус, С.А. Митиков

В статье рассмотрена возможность построения математической модели в энергетическом аспекте, который учитывает физико-механические и геометрические характеристики поверхностей трибоэлементов, которая позволяет проводить расчеты, определяя загруженность в трибосистемах. Полученная информация даст возможность конструктору на этапе проектирования новых конструкций трибосистем или на этапе ремонта изношенных элементов расчетным путем оценить более нагруженный элемент в трибосистеме.

**Ключевые слова:** трибосистема, диссипация, энтропия.

### MODEL DEVELOPMENT OF DISSIPATION WORK SPEED DETERMINATION IN TRIBOSYSTEMS

O.M. Troshin, R.M. Juice, S.A. Mitikov

In the article possibility of construction of mathematical model is considered in a energy aspect takes into account physical, mechanical and geometrical descriptions of surfaces of triboelements, which allows to calculate work-load in tribosystems. The received information will give possibility a designer to estimate an element is more loaded in tribosystem on the stage of new constructions of tribosystem planning or on the stage of repair of threadbare elements by a calculation way.

**Keywords:** tribosisteme, dissipation, entropy.