

2. Алферев С.А. Исследование динамики привода зерноуборочного комбайна / С.А. Алферев // Земледельческая механика. – М., 1966. – Т. IX. – С.4.
3. Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С.Н. Кожевников. – К.: Наукова думка, 1986. – 288 с.
4. Збігнєв К. Визначення масового моменту барабана зернозбирального комбайна / К. Збігнєв, З. Томаш // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К., 2011. – Вип. 114. – С. 208–215.
5. Бойко А.І. Динаміка зміни рівня надійності підсистем зернозбиральних комбайнів в нестабільних умовах експлуатації і обслуговування / А.І. Бойко, К.М. Думенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К., 2010. – Вип. 109. – С. 128–136.

Представлены исследования динамики движения молотильного барабана зерноуборочного комбайна. Исследования проводились для двух случаев изменения приводного момента: постоянный момент приводного механизма; параболического изменение момента. Установлена зависимость амплитуды колебаний скорости молотильного барабана и двигателя от жесткости привода.

Молотильный барабан, привод, жесткость, скорость, динамика.

The research of dynamic motion in threshing drum of combine harvester is conducted. The research was conducted for two cases of change drive point: constant moment of drive mechanism; parabolic changing moment. The dependence of vibration amplitude of speed in threshing drum and engine from drive stiffness is established.

Threshing drum, drive, stiffness, speed, dynamic.

УДК 536:620.178.16

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

М.І. Денисенко, кандидат технічних наук

При терті утворюються нові упорядковані структури з регулюючим рівнем ентропії. Цей ефект може бути використаний для регулювання триботехнічних характеристик контакту. Використовуючи принципи термодинаміки незрівноважених процесів у відкритих системах доказано, що пара тертя відповідає принципам самоорганізації.

© М.І. Денисенко, 2014

Енергетична теорія тертя, вторинні структури, абразивне зношування, ентропія.

Постановка проблеми. Зношування деталей та вузлів робочих органів є неминучим та закономірним процесом, що супроводжують роботу більшості машин, механізмів і обладнання. Багатьма дослідниками встановлено, що у 80-90% випадках працездатність машин і обладнання втрачається внаслідок зношування їх рухомих з'єднань. Основи сучасних уявлень про тертя були закладені такими видатними вченими, як І.В. Крагельський, Ф. Боуден і Д. Тейбор [1-3], котрі значно розширили знання про тертя, сформулювавши молекулярно-механічну і адгезійно-деформаційну теорію. Відповідно молекулярно-механічній теорії для забезпечення зовнішнього тертя процеси деформування і пошкодження контактуючих поверхонь повинні бути можливо ближче до поверхні твердого тіла, для чого на неї повинен формуватися тонкий, менш міцний, ніж основний матеріал, поверхневий шар (нанесений зовні або генерований самими поверхнями тертя), тобто повинно виконуватися правило градієнта.

Б.І. Костецьким і Л.І. Бершадським [4-6] висунута теорія структурно-енергетичного пристосування при терті. Ця теорія полягає в тому, що система тертя сама адаптується до умов експлуатації шляхом формування вторинних структур з властивостями, які забезпечують мінімум енергетичних витрат в заданих умовах.

Аналіз останніх досліджень. Необхідність структурно-енергетичного підходу до питання тертя і зношування відмічалось в роботах П.А. Ребіндера Н.Н. Давиденкова [7,8]. Але реальний розвиток структурно-енергетичний підхід отримав в роботах Б.І. Костецького і Ю.І. Лінника в результаті енергетичного балансу при терті прецизійного калориметрування [9], і в працях А.Д. Дубініна. Л.І. Бершадським [6] трибо система розглядається, як відкрита термодинамічна система, яка обмінюється енергією та речовиною з зовнішнім середовищем. При русі у трибо системі за певного критичного значення потоку-ентропії зовнішнього впливу (навантаження і середовища) – утворюються стійкі дисипативні структури. У трибо технічних системах утворюються різні термодинамічні процеси, характер і інтенсивність котрих визначаються функціональними характеристиками ТС. Кожне рухоме спряження деталей і вузлів сільськогосподарської техніки можливо представити, як сукупність окремих елементів, котрі являються складом трибо технічної системи з певними співвідношеннями між ними, які утворюють її структуру (рис. 1).

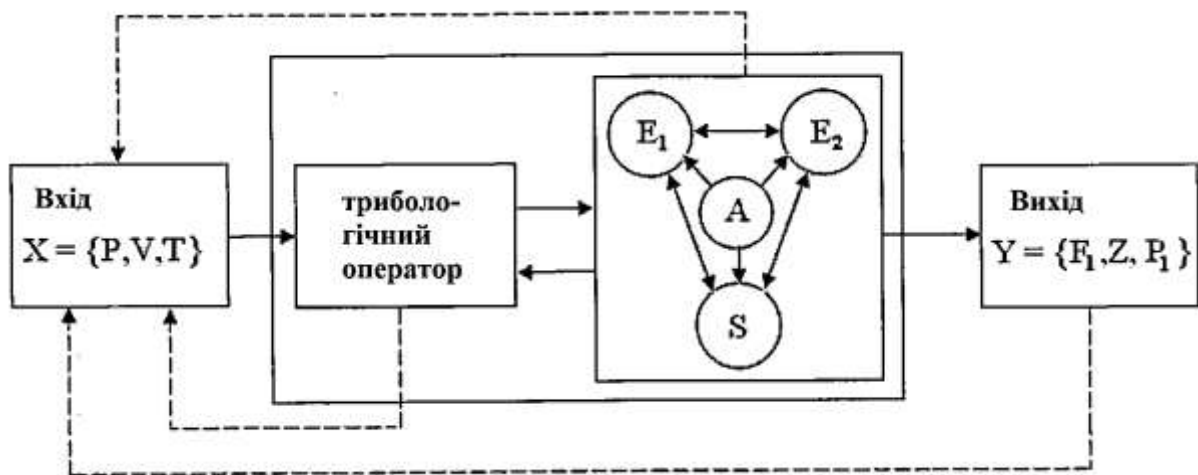


Рис. 1. Структура функціональної дії ТС: E_1 , E_2 – тверді тіла, S – мастильний матеріал, A – зовнішнє середовище.

Зовнішні впливи (кінетичні, динамічні, теплові) відіграють основну роль в трибо логічних процесах та мають енергетичний характер. Вхід у трибо систему це вплив зовнішнього середовища на систему, включаючи сукупність дій механічних і електричних сил, хімічних реакцій. Вихід в ТС можливо розглядати, як реакцію системи на зовнішні впливи, і як результат трибо логічних процесів: опір (сила) тертя F_1 , знос Z , супутні процеси P_1 , наприклад підвищення температури поверхні тертя, старіння конструкційних матеріалів, термомеханічні процеси. Трибо технічна система може змінювати свої функціональні характеристики у процесі роботи, при цьому змінюється її стан.

Дійсно, з точки зору термодинаміки вузли тертя у загальному випадку є не зрівноваженими системами, і для таких систем властиве явище саморегулювання і самоорганізації. Вузли тертя при певних умовах можуть знаходитися у стані метастабільної рівноваги.

Метою досліджень є вивчення процесів тертя та зношування конструкційних матеріалів на основі структурно-термодинамічного підходу, і сучасних уявлень про трибо систему і процеси, які описуються термодинамікою не зрівноважених систем.

Результати досліджень. Сутність використання законів класичної термодинаміки полягає уявлення про локальну рівновагу всередині малих елементів ділянок трибо системи. У термодинамічному підході поверхневий шар розглядають, як відкриту термодинамічну систему, яка здібна обмінюватися енергією і речовиною з зовнішнім середовищем. Наявність адсорбційних процесів на поверхні матеріалів робить їх схожими з мембранами, але у відмінності від звичайних мембранних систем, поверхневий шар володіє ще й об'ємними характеристиками і, отже комплексом

власних характеристик. Вживання уявлень термодинаміки дозволило використати параметри стану для опису будь-яких макроскопічних систем, крізь змінення термодинамічних потенціалів, враховувати адсорбційні та інші ефекти.

При опису зношування були зроблені спроби отримати рівняння стану поверхневого шару у вигляді загальних рівнянь балансу енергії або балансу ентропії. Це призвело до створення енергетичних моделей, що представляли функціональну залежність інтенсивності зношування:

$$J = f(U, S, t, \dots), \quad (1)$$

де U – внутрішня енергія; S – ентропія; t – час.

В основу термодинамічного підходу запропоновано наступні гіпотези:

- у поверхневому шарі третього матеріалу можливо відокремити об'єм, що знаходиться в стані локальної рівноваги;
- процеси тертя та зношування конструкційних матеріалів можуть бути описані рівняннями енергетичного балансу;
- швидкість зношування контролюється швидкістю утворення ентропії.

Дослідженню і розробці енергетичних моделей присвячено роботи Б.В. Протасова, Б.І. Костецького, А.Д. Дубініна, Ю.І. Лінника, Л.І. Бершадського, В.В. Федорова, А.А. Полякова, С.В. Паніна, Г. Польцера, Г. Порше, Г. Фляйшера та інших. Процеси зношування при термодинамічному підході також відносять до явища масо переносу. Безпосередньою причиною масо переносу є локальна зміна хімічного потенціалу речовини і середовища, а розвиток масо переносу опирається на загальні термодинамічні закони, зокрема, на принцип Ле – Шательє, відповідно якому, різноманітні зовнішні впливи, які виводять трибо систему з рівноваги, ініціюють у неї процеси, що повертають систему у вихідний стан. Загальною ознакою перетворень в трибо системах є їх незворотній характер, яка виражається у виробництві ентропії. Ентропія є функцією стану речовини, оскільки її значення не залежать від шляху інтегрування, а лише від початкових і кінцевих параметрів стану. Вона разом із температурою і внутрішньою енергією є важливою термодинамічною величиною, що однозначно характеризує систему.

Ентропію можна визначити так. Виберемо довільно деякий рівноважний стан системи 0 і назвемо його стандартним. Нехай A – деякий інший рівноважний стан системи. Розглянемо інтеграл взятий по оборотному процесу.

$$S(A) = \int_0^A \frac{\delta Q}{T}. \quad (2)$$

Величина цього інтеграла залежить лише від станів системи А і не залежить від θ до А. Оскільки положення зафіксовано, то можна стверджувати, що рівняння (2) залежить лише від стану системи А. Цю функцію називають ентропією стану А.

Так, рівняння Гіббса, яке показує залежність внутрішньої енергії U від ентропії S , об'єма V і хімічних потенціалів μ_K компонентів системи, що складається з різних компонентів, можна записати для малої області в формі:

$$dU = TdS - pdV + \sum \mu_K dC_K, \quad (3)$$

де U , S , V – відносяться до малої ділянки (локальні значення); C_K концентрації компонентів.

Проте виникають труднощі при розрахунках локальних значень внутрішньої енергії, ентропії і т. п., так як і значення змінюються в залежності від координат ділянки і часу. Ці труднощі виявилось можливим здолати, застосовуючи принцип розрахунку з використанням рівняння балансу ентропії для локальної ділянки [10]:

$$\rho \frac{dS}{dt} + \text{div } S = \sigma [S]. \quad (4)$$

Тут права частина рівняння $\sigma [S]$ представляє швидкість виникнення (виробництва) ентропії усередині ділянки. Перший член лівої частини рівняння $\rho \frac{dS}{dt}$ є швидкість приросту ентропії в даній ділянці, а другий член лівої частини $\text{div} S$ швидкість відтоку ентропії з даної ділянки. З розглянутого рівняння балансу ентропії слідує принципово важливий висновок про те, що ентропія, на відміну від загальної маси і енергії, може утворюватися в даній ділянці. Причиною її утворення можуть бути як фізичні (тертя, релаксація), так і хімічні процеси. За визначенням Гленсдорфа і Пригожина, класична термодинаміка є, по суті, теорія руйнування структур, утворення ентропії треба розглядати, як міру швидкості цього руйнування.

Аналізуючи процес самоорганізації трибо систем, Л.І. Бершадський [5, 6] стверджує, що при русі у трибо системі утворюється дисипативна неоднорідність певних параметрів, наприклад градієнти температури, щільності дислокації, електрохімічного потенціалу, концентрації продуктів зношування. В процесі припрацювання при певному критичному значенні потоку енергії-ентропії зовнішнього впливу (навантаження і середовища) утворюються нові, дисипативні структури, котрі є не рівноважними, а сталими. Для відкритих систем, котрими є пари тертя, другий закон термодинаміки може бути записаний, відповідно Пригожину, як:

$$dS = d_i S + d_e S, \quad (5)$$

де $d_i S \geq 0$ – змінення ентропії усередині системи, $d_e S \geq 0$ – змінення ентропії за рахунок обміну з зовнішнім середовищем.

Пари тертя треба розглядати, як пасивні дисипативні структуроутворюючі системи, взаємозв'язані з навколишнім середовищем, і працюючі в умовах зростання ентропії. Тому руйнування трибо системи можливо визначити, як дисипативний фазовий перехід, при якому відбувається обернений перехід від дисипативних структур до зрівноважених, і супроводжуються зростанням їх зростанням їх акумульованої ентропії. Відповідно, з точки зору термодинаміки не зворотних процесів руйнування конструкційного матеріалу при зношуванні визначається не оберненою дисипацією енергії, і поєднано з накопиченням ентропії в мікрооб'ємах. Б.В. Протасовим [11] було зроблено висновок про те, що при постійному потоці енергії $J = const$ в системі і постійній температурі $T_0 = const$ «швидкість утворення ентропії» $dS/d\tau$ визначається тільки властивостями системи, які характеризують її тепловий опір:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{1}{r_{\tau c} + T_0/J}, \quad (6)$$

де $r_{\tau c}$ – тепловий опір системи.

Розвиток термодинамічних уявлень про процеси тертя і зношування було запропоновано А.А. Рижкіним [12], де на основі схеми енергетичного балансу відокремлений тепловий потік дисипації енергії тертя, як суттєво важливий для зношування тепло навантажених пар тертя. Показано, що тертя треба розглядати, як сукупність мікроскопічних (флуктуаційних) і макроскопічних (об'ємних) процесів дисипації енергії, що з'єднані одне з одним. Для оцінки інтенсивності зношування використано поняття ентропійного критерію руйнування, отримане з теорії міцності такий вираз:

$$J_h = \frac{(\int_0^{\delta} P[S] - \Phi[S]) dx^2}{P[\delta S] \cdot (S_* - S_0) \nu}, \quad (7)$$

де $P[S]$ – утворення ентропії в мікрооб'ємах контакту; $P[\delta S]$ – утворення надлишкової ентропії; S_0 – початкова щільність ентропії; S_* – критичне значення щільності ентропії; ν – швидкість тертя; $\Phi[S]$ – потік ентропії, розсіюваним середовищем.

Наведений вираз вказує шляхи зниження інтенсивності зношування: зменшення щільності накопиченої матеріалом ентропії, локалізацію енергетичних процесів в тонкому поверхневому шарі зношує мого матеріалу, використання матеріалів з максимальним значенням S_0 або підвищення цієї величини різними методами (поверхневим зміцненням, легування елементами з високими енергіями активації). У відповідності з термодинамікою не зрівноважених процесів нові упорядковані структури можуть виникати у природі при виконанні чотирьох необхідних умов, вперше сформульованих І.Р. Пригожиним [13]:

- 1) система є термодинамічно відкрита, тобто може обмінюватися з середовищем речовиною і енергією;
- 2) динамічні рівняння системи нелінійні;
- 3) відхилення від рівноваги перевищують критичні значення;
- 4) мікроскопічні процеси відбуваються кооперовано (узгоджено).

Вузли тертя в багатьох випадках також відповідають вимогам самоорганізації, і представляють відкриту термодинамічну систему. Вузли тертя і робочі органи машин обмінюються речовиною з зовнішнім середовищем (активні компоненти середовища і мастильного матеріалу, утворення продуктів зношування). Це створює умови для самоорганізації при не зрівноважених процесах масообміну з зовнішнім середовищем.

Висновки

1. Надійність і довговічність трибо систем в значному ступені залежать від властивостей конструкційних матеріалів та правильного їх вибору для заданих умов роботи вузла тертя.

2. Наведений аналіз робіт призводить до висновку про те, що найбільш перспективним є дослідження та опис процесів тертя і зношування з використанням методів і законів не зрівноваженої термодинаміки. Процес тертя завжди супроводжується дисипацією енергії, при цьому сукупність фізико-хімічних процесів, ентропії трибо системи можуть описані за допомогою термодинамічних критеріїв руйнування структур.

Список літератури

1. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. – М.: Машиностроение, 1977. – 367 с.
2. Боуден Ф.П. Трение и смазка твердых тел / Ф. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. -420 с.
3. Bowden F.P. The Friction and Lubrication of Solids / F.P. Bowden, D. Tabor // Oxford at the Clarendon Press. – 1964. – 544 p.
4. Костецкий Б. Нормальное трение и явления повреждаемости в машинах / Б. Костецкий, Л. Бершадский. – М.: Машиностроение, 1970. – №1. – 206 с.
5. Костецкий Б. Экспериментальное исследование физической модели нормального изнашивания металлов / Б. Костецкий, Л. Бершадский. – К.: Техніка, 1972. – Проблемы трения и изнашивания. – Вып. 2. – С. 187.
6. Костецкий Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин / Б.И. Костецкий. – М.: Машгиз, 1959. – 476 с.
7. Ребиндер П.А. Влияние активных смазочных сред на деформирование сопряженных поверхностях трения / П.А. Ребиндер. – Минск: Наука и техника, 1971. – 264 с.
8. Давиденков Н.Н. Динамические испытания металла / Н.Н. Давиденков. – М.: Госиздат, 1929. – 289 с.
9. Костецкий Б. Исследование энергетического баланса при внешнем трении металлов / Б. Костецкий, Ю. Линник. – М.: Машиноведение, 1968. – №5. – С. 9.

10. Поляков А.А. Теоретический анализ основных механизмов эволюции трибосистем при избирательном переносе / А.А. Поляков // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиноведение, 1983. – №3. – С. 81.
11. Протасов Б. Анализ энергетических соотношений в трибосопряжении с использованием энтропийных оценок // Б. Протасов. – М.: Наука, 1987. – 309 с.
12. Рыжкин А. Термодинамические представления о процессах трения и изнашивания / А. Рыжкин. – М.: Наука, 1992. – 258 с.
13. Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / И.Г. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 264 с.

При трении образуются новые упорядоченные структуры с регулируемым уровнем энтропии. Этот эффект может быть использован для регулирования фрикционных характеристик контакта. Используя принципы термодинамики неравновесных процессов в открытых системах доказано, что пара трения удовлетворяет принципам самоорганизации.

Энергетическая теория трения, вторичные структуры, абразивное изнашивание, энтропия.

At friction new ordered structures with adjustable level of entropy are formed. This effect can be used for regulation of frictional characteristics of contact. Using principles of thermodynamics of nonequilibrium processes in open systems it is proved, that friction pair satisfies to self-organising principles.

Energetics theory friction, secondary structure, abrasive wear, entropy.

УДК 631.371

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІДРОРЕАКТИВНОЇ ЛОПАТЕВОЇ МІШАЛКИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ДИЗЕЛЬНОГО БІОПАЛИВА

**Г.А. Голуб, доктор технічних наук
М.Ю. Павленко, інженер**

Удосконалено математичну модель для визначення параметрів гідрореактивної лопатевої мішалки при виробництві дизельного біопалива.

Дизельне біопаливо, гідрореактивна лопатева мішалка, в'язке середовище, кут нахилу лопаток, діаметр форсунок.

© Г.А. Голуб, М.Ю. Павленко, 2014