

УДК 629.083

ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТРИБОСИСТЕМ

А. О. ЗЕМЛЯНИЙ¹, С. С. БИСЬ², В. В. ЩЕПЕТОВ¹,
С. Д. ХАРЧЕНКО¹, Я. М. ГЛАДКИЙ²

¹ Інститут загальної енергетики НАН України, Київ;

² Хмельницький національний університет

Досліджено енергетику трибосистем з позиції структурно-енергетичної теорії і універсального явища структурної пристосовності. Виявлено їх загальні закономірності та визначено характеристики. Під час розгляду енергетичних зв'язків триботехнічних параметрів, спираючись на загальноприйняті уявлення про термодинамічні співвідношення, враховано енергетичний процес в умовах пластичної деформації як конкуренцію двох взаємопов'язаних тенденцій. Звідси енергія, яка пов'язана з накопиченням пошкоджуваності та термічним зміцненням, ініціює руйнування поверхневого шару трибосистем.

Ключові слова: структура, енергетика трибосистем, деформація, зношування.

The energy of tribosystems is studied from the standpoint of structural-energy theory and the universal phenomenon of structural adaptability. The general regularities of tribotechnical interaction were found and the characteristics of mechanical and thermodynamic processes were determined. When considering the energy relations of tribotechnical parameters, based on generally accepted ideas about thermodynamic relations, it is advisable to consider the energy process under conditions of plastic deformation as a competition of two interrelated trends. Thus, the energy associated with damage and thermal strengthening initiates the fracture of the surface layer of tribosystems.

Keywords: structure, energy of tribosystems, deformation, wear.

Вступ. Температура триботехнічних процесів відображає їхню теплову комунікацію і, як ступінь теплоти (теплової роботи), є мірою енергетичної взаємодії та основним регулятором поверхневої міцності, аспекти якої ґрунтуються на енергетичній концепції. Енергетичні параметри системи характеризують віддаленість трибосистеми від термодинамічної рівноваги. Існуюча методика дає можливість використовувати енергетичний підхід для опису фізико-хімічних явищ та елементарних мікроскопічних актів під час аналізу пластичного деформування та руйнування поверхонь взаємодіючих твердих тіл в умовах навантаження.

Загальна тенденція сучасних досліджень контактної взаємодії з позиції фізико-хімічної механіки матеріалів полягає у розгляді її енергетичних параметрів. Під час навантаження тертям тонкі поверхневі шари змінюють свою структуру та властивості. З експериментальних досліджень зроблено висновок [1], що структури, які утворюються під час тертя, поряд з розподілом температури визначають термодинамічні сили, які зумовлюють енергетичні процеси.

Енергетичний підхід до проблеми тертя та зношування обґрунтований у працях відомих зарубіжних науковців [2, 3], однак реальний розвиток прикладні дослідження енергетичного балансу трибосистем під час навантаження тертям отримали у працях української школи Б. І. Костецького та його учнів [4–6].

Плідною є запропонована [5] структурно-енергетична концепція, яка, незважаючи на деяку суперечливість, сприяла подальшому розвитку такого підходу до проблеми тертя та зношування. Наведені роботи пов'язані із загальною тенденцією, яка на базі реалізації широкого спектра фізико-хімічних процесів та механізмів структурної кооперації, зумовила формування та розвиток енергетичної концепції для опису контактної взаємодії матеріалів.

Структурна пристосовність належить до стійких дисипативних процесів, пов'язаних зі зміною структури та властивостей поверхневих шарів в енергетично вигідному напрямку, тобто перебудовою вихідної структури поверхні у стійкий енергетично вигідніший стан. Структура тонких поверхневих шарів – це гама метастабільних станів ультрадисперсних плівок – вторинних структур, які є результатом фізико-хімічної взаємодії шару ультрадисперсної структури та активних компонентів середовища.

Тертя, яке відповідає механо-хімічному зношуванню, реалізують в умовах термодинамічного рівноважного стану, який відповідає збалансованій динаміці протилежних енергетичних процесів – трибоактивування та пасивації, коли утворення та руйнування вторинних структур перебувають у динамічній рівновазі. За порушення енергетичних компенсаційних співвідношень між взаємодіючими конкуруючими процесами виникає молекулярно-адгезійна взаємодія, яка обумовлює зношування та руйнування.

Нижче наведено узагальнені результати досліджень енергетичного стану трибосистем з позиції структурно-енергетичної концепції та універсального явища структурної пристосовності матеріалів в умовах тертя.

Результати досліджень. З погляду структурно-енергетичної інтерпретації та основних положень структурної пристосовності матеріалів, тертя – це складне діалектично суперечливе явище, за якого у деформованих поверхневих об'ємах взаємодіючих матеріалів відбуваються два взаємозалежні і протилежні процеси, а саме: зростання густини прихованої енергії (ΔU) різного роду дефектів, які утворюються і накопичуються внаслідок роботи, та її зниження в результаті динамічного повернення (дисипації). Тоді, згідно з основним законом термодинаміки, рівняння енергетичного балансу деформації для одиничного локального об'єму поверхневого шару має вигляд: $W_p = \Delta U_e + Q$ (див. рисунок).

З огляду на енергетичний підхід, руйнування твердих тіл, яке зумовлене деформацією за навантаження, не є миттєвим, а залежить від кінетики зародження та руху недосконалостей кристалічної ґратки (дислокацій, вакансій тощо) і є процесом, який розвивається в часі, незалежно від фізико-хімічної природи матеріалу, особливостей структури та умов деформування. З погляду кінетики, моменту утворення макротріщини, яка здатна поширюватися самостійно, передують поступове накопичення мікроосередків у вигляді локалізованих ендогенних екстремальних дефектів [7].

Енергія пластичної деформації обумовлена генеруванням і рухом деформованих об'ємів різних елементарних дефектів. З погляду термодинаміки, енергію, затрачену на пластичне деформування елемента, можна подати у вигляді двох специфічних частин (див. рисунок). Ліва частина енергії (роботи) пластичної деформації пов'язана зі зміною в деформованих об'ємах прихованої (потенційної) енергії (ΔU_e) різних елементарних дефектів та пошкоджень. Ця енергія є однозначною та інтегральною характеристикою субмікро- та мікроструктурних змін, які відбуваються в пластично-деформованих об'ємах. Отже, вона і є мірою деформаційного зміцнення та пошкодження. Ліва частина енергетичного балансу пов'язана з процесами динамічного повернення, які супроводжуються вивільнен-

ням прихованої енергії та тепловим ефектом пластичної деформації. Ця енергія зумовлена рухом та анігіляцією різноманітних елементарних дефектів.

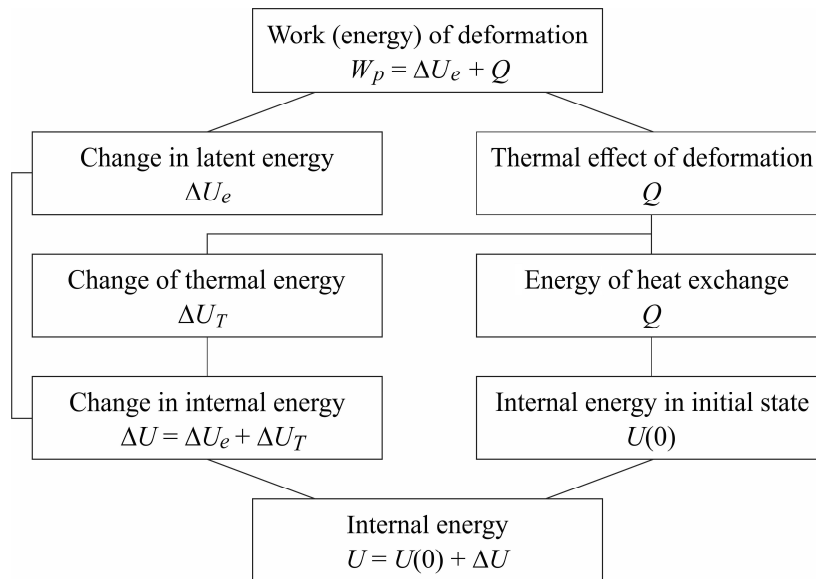


Схема енергетичного балансу пластичної деформації.

The scheme of the energy balance of the plastic deformation.

Згідно з цією концепцією, значна частина енергії зовнішнього тертя (права сторона енергетичного балансу на рисунку) іде на утворення тепла (за нормальних умов контактної взаємодії від 70 до 99%) і розсіюється в навколишньому середовищі внаслідок теплообміну. Решта її витрачається на зміну внутрішньої енергії в деформованих об'ємах поверхневих шарів. Таким чином, енергія, накопичена поверхнею тертя, зосереджена в найтоншому поверхневому шарі, ефективний об'єм якого поширюється, як показали розрахунки [8], на глибину десятків і сотень нанометрів. Зміна її густини в локальному мікрооб'ємі в умовах навантаження наближається до критичного значення, яке може витримати активований поверхневий шар до руйнування.

Таким чином, термодинамічний аналіз показує, що в основі пластичної деформації і руйнування твердої поверхні в трибоумовах лежать дві протилежні і одночасно взаємопов'язані тенденції. При цьому перша пов'язана з деформаційним зміцненням (наклепом), а друга – з динамічним поверненням (відпочинком). Інтенсивність зазначених процесів залежить відповідно від швидкостей зміни густини прихованої енергії та теплового ефекту пластичної деформації. Відповідно потужність дисипації енергії та швидкість пластичної деформації ($\dot{E}_p$) можна подати як суму компонент, контрольованих деформаційним зміцненням і пошкоджуваністю ($\dot{U}_e, \dot{E}_e$) та динамічним поверненням ($\dot{Q}, \dot{E}_q$), тобто

$$\dot{E}_p = \dot{E}_e + \dot{E}_q = \frac{1}{G} (\dot{U}_e + \dot{Q}),$$

де повна деформація E_p – це сума пружної E_e та пластичної E_q .

Робота напружень (G), віднесена до одиниці об'єму і відповідальна за зміну відносної деформації E на величину dE , така: $dW = G dE$.

У зв'язку з цим можна констатувати, що значна частина теплової енергії вузла трибосистеми, пов'язана з тепловим ефектом пластичної деформації Q , не затримується в деформаційному шарі, а проходить крізь нього і розсіюється в навколишньому середовищі. І лише незначна частина теплового ефекту у ньому накопичується у вигляді теплової компоненти внутрішньої енергії, підвищуючи його температуру.

Відповідно накопичену внутрішню енергію в деформованому об'ємі ΔU визначають як суму потенціальної (прихованої) і кінетичної (теплової) ΔU_T , тобто $\Delta U = \Delta U_e + \Delta U_T$. Ця енергія пов'язана з пошкоджуваністю матеріалу (ΔU_e) та його термічним зміцненням (ΔU_T), а отже, є небезпечною для трибосистеми та відповідальною за її руйнування.

Відзначимо, що під час розгляду питання про енергетичний зв'язок триботехнічних параметрів трибосистем, з огляду на загальноприйняті уявлення про термодинамічні співвідношення, необхідно враховувати енергетичний процес під час пластичної деформації як конкуренцію двох взаємопов'язаних тенденцій – деформаційне зміцнення внаслідок наклепу (прихована енергія ΔU_e) та розміцнення внаслідок теплової енергії (ΔU_T) релаксаційних процесів (відпочинок). Таким чином, енергія, пов'язана з пошкоджуваністю та термічним зміцненням, ініціює схоплювання та руйнування матеріалу трибосистем. При цьому вона становить незначну частину енергії ($\sim 1\%$) і зберігається в об'ємі поверхні, що відповідає товщині від десятка до сотні нанометрів, а енергетична величина питомої роботи пошкоджуваності цього тонкого шару, отримана в результаті досліджень, становить майже 10^6 kJ/mm^3 [8].

Під час дослідження енергетичного балансу трибосистем необхідні: коректний поділ руйнування за його механізмами та динамікою; розгляд процесів відповідно до аналізу термодинамічних співвідношень; динамічна рівновага утворення та руйнування поверхневих структур; обмеження, які описують межі нормального процесу та перехідного стану; аналіз результатів досліджень конкретних процесів руйнування. Тільки за такого підходу можна обґрунтувати енергетичний зв'язок між параметрами трибосистем та енергетичний принцип їх дослідження.

Пружно-пластична деформація відбувається за неоднорідних напруженого стану, хімічного потенціалу та температури. Найважливішим завданням теорії зношування є встановлення критеріїв, спираючись на які можна було б передбачити швидкість (або інтенсивність) процесу, настання граничного стану поверхневих шарів, перехід від одного виду зношування до іншого.

ВИСНОВКИ

Найперспективнішим під час дослідження зношування є енергетичний підхід, в основі якого лежать закони збереження енергії та принцип її збільшення за незворотних процесів. Доцільність такого підходу в тому, що в основі сучасних теорій міцності твердих тіл та будови речовини лежать енергетичні концепції, а тертя завжди супроводжується дисипацією енергії. Таким чином, в результаті структурно-енергетичного аналізу виконано якісну оцінку роботи зовнішніх сил з позиції енергетичного балансу, яка пов'язана з двома взаємозалежними та протилежними процесами у деформованих поверхневих об'ємах взаємодіючих матеріалів, а саме: збільшення густини прихованої енергії різного роду дефектів, які утворюються та накопичуються внаслідок роботи, та її зменшення в результаті динамічного повернення (дисипації). Також розглянуто взаємозв'язок процесів в умовах структурної пристосовності та отримано схему енергетичного балансу деформації.

1. *Бершадский Л. И.* Структурная термодинамика трибосистем. – К.: Знание, 1990. – 30 с.
2. *Davim J. P.* Wear of Advanced Materials. – Wiley, 2012. – 256 p.
3. Износ композитных материалов. – Берлин: DEGruyter, 2018. – 86 с.
4. *Костецкий Б. И., Бершадский Л. И.* Динамическое равновесие процессов при трении и износе металлов // ДАН. – 1995. – **190**, № 6. – С. 57–70.
5. *Fleischer G.* Ergebnisseaufdem Gebiet Reibung, Schmserungund Verschleiß // Schmierungstechnik. – 1987. – № 8. – P. 228–234.
6. *Бабак В. П., Щенетов В. В., Супрун Т. Т.* Износостойкость покрытий при аннигиляции эндогенных экстремальных дефектов в условиях трения // Технологические системы. – 2017. – № 3. – С. 15–20.
7. *Костецкий Б. И., Линник Ю. И.* Исследование энергетического баланса при внешнем трении металлов // Проблемы трения и изнашивания. – 1988. – № 5. – С. 31–40.
8. *Костецкий Б. И., Носовский И. Г.* Процесс схватывания метал лов и критерии его интенсивности // Проблемы трения и изнашивания. – 1987. – № 2. – С. 14–20.

Одержано 20.03.2023