

УДК 621.891:621.316

Р.М. Джус, О.М. Трошін, Б.М. Крук

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗНОСНОГО ТЕРТЯ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ПОКРИТТІВ З РЕВІТАЛІЗАНТІВ

Викладено термодинамічну модель організації поверхневих структур металокерамічних покриттів, які були отримані на поверхнях тертя при застосуванні ревіталізаторів. Проведено аналіз безносних властивостей цих покриттів з точки зору термодинаміки. Визначено, що утворені плівки мають здатність до структурної перебудови, яка забезпечує функціонування системи на заданому рівні з максимальною надійністю.

Ключові слова: ревіталізатори, металокерамічні покриття, технології тріботехнічного відновлення, безносність, термодинамічна модель тертя, самоорганізація поверхневої структури.

Вступ

Актуальність подовження ресурсу та підвищення ефективності ремонту агрегатів сучасного озброєння та військової техніки не викликає сумнівів. В останній час широке розповсюдження отримали методи ремонту та подовження ресурсу пар тертя за допомогою ревіталізаторів (технології тріботехнічного відновлення (ТТВ)) [1]. Однак брак інформації про ТТВ, частково внаслідок її комерційної закритості, а частково й із-за її відсутності, заважає широкому застосуванню цих перспективних технологій у авіації та інших відповідальних та високотехнологічних галузях. Тому розкриття фізичної сутності процесів, що відбуваються на поверхнях тертя при застосуванні ревіталізаторів, є актуальною науковою задачею. Внаслідок важкості експериментальних досліджень таких процесів та неоднозначності їх результатів перспективними стають методи математичного моделювання.

Аналіз публікацій, постановка проблеми та формулювання мети статті. Раніше авторами було розроблено методичні підходи до експериментальних досліджень і теоретичного пояснення процесів, що досліджуються [2]. Проведені за допомогою розробленого авторами автоматизованого комплексу трібодіагностики експерименти виявили безносність даних металокерамічних (МК) покриттів протягом часу випробувань на машині тертя (80 годин). Металографічні дослідження дозволили визначити реологічні особливості покриття, що формується. На основі цього побудована його реологічна модель і зроблено аналіз напружено-деформованого стану (НДС). Ці результати дозволили сформулювати гіпотезу квазібезносності покриття на основі двох складових: динамічної повзучості за рахунок макрозрушення самого покриття та еластогідродинамічного ефекту за рахунок його квазірідкої складової в контактній області [3].

Однак пояснення цих унікальних властивостей МК покриттів з точки зору таких загальновизнаних фундаментальних законів, як термодинамічні, доз-

волять швидше впровадити ТТВ у авіації та інших відповідальних та наукоємних галузях, де це неможливе без глибокого теоретичного обґрунтування. Таке пояснення і є **метою** даної публікації.

Вирішення проблеми

Для термодинамічного аналізу трібологічних процесів, що відбуваються при терті захисних МК покриттів використовуємо такий підхід. Усі процеси організації і руйнування локалізовані в елементарному об'ємі, що складається з великої кількості мікрооб'ємів, які одночасно знаходяться в області контактної імпульсної взаємодії. Введемо поняття інформаційної і структурної ентропії, а також виконаємо зіставлення з термодинамічною ентропією. Вона зв'язана з імовірністю P_T рівнянням $S_T = k \ln P_T$, де P_T – термодинамічна імовірність системи.

Хоча усі фізичні і хімічні процеси трансформації вторинних структур підкоряються другому закону термодинаміки $dF = dU - TdS_T$, однак, він не має регулюючого визначального значення для їхньої трансформації; основним для них є принцип структурної адаптації [4]. Швидкість приросту термодинамічної ентропії в елементарному обсязі складається з двох (для нашої моделі рівновеликих) складових і дорівнює зменшенню вільної енергії, тобто

$$\frac{dS_{T_i}}{dt} = -\frac{1}{T} \frac{dG}{dT}, \quad (1)$$

де G – термодинамічний потенціал Гіббса.

Введемо поняття інформаційної (або функціональної) ентропії. Нехай трібосистема (ТС) описується стохастичним диференціальним рівнянням

$$\frac{dx_i}{dt} = f_s(x_1, x_2, \dots, x_n, v/S), \quad i=1, 2, \dots, n,$$

де $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – фазова перемінна, яка визначає функціональний стан ТС; v –керування; S – вхідний сигнал (зміна умов зовнішнього середовища).

Позначимо через $P_u=(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ щільність імовірності фазових перемінних x_1, x_2, \dots, x_n .

Загальна ентропія ТС з функціональним станом x_1, x_2, \dots, x_n визначається формулою

$$S_u = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} P_u \ln P_u dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2)$$

Часткову інформаційну ентропію по фазовій координаті, наприклад, по кількості поглиненої енергії в сфері, обчислимо як

$$S_{ui} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{ui}(x_i, t) \ln P_{ui}(x_i, t) dx_i \quad (3)$$

Для оцінки роботи всього елементарного обсягу можна також ввести поняття інформаційної ентропії, що буде характеризувати ступінь стійкості ТС в цілому. Вирази (2) і (3) саме і визначають значення інформаційної ентропії. Поряд з інформаційною ентропією, при використанні процесів еволюції і самоорганізації в трибологічних системах важливе значення займає структурна ентропія, більш доступна інструментальному вимірові [5]. Для нашого випадку, коли ТС складається з однорідних елементів (сфер), покладемо, що функціональними одиницями в системі служать не окремі елементи, а їхні агрегати – мікроструктура, що представляє собою ансамблі випадково взаємодіючих елементів ϵ_i . Будемо вважати, що ансамбль ϵ_i складається з і однотипних елементів, кожний з яких знаходиться в і-му стані ($i=1, 2, \dots, m$; m – число можливих станів у залежності від величини поглиненої енергії).

Кінетика накопичення і розсіювання енергії в подальшому обмінному процесі в елементарному обсязі підкоряється деякому стохастичному диференціальному рівнянню

$$\frac{dx^j}{dt} = f_{ij}(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) - g_{ij}(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i), \quad (4)$$

де j – енергетичні стани, $j = 1, 2, \dots, n$; $i = 1, 2, \dots, m$; $x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i$ – миттєві значення внутрішньої накопиченої енергії j , причому функція f_{ij} описує швидкість накоплення внутрішньої енергії, а функція g_{ij} описує її розсіювання. Елементарний акт навантаження завжди супроводжують процеси накопичення і розсіювання внутрішньої енергії в ТС. Покладемо, що перехід ансамблю ϵ_i в інший ϵ_l стан (від навантаження до розвантаження в елементарному обсязі) приводить до майже миттєвої зміни його функціонального стану з і у l.

Уведемо цілочисельні функції $v(t)=[v_1(t), v_2(t), \dots, v_m(t)]$, де $v_i(t)$ – число однакових ансамблів ϵ_i у кожен момент часу t . Тоді мірою організації ТС може служити

$$S_c(P_c) = - \sum_{i=1}^m P_{ci} \ln P_{ci}, \quad (5)$$

де $P_{ci}(t) = v_i(t) / \sum_{j=1}^m v_j(t)$.

Назвемо (5) структурною ентропією ТС. Функціонування ТС може бути розглянуте з залученням принципу максимуму надійності [6]. Дане твердження

знаходиться в повній згоді з принципами структурної пристосовуваності, сформульованими Костецьким Б.І., Канарчуком В.Е. [4], а також в інших роботах (Бершадського Л.І., Кламецьки Б, Буше Н.А. та ін.).

Залучення принципу максимуму надійності для пояснення динаміки структурної пристосовуваності ТС має особливий інтерес, а поняття динамічної рівноваги ТС з багатьма положеннями рівноваги підкоряється принципіві найменшої взаємодії (беззносність є частинним проявом принципу надійності).

Передбачається наявність у ТС універсального "стабілізатора", що безпосередньо стежить за зміною внутрішніх параметрів і впливає на середовище, коли зміна прискорюється. При цьому задача взаємодії із середовищем зводиться до формування і виконання таких взаємодій, включаючи і хімічні реакції, що забезпечують стабілізацію зовнішніх впливів на ТС. Запишемо рівняння балансу ентропії для локальної області (місцева термодинамічна рівновага в контактній області):

$$\rho \frac{dS}{dT} + \text{div } S = \sigma[S],$$

де $\rho \frac{dS}{dT}$ – швидкість припливу ентропії в дану область; $\text{div } S$ – швидкість відтоку ентропії з даної області в навколишнє середовище; $\sigma[S]$ – швидкість приросту ентропії усередині даної області.

У процесі деформації в МК шарі активуються дисипативні процеси, які самоорганізуються, у результаті яких утворюються високоупорядочені структури і у результаті їх кооперативного погодженого руху в полі діючих напружень відбувається макрозрушення. Частота макрозрушуючих процесів залежить від швидкості взаємного пересування, контактного тиску і температури. З ТС безупинно «відкачується» ентропія, що утворюється в результаті циклічної взаємодії поверхонь тертя.

Оскільки швидкість деструкції контролюється швидкістю виробництва ентропії, то квазібеззносний режим тертя МК шару легко пояснити. Результати проведеного аналізу показують, що для підтримки квазібеззносності МК шару необхідне збереження об'ємної в'язкості, що забезпечує внутрішню перебудову структури при зміні зовнішніх умов тертя в напрямку підтримки реологічного поведіння, що забезпечує ізометричне провертання у контактній області і макрозрушуючі процеси. При пульсації напруг на вході (у динамічно навантаженому стику) за кожен цикл відбувається необоротний перехід елементів структури МК шару з одного поворотно-ізомерного стану в інший, внаслідок чого відбувається інтенсивна дисипація енергії. Внутрішнє тертя такого роду називають об'ємною в'язкістю.

Відзначимо, що при досягненні ТС динамічно стаціонарного стану, для протікання квазібеззносного тертя повинна виконуватися умова $\sigma[S] \rightarrow 0$.

Для випадку, коли випадкова величина

$$x_k = \sum_{i=1}^m v_i z_i$$

підкоряється нормальному закону розподілу, максимізація функції надійності $H_s(t)$ рівносильна мінімізації приватної інформаційної ентропії $S_{uk} \rightarrow \min$, $k = 1, 2, \dots, n$, тому що $S_{uk} \sim D[x_k]$, тобто в будь-який ТС завжди існує така організація ансамблевих структур зі структурною ентропією $S_c(P^*)$, що забезпечує найбільш надійне її функціонування.

Висновки

На основі викладеного можна сказати, що випадкові зміни локальних умов визначають імовірнісну участь елементів у конкретних ансамблях ε_i , кожний з яких знаходиться в рівновазі з навколишнім локальним середовищем і являє собою об'єкт багатозв'язкового регулювання, що складається з і одночасно функціонуючих окремих елементів. Ціль функціонування – максимізувати свою функцію надійності, але реалізація цієї мети досягається тільки за умови врахування впливу всіх інших елементів ансамблю. Всі ансамблі ε_i ($i=1, m$) складають структуру ТС, тобто елементарний обсяг також представляє об'єкт багатозв'язкового регулювання. Причому просторова орієнтація ансамблів залежить від умов взаємодії і середовища. Термодинамічний аналіз ансамблевих структур, з яких складається покриття, показав, що його особливі фізико-механічні властивості обумовлені процесами сегрегації і сепарації окремих структурних складових.

Реорганізація ансамблевих структур є основою самоорганізації цього шару, що дозволяє надійно функціонувати ТС в умовах зовнішнього середовища, що змінюються. Наприклад, роздрібнення ансамблів може викликати збільшення інтенсивності функціонування за рахунок збільшення навантаження на елементи. Це, у свою чергу, приводить до зменшення надійності функціонування елементів, підключених до роздрібнених ансамблів. Тоді як укрупнення ансамблів припускає збільшення надійності елементів у них, що досягається зменшенням навантаження на кожен елемент.

Однак, кінетичні характеристики не цілком описують організацію структури МК шару. До них ще варто додати просторові характеристики розташування ансамблів елементів. Очевидно, функціонування системи на заданому рівні з максимальною надійністю забезпечується не тільки оптимальними кількісними співвідношеннями, але також оптимальним розташуванням елементів в обмеженому просторі.

Таким чином, фізичний аналіз трансформації структурного стану в ТС з МК покриттям показав, що відношення часток ансамблів ε_i ТС до і після зміни зовнішнього середовища дорівнює відношенню інтенсивності їхньої роботи в цих же умовах. Логарифм відносини ймовірностей перебування системи в цих станах може служити мірою працездатності ТС.

Список літератури

1. *Опис до пат. на винахід: UA 24442 A, С 23 С 26/00, С 10 М 125/40. Спосіб безрозбірного відновлення тертьових сполучень. Агафонов А.К. (RU), Аратський П.Б. (RU), Бахматов С.І. (RU), Гамідов Е.А. (RU), Нікітін І.В. (RU), Слободянюк А.А. 17.07.98. – 10 с.*
2. *Стадніченко М.Г. Автоматизована система трибодіагностики. Перспективи використання у авіації / М.Г. Стадніченко, Р.М. Джус, Л.Ю. Чотій // Вісн. НТУ «ХПИ»: Сб. наук. пр. Темат. вип.: Автомобіле- і тракторобудування. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 2 – С. 157-164.*
3. *Стадніченко В.Н. Об образовании и функционировании МК покрытия, полученного с помощью ревитализантов / В.Н. Стадніченко, Н.Г. Стадніченко, Р.Н. Джус, О.Н. Трошин // Вестн. науки и техн. – Х.: ХДНТ и НТУ «ХПИ». – 2004. – Вып. 1(16). – С. 18-27.*
4. *Канарчук В.Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям / В.Е. Канарчук. – К.: Наукова думка, 1986. – 264 с.*
5. *Войтов В.А. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин / В.А. Войтов, О.М. Яхно, Ф.Х. Аби Сааб. – К., 1999. – 190 с.*
6. *Пронников А.С. Надежность машин / А.С. Пронников. – М.: Машиностроение, 1978. – 590 с.*

Надійшла до редколегії 14.09.2009

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗЫЗНОСНОГО ТРЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ РЕВИТАЛИЗАНТОВ

Р.Н. Джус, О.Н. Трошин, Б.М. Крук

Изложена термодинамическая модель организации поверхностных структур металлокерамических покрытий, которые были получены на поверхностях трения при применении ревитализантов. Проведен анализ безызносных свойств этих покрытий с точки зрения термодинамики. Определено, что образовавшиеся пленки имеют способность к структурной перестройке, которая обеспечивает функционирование системы на заданном уровне с максимальной надежностью.

Ключевые слова: ревитализанты, металлокерамические покрытия, технологии триботехнического восстановления, безызносность, термодинамическая модель трения, самоорганизация поверхностной структуры.

MODELING OF UN-WEAR ATTRITION OF METAL-CERAMIC COVERINGS WITH REVITALIZANT

R.M. Juice, O.M. Troshin, B.M. Kruk

It is represented thermodynamic model of metal-ceramic coverings surface structure organization, received on rubbed surfaces in case of revitalizant application. Analysis of such coverings un-wear characteristics from the point of thermodynamic view was conducted. It determined created pellicle has ability to structural reorganization that provides system functioning on the given level with maximum reliability.

Keywords: revitalizants, metal-ceramic coverings, tribotechnical restoration technology, un-wearness, thermodynamic rubbing model, self-organization of surface structure.