

УДК 621.396.69+669.056.9:629.118.6

В. И. Бутенко, д-р техн. наук, проф.,
Донской государственный технический университет
E-mail: tag.tm@donstu.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ И МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СЛОЯМИ

Рассмотрен механизм изнашивания деталей трибосистем с модифицированными и многокомпонентными функциональными слоями с точки зрения открытой термодинамической неравновесной системы. Получена формула для определения трибоэлектрической приспособляемости поверхностей деталей трибосистем, учитывающая условия контактирования деталей.

Ключевые слова: деталь, трибосистема, энтропия, изнашивание, поверхностный слой, равновесие, температура.

V. I. Butenko

ANALYTICAL RESEARCH OF THE MECHANISM OF WEAR OF DETAILS WITH THE MODIFIED AND MULTICOMPONENT FUNCTIONAL LAYERS

Was considered the mechanism of wear parts tribosystems modified and multi-component functional layers from the perspective of an open thermodynamic nonequilibrium system. Obtained formula for determining the triboelectric adaptability tribosystems surfaces of the parts, which takes into account the contact conditions detail.

Keywords: detail, tribosystem, entropy, wear, surface layer, the equilibrium, temperature.

1. Введение

В современном машиностроительном производстве актуальной является проблема повышения надёжности и работоспособности машин и механизмов, которая связана с технологическим обеспечением износостойкости поверхностного слоя деталей. Исследования показали, что вопросы износа деталей трибосистем не могут быть решены без разработки строгого и научно-обоснованного механизма контактно-усталостного изнашивания материала поверхностного слоя, наиболее часто встречаемого при эксплуатации деталей в экстремальных условиях и опирающегося на описание термодинамических явлений в зоне контакта взаимодействующих материалов. Аналитическое исследование механизма изнашивания деталей трибосистем существенно возрастает в случае создания на их поверхностях модифицированных и многокомпонентных функциональных слоёв (М и МФС), обеспечивающих существенное повышение работоспособности и надёжности машин и механизмов при сравнительно небольших дополнительных экономических затратах и доступности для любого машиностроительного предприятия [1].

2. Основное содержание и результаты работы

В работах [2, 3] показано, что контактно-усталостное изнашивание сопряженных поверхностей деталей машин в общем случае следует рассматривать как процесс разрушения материалов пары трения, определяемый необратимой диссипацией энергии и связанный с накоплением энтропии в микрообъемах материала поверхностного слоя. При этом пару трения можно рассматривать как открытую термодинамическую неравновесную систему, свободная энергия E которой, отнесенная к единице площади, для необратимых процессов рассматривается по формуле

$$dE = -Sd\theta + \sum_{i=1}^n F_i dP_i + \sum_{j=1}^m x_j dq_j, \quad (1)$$

где S – энтропия в неравновесном состоянии; P_i – внешние параметры, характеризующие состояние системы; q_j – внутренние параметры, характеризующие состояние системы; x_j – параметры, характеризующие фиктивное силовое поле, в котором рассматриваемая неравновесная система является равновесной; θ – температура в зоне контакта взаимодействующих материалов; F_i – обобщенные силы, сопряженные с параметром P_i .

В общем случае для деталей трибосистем с М и МФС величины S , F_i и x_j являются функциями θ , P_i , q_i , а сумма $\sum_{i=1}^n F_i dP_i$ представляет собой некоторую элементарную работу dA , произведенную внешними силами в процессе контактно-усталостного изнашивания поверхностного слоя детали:

$$dA = \sum_{i=1}^n F_i dP_i. \quad (2)$$

Известно, что в состоянии равновесия термодинамической системы при заданных значениях θ и P_i величина энтропии $E(\theta, P_i, q_j)$ минимальна. Следовательно, для деталей трибосистем с М и МФС с термодинамической точки зрения имеет место условие

$$\left(\frac{dE}{dq_i} \right)_{\theta, P_i} = 0. \quad (3)$$

откуда определяются значения внутренних параметров системы в состоянии её равновесия \bar{q}_j :

$$\bar{q}_j = q_j(\theta, P_i). \quad (4)$$

Неравновесное состояние поверхностного слоя детали трибосистемы, а также любой его микроскопической части характеризуется температурой θ , тензором деформации ε_{ij} , являющимся внешним термодинамическим параметром, и совокупностью внутренних параметров $q_{ij}^{(1)} \dots q_{ij}^{(n)}$, которые зависят от состава, свойств, толщины, силы сцепления и других параметров созданного на поверхности детали М и МФС. При этом параметры $q_{ij}^{(\alpha)}$, ε_{ij} и температура θ характеризуют степень отклонения состояния системы от состояния полного термодинамического равновесия и во многом зависят от физико-механического состояния материала поверхностного слоя детали, полученного на финишных операциях механической обработки. С течением времени при постоянных внешних условиях ($\theta = \text{const}$, $\varepsilon_{ij} = \text{const}$) состояние поверхностного слоя детали трибосистемы с М и МФС приближается к такому состоянию, при котором устанавливается определенное динамическое равновесие между процессами активирования и пассивации с учётом трансформируемости свойств материалов контактирующих деталей, подвергнутых различным способам финишной обработки [4]. В связи с этим величины $q_{ij}^{(\alpha)}$ приближаются к значениям $\bar{q}_{ij}^{(\alpha)}$, соответствующим квазиравновесному состоянию материала поверхностного слоя детали. В общем случае физический смысл величин $q_{ij}^{(\alpha)}$ (тензоров релаксации) зависит от конкретного релаксационного механиз-

ма, протекающего в поверхностном слое и обусловлен состоянием дислокационной структуры материала. Работа, произведенная над единицей объема материала поверхностного слоя детали в процессе его контактно-усталостного изнашивания, определяется по формуле:

$$dA = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}. \quad (5)$$

Учитывая выражение (3), а также то, что параметр dE_σ является полным дифференциалом переменных θ , ε_{ij} и $q_{ij}^{(\alpha)}$, тождество (1) для условий контактно-усталостного изнашивания и упругодеформированного материала поверхностного слоя детали примет следующий вид:

$$dE = -Sd\theta + \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} + \sum x_{ij}^{(\alpha)} dq_{ij}^{(\alpha)} = \frac{\partial E_\sigma}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial E_\sigma}{\partial \varepsilon_{ij}} d\varepsilon_{ij} + \sum \frac{\partial E_\sigma}{\partial q_{ij}^{(\alpha)}} dq_{ij}^{(\alpha)}. \quad (6)$$

Для аналитического исследования механизма изнашивания материала поверхностей деталей с М и МФС, помимо уравнения (6), необходимо найти выражение для свободной энергии как явной функции величин ε_{ij} , θ и q_{ij} , а также составить уравнения для определения тензоров релаксации $q_{ij}^{(\alpha)}$. Если рассматривать изотермическое деформирование однородного изотропного материала при наличии одного механизма релаксации, то тензоры ε_{ij} и q_{ij} будут характеризоваться лишь одной отличной от нуля компонентой, которую можно обозначить соответственно ε и q . Считая температуру θ постоянной, а величины ε и q малыми, свободную энергию поверхностного слоя E_σ можно разложить в следующий ряд, ограничившись членами второго порядка вида:

$$E_\sigma = E(\theta) + a\varepsilon^2 + bq^2 + c\varepsilon q. \quad (7)$$

Тогда вместо выражения (3) условие равновесного состояния материалов поверхностного слоя деталей с М и МФС при контактно-усталостном изнашивании их может быть представлено выражением

$$\left(\frac{\partial E_\sigma}{\partial q} \right)_{\theta, \varepsilon} = 0. \quad (8)$$

Из зависимостей (1) и (8) следует, что $2b\bar{q} + c\varepsilon = 0$; откуда среднее значение параметра \bar{q} , связанного с внутренними параметрами М и МФС и характеризующего напряжённое состояние системы, будет равно $\bar{q} = -\frac{c}{2b} \varepsilon$.

Если ввести новую величину M , определяемую соотношением

$$M = q - \bar{q}, \quad (9)$$

то условие (8) выполняется при $M = 0$, а свободная энергия E_σ в переменных ε и M принимает вид:

$$E_\sigma = E_0 + \left(a - \frac{c^2}{4b} \right) \varepsilon^2 + bM^2, \quad (10)$$

где E_0 – начальная свободная энергия материала поверхностного слоя детали.

Вместе с тем свободная энергия материала поверхностного слоя детали с M и МФС и, следовательно, находящегося в квазиравновесном состоянии [5], может быть определена по формуле:

$$\bar{E}_\sigma = E_0 + \frac{M}{2} \varepsilon^2, \quad (11)$$

где M – изотермический модуль.

Приняв в уравнении (1) изотермический модуль $M = 0$ и сравнив его с выражением (11), можно получить следующие соотношения:

$$a - \frac{c^2}{4b} = \frac{M}{2}; \quad E_\sigma = E_0 + \frac{M}{2} \varepsilon + bM^2. \quad (12)$$

Так как в большинстве случаев величина $b > 0$, то, определяя напряженно-деформированное состояние материала поверхностного слоя детали с M и МФС в условиях контактно-усталостного изнашивания соотношением $\sigma = \left(\frac{\partial E_\sigma}{\partial \varepsilon} \right) q$, можно написать:

$$\sigma = M\varepsilon + 2bM \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \quad (13)$$

Из формул (9) и (10) следует, что для напряженно-деформированного состояния материала поверхностного слоя детали с M и МФС имеет место соотношение

$$\frac{\partial M}{\partial \varepsilon} = -\frac{\partial q}{\partial \varepsilon} = \frac{c}{2b} \quad (14)$$

Подставляя соотношение (14) в выражение (13), получается:

$$S = M\varepsilon + cq \quad (15)$$

Очевидно, что параметр релаксации q является величиной, скорость изменения которой представляет собой изотермический модуль M . Эта скорость тем меньше, чем созданный на поверхности детали M и МФС ближе к состоянию равновесия, и обращается в нуль при его достижении (квазиравновесное состояние), т.е. при условии, когда $q = 0$, напряженное состояние M и МФС обеспечивает минимальное значение потенциала в зоне трибоконтакта поверхностей деталей машин [6].

Считая, в общем случае, q малой величиной, можно принять $\dot{q} = f(M)$. Тогда, разложив эту функцию в ряд и ограничившись в разложении линейным членом, полу-

чается следующее выражение, позволяющее с достаточной степенью достоверности проанализировать влияние изотермического модуля M на напряжённое состояние M и МФС как в период его создания на поверхности детали, так и во время эксплуатации:

$$\dot{q} = f(0) + f'(0)M. \quad (16)$$

Полагая $f'(0) = -\frac{1}{\tau}$, где τ – время релаксации (характерный для процесса формирования поверхностного слоя детали параметр), получается

$$\dot{q} = -\frac{1}{\tau}M \text{ при } \tau > 0. \quad (17)$$

Учитывая уравнение (9) и (10), можно записать

$$\dot{M} + \frac{1}{\tau}q = \frac{c}{2b}\dot{\varepsilon}. \quad (18)$$

Если проинтегрировать дифференциальное уравнение (19), то текущее напряжение в материале M и МФС детали трибосистемы в момент времени t' определится по формуле:

$$M(t) = \frac{c}{2b} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau}\right) \dot{\varepsilon}(t') dt'; \quad \sigma(t) = M\varepsilon(t) + \frac{c^2}{2b} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau}\right) \dot{\varepsilon}(t') dt'. \quad (19)$$

Если ввести новую величину $\eta = \frac{c^2\tau}{2b}$, имеющую размерность вязкости [кг×с], то выражение (19) преобразуется следующим образом:

$$\sigma(t) = M\varepsilon(t) + \frac{\eta}{\tau} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau}\right) \dot{\varepsilon}(t') dt'. \quad (20)$$

Полученная формула (20) может быть использована для определения трибоэнергетической приспособляемости поверхностей деталей с M и МФС как для случая взаимодействия материалов контактирующих деталей трибосистемы со сдвигом, так и к объемным изотермическим колебаниям, возникающих в контактной зоне. В первом случае M и η означают модуль сдвига материала поверхностного слоя детали G и его сдвиговую вязкость φ соответственно, во втором – M и η выражают модуль объемной упругости и объемной вязкости.

Исходя из формулы (20), можно установить функциональную связь между напряжённостью материала поверхностного слоя и потенциалом трибоконтакта, играющего определяющую роль в процессах контактно-усталостного изнашивания деталей машин [6].

По результатам выполненного аналитического исследования механизма контактно-усталостного изнашивания поверхностного слоя деталей трибосистем с M и

МФС были разработаны технологические и эксплуатационные пути повышения их работоспособности, включая:

- формирование на финишных операциях механической обработки деталей структуры материала поверхностного слоя, способствующей трибоэнергетической приспособляемости создаваемых М и МФС;
- введение в состав создаваемых М и МФС в качестве смазок сплавов эвтектического состава;
- создание на рабочих поверхностях деталей медных слоёв наноразмерной толщины.

При этом особую значимость результаты выполненных исследований имеют для разработки системы оценки и прогнозирования свойств материалов поверхностного слоя деталей с М и МФС, так как входящие в формулу (20) параметры η , τ , $\varepsilon(t)$ зависят от характера изменения плотности дислокаций материала поверхностного слоя по его толщине $grad \rho$, его крутизны и трансформируемости внутренних напряжений, созданных в процессе выполнения финишных операций обработки деталей [5, 7].

3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили получить формулу определения энергетической приспособляемости поверхностей деталей с М и МФС и на её основе разработать эффективные технологические и эксплуатационные пути повышения работоспособности деталей трибосистем и изделий машиностроения в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутенко, В. И. Модифицированные и многокомпонентные функциональные слои на поверхностях деталей машин / В. И. Бутенко. – Ростов на Дону: ИЦ ДГТУ, 2016. – 235 с.
2. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием: учебное пособие / А. А. Рыжкин, К. Г. Щучев, М. М. Климов. – Ростов-на-Дону: ИЦ ДГТУ, 2007. – 419 с.
3. Бутенко, В. И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем [Текст] / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.
4. Бутенко, В. И. Финишная обработка поверхностей деталей – способы, устройства, инструменты / В. И. Бутенко. – Ростов на Дону: ИЦ ДГТУ, 2016. – 219 с.
5. Бутенко, В. И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: ИЦ ДГТУ, 2017. – 481 с.
6. Бутенко, В. И. Аналитическое определение потенциала трибоконтакта поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов / В. И. Бутенко. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов – Донецк: ДонНТУ, 2018. – С. 3-9.
7. Бутенко, В. И. Метод прогнозирования показателей качества поверхностного слоя деталей по склонности материала к дислокационной реструктуризации / В. И. Бутенко / Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике (ТМ-18): Сб. науч. тр. X Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2018. – С. 11-13.

Поступила в редколлегию 04.05.18