

К исследованию совместимости трущихся поверхностей

С. В. ФЁДОРОВ

ФГОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, 236022, Россия

Аннотация. Трение как конкурентный процесс рассматривается с позиций уравнения энергетического баланса. Это уравнение описывает совместную работу трущихся поверхностей. Предлагается диаграмма эволюции трущихся поверхностей. Рассматривается модель диссипативной структуры. При идеальной эволюции трибоконтакта он структурно трансформируется в примерно 63 млн динамических осцилляторов. Совокупное их взаимное ротационно-колебательное поведение определяет эффект динамической диссипации энергии. Предлагается расчетная модель динамического осциллятора диссипативных структур трения.

Ключевые слова: трение; энергия; баланс; эволюция трибосистемы; диаграмма; наноструктура; механический квант; совместимость

Как-то, в начале восьмидесятых я услышал, как один молодой доктор технических наук спросил Николая Александровича Буше: «Скажите, термодинамический подход действительно важен в трибологии?» «Да, — ответил Николай Александрович. — Работа трения — это очень важно!»

Введение. В термодинамике известно уравнение состояния идеального газа, связывающее давление, объем и температуру, — уравнение Клапейрона

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (1)$$

В научной литературе [1] неоднократно высказывались предположения о том, что подобное механическое уравнение состояния должно существовать и для твердых деформируемых тел.

В этом вопросе интересен результат анализа общих закономерностей эволюции состояний и свойств систем с трением — трибосистем, выполненного с использованием обобщенного (термодинамического) анализа деформируемого контакта трущихся поверхностей в рамках трибоэргодинамики [2].

Термодинамический анализ процесса трения. Трение как глобальный трансформационный феномен природы строго подчиняется уравнению энергетического баланса (рис. 1) и с термодинамической точки зрения [3, 4] представляет собой конкуренцию двух одновременно протекающих, взаимосвязанных и противоположных тенденций: накопления скрытой (потенциальной) энергии ΔU_e различного рода дефектов и по-

вреждений структуры контактных объемов и ее высвобождения (рассеяния) Q за счет протекания различного рода релаксационных процессов. Первая тенденция определяет эффект деформационного упрочнения и интегрально характеризует меру повреждаемости (параметр состояния); вторая тенденция определяет тепловой эффект трения и ответственна за квазивязкую составляющую процесса.

Согласно схеме энергетического баланса процесса пластической деформации и разрушения [3] работу ω_f внешних сил для преодоления трения F на пути l для единицы деформируемого (контактного) объема (см. рис. 1) можно представить следующим образом:

$$\omega_f = \Delta u_e + q \quad \text{или} \quad \dot{\omega}_f = \dot{u}_e + \dot{q}. \quad (2)$$

Здесь $\dot{\omega}_f = \frac{d\omega_f}{dt}$ — мощность трения (диссипации) энергии; $\dot{u}_e = \frac{du_e}{dt}$ — скорость накопления скрытой энергии в деформируемых (контактных) объемах; $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$ — мощность теплового эффекта пластической деформации (трения).

Поскольку при трении деформируются контактные объемы обоих материалов, составляющих пару трения, уравнения (2) следует записать как обобщенные уравнения совместимости трущихся поверхностей [2], так как они описывают, по сути, совместную работу (деформацию) поверхностей пары трения:

$$\omega_f = \Delta u_{e1} + \Delta u_{e2} + q_1 + q_2, \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_f = \dot{u}_{e1} + \dot{u}_{e2} + \dot{q}_1 + \dot{q}_2. \quad (4)$$

В наиболее общем случае уравнения энергетического баланса для трения без смазки следует представить

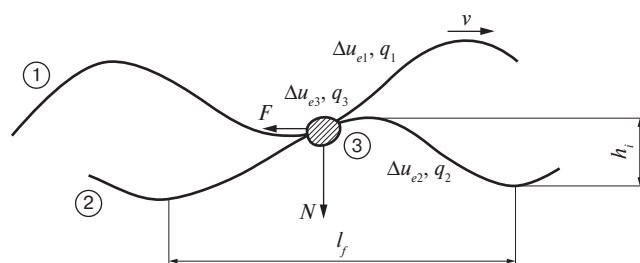


Рис. 1. Условная схема элементарного контакта при трении
Fig. 1. Conventional scheme of elementary contact with friction

с учетом реального (не единичного) размера трибоконтакта V_f :

$$W_f = \Delta U_e + Q = \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + \Delta U_{T1} + \Delta U_{T2} + \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2; \quad (5)$$

$$\dot{W}_f = \dot{U}_e + \dot{Q} = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{U}_{T1} + \dot{U}_{T2} + \dot{\bar{Q}}_1 + \dot{\bar{Q}}_2; \quad (6)$$

$$F_l = \frac{\Delta U_e}{l} + \frac{Q}{l} = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2}}{l} + \frac{Q_1 + Q_2}{l}; \quad (7)$$

$$F_v = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}}{v} + \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{v} = F_{mechanical} + F_{molecular}; \quad (8)$$

$$\mu_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2}}{Nl} + \frac{Q_1 + Q_2}{Nl} = \mu_{adapt} + \mu_{dis} = \mu_{adapt} + \mu_{T(dis)} + \mu_{\bar{Q}(dis)}; \quad (9)$$

$$\mu_v = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}}{Nv} + \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{Nv} = \mu_{deformation} + \mu_{adhesion}. \quad (10)$$

Здесь μ — коэффициент трения; μ_{adapt} — адаптивный (Амонтона) коэффициент трения; $\mu_{T(dis)}$ и $\mu_{\bar{Q}(dis)}$ — статическая и динамическая компоненты диссипативного коэффициента трения μ_{dis} ; $\Delta U_e = \Delta u_e V_f$, ΔU_T — потенциальная и тепловая компоненты внутренней энергии; $\dot{U}_e = \dot{u}_e V_f$, ΔU_T — скорости изменения потенциальной и тепловой составляющих внутренней энергии; $Q = \Delta U_T + \bar{Q}$, $\dot{Q} = \dot{U}_T + \dot{\bar{Q}}$ — тепловой эффект трения и его мощность; $\bar{Q}$, $\dot{\bar{Q}}$ — тепловой эффект динамической диссипации и его мощность; V_f — объем трения;

N — нормальная нагрузка; l — путь трения. Плотность внутренней скрытой энергии Δu_e является интегральным параметром трибосостояния и повреждаемости (разрушения) (Δu_e^*) [3, 4]). В соотношениях (6) — (9) индексами обозначены параметры трения на пути трения l и в единицу времени v .

Соотношения между составляющими энергетического баланса (2) — (10) процесса трения Δu_{e1} и Δu_{e2} , Δu_{T1} и Δu_{T2} , а также $\bar{q}_1$ и $\bar{q}_2$ изменяются в широких пределах и определяются физико-химическими свойствами материалов, составляющих пару трения, их структурой и условиями процесса трения. Подобное многообразие частных соотношений между составляющими энергетического баланса процесса трения и определяет собственно все многообразие частных (граничных) проявлений процесса трения и износа [5, 6].

Для частного случая локализации трения в объеме «третьего тела» (область совместимости (рис. 2)) уравнения (5) и (6) преобразуются к виду

$$W_T = \Delta U_{e3} + Q_3, \quad (11)$$

$$\dot{W}_T = \dot{U}_{e3} + \dot{Q}_3. \quad (12)$$

Данная запись уравнений энергетического баланса энергии при трении не противоречит рассуждениям, приведенным выше, дополняет их и обладает более широкой физической обоснованностью. Здесь индексами 3 обозначены составляющие энергетического баланса, аналогичные обозначениям соотношений (5) и (6), для случая трения в объеме «третьего тела» (вторичных структур).

Таким образом, термодинамический анализ процесса пластической деформации и разрушения контактного объема твердого тела позволяет получить обобщенные (двучленные) соотношения для трения.

Энергетическая интерпретация коэффициента трения. Для условий, характеризующих малыми скоростями скольжения и незначительным тепловым эффектом трения ($Q \approx 0$), уравнение энергетического баланса трения (9) представляет коэффициент трения Амонтона в обобщенном виде как

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\Delta U_e}{Nl}, F = \frac{\Delta U_e}{l}, Q \approx 0. \quad (13)$$

Следовательно, коэффициент трения Леонардо да Винчи (Амонтона) имеет глубокий физический смысл. С одной стороны, это параметр, характеризующий обобщенно сопротивление относительному перемещению (движению) поверхностей, ибо он отражает долю энергии, которая «уничтожается» трением в виде запасенной скрытой энергии ΔU_e . С другой стороны, это обобщенная характеристика повреждаемости, ибо он (коэффициент трения) определяется плотностью скрытой энергии Δu_e , характеризующей меру дефектности структуры и являющейся обобщенным параметром повреждаемости [3, 4]. И здесь также

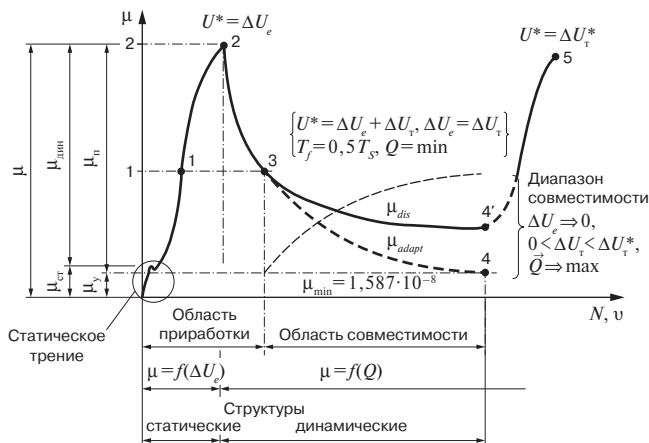


Рис. 2. Структурно-энергетическая диаграмма эволюции трущихся поверхностей [2]. Обозначение на осях:

N, v — нагрузка и скорость; $\mu_{ст}$, $\mu_{дин}$, $\mu_{упр}$, $\mu_{пл}$ — статический, динамический, упругий, пластический коэффициенты трения; T_f, T_s — температура вспышки в контактом объеме трения в точке 3 и температура плавления

Fig. 2. Structural-energy diagram of evolution of friction surfaces [2]. Specification on axes:

N, v — load and speed; $\mu_{ст}$, $\mu_{дин}$, $\mu_{упр}$, $\mu_{пл}$ — Static, dynamic, elastic, plastic friction coefficients; T_f, T_s — Flash point in the contact volume of friction in the point 3, and the melting point

*Здесь и далее — предельные величины.

можно сказать, что коэффициент трения однозначно отражает обобщенно структурное совершенство (не-совершенство) деформируемого контактного объема [3, 4], так как параметр $\Delta u_e (\Delta U_e)$ определяется энергией различного рода дефектов и повреждений, накапливаемых в пластически деформируемых объемах тела, и в соответствии с основным выводом термодинамической теории прочности [3] является обобщенной характеристикой структуры (структурный параметр).

Закономерности эволюции трибосистемы. Эволюция трибосистемы, представленная в виде диаграммы (см. рис. 2), имеет адаптивно-диссипативный характер (2) — (10) и отражает конкурентную (диалектическую) природу трения.

Эволюционная кривая имеет ряд принципиальных точек (1, 2, 3, 4, 5) переходных состояний трибосистемы, которые строго подчинены балансовому принципу трения; между этими точками существуют наиболее характерные области поведения трибосистемы, отражающие общие свойства ее нелинейной динамики.

Так, можно видеть следующие условно обозначенные точки и этапы: 0 — 1 — участок статического трения и деформационного упрочнения; 1 — точка предельного деформационного упрочнения; 1 — 2 — участок накачки избыточной энергии; 2 — точка схватывания и перехода внешнего трения во внутреннее (критической неустойчивости); 2 — 3 — участок образования диссипативных структур (формирование тепловой флуктуации в объеме трения); 3 — точка минимальной совместимости (максимальной фрикционности); 1 — 2 — 3 — область самоорганизации; 3 — 4 — участок совместимости; 4 — точка безызносности (аномально низкого трения); 5 — точка термического схватывания.

Идеальная эволюция трибосистемы симметрична. Процесс начинается и заканчивается в областях упругого поведения. Между ними существует пластический максимум трения (сильно возбужденное состояние) как условие самоорганизации и приспособления.

В наиболее общем случае закономерности эволюции (адаптации) трибосистем можно представить в виде двух этапов (см. рис. 2). Первый (0 — 2) — этап возрастания плотности скрытой энергии Δu_e до предельной величины Δu_e^* в некотором критическом объеме трения V_f^* . Второй (2 — 4) — этап структурного распада (трансформации) критического объема трения (элементарной трибосистемы) V_f^* на адаптивный V_{adapt} и диссипативный V_{dis} объемы. В пределе (точка 4) этот этап характеризуется полным превращением адаптивного критического объема V_{adapt}^* в объем диссипативный V_{dis}^* .

Обозначенные выше объемы характеризуют различные закономерности преобразования энергии внешнего механического движения при трении. Адаптивный объем V_{adapt} связан с необратимым поглощением

энергии деформации. В этом объеме происходит накопление скрытой энергии деформации Δu_e и зарождаются очаги разрушения. Диссипативный объем V_{dis} способен обратимо трансформировать (рассеивать) энергию внешнего движения. В нем не происходит накопления скрытой энергии деформации за счет протекания обратимой упруговязкопластической деформации.

Предложенные теоретические и расчетные оценки [2] показали, что диссипативный объем трения осуществляет обратимую упругую трансформацию энергии внешнего механического движения с плотностью $\bar{q}^*$, равной критической плотности скрытой энергии u_e^* .

Кульминацией эволюции трибосистемы является ее конечное и предельное состояние точки 4 — состояние аномально низкого трения и безызносности (максимальной работоспособности).

Показано [2], что величина минимального адаптивного объема трения V_{adapt}^{min} , соответствующая нулевому значению пластической компоненты трения $\mu_{adapt}^{min} = \mu_{elast}$, не равна нулю, а равна размеру некоего минимального структурного элемента деформируемого твердого тела.

Представляет научный интерес анализ этого минимального структурного устройства при трении.

Идея механического (нано) кванта. Итогом идеальной эволюции элементарной трибосистемы является образование уникальной наноструктуры — механического (нано) кванта. Строгие представления о механическом кванте получены [2, 7] путем рассмотрения для точки 4 диаграммы эволюции трения уравнения квазиидеального твердого тела

$$\begin{aligned}\bar{Q}^* &= \bar{S}_Q T = \mu_{dis}^* N l_f = \\ &= U_e^* = V_f^* u_e^* = V_f^* \bar{q}^* = \text{const},\end{aligned}\quad (14)$$

которое есть частный случай решения уравнений энергетического баланса трения (9) при $\mu_{adapt} = 0$ и $\mu_{dis} = 1 = \mu_{dis}^*$. Здесь $\bar{S}_Q$ — инерционная энтропия совместимого объема трения; T — характеристическая температура контактного объема трения; l_f — линейный размер объема трения.

Соответственно, в условиях максимальной совместимости (точка 4), когда трибосистема реализует полный эволюционный цикл приспособления с образованием наиболее совершенной, диссипативной структуры, ее (структуры) поведение подчиняется уравнению состояния квазиидеального твердого тела, т. е. следует полагать, что взаимодействия между элементами этой структуры минимизированы — состояние идеальной упругости в динамике.

Уравнение (14) с учетом формулы Планка — Больцмана $S = k \ln W$ и реального числа атомных осцилля-

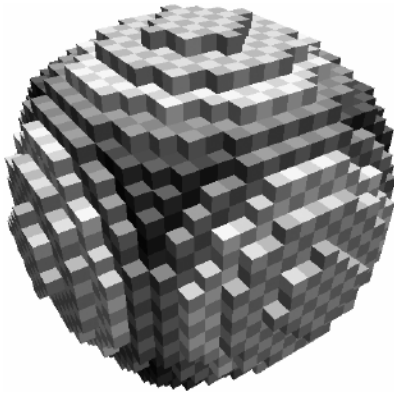


Рис. 3. Модель идеального кристалла элементарной наноструктуры контакта трения [7, 9]

Fig. 3. The model of an ideal crystal of elementary nanostructure of friction contact [7, 9]

торов N_f в объеме элементарной трибосистемы V_f^* приводится к виду

$$\mu_{dis} = \frac{\tilde{S}_0 T}{N I_f} = \frac{k T N_f \ln W}{N I_f}; \quad (15)$$

$$\mu_{adapt} = 1 - \mu_{dis} = 1 - \frac{k T N_f \ln W}{N I_f} = 1 - \frac{\tilde{S}_0 T}{N I_f} = \frac{S_0 T}{N I_f}, \quad (16)$$

объясняющему закономерности трения с точки зрения эволюции систем. Трибосистема всегда стремится к некоторому оптимальному состоянию, характеризующему μ_{adapt} , т.е. к наиболее вероятному состоянию $W^* = N_f \ln W$ для данных условий трения. Здесь N_f — число атомов (осцилляторов) в объеме трения $V_{dis}^{max} = V_f^*$; k — постоянная Больцмана; W — вероятность состояния; S_0 — конфигурационная энтропия совместимого объема трения.

Анализ и решение этих уравнений [2] позволяет показать принцип постоянства величины вероятности (параметра состояния (порядка) трибосистемы) W для всего диапазона совместимого трения, а именно $\ln W = 3$ и $W = e^3 = 20,08553696$.

Число термодинамической вероятности состояния W , равное 20,08553696, было интерпретировано [2] как наименьшее число линейных, атомных осцилляторов в одном из трех направлений минимального адаптивного объема трения V_{adapt}^{min} , соответствующего состоянию практически абсолютного упругого трения — аномально низкого трения (безопасному порогу деформации). Соответственно число атомных осцилляторов в этом объеме равно $W^3 = 8103,083969$.

С другой стороны, принимая смысл энтропии S по Больцману, получена универсальная постоянная трения $R_f = k N_f$ [2], которая по физическому смыслу характеризует «энергетический размер» элементарной трибосистемы (TS), содержащей в идеальных условиях одинаковое число атомных осцилляторов N_f (механических квантов N_Q):

$$R_f = k N_f = k W^3 N_Q = R_{MQ} N_Q \left(\frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot TS} \right); \quad (17)$$

$$R_{MQ} = k W^3 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot MQ} \right). \quad (18)$$

Как следует из расчетов [2], размер минимального адаптивного объема трения V_{adapt}^{min} по своей величине совпадает с размером субмикроскопической зоны в устье трещины, которая для металлов равна $(4 \div 9) \cdot 10^{-6}$ мм, т.е. с размером критического объема, ответственного за разрушение. Таким образом, размер минимального адаптивного объема трения $V_{adapt}^{min} = V_{elast}$ можно представить как размер некоего механического «кванта». Этот механический квант представляет собой минимальное число атомов, способных обеспечить такое их конфигурационное распределение (структуру), которое обладает свойством обратимо воспринимать и рассеивать (возвращать) энергию внешнего механического движения (воздействия). Он также представляет собой наименьшее структурное образование в условиях пластической деформации и образуется при переходе трибосистемы (деформируемого объема) через предельно активированное (критическое) состояние (см. рис. 2) вследствие развития самоорганизационных процессов адаптации трибосистемы. Расчеты показывают, что в объеме трения V_f^* число таких механических квантов равно числу $0,63 \cdot 10^8$ [1], т.е. безопасному числу циклов усталости.

Механический квант сам по себе является динамическим осциллятором диссипативных структур трения, и его линейный размер равен радиусу сферического идеального кристалла

$$D_Q = 2 R_{MQ} = \sqrt[3]{\frac{3 W^3 \bar{d}_a^3}{4 \pi}} = 7,177 \text{ нм}. \quad (19)$$

Здесь $\bar{d}_a$ — средний атомный диаметр.

Собственно механический квант следует рассматривать как элементарную наноструктуру металлического твердого тела. На рис. 3 представлена сконструированная модель этого атомарно-шероховатого теоретического кристалла [1, 5, 6], состоящего из 8103 кубических атомных ячеек.

Взаимное ротационно-колебательное движение этих механических квантов относительно друг друга внутри элементарной трибосистемы определяет состояние наиболее совершенной диссипативной структуры трения. Собственно, такое состояние описывается уравнением квазиидеального твердого тела (14), когда взаимодействие между элементами структуры (механическими квантами) минимизировано (идеальная упругость квазивязкого течения). Расчетный коэффициент трения между квантами равен примерно 10^{-8} [2, 7].

Синергизм трибосистемы и оптимальность состояния. Идеальное, квазиупругое состояние контакта трения при его полной эволюции представляет собой эффект наиболее полного рассеяния энергии внешнего механического движения на вновь образованные (по механизму самоорганизации в окрестности критического состояния) структурные элементы — механические кванты (динамические осцилляторы). Эти осцилляторы реализуют наиболее полное ротационно-колебательное их поведение относительно друг друга в объеме элементарной трибосистемы. При этом сопротивление их относительному взаимодействию минимально упруго и соответствует упругости идеальных атомарных (термодинамически равновесных) взаимодействий.

Универсальные константы механического кванта и элементарной трибосистемы (материальной точки) определяют как квантовую модель демпфирования поверхностей

$$\mu_{dis} = \frac{3R_{MQ}Tn_i}{Nl_f} = \frac{U_{IQ}n_i}{U_{IQ}n_*} = \frac{n_i}{n_*} = 1 - \mu_{adapt};$$

$$\mu = 1 - \frac{n_i}{n_*} = \frac{n_{dest}}{n_*}, \quad (20)$$

учитывающую кванты разрушения n_{dest} (необратимая компонента процесса) и кванты демпфирования n_i (обратимая, упругая компонента (число усталости)), так и вероятностную модель эволюции трибосистемы к наиболее упорядоченному состоянию

$$\mu_{adapt} = 1 - \mu_{dis} = 1 - \frac{R_f T \ln W_i}{Nl_f} = 1 - \frac{\ln W_i}{\ln W_*}. \quad (21)$$

Здесь R_{MQ} — постоянная деформирования (трения); $3R_{MQ}T = U_{IQ}$ — энергия одного механического кванта; W_i и W_* — текущая и предельная вероятности состояний совместимых трибосистем.

Согласно модели квантового демпфирования поверхностей при трении в условиях наиболее полной эволюции (адаптации) элементарной трибосистемы все механические кванты, за исключением одного, упруго и обратимо трансформируют энергию внешнего воздействия (механического движения). Один механический квант излучения ($\cong 8103$ атома) есть минимальная потеря (существо «безызносности» или же стандарт износа).

Собственно, принцип механического кванта определяет наноквантовые уровни всех параметров трения совместимых трущихся поверхностей [10] и др.

Выводы. 1. Совместная работа трущихся поверхностей обобщенно описывается уравнением энергетического баланса трения.

2. Наиболее общие закономерности трения имеют эволюционный, адаптивно-диссипативный характер.

3. Наиболее полная эволюция трибосистемы (контакта трения) имеет симметричный вид — процесс начинается и заканчивается в упругих (статической и динамической) областях.

4. Идеальное, максимально совместимое состояние трибоконтакта характеризуется формированием уникальной наноструктуры, основу которой представляет механический (нано) квант.

5. Механический квант целесообразно рассматривать как стандарт (единицу) износа.

6. Все параметры совместимого (оптимального) трения имеют квантовые уровни, соизмеримые с параметрами одного механического кванта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hollomon J. H., Zener C. J. Appl. Phys., 17, 1946, p. 69.
- Фёдоров С. В. Основы трибозергоники и физико-химические предпосылки теории совместимости. Калининград.: КГТУ, 2003. 415 с.
- Фёдоров В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во Фан, 1979. 186 с.
- Фёдоров В. В. Основы эргодоники и синергетики деформируемых тел. Ч. 1. Основы физической механики деформируемых тел (состояние проблемы) / под. ред. С. В. Фёдорова. Калининград: КГТУ, 2012. 159 с.
- Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбатов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
- G. Fleischer: 40 Jahre Bewertung von Reibung und Verschleiss mit Hilfe der Energiedichte. Tribologie und Schmierungstechnik (2004), 51 (3), S. 5 – 11.
- Фёдоров С. В. Основы эргодоники деформируемых тел и трибозергоники // Приложение к журналу. Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 8. 24 с.
- Fedorov S. V. The Mechanical Quantum of Dissipative Friction Structures is the Elementary Tribonanostructure. Proceedings of World Tribology Congress 2009 (6 – 11 September 2009): Japanese Society of Tribologists. Kyoto, Japan. p. 926.
- Fedorov S. V. Energy Model of Sliding Friction Coefficient and Generalized Regularities of Tribosystems Evolution, in: Transactions of the 19th International Colloquium Tribology «Tribology-Industrial and Automotive Lubrication», TAE, 21 – 23.01.2014, Esslingen, Germany.
- Буше Н. А., Копытько В. В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 127 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ФЁДОРОВ Сергей Васильевич,
д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теории механизмов и машин и деталей машин, ФГОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»

Статья поступила в редакцию 10.06.2016 г., актуализирована 21.07.2016 г., принята к публикации 17.08.2016 г.

On the study of compatibility of friction surfaces

S. V. FEDOROV

FSEIHPE "Kaliningrad State Technical University", Kaliningrad, 236022, Russia

Abstract. The friction as competitive process is considered from positions of energy balance equation. Friction surfaces joint work with using this equation is described. As the result of more full evolution of elementary tribosystem the unique nanostructure is formed and the basis of which is one mechanical (nano) quantum. Mechanical quantum represents the least structural form of solid material body in conditions of plastic deformation and under transition tribosystem across the limit activated state by development of selforganizing processes of tribosystem adaptation are formed. Mechanical quantum is dynamic oscillator of dissipative friction structure. Mechanical quantum can be examined as the elementary nanostructure of metal's solid body. Calculations have shown the number of such mechanical "quanta" (subtribosystems) within the elementary tribosystem's volume, which is close to the safe number of fatigue cycles. Their joint rotary-oscillatory behavior in relation to each other has determined the dynamic dissipation energy effect. Calculative model for dynamic oscillator of friction dissipative structures is offered.

The all parameters of compatibility (optimal) friction have to be in quanta levels — commensurable with the parameters of the one mechanical quantum — standard (unit) of wear.

Keywords: friction; energy; balance; evolution of tribosystem; diagram; nano-structure; mechanic quantum; compatibility

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-5-283-288>

REFERENCES

1. Hollomon J. H., Zener C. J. Appl. Phys., no. 17, 1946, p. 69.
2. Fedorov S. V. *Osnovy triboergodinamiki i fiziko-khimicheskie predposylki teorii sovmestimosti* [Basics triboergo dynamics and physical and chemical prerequisites of compatibility theory]. Kaliningrad, KGTU Publ. [the Kaliningrad State Technical University], 2003, 415 p.
3. Fedorov S. V. *Termodinamicheskie aspekty prochnosti i razrusheniya tverdykh tel* [Thermodynamic aspects of strength and fracture of solids]. Tashkent, Fan Publ., 1979, 186 p.

4. Fedorov S. V. *Osnovy ergodinamiki i sinergetiki deformiruemyykh tel. Chast' 1. Osnovy fizicheskoy mekhaniki deformiruemyykh tel (sostoyaniye problemy)* [Basics of ergo dynamics and synergy of deformed bodies. Part 1: Fundamentals of physical mechanics of deformable bodies (state of the problem)]. Kaliningrad, KGTU Publ. [the Kaliningrad State Technical University Publ.], 2012, 159 p.

5. Kragel'skiy I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Basics of calculations for friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 526 p.

6. G. Fleischer: *40 Jahre Bewertung von Reibung und Verschleiss mit Hilfe der Energiedichte*. Tribologie und Schmierungstechnik. 2004, Vol. 51, no. 3, pp. 5 – 11.

7. Fedorov S. V. *Osnovy ergodinamiki deformiruemyykh tel i triboergodinamiki* [Basics of ergo dynamics of deformed bodies and tribo ergo dynamics]. Prilozhenie k zhurnalu. Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal [Supplement to the magazine. Reference book. Engineering magazine]. 2010, no. 8, 24p.

8. Fedorov S. V. *The Mechanical Quantum of Dissipative Friction Structures is the Elementary Tribonanostructure*. Proc. of the World Tribology Congress 2009 on September 6 – 11, 2009, Japanese Society of Tribologists, Kyoto, Japan, 926 p.

9. Fedorov S. V. *Energy Model of Sliding Friction Coefficient and Generalized Regularities of Tribosystems Evolution*, in: Transactions of the 19th International Colloquium Tribology "Tribology-Industrial and Automotive Lubrication", TAE, on January 21 – 23, 2014, Esslingen, Germany.

10. Bushe N. A., Kopyt'ko V. V. *Sovmestimost' trushchikhsya poverkhnostey* [Compatibility of friction surfaces]. Moscow, Nauka [Science] Publ., 1981, 127 p.

ABOUT THE AUTHOR

FEDOROV Sergey Vasil'evich,

Dr. Sci.(Eng.), Professor, Head of the Department of Theory of mechanisms and machines and machine parts, FSEIHPE "Kaliningrad State Technical University"

Received 10.06.2016

Revised 21.07.2016

Accepted 17.08.2016

■ E-mail: fedorov@kgtu.ru (S. V. Fedorov)

Тюрнин П. Г., Тибилов А. Т., Миронос Н. В. Токосъем: надежность, экономичность и пути совершенствования. М.: ВМГ-Принт, 2015. 166 с.

В книге рассмотрены наиболее важные вопросы токосъема с учетом требований и методов проверки отдельных элементов контактной сети и токоприемников, эксплуатируемых при высокоскоростном движении. Подробно изложены отдельные решения экономичности и надежности устройств.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: железнодорожников, уже имеющих общую подготовку и практический опыт работы на контактной сети и в локомотивном хозяйстве, работников предприятий — изготовителей электроподвижного состава, а также преподавателей и студентов транспортных вузов, техникумов и колледжей.

По вопросам предварительного заказа на приобретение книги обращайтесь в редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ», тел. (499) 260-43-20.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ