

УДК 621.891

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

© 2011 С.В.Фёдоров

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград

Поступила в редакцию 10.11.2011

Современная трибология, анализируя междисциплинарную природу трения, акцентирует внимание на обобщенных, термодинамических моделях трения и износа. В статье предлагается энергетическая модель трения с уравнениями баланса трения. Энергетическая трактовка трения приводит к энергетической интерпретации основного параметра трения – коэффициента трения. Такая интерпретация оказывается плодотворной и позволяет широко анализировать закономерности внешнего трения. Ключевые слова: энергетический баланс трения, коэффициент трения, износ, смазка

Общепризнанно [1,2] трение является глобальным феноменом трансформации энергии внешнего относительного движения. Собственно, локализуясь в поверхностном слое (контактных объемах), эти трансформации определяют существо как сопротивления относительно перемещению, так и рассеяния энергии. Данная модель трения формализуется уравнениями энергетического баланса трения.

В наиболее общем случае [3] работа сил трения  $W_T$  складывается из работы упругого  $W_T^o$  и пластического  $W_O^{ie}$  деформирования и разрушения контактных объемов и работы, затрачиваемой на преодоление сил вязкого трения и разрушения смазочного материала  $W_{\tilde{n}\tilde{i}}$  :

$$W_T = W_T^y + W_T^{nl} + W_{cm} \quad (1)$$

В условиях установившегося (развитого) трения работой сил упругого деформирования можно пренебречь, в силу их малости, а также для частного случая трения без смазки, когда можно принять, что  $W_{\tilde{n}\tilde{i}} \cong 0$ , работа трения  $W_T$  будет определяться в основном работой сил пластического деформирования поверхностей (контактных объемов)  $W_O^{ie}$

$$W_T = W_T^{nl} = W_{T1}^{nl} + W_{T2}^{nl} \quad (2)$$

Здесь,  $W_{O1}^{ie}$ ,  $W_{T2}^{ie}$  - работа пластического деформирования контактных объемов материала вала и подшипника соответственно.

В рамках термодинамической теории прочности твердых тел [4-6] предложена схема (рис.1) энергетического баланса процесса пластической деформации. В соответствии с термодинамическим анализом [4-6] процесс пластической деформации и разрушения рассматривается как конкуренция двух проти-

воположных, взаимосвязанных и одновременно протекающих в деформируемых объемах тела тен-

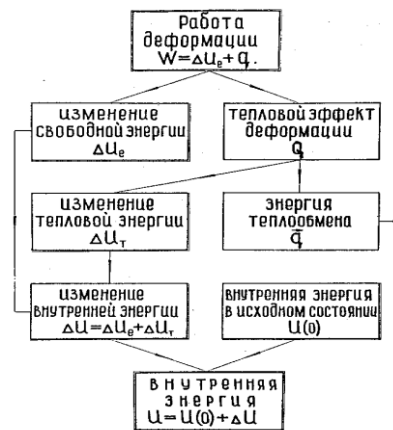


Рис. 1. Схема энергетического баланса процесса пластической деформации [4].

дений - роста плотности скрытой энергии  $\Delta u_e$  различного рода дефектов и повреждений, накапливающихся в материале за счет работы внешних сил  $\omega_p$  и снижения (высвобождения) ее за счет различного рода релаксационных процессов, протекающих внутри деформируемого элемента тела; при этом первая тенденция связана с деформационным упрочнением (наклепом) и повреждаемостью материалов, вторая - с динамическим возвратом (отдыхом), обуславливающим тепловой эффект пластической деформации  $q$ . Интенсивность указанных тенденций определяется скоростью накопления в деформируемых объемах скрытой энергии  $\dot{u}_e$  и мощностью теплового эффекта пластической деформации  $\dot{q}$ . С учетом реального (не единичного) размера трибоконтакта  $V_f$  уравнения энергетического баланса трения [3] для работы (мощности) трения  $W_f$ , силы трения  $F$  и коэффициента трения  $\mu$  (без смазки) имеют вид

Фёдоров Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теория механизмов, машин и деталей машин» Калининградского государственного технического университета. E-mail: fedorov@klgtu.ru.

$$W_f = F \cdot l = \Delta U_e + Q = \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + \Delta U_{T1} + \Delta U_{T2} + \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2, \quad (1)$$

$$\dot{W}_f = F \cdot v = \dot{U}_e + \dot{Q} = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{U}_{T1} + \dot{U}_{T2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2, \quad (2)$$

$$F_l = \frac{\Delta U_e}{l} + \frac{Q}{l} = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2}}{l} + \frac{Q_1 + Q_2}{l}, \quad (3)$$

$$F_v = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}}{v} + \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{v} = F_{mechanical} + F_{molecular}, \quad (4)$$

$$\mu_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2}}{Nl} + \frac{Q_1 + Q_2}{Nl} = \mu_{adapt} + \mu_{dis} = \mu_{adapt} + \mu_{T(dis)} + \mu_{\bar{Q}(dis)}, \quad (5)$$

$$\mu_v = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}}{Nv} + \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{Nv} = \mu_{deformation} + \mu_{adhesion}, \quad (6)$$

где  $\Delta U_{e\Sigma} = \Delta u_e V_f = \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2}$  и  $\dot{U}_{e\Sigma} = \dot{u}_e V_f = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}$  - изменение и скорость изменения накопленной скрытой энергии в контактных объемах пары трения;  $Q_\Sigma = Q_1 + Q_2$  и  $\dot{Q}_\Sigma = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2$  - тепловой эффект трения и его мощность;  $V_{f1}, V_{f2}$  - контактные (деформируемые) объемы материалов пары трения;  $\mu$  - коэффициент трения;  $\mu_{adapt}$  - адаптивный коэффициент трения;  $\mu_{T(dis)}$  и  $\mu_{\bar{Q}(dis)}$  - статическая и динамическая компоненты диссипативного коэффициента трения;  $\Delta U_T$  - изменение тепловой составляющей внутренней энергии;  $N$  - нормальная сила;  $l, v$  - путь (скорость) трения. Изменение плотности скрытой энергии  $\Delta u_e$  является интегральным параметром трибосостояния и повреждаемости (разрушения ( $\Delta u_e^*$ )).

Уравнения энергетического баланса трения (в данном случае для трения без смазки) как обобщенные уравнения трения адекватны современным двойственным представлениям о трении.

Молекулярно-механическая и деформационно-адгезионная теории трения удачно формализуются уравнениями баланса, в которых две принципиальные составляющие, связанные с накоплением скрытой энергии  $\Delta U_{e\Sigma}$  и высвобождением энергии  $Q_\Sigma$  отражают существо одновременно действующих, взаимосвязанных и противоположных тенденций на деформируемом контакте.

Энергетическая интерпретация коэффициента трения Г. Амонтова (Леонардо да Винчи) следует [3] из этих уравнений как частный случай их записи для граничных условий трения, характерных усло-

виям трения первых исследователей, а именно, когда нагрузки  $N$  и скорости  $v$  малы и тепловым эффектом трения  $Q$  можно пренебречь:

$$\mu = \frac{\Delta U_e}{Nl} = \frac{F}{N}; F = \frac{\Delta U_e}{l}; Q \cong 0. \quad (7)$$

С учетом основного вывода общей эргодинамики деформируемых тел [4-5] о том, что составляющая деформационных процессов, связанная с накопленной скрытой энергией различного рода элементарных дефектов и повреждений структуры деформируемого объема, отражает истинное его структурное состояние, мы можем рассматривать коэффициент трения как истинный параметр самого процесса трения [3].

Строгий анализ самих уравнений (5), (6) для коэффициента трения показывает, что этим уравнениям должен быть адекватен эксперимент трения в виде кривых трения типа  $\mu = \mu(N, v)$ . Соответственно, это знаменитые, экспериментальные кривые П. Конти, которые, по его мнению, отражают существо нового закона трения, определяющего переход трения через его максимум. Справедливость идеи П. Конти подтверждается последующими обобщениями эксперимента трения, выполненными научными школами И.В. Крагельского, Б.И. Костецкого, Wapatabe и др.

Действительно, рост коэффициента трения на подобных кривых трения можно объяснить преобладающим действием механизмов деформации, контролирующих накопление скрытой энергии и, соответственно, ростом сопротивления перемещению; наоборот, облегчение процессов скольжения (понижение величины коэффициента трения) следует связывать с преобладающим вкладом в процесс деформации механизмов, контролирующих эффекты высвобождения и рассеяния накапливаемой энергии.

Следовательно, анализ закономерностей эволюции трибосистем это, прежде всего, анализ закономерностей изменения накопленной скрытой энергии  $\Delta U_{e\Sigma}$ , т.е. изменения коэффициента трения Леонардо да Винчи.

В общем случае закономерности адаптивно-диссипативной эволюции состояний и свойств контакта трения (элементарной трибосистемы) отражены [3] в виде диаграммы трущихся поверхностей (рис. 2), на которой существуют точки (1-5) переходных состояний трибосистемы при её эксплуатации в функции главных эксплуатационных параметров  $N$  и  $v$ , при прочих равных условиях (физико-химическая природа трибоматериалов и окружающей среды).

На рис.2 можно видеть следующие условно обозначенные точки переходных состояний трибосистемы и эволюционные 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; 3 - точка минимальной совместимости (максимальной фрикционности); 1-2-3 - область приспособления (адаптации) и самоорганизации; 3-4<sup>1</sup> - участок совместимости; 4 - точка безызносности (аномально-низкого трения); 5 - точка термического схватывания.

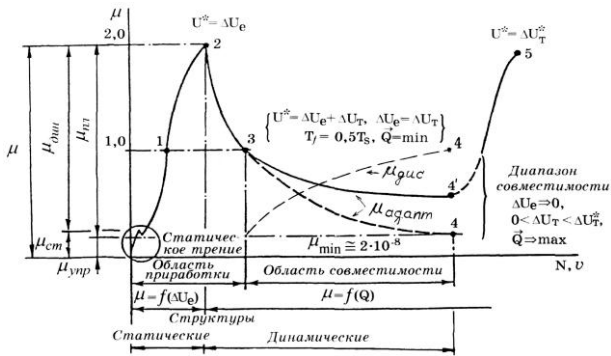


Рис. 2. Структурно-энергетическая диаграмма эволюции трущихся поверхностей [3].

На первом этапе адаптации трибосистема приспособляется, реализуя предельное состояние  $\Delta U_e = \Delta U_e^*$  с формированием предельного (наименьшего) критического объема трения  $V_f^*$ . Соответственно, это есть этап формирования самой элементарной трибосистемы, как трансформатора энергии. На втором этапе адаптации трибосистема эволюционирует при постоянстве этого критического (равновесного) объема трения за счет структурного приспособления. Условно (рис. 3), мы имеем уменьшение доли адаптивного объема трения  $V_{adapt}$  и рост диссипативного объема  $V_{dis}$  (диапазон совместимости на рис. 2), т.е.  $V_f^* = V_{adapt} + V_{dis}$ .

Для анализа задач износа рассматривается модель [3] движущегося критического (равновесного) объема трения (рис.3), когда мгновенное значение работы трения  $\dot{W}_{f_i}$  связывается с работой трения  $\dot{W}_f$  в единицу времени с учетом равномерного распределения контактов (микроударов) в продольном  $n_v$  и поперечном  $n_f$  направлениях поверхности трения:

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{f_i} n = \dot{W}_{f_i} n_H n_v = \dot{W}_{f_i} \frac{H}{l_f} \cdot \frac{L_v}{l_f} \quad (8)$$

Соответственно, имеем ряд соотношений для мощности, силы и коэффициента трения:

$$\begin{aligned} \dot{W}_f^* &= \dot{W}_{f_i}^* \cdot n = V_f^* \cdot \Delta u_e^* \cdot n = \\ &= V_{f_{ПРИВ}}^* \cdot \Delta u_e^* \cdot n_v, \end{aligned} \quad (9)$$

$$F^* = \frac{\dot{W}_f^*}{v} = \frac{V_f^* \cdot \Delta u_e^* \cdot n}{l_f \cdot n_v} = \frac{V_{f_{ПРИВ}}^* \cdot \Delta u_e^*}{l_f}; \quad (10)$$

$$\mu^* = \frac{\dot{W}_T^*}{N_{СОПР}^* \cdot v} = \frac{V_f^* \cdot \Delta u_e^* \cdot n}{N_{СОПР}^* \cdot v} = \frac{V_{f_{ПРИВ}}^* \cdot \Delta u_e^*}{N_{СОПР}^* \cdot l_f} \quad (11)$$

где  $V_{f_{ИДЕА}}^* = V_f^* \cdot n_H$ , (рис.3);  $\dot{W}_T^*$  - мгновенное (контактное) значение работы трения;

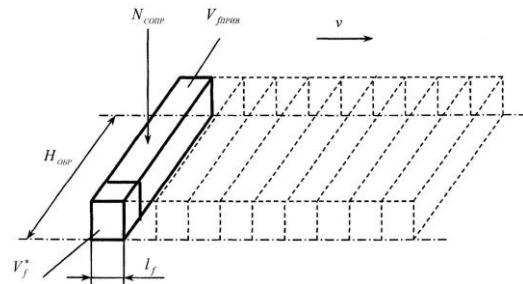


Рис. 3. Схема к расчету критических параметров трения [3].

$$n = \frac{V_f^t}{V_f} = n_v \cdot n_H - \text{отношение объема трения } V_f^t, \text{ деформируемого за единицу времени } t \text{ к мгновенному объему трения } V_f;$$

$n_v, n_H$  - число микроударов в направлении скольжения образца в единицу времени и в поперечном направлении.

Соотношение (11), приведенное к виду

$$\mu^* = \frac{h_r \cdot \Delta u_e^*}{p_r \cdot l_f} = \frac{h_a \cdot \Delta u_e^*}{p_a \cdot B} \quad (12)$$

Представляет собой основное уравнение износа для области совместимого трения:

$$\tau_r = \frac{h_r}{l_f} \Delta u_e^* = I_r \Delta u_e^*; \quad \tau_a = \frac{h_a}{B} \Delta u_e^* = I_a \Delta u_e^* \quad (13)$$

Здесь  $I_r, I_a$  - линейные интенсивности изнашивания, отнесенные к реальной и номинальной площадям контакта;  $B$  - размер образца в направлении скольжения.

При трении со смазкой анализ трения учитывает комплекс свойств смазочного материала, главным из которых является способность сопротивляться ее разрушению.

В соответствии с современными энергетическими (термодинамическими) представлениями о прочности и разрушении материалов [4-6], имеющих фундаментальную природу, разрушение объема материала (критическая дефектность) наступает, когда плотность внутренней энергии  $u$  (потенциальной ( $u_e$ ) и тепловой ( $u_o$ ) составляющих) в этом объеме достигнет критического значения  $u^*$ , постоянного для данного материала. Критерий  $u^*$  является од-

нозначной и интегральной характеристикой предельной повреждаемости (дефектности) материала. Тепловое разрушение материала является частным случаем этого условия, когда изменение потенциальной энергии различного рода дефектов структуры материала ничтожно мало и им можно пренебречь. Температура, как известно, является количественной мерой макроскопического проявления изменения плотности тепловой (кинетической) составляющей  $u$  внутренней энергии материала.

Термодинамическое условие разрушения [4-6] имеет вид

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \Delta u = u^* \\ u_0 &= u_{e0} + u_{T0} \\ \Delta u &= \Delta u_e + \Delta u_T. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь  $u_0 = u_{e0} + u_{T0}$  - плотность внутренней энергии материала в исходном состоянии;  $u_{e0}$ ,  $u_{T0}$  потенциальная (скрытая) и тепловая составляющие, при  $t = 0$ ;  $\Delta u = \Delta u_e + \Delta u_T$  - изменение плотности внутренней энергии материала в процессе трения,  $\Delta u = \Delta u_e + \Delta u_T$ ;  $\Delta u_e$ ,  $\Delta u_T$  - изменение потенциальной и тепловой составляющих внутренней энергии при трении.

Если учесть кинетические особенности накопления внутренней энергии жидкими материалами (маслами), т.е. величины плотностей скрытой энергии  $u_{e0}$  и  $\Delta u_e$  с достаточной для практических целей точностью принять равными нулю, то условие разрушения (1) примет вид

$$u_T = u_{T0} + \Delta u_T = u_T^*. \quad (15)$$

Данное условие [7] является энергетическим условием разрушения масляной пленки в контакте, согласно которому пленка разрушается, когда плотность тепловой (кинетической) энергии  $u_T$  в ее объеме достигает критического значения  $u_T^*$ . При этом масло теряет свою смазывающую способность и трение со смазкой переходит в режим трения без смазки.

За условие отсутствия схватывания вследствие разрушения смазочной пленки принимается соотношение

$$u_{\dot{\delta}} = u_{\dot{\delta}0} + \Delta u_{\dot{\delta}} < u_{\dot{\delta}}^*. \quad (16)$$

Полученное энергетическое условие схватывания хорошо согласуется с современными температурными представлениями о схватывании, и имеет, например, возможность трансформироваться в известное соотношение Х. Блока для критической температуры  $\dot{\delta}^*$  заедания

$$T = T_0 + \Delta T < T^*. \quad (17)$$

Здесь

$$\Delta u_T = \rho \cdot \bar{c}_p \Delta T = \int_{T_0}^{T^*} \rho \cdot \bar{c}_p dT; \quad (18)$$

$$u_{T0} = \rho \cdot \bar{c}_p T_0 = \int_0^{T_0} \rho \cdot \bar{c}_p dT; \quad (19)$$

$$u_T^* = \rho \cdot \bar{c}_p T^* = \int_0^{T^*} \rho \cdot \bar{c}_p dT. \quad (20)$$

Комплекс, рассмотренных выше соотношений для трения, основу которых представляет уравнение баланса трения, позволяет анализировать феномен трения в его противоречивой, диалектической сущности и решать широкий спектр практических задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 2001.- 664.
2. G. Fleischer: 40 Jahre Bewertung von Reibung und Verschleiss mit Hilfe der Energiedichte. Tribologie und Schmierungstechnik (2004), 51 (3), 5–11.
3. Фёдоров С.В. Основы трибоэродинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. – Калининград: КГТУ, 2003. – 415 с.
4. Фёдоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел.-Ташкент: ФАН, 1979.-186с.
5. Фёдоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твёрдых тел.-Ташкент: ФАН, 1985.-168с.
6. Фёдоров В.В. Эргодинамическая концепция разрушения // Проблемы прочности, 1991.-№8.-С.48-58, №10.-С. 31-35.
7. Фёдоров С.В. Энергетические аспекты процесса схватывания трибосистем с различными подшипниковыми сплавами. – Калининград: КГТУ, 2005. – 237с.

### PRINCIPAL EQUATION OF FRICTION AND WEAR

© 2011 S.V.Fedorov

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad

Into frame of modern tribology the friction is interdisciplinary phenomenon and for analysis of very complex nature of friction we may to apply the generalized method of energy balance equations. In this article the energy interpretation of the coefficient of friction is proposed. Such interpretation allow us to understand, marked above, the complex and dialectical nature of friction.

Key words: friction energy balance, coefficient of friction, wear, lubrication

Fedorov Sergey Vasilyevich, Doctor of Technics, Professor, Head of the Department "Theory of the Mechanisms, Machines and Element of the Machines". E-mail: fedorov@klgtu.ru.