

01;05;12

О СВЯЗИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ИХ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

© Ю.П.Козырев, Б.М.Гинзбург, В.П.Булатов

В работах [1,2] было установлено, что линейная интенсивность изнашивания твердых тел I_h в условиях стационарного трения описывается эмпирическим соотношением:

$$I_h = K p_n, \quad (1a)$$

где K — постоянный коэффициент, p_n — контактное давление. Затем было показано, что в константу K входит твердость H изнашиваемого материала, в связи с чем уравнение (1a) может быть переписано в виде [3]:

$$I_h = \frac{k}{H} p_n. \quad (1b)$$

Однако и в этом случае физический смысл коэффициента k (называемого часто коэффициентом износа), его связь с материальными константами материала и условиями эксперимента, представлялись недостаточно раскрытыми.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы установить указанную связь, опираясь на представления неравновесной термодинамики, и на этой основе попытаться дать физическое обоснование для прогнозирования потенциальной износостойкости материалов в узлах трения до экспериментальной апробации последних.

В соответствии с работой [4] рассмотрим модель трибосистемы в виде одного трущегося тела и источника энергии, который не имеет массы. Такой подход правомерен для большинства используемых в технике узлов трения, когда износ одного тела намного больше (меньше) другого.

Если пренебречь изменением энтропии за счет деформационных процессов в зоне трения, то производство энтропии во времени в такой системе можно записать в виде [5]:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_1}{dt} - \frac{dS_2}{dt}, \quad (2)$$

где dS_1 — изменение энтропии за счет притока энергии в зону контакта; dS_2 — изменение энтропии за счет изнашивания с выходом частиц износа за границу трибосистемы.

В соответствии с работами [4,6] для неравновесных процессов изнашивания уравнение (2) можно записать в виде

$$\frac{dS}{dt} = V_e J_q \text{grad} \frac{1}{T} - S_m \frac{dm}{dt}, \quad (3)$$

где V_e — элементарный объем, в котором происходит изменение энтропии; J_q — поток энергии, входящий через контакт в трибосистему; T — температура; S_m — удельная энтропия изношенного материала (энтропия в единице массы); m — массовый износ.

Величину V_e можно оценить из соотношения

$$V_e = A_r \Delta h, \quad (4)$$

где Δh — средняя высота микронеровностей или размер частиц износа, A_r — фактическая площадь контакта.

Согласно работе [5], поток энергии $J_q = -\lambda \text{grad} T$ в трибосистеме определяется выражением

$$|\lambda \text{grad} T| = f p_n v, \quad (5)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; f — коэффициент трения; v — скорость скольжения.

Однако в выражении (5) не учитывается тот факт, что тепловой поток в трибосопряжении проходит через фактическую (а не номинальную) площадь контакта A_r кроме того, на поверхности контакта происходит формирование двух отдельных тепловых потоков через каждое из контртел. Поэтому в правой части выражения (5) должен присутствовать коэффициент $R < 1$, показывающий долю работы сил трения, формирующую поток энергии через рассматриваемое трущееся тело. Таким образом, выражение (5) можно записать в уточненном виде:

$$|\lambda \text{grad} T| = R \frac{f F_N v}{A_r}, \quad (6)$$

где F_N — нагрузка на узел трения. Подставив в (3) выражения (4) и (6), находим

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(f F_N v)^2 \Delta h R^2}{A_r T^2 \lambda} - S_m \frac{dm}{dt}. \quad (7)$$

Далее, учитывая, что в стационарном процессе величина энтропии остается постоянной, приравняем dS/dt нулю и получим:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(f F_N v)^2 \Delta h R^2}{A_r T^2 \lambda} = S_m \frac{dm}{dt}. \quad (8)$$

По определению [1] величина линейной интенсивности изнашивания $I_h = \frac{dV}{A_n dL}$, где dV — приращение объемного износа; dL — приращение пути трения; A_n — площадь номинального контакта.

Учитывая, что $dm = \rho dV$ и $dL = v dt$, где ρ — плотность изнашиваемого материала, а также принимая во внимание известные соотношения $A_r = F_N / \sigma_T$, $\sigma_T \approx H_B / 3$ (где σ_T — предел текучести, а H_B — твердость по Бринеллю), после простых преобразований находим, что величина линейной интенсивности изнашивания в стационарном режиме равна

$$I_h = \frac{f^2 H_B v \Delta h R^2}{3 T^2 S_m \rho \lambda} p_n. \quad (9)$$

Из сравнения выражений (16) и (9) находим выражение для величины коэффициента износа

$$k = \frac{f^2 H_B^2 v \Delta h R^2}{3 T^2 S_m \rho \lambda}. \quad (10)$$

Таким образом, коэффициент износа k зависит от многих факторов, среди которых можно выделить трибологические характеристики (f), термодинамические величины (S_m), параметры, характеризующие условия испытаний (R, v, T), характеристики некоторых свойств поверхности и объема материала ($\Delta h, H_B, \lambda, \rho$). Из выражения (10) видно, что при прочих равных условиях минимальное значение фактора $C = H_B^2 / \lambda \rho$ обеспечивает и более высокую относительную износостойкость данного материала. Как показывают элементарные оценки, наименьшая величина фактора C характерна для таких антифрикционных материалов, как медь и сплавы на основе олова (баббиты). Известно, что эти материалы обладают и высокой износостойкостью, что согласуется с полученными соотношениями.

Таким образом, в данной работе установлена связь коэффициента износа с рядом параметров, определяемых физическими свойствами материала, свойствами изготовленного из него образца и условиями его испытаний. Выделен комплекс объемных свойств изнашиваемого материала, на основании характеристики которых можно оценивать перспективность использования материалов в узлах трения.

Список литературы

- [1] Хрущов М.М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. М.-Л., 1946. 252 с.
- [2] Archard J.E. // J. Appl. Phys. 1953. V. 24. N 8. P. 981-988.
- [3] Комбалов В.С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. М., 1983. 205 с.
- [4] Klamecki B.E. // Wear. 1980. V. 58. № 2. P. 325-330.
- [5] Гершман И.С., Буше Н.А. // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 1. С. 61-70.
- [6] Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М., 1964. 456 с.

Институт проблем
машиноведения РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
6 августа 1996 г.