

УДК 621. 0

Венцель Е.С., д.т.н.; Щукин А.В., к.т.н.; Орел А.В. к.т.н.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

УРАВНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ С ПОЗИЦИЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Аннотация. Получено уравнение интенсивности изнашивания трибосопряжений с позиций неравновесной термодинамики. Показано, что интенсивность изнашивания прямо пропорциональна силе трения $F^{1/2}$ и обратно пропорциональна объемной концентрации частиц загрязнений смазывающего вещества (масла) $n^{3/2}$.

Анотація. Отримано рівняння інтенсивності зношування трибосполучень з позицій нерівноважної термодинаміки. Показано, що інтенсивність зношування прямо пропорційна силі тертя $F^{1/2}$ і зворотно пропорційна об'ємній концентрації частинок забруднень змащуючої речовини (мастила) $n^{3/2}$.

Abstract. The equation of intensity of wear of tribo-conjugations from positions of nonequilibrium thermodynamics is received. It is shown that the wear rate is directly proportional to the frictional force $F^{1/2}$ and is inversely proportional to the volume concentration of particles of lubricant (oil) $n^{3/2}$ contamination.

Постановка проблемы. При исследованиях процессов трения и изнашивания трибосопряжений необходимо рассматривать как термодинамическую систему, в которой реализуется деградация энергии макромеханического движения, то есть производится энтропия.

Разработке математических моделей интенсивности изнашивания трибосопряжений посвящены работы И.В. Крагельского [1], Б.И. Костецкого [2], Г. Польцера, Ф. Майсснера [3] и др. Разработанные этими учеными уравнения не учитывают термодинамические процессы, которые возникают при трении элементов трибосопряжений, их механохимические и реологические характеристики, свойства и состояние смазочного масла, количество и дисперсное состояние входящих в него частиц загрязнений и т.п. А.А. Литвиновым и А.Я. Шепелем [4] было разработано соответствующее обобщающее уравнение с учетом свойств смазывающей среды, но большинство параметров, входящих в это

уравнение, были неявными и сложными функциями. Именно потому представляется интересным составить уравнение интенсивности изнашивания трибосопряжений, которое связывало бы параметры поверхностей, смазывающей среды, а также качественный и количественный состав частиц загрязнений в ней (износа и пыли) с показателями трения и изнашивания с позиций классической термодинамики.

Целью этой работы является получение уравнения интенсивности изнашивания трибосопряжений с учетом термодинамических процессов, протекающих при трении.

Изложение основного материала. Для достижения этой цели примем во внимание то, что в соответствии с математической моделью Л.И. Бершадского [5] трибосопряжения включают в себя возбуждаемые объемы поверхностей трения и смазочные слои.

Разработка уравнения интенсивности изнашивания. Для термодинамического описания трибосопряжений запишем основное уравнение термодинамики в виде

$$T \cdot dS \geq dU - F \cdot dl - \mu \cdot dN, \quad (1)$$

где T – температура;

dS – полное изменение энтропии;

dU – изменение внутренней энергии;

F – сила трения;

dl – перемещение;

μ – химический потенциал;

dN – изменение количества частиц загрязнений в смазывающем масле в процессе изнашивания.

Для бесконечно малого объема V трибосопряжений может быть записана локальная формулировка основного закона термодинамики, для чего (1) делим на V под знаком дифференциала. Приняв во внимание, что в соответствии с уравнением (1) имеет место знак равенства тогда, когда оно описывает термодинамический процесс в физически бесконечно малом объеме, получим:

$$T \cdot d\left(\frac{S}{V}\right) = d\left(\frac{U}{V}\right)U - F \cdot d\left(\frac{l}{V}\right) - \mu \cdot d\left(\frac{N}{V}\right). \quad (2)$$

Введем следующие обозначения:

$\bar{S} = \frac{S}{V}$ – объемная плотность энтропии;

$\tilde{U} = \frac{U}{V}$ – объемна плотность внутренней энергии;

$\frac{N}{V}$ – объемная плотность частиц загрязнений в масле.

Отношение l/V можно выразить через интенсивность изнашивания

$$I = \frac{dV}{S_k \cdot dl}, \quad (3)$$

где dV – объем вещества, удаляемого с контактирующих поверхностей вследствие износа;

S_k – площадь контактирующих поверхностей.

Для конечного перемещения l и конечного объема V вещества, подвергнутого износу, имеем

$$\frac{l}{V} = \frac{1}{I \cdot S_k} \quad (4)$$

Тогда

$$d\left(\frac{l}{V}\right) = d\left(\frac{1}{I \cdot S_k}\right) \quad (5)$$

Используя введенные объемные характеристики, основное уравнение термодинамики в локальной форме для зоны интенсивного изнашивания может быть записано в виде:

$$T \cdot d\tilde{S} = dU - F \cdot d\left(\frac{1}{I \cdot S_k}\right) - \mu \cdot dN. \quad (6)$$

Для определения смысла химического потенциала μ по отношению к трибосопряжению уточним классическое определение этой величины $\mu = (dU / dN)_{S,V}$ в связи с тем, что частицы, удаляемые в процессе трения, не являются идентичными и объем трибосопряжения не постоянный. Полагая $\tilde{S} = const$ и $\tilde{U} = const$, получим следующее определение для μ :

$$\mu = -F \cdot \left[\frac{\partial \left(\frac{1}{I \cdot S_k} \right)}{\partial n} \right]_{\tilde{s}, \tilde{u}}, \quad (7)$$

где n – объемная концентрация частиц износа.

Для однородного трибосопряжения эта величина, которую можно назвать статистическим химическим потенциалом, равна

$$\mu = \frac{F}{n \cdot I \cdot S_k}. \quad (8)$$

В соответствии с основными положениями термодинамики неравновесных систем с величиной μ можно связать соответствующую термодинамическую силу. Если условиться о наименовании величин, входящих в (1) под знаком дифференциала, обобщенная координата (α_i), то силы \vec{X}_i можно определить по формуле

$$\vec{X}_i = grad \left(\frac{\partial S}{\partial \alpha_i} \right). \quad (9)$$

Каждой термодинамической силе \vec{X}_i линейной системе соответствует поток, плотность которого \vec{j} определяется соотношением

$$div j = -\frac{\partial \alpha_i}{\partial t}. \quad (10)$$

В предположении о линейной системе связь между силами и потоками будет иметь вид

$$\vec{j} = M \cdot \vec{X}, \quad (11)$$

где M – коэффициент пропорциональности, называемый кинетическим коэффициентом.

Можно показать, что соответствующему химическому потенциалу μ соответствует термодинамическая сила \vec{X}_N , равная

$$\vec{X}_N = \text{grad} \left(\frac{dS}{\partial N} \right) = -\text{grad} \left(\frac{\mu}{T} \right). \quad (12)$$

Подставляя в (12) значение μ из (8), получим

$$\vec{X}_N = \text{grad} \left(\frac{F}{n \cdot I \cdot S_k \cdot T} \right). \quad (13)$$

Поскольку из всех величин, стоящих под знаком градиента, лишь концентрация n зависит от координат (для однородного трибосопряжения), то

$$\vec{X}_N = -\frac{F}{S_k \cdot T \cdot n^2} \cdot \text{grad } n. \quad (14)$$

В соответствии с основными положениями термодинамики неравновесных систем термодинамической силе \vec{X}_N соответствует плотность потока частиц \vec{j}_N , равная

$$\vec{j}_N = \frac{dN}{S_k \cdot dt}. \quad (15)$$

Учитывая, что $dN = n dV$, а в соответствии с (3) $dV = I \cdot S_k \cdot dl$, находим, что

$$\vec{j}_N = n \cdot I \cdot \frac{dl}{dt} = n \cdot I \cdot \vec{V}. \quad (16)$$

где V – скорость перемещения.

В соответствии с (11)

$$\vec{j}_N = M_N \cdot \vec{X}_N. \quad (17)$$

Тогда с учетом (14) и (16) получим

$$n \cdot I \cdot \vec{V} = -M_N \cdot \frac{F}{I \cdot S_k \cdot T \cdot n^2} \cdot \text{grad } n. \quad (18)$$

Знак минус в этом уравнении указывает на то, что поток частиц износа направлен противоположно градиенту концентрации.

Поскольку $M_N = D^* \cdot T$ (D^* – коэффициент квазидиффузии) имеем

$$n \cdot I \cdot \vec{V} = D^* \cdot \frac{F}{I \cdot S_k \cdot n^2} \cdot grad n. \quad (19)$$

Откуда, приравнявая модули левой и правой частей этого уравнения, получим

$$I = n^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{\frac{D^* \cdot F}{\vec{V} \cdot S_k}} \cdot grad n, \quad (20)$$

По аналогии с представлениями молекулярно-кинетической теории выразим величину коэффициента квазидиффузии D^* через скорость частиц $V_{\text{ч}}$ и среднее расстояние λ , проходимое частицей износа. Очевидно, что $V_{\text{ч}}$ приближенно пропорциональна скорости V перемещения контактирующих поверхностей, а сам коэффициент D^* должен зависеть от твердости HB , шероховатости Δ , номинального давления P_N в зоне контакта и других параметров. В связи с этим можно предположить

$$D^* = f(HB; \Delta; P_N \dots) \quad (21)$$

где $f(HB; \Delta; P_N \dots)$ – неизвестная функция указанных параметров, которая, в принципе, не может быть определена из термодинамических соображений.

Функцию $f(HB; \Delta; P_N \dots)$ можно представить в виде степенного ряда, если подобрать соответствующий малый параметр. Поскольку в соответствии с (20) интенсивность изнашивания пропорциональна $\sqrt{D^*}$, а с другой стороны, она должна быть пропорциональна P_N и Δ и обратно пропорциональна HB , то коэффициент D^* также должен зависеть от P_N , Δ и HB . Эти три величины могут образовать безразмерный малый параметр δ , равный

$$\delta = \Delta \frac{P_N}{HB}. \quad (22)$$

Малость параметра δ обусловлена тем, что $P_N < HB$, а $\Delta < I$. Тогда функцию можно представить в виде ряда

$$f(\delta) = \sum_{i=0}^k a_i \delta^i \quad (23)$$

где a_i – безразмерный коэффициент, определяемый экспериментальным путем.

Подставляя это соотношение в (20) получим окончательное выражение для интенсивности изнашивания:

$$I = \frac{1}{n^{\frac{3}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{F \cdot \lambda}{S_k} \cdot grad n \cdot \sum_{i=0}^k a_i \cdot \delta^i}. \quad (24)$$

Из полученного выражения следует, что интенсивность изнашивания прямо пропорциональна силе трения $F^{1/2}$. При этом если в трибосопряжении, характеризующимся определенным объемом V , находится смазывающее вещество (масло) с определенной массой частиц загрязнений, то увеличение их числа N , приводящее к повышенной их объемной концентрации n , уменьшает интенсивность изнашивания обратно пропорционально $n^{3/2}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В.Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – К.: Техника, 1970. – 396 с.
3. Польцер Г. Основы трения и изнашивания / Г.Польцер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение. – 264 с.
4. Литвинов А.А. Обобщенное уравнение производства энтропии в трибосистеме с учетом свойств смазывающей среды / А.А. Литвинов, А.Я. Шепель // Сб. трудов Киевского института инженеров гражданской авиации «Исследование эксплуатационных свойств АВИАГСМ и спецжидкостей». – К.: КИИГА, 1987. – С. 39–41.
5. Бершадский Л.И. О взаимосвязи структурных механизмов и диссипативных потоков при кинетическом (некулоновском) трении и износе / Л.И. Бершадский // Трение и износ. – 1989. – Т.10, №2. – С. 358–364.
6. Гленсдорф Г. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / Г. Гленсдорф, И. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 280 с.