УДК 678.4.06:621.81

Обобщенная теория износа упруго-наследственных сред

А.С. Кобец, В.И. Дырда, профессора
Е.В. Калганков, старший преподаватель
И.Н. Цаниди, асистент

Наведено методику та результати визначення ступеня зносу матеріалу за енергетичним критерієм руйнування. Обчислено енергію руйнування в одиниці об'єму матеріалу $0{,}25\cdot10^{10}$ Дж/м^3. Пропонується отримані дані використовувати в розрахунку довговічності матеріалів.

Ежегодно в Украине переработке железных руд и строительных материалов подвержено более 100 млн тонн минерального сырья. Практически все это сырье перерабатывается в шаровых мельницах с резиновой футеровкой, на что уходит 50–70 % всей энергии. Поэтому создание энергосберегающей технологии путем оптимизации формы и расчета резиновых футеровок является государственной проблемой.

В данной ситуации одним из важнейших вопросов является создание теории износа (абразивно-усталостного разрушения резиновых футеровок).

Проблеме трения и износа твердых тел посвящены многочисленные научные издания. В разное время этой проблемой занимались ученые И.В. Крагельский, М.М. Резниковский, Г.М. Бартенев, Д.Н. Гаркунов, В.Ф. Евстратов, Н.С. Пенкин, В.Г. Копченков, Е.Ф. Непомнящий, Е.Ф. Чижик, П.А. Ковалёв, М.М. Хрущов; из зарубежных исследователей – A. Schallamach, Мур, Палмгрен, Нильсон, Утияма, К. Грош и другие [1, 4–6].

В своих работах исследователи приходят к весьма важному выводу: для оценки механизмов разрушения резин необходима интегральная величина, т.е. интегральный информационный параметр, наиболее полно характеризующий разрушение футеровки в целом. По мнению авторов [1], интегральной величиной для оценки механизмов разрушения может служить энергия разрушения от абразивно-усталостного механизма износа. Такой приём в последние годы получил довольно широкое распространение как для резин [2], так и для других материалов.

Анализ научных литературных источников по трению и износу твердых тел [1–3], показывает полное отсутствие какой-либо теории, которая описывала бы абразивно-усталостный износ упруго-наследственных сред с точек зрения энергетической и использования первого начала термодинамики. Ранее с учётом энергетического критерия рассматривалась синергетическая модель разрушения упруго-наследственной среды и обобщённый критерий расчёта её долговечности [1]. Было получено уравнение для определения долговечности t^* локального объёма в виде

$$\Delta U_p^* = \Delta U_y^* + \Delta U_{из}^* = \int_0^{t^*} (\sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{q} + \dot{\xi} + \dot{\chi})dt, \qquad (1)$$

где ΔU^*_p – приращение энергии разрушения резины;

ΔU^*_y, $\Delta U^*_{из}$ – приращение энергии разрушения соответственно от усталостного механизма и от абразивного износа;

$\dot{q}$ – тепловой поток;

$\dot{\xi}$, $\dot{\chi}$ – энергия разрушения соответственно от абразивного износа и от действия внешней активной среды.

Первая составляющая этого уравнения ΔU^*_y подробно описана в работах [2, 3]; вторая $\Delta U^*_{из}$ представляет собой часть энергии, идущей на разрушение поверхностного слоя резины от абразивного износа. В научной литературе данные о величине такой энергии отсутствуют.

Целью проведенных нами исследований явилось построение обобщенной теории абразивно-усталостного износа упруго-наследственных сред с помощью двухкритериального уравнения долговечности.

Ниже будет приведена методика построения алгоритма определения энергии разрушения от абразивного износа и определение энергии разрушения $\Delta U^*_{из}$ при прямых экспериментальных исследованиях для наполненных резин.

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим абразивную составляющую этого довольно сложного многопараметрического процесса. Известно [1], что в основе абразивного износа лежат следующие составляющие: износ, обусловленный разрушением внутренних когезионных связей материала; адгезия, обусловленная молекулярными силами; деформация, вызванная преимущественно диссипативными силами.

Современные возможности эксперимента позволяют выделить в основном адгезионную составляющую износа, которая обусловлена разрывом "молекулярных агрегатов". Воспользуемся термином "агрегат резины", более подходящим для процесса макроразрушения при абразивном износе резины.

Примем следующие важные допущения, которые не искажают общих представлений о механизме разрушения резины вследствие абразивного износа и не выходят за рамки принятой феноменологической модели:

● между матрицей и контртелом существует однородное относительное скольжение со скоростью V;

● температура в зоне контакта не превышает допускаемую(T < [T]) для рассматриваемого типа резины;

● для исследуемого процесса характерна совместимость с принципом эквивалентности скорости и температуры, т.е. величина A (V,T), зависящая от скорости и температуры, подчиняется принципу температурно-временной суперпозиции (так называемое уравнение ВЛФ–Вильямса–Ландела–Ферри) [2, 4, 5].

● отрыв агрегата резины от матрицы, т.е. разрыв связи происходит в то время, когда энергия, накопленная агрегатом во время процесса износа, достигнет некоторого критического значения U_0;

● для исследуемой резины функция релаксации агрегатов известна и определяется свойствами материала. При этом, зная релаксационную функцию и закон смещения двух находящихся в контакте материалов (однородное относительное скольжение с заданной скоростью), на основании интеграла

Больцмана можно получить уравнение силы связи для элементарного агрегата, что позволит вычислить силу трения (износа) как среднее значение сил связи.

При известном динамическом пределе одной связи (эту величину можно найти экспериментально, исходя из величины трения при скоростях, близких к скорости при нулевом скольжении), полученной силе износа и согласно энергетическому критерию разрушения, можно определить критическую энергию разрушения резины при абразивном износе.

Энергетический критерий разрушения резины при абразивном износе. При отрыве агрегата резины от матрицы предполагается, что функция релаксации резины $r(t)$ известна, т.е. известны механические параметры резины; между загрузкой и футеровкой существует однородное относительное движение в большинстве случаев с постоянной и ограниченной малыми величинами скоростью – V. Следовательно, используя интеграл Больцмана, можно получить уравнение силы связи для элементарного агрегата резины и затем определить силу трения (износа) как среднее значение сил связи.

Пусть n – общее число агрегатов, подвергающихся действию сил связи вблизи поверхности контакта; n_0 и n_1 – число агрегатов соответственно в связанном и свободном (т.е. после разрыва) состоянии; t_0 и t_1 – время, в течение которого агрегат находится соответственно в связанном и свободном состоянии; эти величины связаны статистическими соотношениями

$$\frac{n_0}{t_0} = \frac{n_1}{t_1} = \frac{n}{t_0 + t_1}. \qquad (2)$$

Предположение, что время, в течение которого агрегат находится в свободном состоянии, пропорционально времени релаксации τ агрегата,

$$t_1 = a\,\tau,$$

где a – некоторая постоянная; будет справедливо, если время, необходимое для достижения агрегатом известного динамического уровня, принять пропорциональным τ, а смещение при этом будет пропорционально скорости V.

С учётом приведенных предположений силу связи $f\ (t)$ агрегатов определим, пользуясь интегралом Больцмана,

$$f(t) = V\int_0^t r(t-t')dt'. \qquad (3)$$

Динамический предел связи f_0 одного агрегата резины получим экспериментально, исходя из величины трения при скоростях, близких к скорости при нулевом скольжении (например применяя смазку), из выражения

$$f_0 = \frac{2F(0)}{n_0},$$

где $F(0)$ – сила трения при нулевом скольжении.

Предполагая, что связь между агрегатами резины исчезает, когда сила достигает величины f_0, уравнение (3) можно записать в виде

$$f\,(t_0) = f_0. \qquad (4)$$

В этом случае общая сила трения как среднее значение сил связи агрегатов, находящихся в контакте с контртелом, будет

$$F = \frac{n_0}{t_0}\int_0^{t_0} f(t)dt. \qquad (5)$$

Положим [1], что резина характеризуется функцией релаксации вида

$$r\,(t) = E_0\,(1 - be^{-t/r}), \qquad (6)$$

где E_0 – модуль упругости резины;

τ – время релаксации;

b – некоторая постоянная;

t – текущее время.

Элементарную силу связи каждого агрегата определим с учетом релаксационной функции (2) из выражения

$$f\,(t) = vtE_0 + \tau vbE_0 - vbE_0\,\tau e^{-t/r}. \qquad (7)$$

Вводя обозначения

$$L = v \cdot \tau \text{ и } \alpha = t\,/\,\tau, \qquad (8)$$

где L – длина релаксации агрегата молекул материала; τ – время релаксации, зависимость (7) будет иметь вид

$$f\,(t) = LE_0\,[\alpha + b\,(1 - e^{-\alpha})].$$

Величины τ и L (по порядку значений) совпадают: длина релаксации L – со средней длиной свободного пробега агрегатов резины, а время релаксации τ – со средним временем их свободного пробега [4].

С учётом принятых обозначений (8) из условия (4) находим

$$f_0 = f\,(t - t_0) = E_0L\,[\alpha + b\,(1 - e^{-\alpha})]$$

и, пользуясь уравнением высшего порядка

$$L = \frac{f_0}{E_0}[\alpha_0 + b(1 - e^{-\alpha_0})]^{-1},$$

можно определить t_0, а также α_0.

Силу трения F, как общую силу, рассчитаем усреднением сил связи агрегатов резин по формуле

$$F = \frac{n_0}{t_0}\int_0^{t_0} f(t)dt. \qquad (9)$$

После интегрирования уравнение общего трения (9) будет иметь вид

$$F = \frac{n_0E_0L}{\alpha_0}\left[\frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1)\right],$$

или с учётом выражения (2)

$$F = \frac{nE_0L}{\alpha_0 + a}\left[\frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1)\right]. \qquad (10)$$

С учётом изложенного можно утверждать следующее: энергетический критерий разрушения резины постулирующий, что разрыв связи агрегата с матрицей происходит, когда энергия, накопленная агрегатом во время износа резины, достигает некоторого критического значения U_0, определяет величину t_0 согласно уравнению

$$U_0 = V\int_0^{t_0} f(t)dt,$$

или с учётом (5), (8)

$$U_0 = \frac{Vt_0F}{n_0}. \qquad (11)$$

Согласно принятой пропорциональности (2)

$$\frac{n_0}{t_0} = \frac{n}{t_0 + t_1} = \frac{n}{\alpha_0\tau + a\tau} = \frac{n}{\tau(\alpha_0 + a)},$$

зависимость (5) преобразуется к виду

$$U_0 = \frac{L(\alpha_0 + a)}{n}F, \qquad (12)$$

или через силу трения

$$F = \frac{nU_0}{L(\alpha_0 + a)}. \qquad (13)$$

Для резины, функция релаксации которой имеет вид (6), с учётом вычисленного интеграла (10), выражение для параметра L по зависимостям (12) или (13) запишем как

$$L = \sqrt{\frac{U_0 / E_0}{\frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1)}}.$$

Исследование изменения силы трения F как функции скорости $F(L)$ проводим решением системы уравнений

$$\begin{cases} L = \sqrt{\dfrac{U_0 / E_0}{\frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1)}}; \\ F = \dfrac{nU_0}{L(\alpha_0 + a)}. \end{cases}$$

Таким образом, для наполненных резин при абразивно-усталостном механизме износа определение энергии разрушения целесообразно проводить по формуле (11) при известной релаксационной кривой и экспериментально найденных параметрах износа модельных образцов.

Экспериментальные исследования наиболее целесообразно проводить согласно ГОСТ 426-77 (Метод определения сопротивления истиранию при скольжении) [5]. С этой целью использовали экспериментальный стенд МИ-2 и стандартные образцы из футеровочной резины 541933-1 размером 20×20×8 мм; образцы присоединяли к специальной рамке-держателю и истиралина шлифовальной шкурке (ГОСТ 344-74). Для статистической обработки данных проводили не менее девяти испытаний. Таким образом получены результаты: сила трения F = 16 Н; время истирания t = 150 с; скорость истирания V = 0,285 м/с; количество частиц износа $n = 60 \cdot 10^3$ (усреднённое значение по результатам девяти испытаний); усреднённая масса частиц – 0,5 г; при усреднённом диаметре частиц d = 0,4 мм количество частиц в одном кубическом метре $n^* = 22{\cdot}10^9$ 1/м^3.

В этом случае энергия разрушения для одного фрагмента резины (т.е. энергия отделения его от матрицы) согласно уравнению (11) составит

$$U_0 = \frac{F \cdot V \cdot t}{n} = \frac{16 \cdot 0{,}285 \cdot 150}{6{,}0 \cdot 10^3} = 114 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Плотность энергии разрушения от абразивного износа, т.е. энергия разрушения в единице объёма материала, будет

$$\Delta U_{из} = U_0 \cdot n^* = 114 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \cdot 10^9 = 0{,}25 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3.$$

Выводы

1. Располагая энергией разрушения от усталостно-механического и от абразивного износа, используя уравнение для определения долговечности t^* локального объема, (1), можно расчитать долговечность материала.

2. Полученную для резины 541933-1 плотность энергии разрушения и при температурах $T \le [T]$ можно считать постоянной материала; для дальнейших расчётов долговечности реальных конструкций резиновых футеровок при абразивно-усталостном механизме износа принята величина энергии разрушения: $\Delta U_{из} = 0{,}25 \cdot 10^{10}$ Дж/м^3.

3. Изложенная теория может быть использована для различных материалов (полимеров, металлов и др.).

Библиография

1. *Чижик Е.Ф.*Защитные футеровки барабанных рудоизмельчительных мельниц / *Чижик Е.Ф., Маркелов А.Е., Дырда В.И.* – Днепропетровск, 2002. – 204 с.

2. *Дырда В.И.* Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях / *В.И. Дырда*. – К. : Наук. думка, 1988. – 239 с.

3. Прикладная механика упругонаследственных сред: [в 3 т.] / [*Булат А.Ф., Дырда В.И., Звягильский Е.Л., Кобец А.С.*]. – К. : Наук. думка, 2011 (Механика деформирования и разрушения эластомеров). – Т. 1. – 568 с.

4. *Schallamach A.* Recent advances in knowledge of rubber friction and tire wear / *A. Schallamach* // Rubber chem. technol. – 1968. – 41. – P. 200–444 с.

5. *Grosch K.A.* Viscoelastic properties and the friction of solids. Friction of polymers: Influence of speed and temperature / *K.A. Grosch* // Nature. – 1963. – 197. – P. 856–863с.

6. *Schallamach A.* A theory of dynamic rubber friction / *A. Schallamach* // Wear. – 1963. – 6. – P. 375–386.

7. ГОСТ 426-77. Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении; [Введ.01.01.78 до 01.01.90]. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 9 с.