

## ПРОБЛЕМЫ ТРИБОЛОГИИ

УДК 669.1.002.5-192

А. В. Анцупов, В. П. Анцупов, А. В. Анцупов (мл.), М. В. Налимова, А. С. Губин

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При аналитической оценке фрикционной надежности узлов трения математическое ожидание изменения величины линейного износа во времени обычно представляют с помощью линейной динамической модели [1, 2]

$$M[\Delta h(t)] = M[\Delta h(0)] + M[\Delta h'] \cdot t, \quad (1)$$

а вероятность безотказной работы трибосопряжений определяют [1] выражением

$$P(t) = \Phi \left( \frac{[\Delta h] - M[\Delta h(0)] - M[\Delta h'] \cdot t}{\sqrt{D[\Delta h(0)] + D[\Delta h'] \cdot t^2}} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta h(0)$ ,  $\Delta h'$  – случайный линейный износ на стадии приработки и скорость изнашивания (нормально распределенные случайные величины, не зависящие от времени  $t$ );  $[\Delta h]$  – допустимая величина износа обычно детали из наиболее мягкого материала, определяющая работоспособность узла трения, например предельный зазор в сопряжении;  $\Phi$  – величина нормированной функции нормального распределения.

Для оценки математического ожидания обычно используют среднее арифметическое экспериментально определенное значение  $\bar{\Delta h}(t)$ , а для дисперсии – эмпирическую дисперсию  $S^2[\Delta h']$ .

Решение реализуют только для установившегося процесса, пренебрегая значением приработочного износа ( $\Delta h(0)=0$ ).

Аналитически скорость изнашивания  $\Delta h'$  поверхности трения в большинстве случаев выражают с помощью [1, 2] линейной интенсивности изнашивания  $I_h$

$$M[\Delta h'] = M[I_h \cdot V_{ск}], \quad (3)$$

где  $V_{ск}$  – скорость скольжения считают постоянной величиной.

Износостойкость поверхностей трения деталей из данного материала также определяют величиной  $I_h$

$$I = 1/I_h. \quad (4)$$

Полученное значение износостойкости по стандартным таблицам [2, 3] позволяет назначить класс и разряд износостойкости деталей.

Величину линейной интегральной интенсивности изнашивания  $I_h$  в уравнениях (3) и (4) определяют по «методике расчетной оценки износостойкости поверхностей трения деталей машин» И.В. Крагельского [3] как отношение средней толщины  $\Delta h$  изношенного на номинальной площади  $A_a$  объема материала  $\Delta V$  к совершенному пути трения  $L$ :

$$I_h = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\Delta V}{A_a \cdot L}. \quad (5)$$

В теории И.В. Крагельского предполагается усталостный механизм разрушения циклически деформируемого при трении объема поверхностного шероховатого слоя  $V_D$ , ограниченного некоторой площадью  $A_D$  поверхности тела, от которого после критического числа воздействий  $n_{кр}$  отделяется изношенный объем  $\Delta V_i$  средней толщины

$\Delta h_i = \frac{\Delta V_i}{A_D} = \frac{V_D}{n_{кр} \cdot A_D}$ . Для количественной

оценки  $I_h$  вводится основополагающая характеристика – удельная интенсивность усталостного изнашивания по аналогии с (5):

$$i_h = \frac{\Delta h_i}{\Delta l} = \frac{\Delta V_i}{A_D \cdot \Delta l} = \frac{V_D}{n_{кр} \cdot A_D \cdot \Delta l}, \quad (6)$$

где  $\Delta l = d$  – средний диаметр пятна касания.

Полагая, что на пути скольжения  $L$  площадь  $A_D$  воспроизводится на номинальной площади  $n=L/d$  раз, а концу пути изношенный объем  $\Delta V = \Delta V_i \cdot n$ , где  $n=n_{кр}$ , с учетом (5) и (6)

$$I_h = i_h \cdot \frac{A_D}{A_a}. \quad (7)$$

Для расчета деформируемого объема  $V_D$  и определения удельной и интегральной интенсивностей изнашивания в методике И.В. Крагельского принимается ряд допущений [3]:

– основополагающей является расчетная схема, согласно которой изнашиваемое тело – гладкое и деформируемое, изнашивающее – жесткое и шероховатое. Возможны модификации основной схемы, которые с использованием эквивалентных характеристик микрогеометрии и корректирующих множителей для физических свойств материалов сводятся к основной;

– за деформируемый объем  $V_D$  принимают объем внедренных в гладкое деформируемое изнашиваемое тело «жестких» микронеровностей изнашивающего контртела  $V_r$ , отсеченный фактической площадью  $A_D = A_r$ ;

– для расчета  $V_D = V_r$  используется уравнение опорной поверхности, начальный участок которой аппроксимируется степенной функцией  $A_r = A_a \cdot b \cdot \varepsilon^v$ , где  $\varepsilon = h^*/R_{max}$ ,  $h^*$  – относительная и абсолютная глубина внедрения микронеровностей,  $R_{max}$  – наибольшая высота неровностей профиля;  $b, v$  – параметры опорной кривой.

В этом случае с использованием (5), (6) и (7) интегральная интенсивность изнашивания [3]

$$I_h = \frac{h^*}{(v+1) \cdot n_{кр} \cdot d} \cdot \frac{A_r}{A_a} \quad (8)$$

Дальнейшее определение значений  $A_r, h^*, d, n_{кр}$  и подстановка их в выражение (8) дает, по мнению А.В. Чичинадзе [2], «громоздкие и малопригодные для инженерных расчетов выражения, позволяющие только качественно проследить влияние параметров на  $I_h$ ». По мнению самого автора [2], случайное рассеяние результатов также достаточно велико: с вероятностью не менее 90% средние ( $\bar{I}_h$ ) из десяти экспериментальных значений группируются вокруг расчетного  $I_{hp}$  в интервале  $0,04\bar{I}_h \leq I_{hp} \leq 2,6\bar{I}_h$ , то есть ошибка расчетов превышает 250–300%.

Очевидно, что по принятой схеме величина  $V_D$  значительно ниже действительного значения, так как в поверхностном слое обоих тел деформации распространяются под фактическую площадь  $A_r$ , на которой действует внешнее для обоих тел фактическое давление  $q_r$  контактирующих реальных шероховатых поверхностей.

В работах школы Г. Фляйшера линейную интенсивность  $I_h$  усталостного изнашивания с теми же допущениями предложено определять на основе энергетического подхода с использованием

мнимой плотности энергии  $e_r^*$  [1]. Однако значение ее в настоящее время аналитически оценить пока невозможно: ряд параметров, определяющих  $e_r^*$ , требует экспериментальных исследований; проблематичным также является точная оценка критических плотностей энергии деформации материала и разрыва молекулярных связей [1] как составляющих  $e_r^*$ .

В данной работе предлагается методика аналитической оценки вероятности безотказной работы и износостойкости деталей на основе энергетического подхода к усталостной теории, который реализуется в главном уравнении связи основополагающих для этих теорий показателей [1, 3]

$$I_\omega = \frac{I_h}{q_a \cdot f} = \frac{\Delta V}{A_a \cdot L} \cdot \frac{1}{q_a \cdot f} \quad (9)$$

где  $I_\omega$  – интегральная энергетическая интенсивность изнашивания поверхностей трения;  $q_a$  – номинальное давление в контакте;  $f$  – коэффициент трения.

На наш взгляд, перечисленные выше допущения при определении  $I_h$  можно скорректировать, а расчетные зависимости упростить, используя результаты исследований [4]. Автор более точно, на наш взгляд, определяет  $V_D$  как объем всесторонне сжатого материала, равный сумме нагруженных микрообъемов, возникающих под фактической площадью  $A_r$  всех микроконтактов в каждой детали. В них внутренние напряжения уравновешивают внешнее фактическое давление  $q_r$ . Именно в этих объемах, в первую очередь для тела из мягкого материала, на критической глубине могут возникнуть необратимые пластические деформации сдвига или усталостные разрушения при достижении максимальным касательным напряжением предельного значения. В этом случае, определяя  $V_D$ , его можно ограничить площадью контура  $A_c$ , равной сумме площадей сечений, нормальных к направлению действия  $q_r$  и определяемых диаметрами изохром первого порядка [4]. Суммарная относительная площадь, ограничивающая выход деформируемого объема  $V_D$  на поверхность [4]:

$$A_c/A_a = (q_a/\sigma_T)^{1-q_a/\sigma_T} \quad (10)$$

Используя тот же подход И.В. Крагельского к описанию усталостного механизма изнашивания, с учетом методики [4] оценки объема материала, отделяемого от деформируемого объема поверхностного слоя (удаляемого с площади контура  $A_c$ ) за одно воздействие на элементарном пути трения:

$$d(\Delta V) = \frac{A_c \cdot dL}{n_{кр}} \quad (11)$$

Так как на пути трения десятки и сотни тысяч воздействий, считая перемещение площади контура  $A_c$  по номинальной  $A_a$  непрерывным, получим объем материала, удаленный на пути трения  $L$  [4]:

$$\Delta V = \frac{1}{n_{кр}} \int_0^L A_c \cdot dL = A_c \cdot L / n_{кр} \quad (12)$$

Подставляя значение объема в условие (9) с учетом (10), получим выражение для определения интегральной энергетической интенсивности изнашивания:

$$I_\omega = \frac{(q_a / \sigma_T)^{1 - q_a / \sigma_T}}{q_a \cdot f \cdot n_{кр}} \quad (13)$$

Критическое число циклов до отделения частиц износа поверхностного деформируемого слоя при фрикционном взаимодействии можно определить, используя математическое описание кривой усталости материалов [4]:

$$n_{кр} = \begin{cases} 10^{\left(\frac{\sigma_B + \sigma_T}{\sigma_T} \cdot \frac{q_c}{q_a}\right)} & \text{при } 0 < q_c \leq \sigma_T; \\ 10^{\left(\frac{\sigma_B + 1}{\sigma_T}\right) \left(\frac{HB - q_c}{HB - \sigma_T}\right)} & \text{при } \sigma_T < q_c \leq HB, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $HB$  – предел прочности, предел текучести и твердость по Бринеллю материала поверхностного слоя изнашиваемой детали;  $q_c = \sigma_T (q_a / \sigma_T)^{(q_a / \sigma_T)}$  – давление на площади контура  $A_c$ , ограничивающей деформируемый  $V_D$  объем поверхностного слоя [4].

При описании кривой фрикционной усталости по условию (14) в качестве граничных приняты следующие условия:

– в начале кривой фрикционной усталости при давлении на площади контура  $A_c$ , равном минимально возможному значению  $q_{c\min} = 0,6922\sigma_T = \sigma_{-1\phi}$ , число циклов до отделения частиц износа будет максимальным

$n_{\max} = 10^{\left(\frac{\sigma_B + \sigma_T}{\sigma_T} \cdot \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1\phi}}\right)}$  для данного материала [4]. Величину  $\sigma_{-1\phi}$ , на наш взгляд, можно принимать за предел фрикционной выносливости поверхности трения детали из данного материала, как то минимальное напряжение в объеме  $V_D$ , при котором поверхностный шероховатый слой выдерживает максимальное количество циклов до отделения частиц износа;

– границу двух зон определяет значение давления  $q_c = \sigma_T$ , ограничивающее область упругих деформаций микронеровностей [4], которому соответствует число циклов до отделения частиц

$$n_{кр} = 10^{\left(\frac{\sigma_B + 1}{\sigma_T}\right)};$$

– при значении давления, равного твердости по Бринеллю  $q_c = HB$  [3], критическое число циклов  $n_{кр} = 1$ . Это условие определяет переход процесса усталостного разрушения к микрорезанию (пластическому или хрупкому отделению частиц деформированного объема [1, 2]) и обозначает правую границу зоны малоциклового усталости.

Коэффициент трения в выражении (13) определяется условиями нагружения в упругом, упругопластическом или пластическом контактах [2].

Особый интерес для практики представляет описание наиболее длительного периода работы узла трения – установившегося процесса, когда фрикционная система переходит из неравновесного состояния (приработки) в равновесное, характеризующееся стабильным (устойчивым) соотношением параметров микрорельефа поверхностей обоих тел. Возникающая конфигурация неровностей обеспечивает их упругое взаимодействие [4], минимальный коэффициент теплообразования и трения, который не зависит от нагрузки, и согласно [1]

$$f_{\min} = \sqrt{\frac{\tau_0 \cdot \alpha_T \cdot (1 - \mu^2)}{E}} + \beta, \quad (15)$$

где  $\tau_0$ ,  $\beta$  – удельная сдвиговая прочность и коэффициент упрочнения молекулярной связи двух твердых тел;  $\alpha_T$ ,  $E$ ,  $\mu$  – коэффициент гистерезисных потерь, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала изнашиваемой детали.

С учетом вышеизложенного, выражение (13) для установившегося процесса изнашивания примет вид

$$I_\omega^y = \left[ \sigma_{-1\phi} \left( \sqrt{\frac{\tau_0 \alpha_T (1 - \mu^2)}{E}} + \beta \right) \cdot 10^{\left(\frac{\sigma_B + \sigma_T}{\sigma_T} \cdot \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1\phi}}\right)} \right]^{-1} \quad (16)$$

Обратная  $I_\omega^y$  величина

$$I_\omega^y = \sigma_{-1\phi} \left( \sqrt{\frac{\tau_0 \alpha_T (1 - \mu^2)}{E}} + \beta \right) \cdot 10^{\left(\frac{\sigma_B + \sigma_T}{\sigma_T} \cdot \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1\phi}}\right)} \quad (17)$$

определяет «износостойкость» (по В.Д. Кузнецову [5]) поверхности трения изнашиваемой детали

и, на наш взгляд, может являться единой и однозначной характеристикой износостойкости материалов деталей для сравнения и выбора того или иного при проектировании узлов трения.

Значения физико-механических характеристик в уравнениях (13), (16), (17) следует определять в функции температуры узла трения, которую можно рассчитывать по известным методикам, в частности работы [3].

Математическое ожидание изношенного объема  $M[\Delta V(t)]$  и толщины изношенного слоя  $M[\Delta h(t)]$  в данном случае может быть определено на основе нелинейной динамической модели с использованием уравнения В.Д. Кузнецова [5] в функции  $I_\omega$  и величины совершенной в контакте работы сил трения  $A_{mp}(t) = N_{mp} \cdot t = F_{mp} \cdot V_{ck} \cdot t = Q \cdot f \cdot V_{ck} \cdot t$  ( $F_{mp}$ ,  $N_{mp}$  – сила и мощность трения,  $Q$  – нормальная сила) за время  $t$ :

при  $t \leq t_{np}$

$$M[\Delta V(t)] = M[I_\omega \cdot N_{mp}] \cdot t, \quad (18)$$

$$M[\Delta h(t)] = M[I_\omega \cdot q_a \cdot f \cdot V_{ck}] \cdot t; \quad (19)$$

при  $t > t_{np}$

$$M[\Delta V(t)] = M[I_\omega \cdot N_{mp}] \cdot t + M[I_\omega^y \cdot N_{mp}] \cdot t, \quad (20)$$

$$M[\Delta h(t)] = M[I_\omega \cdot q_a \cdot f \cdot V_{ck}] \cdot t + M[I_\omega^y \cdot q'_a \cdot f_{\min} \cdot v_{ck}] \cdot t, \quad (21)$$

где  $q'_a = 0,36788\sigma_T$  – номинальное давление, соответствующее контурному давлению  $q_c = q_{c \min}$  (см. пояснения к ф-ле (14)).

В приведенных выражениях  $t_{np}$  – время приработки, определяемое из условия достижения линейным износом  $M[\Delta h(t)]$  значения  $R_p$  – высоты сглаживания исходного профиля [4].

Вероятность безотказной работы сопряжения в этом случае

$$P(t) = \Phi \left( \frac{([\Delta h] - M[I_\omega \cdot q_a \cdot f \cdot v_{ck}] \cdot t_{np} - M[I_\omega^y \cdot q'_a \cdot f_{\min} \cdot V_{ck}] \cdot t)}{\sqrt{D[I_\omega \cdot q_a \cdot f \cdot V_{ck}] \cdot t_{np}^2 + D[I_\omega^y \cdot q_a \cdot f_{\min} \cdot v_{ck}] \cdot t^2}} \right) \quad (22)$$

Очевидно, что в выражениях (18)–(22) математическое ожидание износа и его дисперсия будут определены точностью средних значений и среднеквадратических отклонений задаваемых исходных данных: технологических параметров и физико-механических характеристик материалов.

#### Библиографический список

1. Расчет трения, износа и долговечности с позиций молекулярно-механической, усталостной и энергетической теорий / И.В. Крагельский, Г. Фляйшер, В.С. Комбалов, Х. Тум // Проблемы автоматизации и машиностроения. М.: Будапешт, 1986. № 12. С. 13–24.
2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В.Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В.Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
3. Методика расчетной оценки износостойкости поверхностей трения деталей машин / Под ред. Крагельского И.В. М.: Изд-во стандартов. 1979. 100 с.
4. Хохлов В.М. Расчет площадей контакта, допускаемых напряжений, износа и износостойких деталей машин. Брянск: БГТУ, 1999. 105 с.
5. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела: Материалы по физике внешнего трения, износа и внутреннего трения твердых тел. Т. 4. Томск: Полиграфиздат, 1947. 515 с.