

5. Шашок Ж.С., Липлянин П.К. Труды Белорусского государственного технологического университета. - Мн., 1994. С.74-77.

УДК 621.89

Рябинин В.А., асп.;  
Ревяко М.М., проф.;  
Шестаков В.М., доц.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ СРОКА СЛУЖБЫ ФРИКЦИОННОЙ ПАРЫ ТРЕНИЯ

Calculations of the energy estimation of the metal-polymeric couples of friction exploitation term were carried out.

Изучение научной литературы по трению и износу указывает на два подхода к механизму утраты работоспособности контактирующих пар трения усталостном и энергетическом.

Такое деление условно, т.к. оба подхода содержат одинаковые элементы и говорят об одном: износ возникает в результате накопления изменений в поверхностных слоях при трении любых материалов. Важно знать, при действии какой пороговой нагрузки эти изменения примут необратимый характер.

Трение и возникающий из-за этого износ зависят не только от геометрических, но и физико-механических свойств контактирующих материалов. Влияние температуры только активизирует эти процессы и определяется значением нагрузочных факторов - скорости, давления и условий трения.

Микрогеометрические характеристики состояния поверхностных слоев трения при обоих подходах учитываются лишь приблизительно, поскольку они формируются в результате определенной технологической обработки и последующей приработки. Ахматов указывает на формирование восьми слоев на свободной поверхности трения [1]. Особое значение приобретает седьмой наклепанный слой (некая аналогия пограничного слоя), благодаря которому и происходит энергообмен как внутри, так и вне зоны непосредственного контакта в узле трения. Вот почему при оценке износостойкости предпочтителен энергетический подход, не исключая усталостную природу нарушения поверхностной прочности трущихся материалов [2]. Сложность процесса износа позволяет говорить лишь об оценке срока службы металло-полимерных пар трения.

Алгоритм расчета срока службы пары трения металл - терморезистивная пластмасса сводится к следующему: проводится полный и подробный расчет параметров трения (текущие за известное время торможения значе-

ния коэффициентов трения  $f_{\text{тр}}$ , давления  $p(\tau)$ , скорости торможения  $V(\tau)$ , мощности торможения  $A(\tau)$ , коэффициентов тепловых потоков  $\alpha_{\text{тп}}$ , температурного поля с учетом внешнего теплообмена).

По статистическим данным подбирается величина удельной энергии  $A_{\text{уд}}$  разрушения поверхностных слоев при трении [3]. Затем подсчитывается величина тепловой мощности  $Q$ , кВт/м<sup>2</sup>, генерирующей при трении за полное время торможения  $\tau_0$ . Это значение удельной мощности на поверхности трения тормозной колодки сравнивается с ее допустимыми значениями. Если величина расхождения превышает 10 %, требуется анализ исходных массивов. В противном случае расчет продолжается.

Далее определяются значения удельных тепловых потоков  $Q_1, Q_2$ , отводимых в каждый элемент трущейся пары, коэффициент тепловых проводимостей  $KR$  в зоне контакта.

Рассчитываются величины работы трения на фрикционном контакте  $A_1, A_2$  каждого из материалов и производится оценка их скоростного износа  $V_1, V_2$ . Оцениваются конструктивный коэффициент трибосопряжения  $\eta_c$  и средняя суммарная скорость изнашивания  $US_{12}$  трибосопряжения. Выполняется оценка срока службы трибосопряжения с учетом конструктивного крепления тормозной колодки.

Формула для расчета значения теплового потока  $Q$ , кВт/м<sup>2</sup> генерирующего при трении, получена из следующих соображений.

Работа трения  $A$ , переходящая в теплоту за полное время  $\tau_0$ , будет определяться следующим образом:

$$A = \int_0^{\tau_0} f(\tau) \cdot p(\tau) \cdot V(\tau) \cdot dt, \text{ Дж/м}^2,$$

где  $f(\tau), p(\tau), V(\tau)$  - текущие значения соответственно коэффициента трения, давления и скорости за время торможения.

Если разбить полное время торможения на  $n$  одинаковых участков, номера которых  $j=1, n$ , тогда величина теплового потока  $Q$ :

$$Q = \frac{\Delta\tau_0}{\tau_0} \sum_{j=1}^n \bar{f}(j) \cdot \bar{p}(j) \cdot \bar{V}(j), \text{ Вт/м}^2,$$

где  $\bar{f}(j), \bar{p}(j), \bar{V}(j)$  - средние в пределах каждого временного участка значения коэффициентов трения, давления, скорости торможения;  $\Delta\tau_0$  - одинаковая продолжительность каждого участка, с.

Для общности расчетов можно вводить два значения - номера начального участка  $k1$  и номера конечного участка  $k2$ .

Приведем пример расчета для фрикционной пары: 16 ФКЛ (тормозная колодка) и спецсталь (тормозной барабан). Воспользуемся так-

же готовыми данными расчета для этой приработанной пары трения. Время однократного торможения  $\tau_0 = 4,115$  с. Продолжительность временного интервала  $\Delta\tau_0 = 0,5$  с. Коэффициенты распределения тепловых потоков:  $\alpha_1 = 0,09$  (колодка) и  $\alpha_2 = 0,91$  (барабан). Номинальные значения поверхностей трения  $Aa_1 = 0,054$  м<sup>2</sup> (колодка) и  $Aa_2 = 0,113$  м<sup>2</sup> (барабан). По условиям эксплуатации требуется погасить при торможении энергию в количестве  $A = 500$  кДж. Удельная энергия разрушения поверхностных слоев при трении:  $A_{уд1} = 2,96 \cdot 10^{15}$  Дж/м<sup>3</sup> и  $A_{уд2} = 35 \cdot 10^{15}$  Дж/м<sup>3</sup> - соответственно для колодки и барабана.

Для грубой оценки соотношения микронеровностей материалов колодки и барабана используются модули упругости:  $E_1 = 6,9 \cdot 10^9$  Па (колодка) и  $E_2 = 2,1 \cdot 10^5$  Па (барабан).

Последовательность расчета:

1. Величина теплового потока  $Q$ , кВт/м<sup>2</sup>, генерирующаяся при трении:

$$Q = \frac{\Delta\tau_0}{\tau_0} \sum_{j=k1}^{k2} f(j) \cdot p(j) \cdot \bar{V}(j), = 0,5/4,115 \cdot (0,21496,97229,3832 +$$

$$+ 0,248493,96227,6839 + 0,262490,9725,0688 +$$

$$+ 0,2742482,10312,7462 + 0,27415479,1837,37097 +$$

$$+ 0,2734476,2811,44217) = 2150,04 \text{ кВт/м}^2$$

$$\text{т.е. } Q \approx 215 \text{ Вт/см}^2$$

2. Допустимое значение удельной мощности трения для аналогичных условий эксплуатации  $NUD \approx 200$  Вт/см<sup>2</sup> [4].

Поскольку  $R = ABS[(Q - NUD)/Q] \cdot 100 = [(215 - 200)/215] \cdot 100 = 6,98 \% < 10 \%$  - расчет продолжается.

3. Величина теплового потока, отводимого в тормозной барабан:

$$Q_2 = (1 - \alpha_{тн1}) \cdot Q = (1 - 0,09) \cdot 2150,04 = 1956,53 \text{ кВт/м}^2$$

4. Величина теплового потока, отводимого в тормозную колодку:

$$Q_1 = Q - Q_2 = 2150,04 - 1956,53 = 193,51 \text{ кВт/м}^2$$

5. Относительный коэффициент тепловых проводимостей контактирующих тел:

$$K_p = Q_1/Q_2 = 193,51/1956,53 = 0,1$$

6. Коэффициент взаимного перекрытия поверхностей контакта:

$$K_{вз} = Aa_1/Aa_2 = 0,054/0,113 = 0,478$$

7. Величина работы трения, приходящейся на тормозную колодку:

$$A_1 = AK_p / (1 + K_p) = 500 \cdot 0,1 / 1,1 = 45,45 \text{ кДж}$$

8. Величина работы трения, приходящейся на тормозной барабан:

$$A_2 = A_1 / K_p = 45,45 / 0,1 = 454,5 \text{ кДж}$$

9. Скорость износа материала колодки, при которой нормальная эксплуатация узла трения не обеспечивается:

$$V_{p1} = Q K_p \cdot 10^3 / ((A_{уд1} (1 + K_p) \varphi) = 2150,04 \cdot 10^3 \cdot 0,1 / [(2,96 \cdot 10^{15} \cdot 1,1) \cdot 0,802] = 8,23 \cdot 10^{-11} \text{ м/с},$$

где  $\varphi = 0,802$  - коэффициент ослабления поверхностной прочности.

10. Предельная скорость износа материала барабана, при которой нормальная эксплуатация узла трения не обеспечивается:

$$V_{p2} = Q \cdot 10^3 / ((A_{уд2} K_p (1 + K_p)) = 150,04 \cdot 10^3 / (35 \cdot 10^{15} \cdot 1,1 \cdot 0,478) = 1,168 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$$

11. Расчетная величина скорости износа приработанного материала колодки:

$$V_1 = Q_1 \cdot 10^3 / A_{уд1} = 193,5 \cdot 10^3 / 2,96 \cdot 10^{15} = 6,538 \cdot 10^{-11} \text{ м/с}$$

12. Расчетное значение скорости износа приработанного материала барабана:

$$V_2 = Q_2 \cdot 10^3 / A_{уд2} = 1956,54 \cdot 10^3 / 35 \cdot 10^{15} = 5,59 \cdot 10^{-11} \text{ м/с}$$

13. Отношение шероховатостей материалов барабана и колодки:

$$E_{22} = (E_2 / E_1) / K_p = (2,1 \cdot 10^{11} / 6,9 \cdot 10^9) \cdot 0,1 \approx 3$$

14. Выбор сравнительной скорости износа  $V_{12}$ , м/с: если  $V_2 < V_1$ , тогда сравнительная скорость износа  $V_{12} = V_1$ , если  $V_2 > V_1$ , тогда сравнительная скорость износа  $V_{12} = V_2$ . Поскольку  $V_2 < V_1$ , в нашем случае  $V_{12} = V_1 = 6,538 \cdot 10^{-11} \text{ м/с}$ .

15. Отношение удельных энергий разрушения поверхностных слоев при трении барабана и колодки:

$$K_{c1} = A_{уд2} / A_{уд1} = 35 \cdot 10^{15} / 2,96 \cdot 10^{15} = 11,82$$

16. Значение средней суммарной скорости изнашивания трибосопряжения  $V_{12}$ :

$$V_{c12} = 0,5 (V_1 + V_2) = 0,5 (6,538 + 5,59) \cdot 10^{-11} = 6,06 \cdot 10^{-11} \text{ м/с}$$

17. Если абсолютная величина расхождения между средней суммарной скоростью изнашивания  $V_{c12}$  и сравнительной скоростью износа  $V_{12}$  менее 10 %, можно переходить к заключительной части расчета. В против-

ном случае требуется детальный анализ исходных данных. В нашем случае:

$$D_2 = \text{ABS}(V_{c12} - V_{12})/V_{c12} \cdot 100 = (|6,06 - 6,538|/6,06) \cdot 100 = 7,89\%$$

Поскольку  $D_2 = 7,89\% < 10\%$ , переходим к заключительной части расчета.

18. Оценка срока службы трибосопряжения:

а) Требуется ввести расчетную толщину  $V_{\text{расч}}$  тормозной колодки. Поскольку, часть толщины тормозной колодки используется для ее крепления  $V_{\text{расч}} < V_1$ . В нашем случае  $V_{\text{расч}} = 2$  мм.

б) Из ранее сделанного расчета видно, что расчетная скорость износа  $V_{\text{расч}}$  определяется двумя величинами:  $V_{12}$  - определяющая для колодки и  $V_{c12}$  - определяющая для фрикционной пары. Эти два значения можно использовать для определения границ срока эксплуатации тормозной колодки.

в) Срок эксплуатации тормозной колодки, по истечении которого колодку надо менять на новую, составит (в годах):

$$\begin{aligned} \tau_c &= V_{\text{расч}} / (V_{\text{расч}} \cdot 24 \cdot 365 \cdot 3600) = 2 / (10^3 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 3600 \cdot V_{\text{расч}}) = \\ &= (6,342/10^{11}) (1/V_{\text{расч}}) \end{aligned}$$

Для  $V_{\text{расч}} = V_{c12} = 6,06 \cdot 10^{-11}$  м/с значение  $\tau_c = 1,046$  года, для  $V_{\text{расч}} = V_{12} = 6,538 \cdot 10^{-11}$  м/с значение  $\tau_{c1} = 0,97$  года, т.е.

$$\tau_{c1} \geq \tau_c \geq \tau_{c2}$$

Значит, в данных условиях эксплуатации срок службы трибосопряжения находится между одиннадцатью и двенадцатью с половиной месяцами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. - М.: Физматгиз, 1963.
2. Протасов Б.В. Энергетические состояния в трибосопряжении и прогнозировании его долговечности. - Саратов: Саратовский государственный университет, 1979.
3. Костецкий Б.И. Фундаментальные закономерности трения и износа. - Киев, 1981.
4. Чичинадзе А.В. и др. Износостойкость фрикционных полимерных материалов. - Львов: Изд. гос. университета, 1989.