



ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАБОТЫ В ВАКУУМЕ

Канд. техн. наук В.А. Васин, доктор техн. наук Е.Н. Ивашов,
канд. техн. наук С.В. Степанчиков (МИЭМ, г. Москва)

Mногообразие технологических процессов производства изделий электронной техники, в основе которых во многих случаях лежат сложные физико-химические, электрофизические, термические и другие процессы, осуществляемые в контролируемой вакуумной среде, требует применения оборудования, в котором цикл обработки изделия в значительной степени или полностью совершается автоматически, с использованием приводных систем. Этим исключается влияние субъективных факторов на ход технологических процессов.

Функционирование приводных систем в высоком вакууме связано с введением в технологический объём пар трения, в которых кинематика относительного движения трущихся поверхностей обуславливает наличие в них либо пар трения покоя или скольжения, либо трения качения с проскальзыванием.

Для снижения трения и износа в элементах приводных систем в условиях вакуума, целесообразно использовать твердосмазочные композиционные покрытия, в которых в качестве связующего вещества используется эпоксидная смола в сочетании с твердой смазкой, например, дисульфидом молибдена или графитом, и газопоглотителем, например, цеолитом, силикагелем или алюмогелем. Такое твердосмазочное покрытие наносится на втулку подшипника скольжения или другие трущиеся детали. При этом остаточные, в вакуумной системе, газы адсорбируются газопоглотителем на поверхностях трения и образуют плотную пленку из адсорбированных молекул, которая снижает адгезионное взаимодействие и в сочетании с твердой смазкой уменьшает коэффициент трения и изнашивание поверхностей.

На рис. 1. представлены зависимости интенсивности изнашивания твердосмазочных композиционных покрытий, содержащих газопоглотитель – цеолит (CaA) и различные компоненты: графит (C) или дисульфид молибдена (MoS_2), связанные эпоксидной смолой (ЭС), от времени.

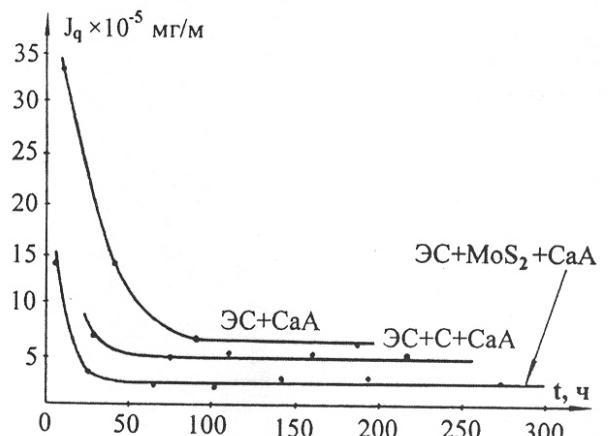


Рис. 1. Зависимости интенсивности изнашивания различных твёрдосмазочных композиционных покрытий от времени

Здесь интенсивность изнашивания определяется через интенсивность линейного изнашивания J_h :

$$J_q = \rho S J_h,$$

где ρ – плотность изнашиваемого материала; S – площадь трения.

Интенсивность изнашивания покрытий на основе газопоглотителя силикагель (КСМ-6) с различными компонентами приведена на рис. 2. На рис. 3. показаны зависимости коэффициентов трения предлагаемых покрытий от разрежения в вакуумной камере. Эксперименты проводились с подшипниками скольжения, на втулки которых наносились твердосмазочные покрытия.

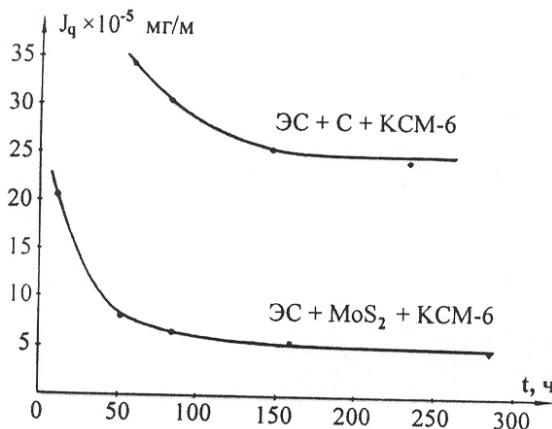


Рис. 2. Зависимости интенсивности изнашивания твёрдосмазочных композиционных покрытий на основе газопоглотителя силикагель (КСМ-6) с различными компонентами от времени

Одним из основных требований, предъявляемых к подшипникам скольжения элементов приводных систем, является обеспечение заданной точности. В связи с этим необходимо, чтобы изнашивание цапфы или втулки за определенный промежуток времени, для конкретных условий эксплуатации, не выходило за пределы допустимых значений, лимитирующих надежность подшипника скольжения по точности.

Оценка интенсивности изнашивания производится в зависимости от механических свойств материалов цапфы и втулки, микрогоеометрии контактирующих поверхностей и удельного давления в контакте.

Величина максимального удельного давления в контакте определяется по формуле

$$P_0 = P / 2R_u \cdot \ell, \quad (1)$$

где P - радиальная нагрузка на опору;

R_u - радиус цапфы;

ℓ - длина цапфы.

При оценке интенсивности изнашивания приняты следующие допущения:

1. Поверхность трения моделируется сферическими сегментами высотой R_{max} и радиусом R . Поверхности трения можно моделировать в виде сферы, цилиндра или конуса (рис. 4 а, б, в). Наиболее пригодной для

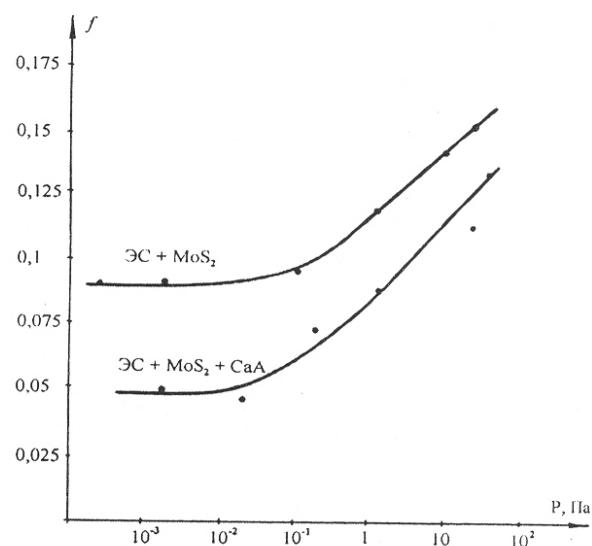


Рис. 3. Зависимости коэффициентов трения твёрдосмазочных композиционных покрытий от разряжения в вакуумной камере

расчетов на трение и изнашивание и предпочтительной является сферическая модель, которая обладает осевой симметрией, что особенно важно при рассмотрении проблем с учетом кинематики. При сферической модели осевая симметрия отражает изотропность трения. Две другие формы способны описать анизотропные эффекты. В этих формах нормальные напряжения на периферии (рис. 4 б) и в центре (рис. 4 в) пятна контакта являются неопределенными.

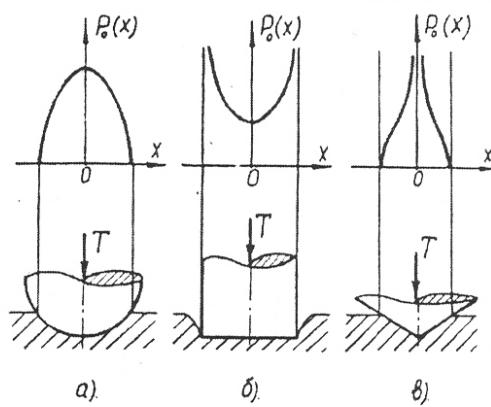


Рис. 4. Модели поверхностей трения

Однако сферическая модель, где микронеровности моделируются в виде полусфер, не всегда отражает картину реальной шероховатости. Поэтому моделируем поверхность трения в виде сферических сегментов,



форма которых близка к форме реальной поверхности.

2. Износ происходит в зоне вершин микронеровностей.

3. Влияние температуры в зоне трения учитывается изменениями механических свойств материалов.

4. Адгезионные свойства и физико-химические изменения поверхностных слоев не учитываются.

Интенсивность линейного изнашивания J_h определяется как средняя толщина изношенного слоя поверхности материала Δh удалённая с единицы пути трения L :

$$J_h = \Delta h / L. \quad (2)$$

Фактически материал удаляется лишь с реальных пятен касания, поэтому вводится понятие удельной интенсивности изнашивания i_h , величина которой выражается зависимостью,

$$i_h = \Delta h_1 / \ell, \quad (3)$$

где Δh_1 - средняя толщина изношенного слоя контакта;

ℓ - путь трения, равный диаметру пятна контакта.

Между интенсивностью изнашивания J_h и удельной интенсивностью изнашивания i_h существует следующая связь:

$$J_h = i_h \frac{A_a}{A_R}, \quad (4)$$

где A_a - фактическая площадь контакта;

A_R - номинальная площадь контакта.

Средняя толщина изношенного слоя шероховатой поверхности за одно нарушение фрикционной связи, в соответствии с рис. 5, может быть определена по формуле

$$\Delta h_1 = \frac{R - \sqrt{R^2 - a^2}}{N}, \quad (5)$$

где R - радиус единичной микронеровности, смоделированной в виде сферического сегмента;

a - радиус единичного пятна контакта;

N - количество циклов деформации до разрушения.

В соответствии с рис. 5 радиус основания сегмента при $R_{max} \ll R$ будет равен

$$r \approx \sqrt{2R \cdot R_{max}}, \quad (6)$$

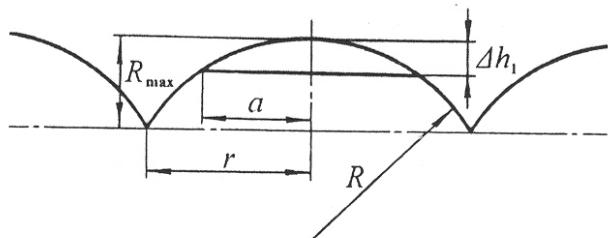


Рис. 5. Схема поверхностей трения, моделируемая сферическими сегментами равных радиусов

Расстояние между микровыступами двух шероховатостей равно $2r$.

Тогда сила, действующая на единичную микронеровность, равна

$$T = 4P_0 \cdot r^2. \quad (7)$$

Величина пятна контакта определяется по формуле

$$a = 0,883 \sqrt{\frac{T}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) R}, \quad (8)$$

где T - сила, действующая на единичную микронеровность;

E_1, E_2 - модули упругости материала цапфы и втулки;

R - радиус единичной микронеровности, смоделированной в виде сферического сегмента.

После подстановки выражений (6) и (7) в (8) получим для случая упругого контактного взаимодействия

$$a = 1,43 \sqrt{R^2 R_{max} P_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}. \quad (8)$$

Для случая пластического контактного взаимодействия радиус пятна контакта находится из условия, что контактные напряжения σ_k на превышает $10 H_\mu$, т.е.

$$\sigma_k = 10 H_\mu. \quad (10)$$

или

$$\frac{1,5T}{a} = 10 H_\mu, \quad (11)$$

Откуда, используя выражение (6) и (7) получим

$$a = 0,618 \sqrt{\frac{R_0 R_{max} R}{H_\mu}}. \quad (12)$$

Максимальное удельное давление, назовем его допускаемым удельным давлением $[P_0]$, при котором ещё выполняются



соотношения (8) будет определяться из следующих соображений.

Наибольшее контактное напряжение возникает в центре круга касания двух микронеровностей и определяется по формуле

$$\sigma_e = \frac{2P_0 P_{\max}}{\sqrt[3]{RR_{\max}^2 P_0^2 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right)^2}}. \quad (13)$$

Откуда с учетом выражения (10)

$$[P_0] = \frac{125H_\mu \cdot R}{R_{\max}} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right). \quad (14)$$

Интенсивность линейного изнашивания с учетом выражений (3), (4) и (5) равна

$$J_h = \frac{R - \sqrt{R^2 - a^2}}{2aN} \cdot \frac{A_a}{A_R}, \quad (15)$$

где a - величина пятна контакта

$$A_a = \pi a^2; \quad (16)$$

$$A_R = \pi r^2. \quad (17)$$

Количество циклов деформации N , приводящих к разрушению зависит от напряженного состояния единичного пятна контакта. Если напряжение в контакте превышает допускаемое, то количество циклов деформации до разрушения будет определяться:

$$N = 10^7 \left(\frac{[\sigma_e]}{\sigma_e} \right)^6. \quad (18)$$

Допускаемое контактное напряжение $[\sigma_e]$ может быть определено по справочным таблицам. Что касается расчетного контактного напряжения, его следует определять по

формулам (9) или (12) в зависимости от характера контактного взаимодействия.

Подставив выражения (16), (17), (18) в формулу (15), получим

$$J_h = \frac{\left(R - \sqrt{R^2 - a^2} \right) a}{2 \cdot 10^7 \left(\frac{[\sigma_e]}{\sigma_e} \right)^6 \cdot R^2},$$

или

$$J_h = 5 \cdot 10^{-8} \left(\frac{[\sigma_e]}{\sigma_e} \right)^{-6} \cdot \frac{a \left(R - \sqrt{R^2 - a^2} \right)}{R^2}.$$

Предложенные и исследованные твёрдосплавные композиционные покрытия позволяют создавать приводные системы с пониженной интенсивностью изнашивания и тем самым снижать уровень загрязнений привносимых элементами вакуумного оборудования, что особенно важно при современном повышении требований к чистоте технологической среды при загрязнении её микрочастицами износа, так и высокомолекулярными углеродными загрязнениями.

Литература

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комболов В.С. Основы расчетов на трение и износ.— М.: Машиностроение, 1977.- 526с.
2. Крагельский И.В. и др. Трение и износ в вакууме.— М.: Машиностроение, 1973.- 216с.
3. Плюснин А.К., Ерданов В.И., Пин А.Г. Проектирование механических передач приборов.— М.: Высшая школа, 1987.- 340с.
4. Ивашов Е.Н., Степанников С.В. Способ уменьшения трения в вакууме. Патент РФ на изобретение №2014551 – опубл. 15.06.94 в бюл. №11.