

Информационно-измерительная техника и технологии

УДК 531.45:539.62270

Метод измерения адгезионной и гистерезисной составляющих момента трения качения

Джилавдари И. З., Ризноокая Н. Н.

Белорусский национальный технический университет

В связи с разработкой микромеханических систем, весьма актуальными становятся исследования трения на малых участках поверхности материалов. Основным достоинством трения качения является щадящий режим взаимодействия индентора и поверхности. При этом широко используются свободные затухающие колебания физического маятника, опирающегося двумя шариками на исследуемую поверхность. Однако существуют проблемы в интерпретации результатов опытов.

Силу или момент силы трения качения можно разделить на следующие составляющие:

- адгезионная составляющая. Она обусловлена адгезией (или прилипанием) взаимодействующих поверхностей;
- деформационно-гистерезисная составляющая. Она обусловлена упруго-пластичными свойствами материала;
- вязкая составляющая. Она обусловлена проскальзыванием шариков относительно поверхности и упруго-вязкими свойствами материала.

На опыте, если не принято специальных мер, сила трения всегда обусловлена всеми тремя механизмами диссипации энергии. Для измерения адгезионной и вязкой составляющих момента трения качения предлагается следующий метод.

1. Предполагают, что момент силы трения качения зависит от угловой скорости шариков (или маятника) по формуле

$$M(\omega) = PR(b_0 + b_1|\omega| + b_2\omega^2), \quad (1)$$

где P – вес маятника, R – радиус шариков, b_0 , b_1 , b_2 – постоянные коэффициенты, определяемые методом аппроксимации экспериментальной зависимости амплитуды от времени уравне-

нием регрессии, полученным на основании математической модели взаимодействия шариков и поверхности.

2. Измерения свободных колебаний физического маятника проводят в интервале амплитуд α , меньших половины угла статического контакта β шариков и поверхности. В этом случае деформационной составляющей трения качения можно пренебречь. Угол β рассчитывают по известным значениям модулей Юнга исследуемого материала E_1 и шариков E_2 и их коэффициентов Пуассона ν_1 и ν_2 , радиуса шарика R и веса маятника P :

$$\beta \approx \frac{d}{2R} \approx \frac{1}{R} \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где d – диаметр пятна контакта и

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

3. Измеряют последовательность амплитуд α колебаний маятника и соответствующие им моменты времени (см. отдельные точки на рисунке 1).

4. Используя в качестве уравнения регрессии формулу

$$\alpha(t) = \frac{(\sqrt{D} - k_1)\alpha_0 - 2k_0 + \left[(\sqrt{D} + k_1)\alpha_0 + 2k_0 \right] \exp(-\sqrt{D}t)}{\sqrt{D} + k_1 + 2k_2\alpha_0 + \left[\sqrt{D} - k_1 - 2k_2\alpha_0 \right] \exp(-\sqrt{D}t)}, \quad (4)$$

где $D = k_1^2 - 4k_0k_2$, α_0 – начальная амплитуда колебаний, k_0 , k_1 , k_2 – постоянные коэффициенты, связанные с коэффициентами b_0 , b_1 , b_2 соотношениями

$$k_0 = \frac{4R}{Tl} b_0, \quad k_1 = \frac{2\pi^2 R}{T^2 l} b_1, \quad k_2 = \frac{32\pi^2 R}{3T^3 l} b_2, \quad (5)$$

аппроксимируют экспериментальную зависимость амплитуд α от времени t и находят значения коэффициентов b_0 , b_1 , b_2 методом наименьших квадратов (см. результат аппроксимации на рисунке 1 в виде сплошной линии).

Уравнение регрессии (4) получено из решения дифференциального уравнения колебаний маятника и зависимости момента трения качения от угловой скорости колебаний маятника в виде трехчлена (1).

5. Рассчитывают значение адгезионной составляющей момента трения по формуле

$$M_{адс} = PRb_0. \quad (6)$$

6. Рассчитывают значение гистерезисной составляющей момента трения по формуле

$$M_{вязк} = PR(b_1|\omega| + b_2\omega^2). \quad (7)$$

7. Строят график зависимости этих составляющих от угловой скорости маятника (см. рисунок 2). На этом графике фиксируют наличие угловой скорости ω_0 , где эти моменты равны. Если ω_0 отсутствует, измерение необходимо повторить при меньших амплитудах колебаний. Если значение ω_0 достигнуто, то адгезионная составляющая трения превалирует в области $\omega < \omega_0$, а вязкая – в области $\omega > \omega_0$.

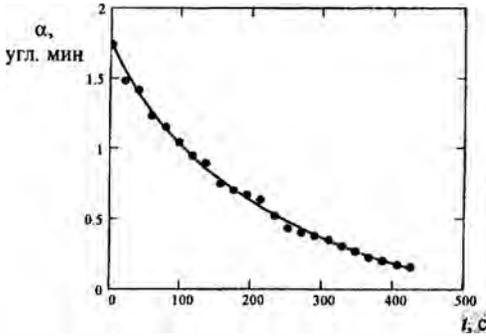


Рисунок 1 – Затухание колебаний маятника и его аппроксимация

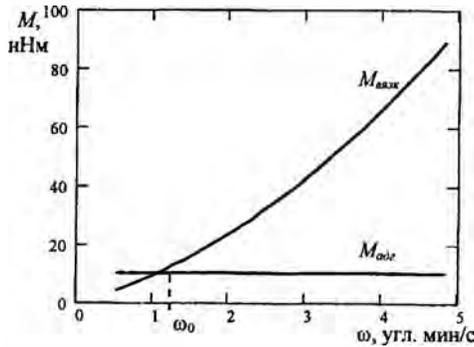


Рисунок 2 – Зависимость моментов силы трения от угловой скорости шариков

На рисунке 1 в виде отдельных точек представлена зависимость амплитуды колебаний маятника от времени, полученная из измерений на поверхности кристалла кремния КДБ 12, и в виде непрерывной кривой представлена функция, аппроксимирующая эту зависимость.

На рисунке 2 представлены составляющая момента силы трения качения, зависящая от угловой скорости маятника (сплошная кривая), и составляющая, независящая от угловой скорости маятника (горизонтальная прямая), построенные на основе результатов измерений и аппроксимации.

Проведение измерений в интервале амплитуд $\alpha < 0,5\beta$:

- обеспечивает отсутствие проскальзывания шариков на испытываемой поверхности, поскольку в этом случае пятно контакта практически не перемещается;

- позволяет исключить вязкую составляющую момента трения качения и увеличить точность измерения коэффициента трения качения;

- позволяет установить количественный критерий ω_0 для разделения момента силы трения качения на составляющие и вычислить эти составляющие по формулам (6) и (7). При угловых скоростях $\omega < \omega_0$ превалирует адгезионная составляющая момента силы трения, а при угловых скоростях $\omega > \omega_0$ превалирует гистерезисная составляющая момента силы трения.

Это объясняется тем, что гистерезисная и вязкая составляющая момента силы трения стремятся к нулю, когда скорость шарика стремится к нулю. А адгезионная составляющая остается конечной, поскольку процесс отрыва поверхности шарика от поверхности контртела стремится к обратимому изотермическому процессу, который зависит от коэффициентов поверхностного натяжения контактирующих поверхностей.

Отметим, что на рисунке 2 значение $\omega_0 \approx 1,134$ угл.мин/с было достигнуто при $\alpha \approx 20$ угловых секундах. При этом $b_0 = 1,65 \cdot 10^{-7}$; $b_1 = 3,83 \cdot 10^{-4}$ с; $b_2 = 0,41$ с.