

Секция II

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

ИЗМЕРЕНИЕ РАБОТЫ АДГЕЗИИ НА ОТРЫВ

М. С. Артамонова, Н. Н. Ризноокая

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель И. З. Джилавдари

В настоящее время в связи с развитием микро- и нанотехники значительно возрос интерес к исследованию внешнего трения и адгезии при перемещениях контактирующих тел в интервале от нескольких микрометров до нескольких нанометров [1]–[3].

С этой точки зрения представляется перспективным использовать маятниковый трибометр, исследования с которым проводят, наблюдая свободные колебания маятника, опирающегося двумя шариками на поверхность твердого тела [4]. Здесь достаточно просто обеспечить перемещение шариков в интервале от долей миллиметров до десятка нанометров, практически не повреждая исследуемую поверхность. Исследуя характер затухания амплитуды можно сделать выводы о механизмах взаимодействия шариков и поверхности, а также о свойствах поверхности.

Хорошо известно, что основными причинами трения качения являются гистерезис упругости, связанный с периодической деформацией поверхности, адгезия и проскальзывание [5]. Однако до сих пор не удалось создать последовательную феноменологическую теорию свободных колебаний физического маятника, которая бы позволяла с удовлетворительной точностью описать взаимодействие шариков и поверхности и, в частности, оценить работу сил адгезии.

Целью данной работы является измерение работы адгезии на отрыв путем анализа характера затухания амплитуды на основе феноменологического подхода.

Экспериментальные исследования. Исследования микрокачаний маятника проводились на поверхности $\langle 111 \rangle$ полированных пластин из монокристалла кремния. Маятник массой 1,256 кг опирался на две одинаковые пластины двумя шариками с радиусом $R = 5$ мм, выполненными из прессованного корундового порошка. Использовались два вида кремниевых пластин, которые отличались качеством полировки. Пластины 1 имели $R_a \approx 0,4$ нм, пластины 2 – $R_a \approx 0,1$ нм.

На опыте измерялись амплитуды и соответствующие им моменты времени. Начальная амплитуда колебаний $\alpha_0 \approx 160$ угл. с, конечная – 2,7 угл. с. В этом интервале амплитуд максимальное смещение шариков $r_{\text{макс}} \approx 3,7$ мкм, минимальное смещение $r_{\text{мин}} \approx 75$ нм. Таким образом, на опыте максимальное значение отношения $r_{\text{макс}}/a \approx 0,07$.

На рис. 1 представлены результаты измерений амплитуд, где отдельными точками показаны значения лишь некоторых из всех измеренных амплитуд.

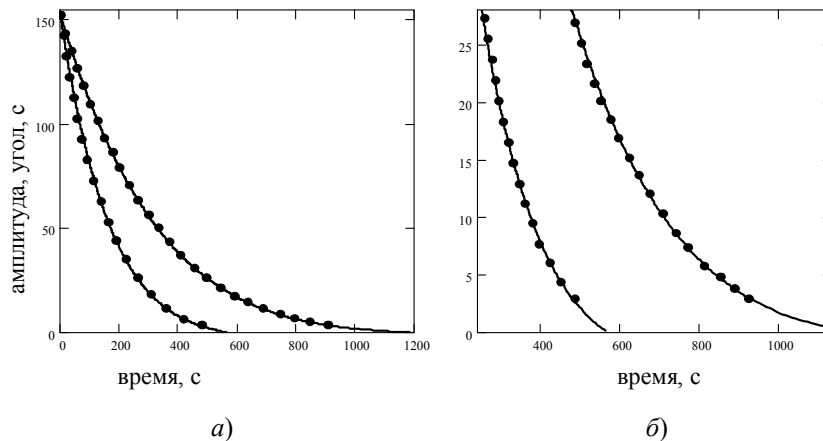


Рис. 1. Зависимость амплитуды колебаний маятника от времени.
 Отдельные точки – эксперимент, сплошные линии – теория.
 Верхние кривые – на пластине 1, нижние – на пластине 2:
 а – весь процесс; б – заключительная стадия

Модели диссипации энергии маятника и расчеты. Очевидно, что работа адгезии на отрыв будет совершаться лишь при отрыве задней части поверхности шарика от опорной поверхности. При малой скорости перемещения шарика эта работа пропорциональна пути, пройденному шариком. Поэтому момент сил трения, обусловленный разрывом адгезионных связей, запишем в виде

$$M_1 = mgRc, \quad (1)$$

где c – коэффициент адгезионной составляющей момента трения; m – масса маятника; g – ускорение свободного падения; R – радиус шарика.

Работа сил упругости и сил адгезии имеет гистерезисный характер. При оценке потерь энергии маятника вклад каждой из этих составляющих трудно разделить. Поэтому можно говорить лишь об общих потерях на гистерезис. Будем считать, что эти потери в нашем случае аналогичны гистерезисным потерям на внутреннее трение в материалах при циклическом деформировании. Известно, что эти потери не зависят от частоты, но, в основном, зависят от амплитуды деформации [6]. Поэтому выразим потери на гистерезис как результат действия момента силы трения, который зависит от угла φ отклонения маятника в виде

$$M_2(\varphi) = mgRb\varphi^p, \quad (2)$$

где b – коэффициент гистерезисной составляющей момента трения, $p = \text{const}$.

Полный момент трения, действующий на шарики (или маятник):

$$M_{\text{тр}}(\varphi) = M_1 + M_2(\varphi) = mgR(c + b\varphi^p). \quad (3)$$

Поскольку максимальная скорость перемещения шариков мала и не превышает $1,3 \cdot 10^{-5}$ м/с, задачу о колебаниях маятника можно решать в квазистатическом приближении. Если пренебречь влиянием деформации поверхности и сопротивлением воздуха, для $\varphi \ll 1$ уравнение колебаний будет иметь вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2\varphi = \omega_0^2(c + b\varphi^p) \operatorname{sign}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right), \quad (4)$$

где $\omega_0^2 = \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 = \frac{mgR}{I}$; I – момент инерции маятника.

Решая это уравнение в первом приближении метода асимптотической теории нелинейных колебаний, можно найти зависимость амплитуды колебаний от времени в виде

$$t(\alpha) = -\frac{T_0}{4} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\varphi}{\frac{1}{b\varphi^p + c}}. \quad (5)$$

Применим формулу (5) в качестве уравнения регрессии для аппроксимации экспериментальной зависимости амплитуды от времени и найдем значения параметров трения. В качестве параметра T_0 возьмем среднее значение периода маятника за все время колебаний. Для пластины 1 имеем: $c = 9,5 \cdot 10^{-9}$; $b = 1,04 \cdot 10^{-3}$; $p = 0,86$; для пластины 2 – $c = 5,2 \cdot 10^{-8}$; $b = 3,54 \cdot 10^{-3}$; $p = 0,94$. Точность полученного решения видна из рис. 1. Относительные значения СКО теоретических точек от экспериментальных значений составили 0,3 и 0,6 % соответственно. Это свидетельствует об адекватности предложенной модели трения реальности.

Полные потери энергии на гистерезис и работу адгезии на отрыв можно найти путем суммирования потерь в каждом цикле по формуле

$$A = mgR \sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^k \frac{2\pi}{k} \alpha_n \left| \sin\left(\frac{2\pi}{k} i\right) \right| \left\{ c + b \left[\alpha_n \left| \cos\left(\frac{2\pi}{k} i\right) \right|^p \right] \right\}, \quad (6)$$

где k – число отрезков, на которое разбивается каждый цикл колебаний ($k \approx 10^3$); i – номер отрезка в цикле; n – номер цикла.

Полагая поочередно в этой формуле $b = 0$ или $c = 0$, можно соответственно найти работу адгезии $A_{\text{отр}}$ на отрыв или работу на гистерезис $A_{\text{гист}}$. Подставляя значения параметров трения, приведенные выше, найдем, что для пластины 1 $A_{\text{отр}} = 0,25$ нДж и для пластины 2 – $A_{\text{отр}} = 0,76$ нДж, или 1,4 и 4,3 % от полных потерь соответственно. Остальные потери приходятся на гистерезис: $A_{\text{гист}} = 17,6$ нДж и $A_{\text{гист}} = 17,09$ нДж. Полная потеря энергии в обоих случаях равна $\Delta W_{\text{пот}} \approx 17,85$ нДж. Из формулы (5) можно найти, что потери на отрыв являются основными при амплитудах α , удовле-

творяющих условию $\alpha < \alpha_{\text{отр}} = \left[\frac{c(p+1)}{b} \right]^{1/p}$. Для пластины 1 угол $\alpha_{\text{отр}} \approx 0,6$ угл. с;

для пластины 2 – $\alpha_{\text{отр}} \approx 3$ угл. с.

Вычислим поверхностную плотность w энергии, необходимую для отрыва поверхности шарика от опорной поверхности, которая является стандартной характеристикой адгезии. Из формулы (1) следует, что при повороте шарика на угол φ работа $A_{\text{отр}}(\varphi) = mgRc\varphi$. Для $\varphi \ll 1$ площадь поверхности отрыва $S \approx 2aR\varphi$. Тогда

$$w = \frac{A_{\text{отр}}(\varphi)}{S} = \frac{mgc}{2a}. \quad (7)$$

Расчет для пластины 1 дает $w \approx 0,75 \cdot \text{мДж/м}^2$, для пластины 2 – $w \approx 4,18 \cdot \text{мДж/м}^2$. Данные значения по порядку величины согласуются со значениями удельной поверхностной энергии (от $1,6 \text{ мДж/м}^2$ до 14 мДж/м^2), приведенными в [3], и которые были получены из результатов исследования взаимодействия кремниевого шарика ($R = 1 \text{ мм}$) и титанового шарика ($R = 1,5 \text{ мм}$) с поверхностью кремния с нанесенными на нее различными покрытиями в [1]. Они также совпадают с результатами, полученными с помощью методики для пар кремниевый зонд-слюда и кремниевый зонд-кальцит на АСМ в [2].

Заключение. Маятниковый трибометр можно эффективно использовать для исследования адгезии на участках поверхности с размерами, практически не превышающими диаметра пятна упругого контакта. Предложенная феноменологическая модель обеспечивает высокую точность численного анализа результатов опытов. Измеряя зависимость амплитуд колебаний маятника от времени, можно вычислить общие гистерезисные потери сил упругости и адгезии, а также вычислить поверхностную плотность работы адгезии на отрыв. Однако данный подход не позволяет разделить потери на гистерезис сил упругости и адгезии. Для их разделения нужна дополнительная информация, которую, по-видимому, можно получить из анализа зависимости периода колебаний от амплитуды.

Литература

1. Измерение контактной адгезии и аттракционного взаимодействия технических поверхностей / А. Я. Григорьев [и др.] // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 4. – С. 405–412.
2. Adhesion hysteresis and friction at nanometer and micrometer length / R. Szoszkiewicz [et al.] // J. Appl. Phys. – 2006. – Vol. 99, № 1. – P. 014310-(1–7).
3. Ковалев, А. В. Феноменологическая модель адгезионного контакта / А. В. Ковалев, И. Н. Ковалева, Н. К. Мышкин // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 6. – С. 575–585.
4. Джилавдари, И. З. Исследование динамики свободных микрокачаний маятника с опорой на два шарика / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 1. – С. 5–11.
5. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – Москва : Наука, 2001. – 478 с.
6. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – Москва : Наука, 1991. – 256 с.

ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ НА МИКРОУЧАСТКАХ ПОВЕРХНОСТИ

Н. Н. Ризноокая

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель И. З. Джилавдари

В последнее время в связи с развитием микромеханики и нанотехнологии большое внимание уделяется проблемам исследования трения на малых участках поверхности [1], [2]. Размеры рабочих элементов таковы, что свойства поверхности играют определяющую роль в работе этих приборов. Исследования сконцентрированы в основном вокруг трения скольжения, и здесь существует проблема разрушения поверхности. Измерение коэффициента трения позволяет исследовать физико-механические свойства поверхности материала.