

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

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  $14 \text{ мДж/м}^2$ ), 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.

Трение качения отличается тем, что при малых нагрузках изнашивание и остаточные деформации поверхности минимальны. В общем случае коэффициент трения качения  $k$  определяется исходя из равенства

$$M = kmgR, \quad (1)$$

где  $m$  – масса маятника;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – радиус шарика.

В настоящее время измерения коэффициента трения качения проводят в соответствии с ГОСТ 27640–88 [3]. Они основаны на измерении затухания свободных колебаний физического маятника, который опирается на исследуемую поверхность двумя шариками. Согласно ГОСТу 27640–88 измеряют начальную  $\alpha_0$  и конечную  $\alpha_n$  амплитуды колебаний, а также полное число колебаний  $n$  и коэффициент трения качения рассчитывают по формуле [3]:

$$f_k = \frac{\cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{2n(\alpha_0 + \alpha_n)}. \quad (2)$$

Данный ГОСТ рекомендуется применять лишь при измерениях значений коэффициента трения качения  $f_k > 10^{-5}$ . Кроме того, величина  $f_k$  совпадает с  $k$  при условии, что момент силы трения не зависит от скорости, и, следовательно, амплитуда колебаний маятника затухает со временем по линейному закону. Обычно данное условие не выполняется, особенно при измерениях на малых амплитудах.

Нами установлено, что при малых амплитудах колебаний значение коэффициента трения качения могут быть меньше  $10^{-6}$ . В связи с этим возникает проблема измерения малых значений коэффициента трения качения.

В данной работе предлагается более точный метод измерения трения качения, который может быть реализован при любых законах затухания амплитуды и при любых амплитудах.

Метод состоит в том, что измеряют все амплитуды колебаний и соответствующие им моменты времени и вычисления коэффициента трения качения проводят по формуле

$$f = \frac{A_{\text{тр}}}{mgR\Phi}, \quad (3)$$

где  $A_{\text{тр}}$  – работа силы трения;  $\Phi$  – полный угол, заметаемый маятником за время измерения.

**Экспериментальные исследования и их анализ.** Исследования микрокачаний маятника проводились на поверхности <111> полированных пластин из монокристалла кремния, которые используются при производстве интегральных микросхем. Маятник массой  $m = 1,256$  кг опирался на две одинаковые пластины двумя шариками с радиусом  $R = 5$  мм, выполненными из прессованного корундового порошка. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона шариков  $E_{\text{ш}} = 3,1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\nu_{\text{ш}} \approx 0,27$  и пластин  $E_{\text{пл}} = 1,3 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\nu_{\text{пл}} \approx 0,27$ . Радиус пятна контакта шариков и пластин, вычисленный по формулам Герца [10],  $a \approx 60,5$  мкм, глубина внедрения шарика в пластину составила 0,7 мкм, контактный угол  $\alpha_r = a/R \approx 40$  угл. мин. Использовались два вида кремниевых пластин, которые отличались качеством полировки. Пластины 1 имели параметр шероховатости  $R_a \approx 0,4$  нм, пластины 2 –  $R_a \approx 0,1$  нм. Маятник был

сбалансирован так, чтобы в положении равновесия его центр масс находился на пятне контакта. Это позволяло исключить проскальзывание шариков и существенно уменьшить влияние горизонтальных вибраций основания [9].

На опыте измерялись амплитуды и соответствующие им моменты времени. Начальная амплитуда колебаний  $\alpha_0 \approx 160$  угл. с. Чтобы исключить влияние переходных процессов, возникающих при отпуске маятника, при обработке результатов начальные значения амплитуд отсекались до одного и того же заданного значения, равного 315 угл. с. Так же, чтобы исключить влияние шумов и вибраций на самых малых амплитудах, эти амплитуды обрезались на одном нижнем уровне, равном 2,7 угл. с. В этом интервале амплитуд максимальное смещение шариков  $r_{\max} \approx 3,7$  мкм, минимальное смещение  $r_{\min} \approx 75$  нм. Таким образом, на опыте максимальное значение отношения  $r_{\max}/a \approx 0,06$ .

На рис. 1 представлены результаты измерений амплитуд, где отдельными точками показаны значения лишь некоторых из всех измеренных амплитуд. В противном случае теоретические кривые были бы невозможно выделить на их фоне. Всего таких точек 481 и 267, для пластин 1 и 2 соответственно.

Видно, что затухание колебаний маятника на пластине 2 выражено гораздо сильнее, чем на пластине 1. Эти амплитуды измерялись при отклонении маятника в одну сторону. Их будем считать положительными. Поскольку затухание колебаний было невелико, отрицательные амплитуды можно рассчитать как среднее арифметическое двух соседних положительных амплитуд. Это позволяет вычислить с высокой точностью среднее значение  $f$  коэффициента трения качения. Учитывая, что полная потеря энергии маятника равна изменению его потенциальной энергии  $W_{\text{пот}}$  в гравитационном поле и полагая, что работа момента силы трения  $A = f mgR\Phi$ , где  $\Phi$  – полный угол, заметаемый маятником за время колебаний, найдем, что

$$f = \frac{\Delta W_{\text{пот}}}{mgR\Phi} = \frac{\cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{\Phi}; \quad (4)$$

$$\Phi = 2(\alpha_0 + \alpha_n) + 4 \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i. \quad (5)$$

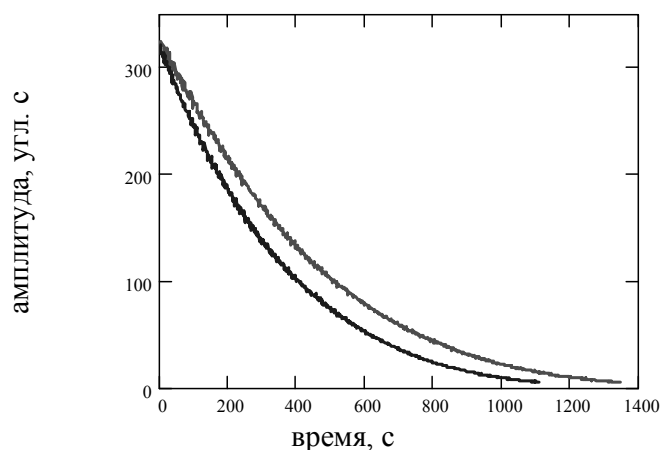


Рис. 1. Затухание колебаний маятника на кремниевых пластинах

В результате расчета по формуле (4) значение коэффициента трения качения равно: для пластины 1  $f = 6,7 \cdot 10^{-7}$ ; для пластины 2  $f = 1,2 \cdot 10^{-6}$ .

Формулу (4) можно применять практически для любых законов затухания. Формула (2) является ее частным случаем, и она справедлива, когда амплитуда колебаний затухает по линейному закону. Расчет по формуле (2) для пластины 1 дает  $f_k = 3,9 \cdot 10^{-7}$  и для пластины 2  $f_k = 7,0 \cdot 10^{-7}$ .

**Вывод.** Маятниковый трибометр можно эффективно использовать для исследования трения качения на участках поверхности с размерами, практически не превышающими диаметра пятна упругого контакта. Измеряя зависимость амплитуд колебаний маятника от времени, можно вычислить точное значение коэффициента трения качения.

#### Литература

1. Комков, О. Ю. Микротрибометр возвратно-поступательного типа, работающий в области малых нагрузок: конструктивные особенности и методика испытания образцов / О. Ю. Комков // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 6. – С. 642–649.
2. Дубравин, А. М. Локальная трибометрия на основе сканирующего зондового микроскопа / А. М. Дубравин, О. Ю. Комков, Н. К. Мышкин // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 3. – С. 269–277.
3. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения : ГОСТ 27640–88. – Москва : Госкомитет по стандартам, 1988. – 20 с.

## СПОСОБ ВИБРОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАСПИЛОВОЧНЫХ ДИСКОВ И УСТАНОВКА ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

П. О. Корзун, Ю. А. Савич

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель М. Г. Киселев

Распиловочный диск – это инструмент, применяемый для механического распиливания монокристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий. Изготавливаются диски из оловянисто-фосфористой бронзы марки БрОФ 6,5–0,15 диаметром 76 мм и толщиной от 0,04 до 0,09 мм, что определяются массой обрабатываемого монокристалла алмаза [1].

Технологический процесс изготовления этих инструментов включает в себя три основных операции: вырубка из прокатанной до требуемой толщины бронзовой ленты заготовок дисков; формирование на их боковых поверхностях алмазосодержащего слоя; термоправка полученных распиловочных дисков.

В настоящее время для формирования на боковых поверхностях распиловочных дисков алмазосодержащего слоя применяется способ механического шаржирования (насыщения) боковых поверхностей их заготовок зернами алмазных микропорошков. Поэтому уровень эксплуатационных показателей получаемых инструментов (режущая способность, стойкость, шероховатость поверхностей распиленных алмазных заготовок), в первую очередь определяется качеством шаржирования их боковых поверхностей. В частности, размером и количеством внедрившихся алмазных частиц, равномерностью их распределения на обработанной поверхности, степенью их закрепления в материале диска и их разновысотностью.