

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **13324**

(13) **С1**

(46) **2010.06.30**

(51) МПК (2009)

**G 01N 19/00**

(54)

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТЫ СИЛ КОНТАКТНОЙ  
АДГЕЗИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ**

(21) Номер заявки: а 20080795

(22) 2008.06.17

(43) 2010.02.28

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Джилавдари Игорь Захарович; Ризноокая Наталия Николаевна (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) ГРИГОРЬЕВ А.Я. и др. Трение и износ. - 2003. - Т. 24. - № 4. - С. 405-412.

ВУ 1956 С1, 1997.

ВУ 6790 С1, 2005.

SU 1254355 А1, 1986.

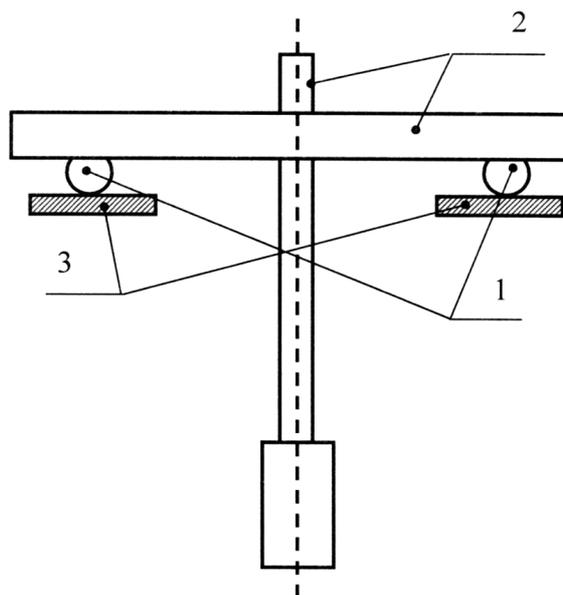
JP 2232547 А, 1990.

JP 9281032 А, 1997.

(57)

Способ определения работы сил контактной адгезии при циклической нагрузке, в котором в контакт с исследуемым образцом приводят два сферических пробных тела радиусом  $R$ , используемые в качестве опоры маятника, нагружают эти тела весом маятника  $P$ , возбуждают свободные колебания маятника с начальной амплитудой  $\alpha_0$ , удовлетворяющей условию

$$\alpha_0 \ll \frac{a}{R},$$



Фиг. 1

**ВУ 13324 С1 2010.06.30**

## ВУ 13324 С1 2010.06.30

где  $a$  - радиус пятна упругого контакта пробного тела и образца, измеряют последующие амплитуды колебаний  $\alpha_i$  и соответствующие им периоды  $T_i$ , аппроксимируют зависимость  $T_i$  от  $\alpha_i$  теоретической зависимостью  $T(\alpha)$

$$T(\alpha) \approx \tau \left[ 1 - 0,3k \left( \frac{R}{a} \right)^{1/2} \alpha^{1/2} \left( 1 - 0,8 \frac{R}{a} \alpha \right) \right]^{-1}$$

с расчетными параметрами аппроксимации  $\tau$  и  $k$  и определяют искомую работу  $A$  при любом заданном значении  $\alpha$  в соответствии с выражением

$$A \approx 0,26PRk \left( \frac{R}{a} \right)^{1/2} \alpha^{5/2} \left( 1 - 0,65 \frac{R}{a} \alpha \right).$$

Изобретение относится к области измерительной техники и может быть использовано при измерении работы сил адгезии при контакте твердых тел на малых участках поверхности в процессе действия циклической нагрузки.

Известен способ измерения гистерезиса сил адгезии в нано- и микромасштабе с помощью силового зондового микроскопа [1], в котором получают зависимость силы от расстояния между зондом и образцом, когда зонд и образец периодически приближают друг к другу и отдаляют. Основным недостатком этого способа состоит в низкой точности. Это объясняется многими причинами. В первую очередь, данный способ нуждается в калибровке, которую трудно провести вследствие отсутствия соответствующих аппаратуры и методик. Кроме того, гистерезис сил адгезии здесь затушевывается наличием капиллярных сил и сил упругости. Здесь также трудно с высокой точностью определить площадь контакта зонда и образца. Наконец, результаты измерений, полученные этим методом, трудно экстраполировать в области контактов, размеры которых составляют десятки и более микрометров. Все эти проблемы перечислены в [1] в разделе введение и в [2].

Наиболее близким к предлагаемому является способ измерения работы на гистерезис сил контактной адгезии [3], в котором пробное тело, выполненное в виде шарика, и образец приводят в контакт, далее перемещают их друг относительно друга, обеспечивая взаимное внедрение до достижения заданной нагрузки, а затем разводят их в исходное положение. В процессе перемещения этих тел измеряют силу, действующую между ними, в зависимости от расстояния между телами. Результатом измерения являются две зависимости, описывающие силовое взаимодействие пробного тела и образца при их взаимном приближении и удалении. Эти зависимости образуют петлю гистерезиса. Гистерезис характеризуется работой, которую рассчитывают, интегрируя силу взаимодействия пробного тела и образца на замкнутой траектории.

Измерение сил контактной адгезии в данном способе осуществляют следующим образом. Пробное тело закрепляют в держателе на одной из вертикальных сторон прямоугольной рамки, подвешенной за середины горизонтальных сторон на вертикальных струнах, так что рамка может поворачиваться вокруг вертикали. На другой вертикальной стороне рамки находится подвижная катушка электромагнита. Изменение сил молекулярного взаимодействия между телами, обусловленное изменением расстояния между ними, компенсируется величиной тока в неподвижной катушке электромагнита, так что рамка приводится к одному и тому же положению. Таким образом, в данном способе измерение силы сводится к измерению тока.

Основным недостатком данного способа измерений является низкая точность.

Это объясняется несколькими причинами.

1. Данный способ основывается на преобразовании измеряемой силы в измеряемый ток, и он нуждается в калибровке. Однако измеряемые силы очень малы, и осуществить такую калибровку здесь непосредственно нельзя, поскольку эталоны таких сил отсутст-

вуют. Например, имеющийся в Беларуси эталон позволяет осуществить калибровку силы, начиная только от 30 Н [4]. В прототипе диапазон измеряемых сил находится в интервале от 10 мкН до  $10^4$  мкН. Здесь калибровку удастся осуществить в узком интервале сил от 98 мкН до 980 мкН в условиях, отличных от условий измерений. Если при измерениях работы сил адгезии подвижная рамка, которая подвешивается на струне, располагается вертикально, то при калибровке эту рамку приходится устанавливать горизонтально, поворачивая весь прибор на бок для того, чтобы имитировать силу молекулярного притяжения силой тяжести груза, подвешиваемого к этой рамке на месте пробного тела.

2. Здесь нельзя разделить работу на гистерезис сил упругости, возникающих в процессе деформации тел, и работу на гистерезис сил адгезии.

3. О контактной адгезии макроскопических тел можно говорить лишь при условии наличия физического контакта между телами, когда имеет место деформация тел и их взаимное внедрение. В данном способе нельзя обеспечить достаточно большие нагрузки на контактирующие тела. В результате перемещение тел при их взаимном внедрении оказывается слишком малым. Это видно из рис. 4 в [3], где кривые, соответствующие подводу и отводу тел на участке их контакта, трудно различить. Поэтому провести расчет работы на гистерезис сил контактной адгезии с высокой точностью в данном способе нельзя.

Задачей изобретения является увеличение точности измерения работы на гистерезис сил контактной адгезии.

Решение этой задачи обеспечивается тем, что в способе измерения работы на гистерезис сил контактной адгезии, в котором пробное тело, поверхность которого имеет сферическую форму радиусом  $R$ , приводят в контакт с образцом и вычисляют работу сил адгезии  $A$ , совершаемую при их перемещении друг относительно друга, в контакт с исследуемым образцом приводят два сферических пробных тела радиусом  $R$ , используемые в качестве опоры маятника, нагружают эти тела весом маятника  $P$ , возбуждают свободные колебания маятника с начальной амплитудой  $\alpha_0$ , удовлетворяющей условию

$$\alpha_0 \ll \frac{a}{R}, \quad (1)$$

где  $a$  - радиус пятна упругого контакта пробного тела и образца, измеряют последующие амплитуды колебаний  $\alpha_i$  и соответствующие им периоды  $T_i$ , аппроксимируют зависимость  $T_i$  от  $\alpha_i$  теоретической зависимостью  $T(\alpha)$

$$T(\alpha) \approx \tau \left[ 1 - 0,3k \left( \frac{R}{a} \right)^{1/2} \alpha^{1/2} \left( 1 - 0,8 \frac{R}{a} \alpha \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

с расчетными параметрами аппроксимации  $\tau$  и  $k$  и определяют искомую работу  $A$  при любом заданном значении  $\alpha$  в соответствии с выражением

$$A \approx 0,26PRk \left( \frac{R}{a} \right)^{1/2} \alpha^{5/2} \left( 1 - 0,65 \frac{R}{a} \alpha \right). \quad (3)$$

Использование пробных тел в качестве опор физического маятника, совершающего свободные колебания, позволяет легко осуществить цикличность подвода и отвода поверхности пробного тела к поверхности образца и тем самым существенно увеличить точность за счет накопления эффектов взаимодействия. Использование двух пробных тел позволяет обеспечить устойчивость фиксации мгновенной оси колебаний маятника, которая проходит через точки контакта пробных тел и образца. Выбирая вес маятника, здесь, в отличие от прототипа, можно легко регулировать нагрузку на пробные тела в широком диапазоне.

Проведение измерений в интервале углов, определяемых условием (1), позволяет реализовать режим адгезионного взаимодействия поверхности пробных тел и поверхности образца практически без изменения площади контакта. Действительно, при отклонении

маятника на угол  $\alpha$  боковая поверхность шарика отрывается от поверхности образца на площади  $S = 2aR\alpha$ , которая составляет лишь малую долю, равную отношению

$$\frac{S}{\pi a^2} = \frac{2aR\alpha}{\pi a^2}, \quad (4)$$

от площади пятна упругого контакта. Например, при начальной амплитуде  $\alpha_0 = 7,6 \cdot 10^{-4}$ ,  $R = 5$  мм и  $a = 60,5$  мкм эта доля составляет всего 4 % и при уменьшении амплитуды стремится к нулю. Кроме того, реализация условия (1) позволяет исключить проскальзывание шариков в процессе качаний маятника. Радиус пятна упругого контакта для шарика можно вычислить по хорошо известной формуле Герца [5], которая с учетом того, что на каждый шарик приходится нагрузка, равная  $P/2$ , имеет вид

$$a = \left( \frac{3 PR}{8 E^*} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

где  $E^*$  - приведенный модуль упругости шарика и образца.

Измерение амплитуд отклонений маятника  $\alpha_i$  и соответствующих им периодов  $T_i$  позволяет выразить работу адгезионного взаимодействия пробных тел и образца через величины, которые могут быть измерены с помощью стандартных измерительных приборов с точностью, гораздо большей, чем точность измерения силы или малого тока в прототипе. Поэтому предлагаемый способ не нуждается в дополнительной калибровке.

Формула (2) выводится путем решения уравнения колебаний маятника

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} + PR\varphi = M(\varphi), \quad (6)$$

где  $I$  - момент инерции маятника,

$M(\varphi)$  - момент сил, обусловленный адгезией пробных тел и образца методом асимптотической теории нелинейных колебаний [6]. Момент сил  $M(\varphi)$  вычисляется по формуле

$$M(\varphi) \approx 0,647223PRk \left( \frac{R}{a} \right)^{1/2} \varphi^{3/2} \left[ 1 - 0,91185 \frac{R}{a} \varphi \right], \quad (7)$$

которая получена из известного решения задачи Герца о внедрении пробного тела в виде шарика в упругое полупространство [5] с учетом влияния сил адгезии.

Формула (3) выводится на основании формулы (7) и очевидной формулы, выражающей работу, совершаемую при отклонении маятника на угол  $\alpha$ , через момент силы, действующей на маятник:

$$A = \int_0^{\alpha} M(\varphi) d\varphi. \quad (8)$$

Из формулы (3) видно, что работа на гистерезис сил адгезии зависит от амплитуды колебаний. Эта зависимость является характерной для потерь на внутреннее трение (см., например, [7], стр. 53). В прототипе эту зависимость получить практически нельзя ввиду указанного выше малого интервала перемещения тел.

Пользуясь результатами теории Герца о внедрении шарика в упругое полупространство [5], можно доказать, что в предлагаемом способе силы упругости не влияют на зависимость периода колебаний маятника от амплитуды. Поэтому работа на гистерезис сил взаимодействия пробных тел и образца при их контакте здесь обусловлена именно силами адгезионного взаимодействия.

Фиг. 1 иллюстрирует способ использования пробных тел в качестве опор маятника.

Фиг. 2 иллюстрирует взаимодействие пробного тела и образца.

На фиг. 3 показаны результаты измерений амплитуд колебаний и периодов, а также результат их аппроксимации теоретической зависимостью по формуле (2) в реальном опыте.

На фиг. 1 два пробных тела 1, выполненные в виде шариков, являются опорой маятника 2. Маятник опирается на два одинаковых образца 3, выполненные в виде плоских пластин из одного материала. Маятник имеет возможность совершать колебания в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка, опираясь на эти шарики.

На фиг. 2 пробное тело в виде шарика радиусом  $R$  контактирует с образцом на пятне контакта с диаметром  $2a$ . Здесь же показан контактный угол  $\alpha_r = \frac{a}{R}$ , входящий в условие (1).

На фиг. 3 в виде отдельных точек показаны измеренные на опыте 430 амплитуд колебаний маятника и соответствующие им периоды, которые трудно разделить ввиду их тесного расположения, а также аппроксимирующая их пунктирная кривая, построенная в соответствии с формулой (2).

Опишем реализацию предлагаемого способа на примере конкретных измерений работы  $A$ . Два пробных тела 1 в виде корундовых шариков с радиусами  $R = 5$  мм закрепляют в качестве опор маятника 2. Взвешивают маятник и определяют его вес  $P = 12,309$  Н. Устанавливают маятник на поверхности двух одинаковых кремниевых пластин. Используя известную формулу [5]

$$E^* = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}, \quad (9)$$

определяют приведенный модуль упругости  $E^* = 9,88 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup> по известным значениям модуля упругости  $E_1 = 3,1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup> шарика и модуля упругости кремниевых пластин  $E_2 = 1,3 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, а также известным значениям их коэффициентов Пуассона  $\nu_1 = \nu_2 = 0,27$ . Вычисляют радиус  $a$  пятна упругого контакта по формуле (5)  $a = 60,5$  мкм, а также контактный угол  $\alpha_r = \frac{a}{R} = 0,012$  рад = 2400 угл. сек. Отклоняют маятник на угол  $\alpha_0 = 7,6 \cdot 10^{-4}$  рад = 152 угл. сек, удовлетворяющий условию (1), и освобождают его. Далее измеряют амплитуды свободных колебаний  $\alpha_i$  и соответствующие им моменты времени  $T_i$ . Используя формулу (2), методом нелинейной аппроксимации находят значения параметров  $\tau$  и  $k$  ( $\tau = 1,9322$  сек;  $k = 0,0816$ ). Используя формулу (5), находят искомое значение работы на гистерезис сил контактной адгезии как функции амплитуды колебаний маятника  $\alpha$  и вычисляют эту работу при заданном значении  $\alpha$ . В частности, при  $\alpha = \alpha_0$  имеем  $A = 0,031 \cdot \text{Дж/м}^2$ .

В отличие от прототипа, в предлагаемом способе на каждом этапе вычислений и измерений может быть получена оценка погрешности совершаемой операции. Например, при проведении описанного выше опыта была получена оценка относительного среднего квадратического отклонения (СКО) теоретически значений  $T(\alpha_i)$  от экспериментальных значений  $T_i$ , которая оказалась равной 2,5 %. По-существу, это значение СКО является значением погрешности оценки параметра  $k$ , входящего в формулы (2) и (3). Погрешность измерения величины  $A$  в предлагаемом способе совпадает с данным значением СКО, поскольку значения других параметров, вошедших в формулу (3), могут быть получены с меньшей погрешностью.

Источники информации:

1. Szoszkiewicz R., Bhushan B., Huey B.D., Kulik A.J., Gremaud G. Adhesion hysteresis and friction at nanometer and micrometer length // J. Appl. Phys. 99, 014310-(1-7), (2006).
2. Дубравин А.М., Комков О.Ю., Мышкин Н.К. Локальная трибометрия на основе сканирующего зондового микроскопа // Трение и износ. - Т. 26. - № 3. - 2005. - С. 269-277.

# ВУ 13324 С1 2010.06.30

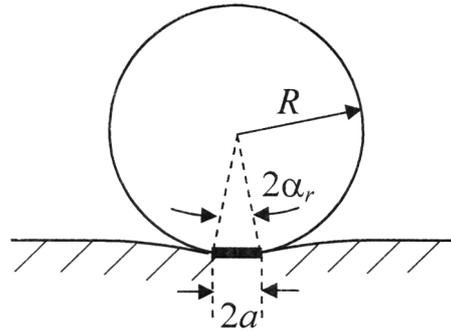
3. Григорьев Я., Дубравин А.М., Ковалев А.В., Ковалева И.Н., Комков О.Ю., Мышкин Н.К. Измерение контактной адгезии и аттракционного взаимодействия технических поверхностей // Трение и износ. - Т. 24. - № 4. - 2003. - С. 405-412.

4. Национальные и исходные эталоны Беларуси: Каталог / Под ред. Н.А. Жагоры. - Минск: БелГИМ, 2005. - 31 с.

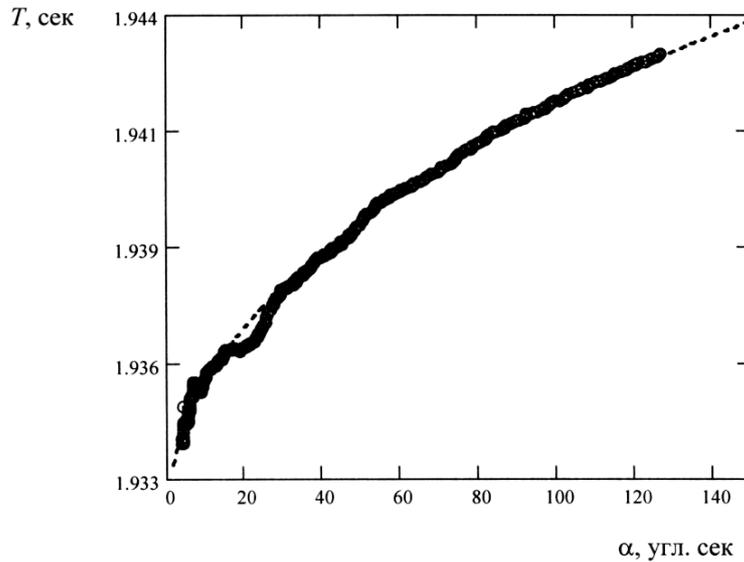
5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. - М.: Мир, 1989. - 510 с.

6. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1974. - 504 с.

7. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. - М.: Наука, 1971. - 240 с.



Фиг. 2



Фиг. 3