

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 13618

(13) С1

(46) 2010.10.30

(51) МПК (2009)

G 01N 19/00

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТЫ АДГЕЗИОННОГО ОТРЫВА

(21) Номер заявки: а 20080550

(22) 2008.04.25

(43) 2009.12.30

(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.

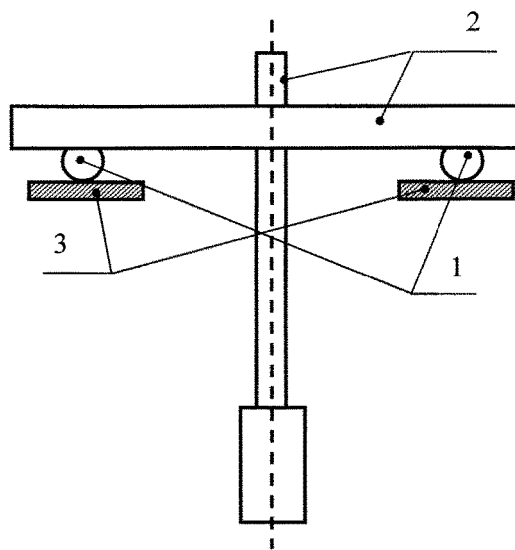
JP 9281032 А, 1997.

(57)

Способ определения работы адгезионного отрыва, в котором в контакт с исследуемым образцом приводят два сферических пробных тела радиусом R , используемые в качестве опоры маятника, нагружают эти тела весом маятника с массой m , возбуждают свободные колебания маятника с начальной амплитудой α_0 , удовлетворяющей условию

$$\alpha_0 < 0,1 \frac{a}{R},$$

где a - радиус пятна упругого контакта пробного тела и образца, затем измеряют последующие амплитуды колебаний α_i в соответствующие им моменты времени t_i , аппроксимируют связь α_i и t_i теоретической зависимостью $t(\alpha)$



Фиг. 1

$$t(\alpha) = -\frac{T}{4} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{1}{\frac{1}{bx^p + c}} dx,$$

где T - среднее значение периода колебаний за все время колебаний, c расчетными параметрами аппроксимации p , b и c , и определяют искомую работу σ в соответствии с выражением

$$\sigma = \frac{mgc}{4a},$$

где g - ускорение свободного падения.

Изобретение относится к области измерительной техники и может быть использовано при измерении работы сил адгезии на отрыв при контакте твердых тел на малых участках поверхности.

Известен штифтовой способ определения адгезионной прочности соединения покрытия с основным металлом [1], в котором наносят покрытие на торец усеченного конуса - штифта, вставленного заподлицо в шайбу. Затем вытаскивают конус из шайбы и измеряют силу отрыва торца конуса от покрытия. Основным недостатком этого способа состоит в том, что отрыв металла от покрытия сопровождается разрушением покрытия.

Наиболее близким к предлагаемому является способ определения работы адгезионного отрыва [2], в котором образец и пробное тело, выполненное в виде шарика, приводят в контакт до достижения заданной начальной нагрузки, а затем разводят их. В процессе изменения расстояния между пробным телом и образцом измеряют силу, действующую между ними, в зависимости от расстояния.

Измерение силы 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. При каждом изменении расстояния между образцом и пробным телом пробное тело стремится приблизиться к образцу под действием силы молекулярного притяжения и поворачивает рамку. Рамку удерживают в положении равновесия, уравновешивая силу молекулярного притяжения силой магнитного поля, действующего между подвижной и неподвижной катушками электромагнита. Изменение сил молекулярного взаимодействия между телами, обусловленное изменением расстояния между ними, компенсируется величиной тока в катушке электромагнита, так что измерение силы сводится к измерению тока.

Результатом измерения являются две зависимости, характеризующие силовое взаимодействие пробного тела и образца при их взаимном приближении и удалении, а также работа, совершаемая при этом и приходящаяся на единицу площади поверхности контакта этих тел. Эта работа рассчитывается путем интегрирования зависимостей силы от расстояния. По существующей терминологии эта работа есть "работа адгезионного отрыва" [3].

Основным недостатком данного способа является низкая точность измерений.

Это объясняется тем, что данный способ включает преобразование измеряемой силы в измеряемый ток и этот способ нуждается в калибровке. Однако, поскольку измеряемые силы очень малы, осуществить такую калибровку здесь непосредственно нельзя, поскольку эталоны таких сил отсутствуют.

В прототипе диапазон измеряемых сил находился в интервале от 0,01 мН до 10 мН. В то же время измерительная установка имела калибровку в узком интервале сил от 98 мН до 980 мН (от 10 мг до 100 мг силы). Сама калибровка осуществлялась в условиях, совершенно отличных от условий проведения измерений. Если в условиях эксперимента по-

ВУ 13618 С1 2010.10.30

движная рамка, которая подвешивалась на струне, располагалась вертикально, то при калибровке ее приходилось устанавливать горизонтально и имитировать силу молекулярного притяжения силой тяжести груза, подвешиваемого к этой рамке на месте пробного тела.

Задачей изобретения является увеличение точности определения работы адгезионного отрыва.

Решение этой задачи обеспечивается тем, что в способе определения работы адгезионного отрыва, в котором поверхность пробного тела, имеющего сферическую форму радиусом R , и поверхность образца подводят и отводят друг от друга, вычисляют работу A , совершаемую силами адгезии при образовании контакта площадью S , и определяют работу адгезионного отрыва σ по формуле

$$\sigma = \frac{A}{S}, \quad (1)$$

в контакт с исследуемым образцом приводят два сферических пробных тела радиусом R , используемые в качестве опоры маятника, нагружают эти тела весом маятника с массой m , возбуждают свободные колебания маятника с начальной амплитудой α_0 , удовлетворяющей условию

$$\alpha_0 < 0,1 \frac{a}{R}, \quad (2)$$

где a - радиус пятна упругого контакта пробного тела и образца, затем измеряют последующие амплитуды колебаний α_i в соответствующие им моменты времени t_i , аппроксимируют связь α_i и t_i теоретической зависимостью $t(\alpha)$

$$t(\alpha) = -\frac{T}{4} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{1}{\frac{1}{p+1}bx^p + c} dx, \quad (3)$$

где T - среднее значение периода колебаний за все время колебаний, с расчетными параметрами аппроксимации p , b и c , и определяют искомую работу σ в соответствии с выражением

$$\sigma = \frac{mgc}{4a}, \quad (4)$$

где g - ускорение свободного падения.

В процессе свободных колебаний маятника его амплитуда уменьшается (затухает). При этом шарики совершают периодические покачивания, при которых их боковые поверхности периодически прилипают к поверхности образца и отлипают от нее. Одной из причин затухания амплитуды является работа адгезионного отрыва поверхности пробных тел от поверхности образца.

Использование двух пробных тел в качестве опор физического маятника позволяет выразить работу адгезионного отрыва через затухание колебаний маятника. Кроме того, поскольку трение качения мало, маятник совершает много колебаний (несколько сотен). Это приводит к накоплению эффектов взаимодействия пробных тел и образца и существенно увеличивает точность измерений по сравнению с прототипом.

Проведение измерений в интервале углов, определяемых условием (2), когда амплитуды α_i не превосходят несколько десятков и менее угловых секунд, позволяет исключить проскальзывание шариков в процессе качаний маятника.

Радиус пятна упругого контакта можно вычислить по хорошо известной формуле Герца [4]

$$a = \left(\frac{3}{4} \frac{mgR}{E^*} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

где E^* - приведенный модуль упругости шариков и образца.

ВУ 13618 С1 2010.10.30

Измерение амплитуд маятника и соответствующих им моментов времени позволяет количественно описать затухание колебаний маятника и измерить работу адгезионного отрыва. Амплитуды колебаний маятника и время колебаний могут быть измерены с помощью приборов, откалиброванных с высокой точностью, на несколько порядков большей, чем точность измерения малого тока в катушке электромагнита в прототипе. Поэтому предлагаемый способ не нуждается в дополнительной калибровке.

Процедура аппроксимации экспериментальной зависимости α_i от t_i теоретической зависимостью на основании формулы (3) позволяет с высокой точностью вычислить методом наименьших квадратов значение параметра c , с помощью которого по формуле (4) вычисляется работа σ .

Формула (3) позволяет реализовать метод наименьших квадратов. Она выводится путем решения уравнения колебаний маятника методом асимптотической теории нелинейных колебаний [5]

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} + mgR\varphi = -mgR(c + b\varphi^p) \operatorname{sign}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right), \quad (6)$$

где I - момент инерции маятника.

В этом уравнении множитель

$$M = mgR(c + b\varphi^p) \quad (7)$$

представляет собой момент силы трения качения, действующий на маятник и обусловленный влиянием сил адгезии, возникающих при взаимодействии поверхности пробных тел (шариков) и образца. Здесь составляющая момента силы трения

$$M_1 = mgRc \quad (8)$$

представляет собой минимальный момент этой силы $M_1 = M_{\min} = M(0)$, который непосредственно связан с работой отрыва единицы площади поверхности пробного тела от поверхности образца. Эта составляющая не зависит от угла φ отклонения маятника от положения равновесия. Поэтому работа этой силы

$$A = \int_0^{\varphi} M_1 d\varphi = mgRc\varphi. \quad (9)$$

Можно показать, что составляющая момента силы трения

$$M_2 = mgRb\varphi^p. \quad (10)$$

связана с потерями энергии маятника на гистерезис сил адгезии и сил упругости при контакте образца и пробных тел, когда отрыв их поверхностей не происходит, но имеет место лишь их деформация.

Площадь взаимодействия шариков и образцов S рассчитывается по следующей формуле

$$S = 4aR\varphi. \quad (11)$$

Тогда работа адгезионного отрыва в соответствии с (2), (9) и (11) дается формулой

$$\sigma = \frac{A}{S} = \frac{mgRc\varphi}{4aR\varphi} = \frac{mgc}{4a}. \quad (12)$$

Формула (11) выводится из кинематики качения шарика при $\varphi \ll 1$. Площадь S - это площадь боковой поверхности шариков и образца, которые периодически прилипают и отлипают друг от друга.

Формула (5) для расчета радиуса пятна упругого контакта a является стандартной, хорошо известной формулой Герца, получаемой при решении задачи упругого контакта шарика и плоской поверхности [4].

Фиг. 1 иллюстрирует способ применения двух пробных тел для измерения работы адгезионного отрыва.

Фиг. 2 иллюстрирует взаимодействие пробного тела и образца.

На фиг. 3 показаны результаты измерений амплитуд колебаний и соответствующих моментов времени, а также результат их аппроксимации теоретической зависимостью по формуле (3) в реальном опыте по измерению работы адгезионного отрыва.

На фиг. 1 два пробных тела 1, выполненные в виде шариков, являются опорой маятника 2. Маятник прижимает своим весом эти пробные тела к двум одинаковым образцам 3, выполненным в виде плоских пластин из одного материала. Маятник имеет возможность совершать колебания в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка, опираясь на эти пробные тела.

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

На фиг. 3 показаны все измеренные на опыте 480 амплитуд и соответствующие им моменты времени, которые образовали жирную линию, а также аппроксимирующая их пунктирная кривая, построенная в соответствии с формулой (3).

Опишем возможную реализацию предлагаемого способа на примере измерений величины σ конкретного образца. Два пробных тела 1 в виде корундовых шариков с радиусами $R = 5$ мм используют в качестве опор маятника 2. Взвешивают маятник и определяют его массу $m = 1,256$ кг. Устанавливают маятник на поверхности двух одинаковых кремниевых пластин. Используя известную формулу [4]

$$E^* = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}, \quad (13)$$

определяют приведенный модуль упругости $E^* = 9,88 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ по известным значениям модуля упругости $E_1 = 3,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ шарика и модуля упругости кремниевых пластин $E_2 = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, 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. Отклоняют маятник на угол $\alpha_0 = 7,6 \cdot 10^{-4}$ рад, удовлетворяющий условию $\alpha_0 < 0,1 \frac{a}{R}$, и освобождают

его. Далее измеряют амплитуды свободных колебаний α_i и соответствующие им моменты времени t_i . Используя формулу (3), методом нелинейной аппроксимации находят значения параметров b , c и p ($b = 1,04 \cdot 10^{-3}$, $c = 9,5 \cdot 10^{-9}$, $p = 0,86$). При этом была получена оценка относительного среднего квадратического отклонения (СКО) значений, полученных теоретически, от экспериментальных значений, которая оказалась равной 0,3 %.

Используя формулу (4), находят искомое значение работы адгезионного отрыва $\sigma = \frac{A}{S} = \frac{mgc}{4a} = 0,75 \cdot \text{мДж/м}^2$. Это значение величины σ совпадает по порядку величины с

результатами, полученными с помощью сложной методики для пар кремниевый зонд-слюда и кремниевый зонд-кальцит на СЗМ в [6], а также с результатами, приведенными в [7], но отличается на порядки от значений, полученных способом-прототипом [2].

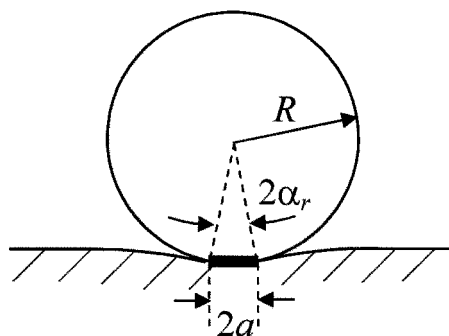
В отличие от прототипа, в предлагаемом способе на каждом этапе вычислений и измерений может быть получена оценка погрешности совершаемой операции. По-существу, полученное значение 0,3 % СКО является значением погрешности оценки параметра c ,

входящего в формулу $\sigma = \frac{mgc}{4a}$. Отсюда видно, что погрешность измерения величины σ в

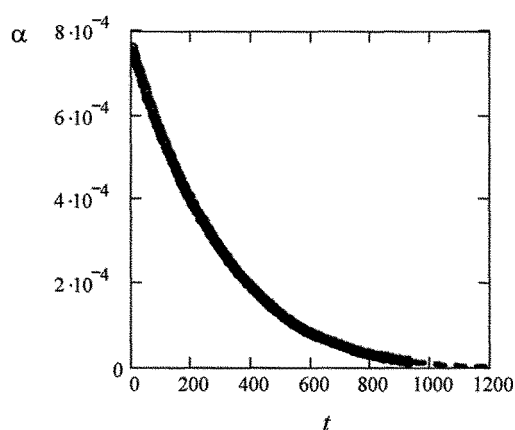
предлагаемом способе совпадает с этим значением СКО, поскольку значения других параметров, вошедших в эту формулу, могут быть получены с меньшей погрешностью.

Источники информации:

1. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И. Методы исследования материалов. - М.: Мир, 2004. - С. 237-238.
2. 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.
3. Физический энциклопедический словарь. Т. 1. - М.: Сов. Энциклоп. - С. 19.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. - М.: Мир, 1989. - 510 с.
5. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1974. - 504 с.
6. 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.
7. Ковалев А.В., Ковалева И.Н., Мышкин Н.К. Феноменологическая модель адгезионного контакта // Трение и износ. - Т. 26. - № 6. - 2005. - С. 575-585.



Фиг. 2



Фиг. 3