

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 11588

(13) С1

(46) 2009.02.28

(51) МПК (2006)

G 01N 19/02

## (54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

(21) Номер заявки: а 20070484

(22) 2007.04.27

(43) 2008.12.30

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

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

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

(56) ГОСТ 27640-88. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения. - М.: Издательство стандартов, 1988. - С. 2-17.

ВУ 6790 С1, 2005.

RU 54433 U1, 2006.

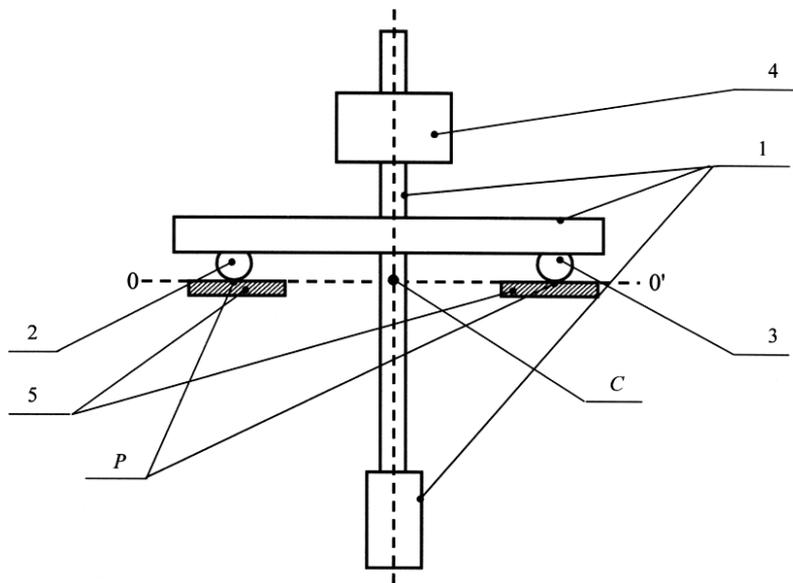
SU 1434334 A2, 1988.

JP 1284736 A, 1989.

(57)

Способ определения коэффициента трения качения, в котором возбуждают свободные колебания физического маятника, опирающегося двумя шариками на поверхность исследуемого образца, задают начальную амплитуду колебаний  $\alpha_0$ , измеряют конечную амплитуду колебаний  $\alpha_n$  по истечении заданного числа  $n$  полных колебаний, и определяют коэффициент трения качения  $f_k$  в соответствии с выражением:

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



Фиг. 2

**отличающийся** тем, что маятник предварительно балансируют так, чтобы его центр тяжести находился на мгновенной оси вращения в моменты прохождения им положения равновесия, определяют угол статического контакта шариков и поверхности  $\alpha_r$  в соответствии с выражением:

$$\alpha_r = \frac{r}{R},$$

где  $r$  - радиус пятна контакта шарика с поверхностью образца;

$R$  - радиус шарика,

а начальную амплитуду колебаний  $\alpha_0$  задают, исходя из условия  $\alpha_0 < 0,5\alpha_r$ .

Изобретение относится к области измерительной техники и может быть использовано при исследовании физико-механических параметров поверхности материалов.

Известен способ определения коэффициента трения при качении шарика по плоской поверхности [1], в котором шарик помещают между двумя плоскими параллельными образцами исследуемого материала, подвергают верхний образец заданной нагрузке и измеряют силу, необходимую для того, чтобы привести этот образец в движение параллельно нижнему образцу. Коэффициент трения здесь получают, разделив силу перемещения на нагрузку.

Наиболее близким к предлагаемому является способ [2], в котором для определения коэффициента трения качения используют физический маятник, опирающийся двумя шариками на поверхность испытываемого образца. В этом способе приводят маятник в состояние свободных колебаний, так чтобы его амплитуда приняла заданное значение  $\alpha_0$ . Далее измеряют количество  $n$  колебаний, которые маятник совершает при затухании амплитуды на, примерно, 20 %, затем измеряют конечную  $\alpha_n$  амплитуду колебаний и определяют коэффициент трения качения  $f_k$  по формуле:

$$f_k = \frac{\cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{2n(\alpha_0 + \alpha_n)}. \quad (1)$$

Основным недостатком данного способа является большая погрешность. Эта погрешность обусловлена следующими причинами.

1. В нем не обеспечены условия чистого качения шариков. Качение шариков по поверхности исследуемого образца сопровождается их скольжением. Это скольжение возникает из-за того, что в процессе колебаний маятника его центр масс совершает возвратно-поступательное движение. Это движение могут обеспечить только силы трения покоя или скольжения, действующие на шарик параллельно поверхности. Если сила трения покоя мала, то возникнет скольжение шариков по поверхности.

2. Шарика взаимодействуют с поверхностью через так называемое пятно упругого контакта, размеры которого определяются в теории упругости [3]. Если шарика и поверхность достаточно жесткие, радиус упругого пятна контакта  $r$  составляет несколько десятков микрометров.

При чистом качении без скольжения амплитуда  $l$  линейного перемещения шариков с радиусом  $R$  вдоль плоской поверхности связана с амплитудой  $\alpha$  колебаний по формуле

$$l = \alpha R. \quad (2)$$

Если сила трения покоя достаточно велика, чтобы удержать шарика от скольжения, между шариком и поверхностью будут возникать упругие напряжения, приводящие к их деформации. При достаточно большой амплитуде качаний маятника, когда выполняется соотношение  $l > r$  и маятник, меняя свое положение, выходит за пределы первоначального пятна контакта, деформированные участки шарика и поверхности будут скользить относительно друг друга. Деформация поверхностей пропорциональна сдвигающей силе. В

данном случае она пропорциональна горизонтальной составляющей ускорения центра масс.

Указанные механизмы, вызывающие проскальзывание или деформации шариков и поверхности, приводят к дополнительным потерям энергии качаний маятника и к погрешности измерений трения качения.

3. Поверхность, на которую опираются шарики, всегда подвержена действию вибраций. Наибольшее влияние оказывают горизонтальные вибрации поверхности. Это влияние пропорционально расстоянию от центра масс до мгновенной оси вращения.

4. Формула (1), строго говоря, справедлива лишь при условии независимости силы трения от величины скорости качения (трение подчиняется закону Кулона). На опыте признаком такого трения является линейный закон убывания амплитуды колебаний маятника, который, чаще всего, не наблюдается. Это связано с тем, что при колебаниях маятника с большой амплитудой пятно контакта совершает перемещения на расстояния, больше своего радиуса. Поэтому расчет по формуле (1) приводит к большой методической погрешности.

Задачей изобретения является повышение точности измерений.

Решение этой задачи обеспечивается тем, что в известном способе определения коэффициента трения качения, в котором возбуждают свободные колебания физического маятника, опирающегося двумя шариками на поверхность исследуемого материала, задают начальную амплитуду  $\alpha_0$ , измеряют конечную амплитуду колебаний  $\alpha_n$  по истечению заданного числа  $n$  полных колебаний и определяют коэффициент трения качения  $f_k$  в соответствии с выражением:

$$f_k = \frac{\cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{2n(\alpha_0 + \alpha_n)} \quad (3)$$

при этом предварительно балансируют маятник так, чтобы его центр тяжести находился на мгновенной оси вращения в моменты прохождения им положения равновесия, определяют угол статического контакта шариков и поверхности  $\alpha_r$  в соответствии с выражением:

$$\alpha_r = \frac{r}{R}.$$

где  $r$  - радиус пятна контакта шарика с поверхностью образца;

$R$  - радиус шарика,

а начальную амплитуду колебаний  $\alpha_0$  задают, исходя из условия  $\alpha_0 < 0,5\alpha_r$ .

Обеспечение балансировки маятника сводит к минимуму возможность его проскальзывания вдоль поверхности, поскольку при выполнении условия балансировки горизонтальная составляющая ускорения центра тяжести минимальна.

Кроме того, обеспечение этого условия сводит к минимуму действие горизонтальных вибраций основания на колебания маятника, поскольку момент сил трения, действующих на шарик со стороны основания при таких вибрациях, будет равен нулю.

Реализация режима измерений, в котором начальная амплитуда  $\alpha_0$  меньше половины угла статического контакта шариков и поверхности, практически устраняет проскальзывание шариков, обусловленное деформациями поверхности шариков и опорной поверхности.

Кроме того, этот режим обеспечивает независимость сил трения от скорости качения шариков, поскольку пятно контакта при этом практически не перемещается. Поэтому в этом режиме методическая погрешность формулы (3), связанная с перемещением пятна, сводится к минимуму.

На фиг. 1 показан в увеличенном виде контакт шарика с поверхностью, на которую он опирается. Эта фигура иллюстрирует понятия "пятно контакта", "радиус пятна контакта" и "угол статического контакта", употребляемые в тексте.

На фиг. 2 приведен фронтальный схематический вид маятника, опирающегося двумя шариками на испытываемую поверхность.

На фиг. 3 вид того же маятника в профиль.

На фиг. 4 приведен вид части маятника в способе-прототипе.

На фиг. 5 дан пример балансировки маятника.

Физический маятник содержит Т-образное с утолщением на конце тело маятника 1, опоры качения, которые выполнены в виде двух шариков 2 и 3, а также груз 4. Шарик опираются на плоские полированные опорные площадки 5. Точка С на фиг. 1 и фиг. 2 показывает положение центра тяжести сбалансированного маятника. На фиг. 4 точка С' показывает положение центра тяжести маятника в способе-прототипе. Мгновенная ось вращения 00' сбалансированного маятника проходит через точки контакта шариков Р с опорными площадками, а также через центр тяжести маятника С. R - радиус шарика, F<sub>тр</sub> - сила трения, r - радиус пятна контакта, α<sub>т</sub> - угол контакта, α - ускорение основания (поверхности), α<sub>с</sub> - ускорение центра масс несбалансированного маятника.

На фиг. 1 и фиг. 2 положение груза 4 подобрано так, что центр тяжести С сбалансированного маятника находится на мгновенной оси вращения маятника 00', когда маятник занимает вертикальное положение (положение равновесия).

Покажем, что балансировка маятника позволяет исключить влияние горизонтальных вибраций основания на колебания маятника. Пусть маятник занимает вертикальное положение (находится в положении равновесия). При наличии горизонтального ускорения а основания (фиг. 4) на шарик будет действовать сила трения F<sub>тр</sub>. При выполнении условия l = R момент этой силы относительно центра масс будет равен нулю, и маятник не будет поворачиваться под действием силы трения.

Маятник в способе-прототипе несбалансирован. Поэтому в нем l<sub>с</sub> >> R и ускорение основания будет выводить маятник из положения равновесия, т.е. влиять на его колебания.

Покажем теперь, что балансировка маятника позволяет также существенно уменьшить ускорение горизонтальной составляющей центра масс и, как следствие, уменьшить усилие, сдвигающее маятник вдоль поверхности. Динамика колебаний маятника с опорой в виде шарика рассмотрена в работе [4]. В этой работе показано (формула (2')), что горизонтальная составляющая центра масс шарика дается формулой

$$\alpha_c = (l_c \cos \varphi - R) \ddot{\varphi} - l_c \dot{\varphi}^2 \sin \varphi. \quad (4)$$

Из этого уравнения видно, что при  $\varphi \ll 1$  и  $l_c \approx R$  по порядку величины ускорение  $\alpha_c \approx \frac{1}{2} l_c \omega_0^2 \varphi^3$ , т.е. становится пренебрежимо малой. Условие  $\varphi \ll 1$  определяется в предлагаемом способе измерений. Как уже отмечалось, наличие горизонтальной составляющей ускорения маятника возможно лишь при наличии горизонтальной составляющей силы трения, которая появляется при воздействии шарика на опору.

Следовательно, при балансировке маятника в предлагаемом способе горизонтальное воздействие маятника на опору становится минимально возможным.

Рассмотрим пример выполнения способа.

1. Балансируют маятник. Для этого располагают маятник горизонтально, положив его на ребро призмы 6 (фиг. 5), установленной на линии 00', соединяющей точки Р шариков. Перемещая груз 4, добиваются равновесия этого маятника.

2. Рассчитывают угол статического контакта по формуле  $\alpha_t = \frac{r}{R}$ , при этом значение r рассчитывают по известным формулам Герца [3].

2. Устанавливают маятник на испытываемую поверхность в вертикальном положении так, чтобы он опирался шариками 2 и 3 на поверхность испытываемых образцов 5.

Задают количество свободных колебаний n, которое должен совершить маятник.

3. Отклоняют маятник от положения равновесия на некоторый угол  $\alpha > \alpha_t$  и освобождают его.

4. Маятник начинает совершать затухающие свободные колебания. Когда амплитуда маятника станет меньше половины угла  $\alpha_r$ , измеряют амплитуду и принимают ее за начальную амплитуду колебаний  $\alpha_0$ .

5. Отсчитывают количество полных колебаний  $n$  маятника, измеряют амплитуду колебаний и принимают ее за конечную амплитуду  $\alpha_n$ .

6. По формуле (1) вычисляют коэффициент трения качения.

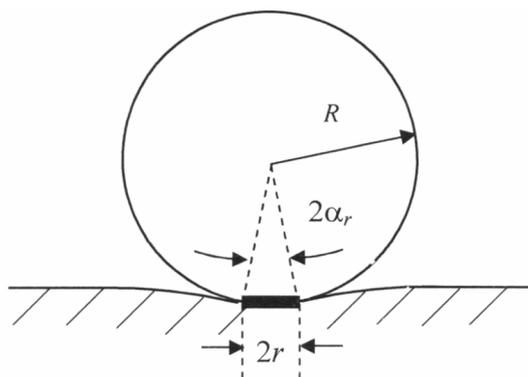
Источники информации:

1. Боуден Ф.П., Тэйбор Д. Трение и смазка твердых тел. - М.: Машиностроение, 1968. - С. 277-278.

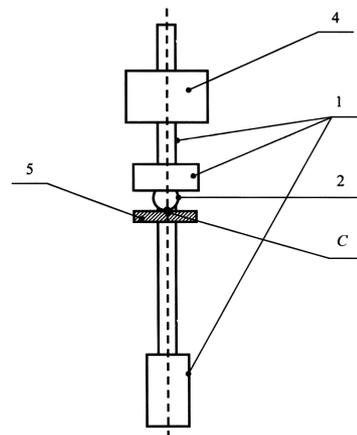
2. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения. ГОСТ 27640-88. - М.: Издательство стандартов, 1988. - С. 2, 9.

3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. - М.: Мир, 1989. - С. 480.

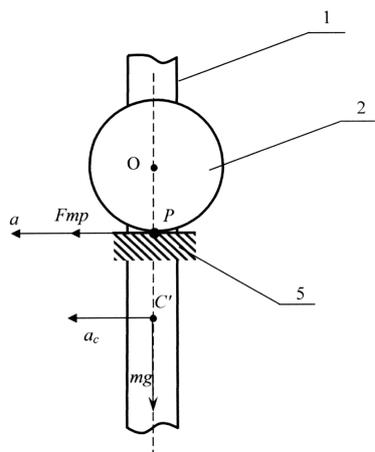
4. Джилавдари И.З. Проблемы динамики маятника с опорой качения / Метрологическое обеспечение качества-2000. Материалы Междунар. научн.-техн. конф. / Под ред. В.Л. Соломахо. - Мн.: Тесей, 2000. - С. 171-176.



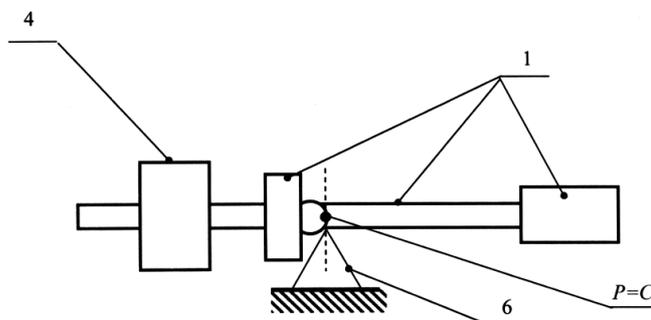
Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5