

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **8093**
(13) **С1**
(46) **2006.06.30**
(51)⁷ **G 01N 3/40**

(54)

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

(21) Номер заявки: а 20030267
(22) 2003.03.26
(43) 2004.09.30
(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)
(72) Автор: Джилавдари Игорь Захарович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)
(56) 1. ГОСТ 5233-89.
2. RU 2068556 С1, 1996.

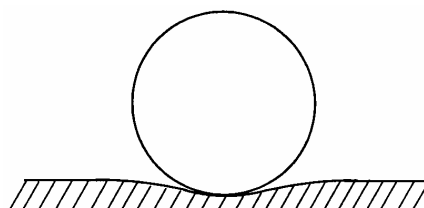
(57)

1. Способ измерения твердости, заключающийся в том, что возбуждают свободные колебания маятника, опирающегося двумя шариками на плоскую поверхность испытуемого тела, задавая начальное α_1 и конечное α_2 значения амплитуды колебаний, **отличающийся** тем, что измеряют длительность \tilde{T}_i последовательных повторяющихся циклов колебаний одновременно с промежуточными значениями амплитуд колебаний α_i , соответствующих моментам окончания этих циклов, до заданного конечного значения амплитуды колебаний α_2 , определяют экспериментальную зависимость длительности цикла \tilde{T}_i^{-2} от амплитуды α_i , в соответствии с которой выбирают модель аналитической зависимости \tilde{T}_i от α_i , связанную с деформацией поверхности тела под действием веса маятника, определяют радиус кривизны $R_{\text{деф}}$ упомянутой деформации при заданном значении амплитуды α_0 , а безразмерное значение твердости испытуемого тела определяют из соотношения:

$$H_T = \frac{R_{\text{деф}}}{R_{\text{шар}}},$$

где $R_{\text{шар}}$ - радиус шариков.

2. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что значение α_0 выбирают равным нулю.
3. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что значение $R_{\text{деф}}$ определяют методом наименьших квадратов, аппроксимируя зависимость параметра \tilde{T}_i^{-2} от амплитуды α_i .



Фиг. 1

ВУ 8093 С1 2006.06.30

ВУ 8093 С1 2006.06.30

Изобретение относится к области измерительной техники, в частности к области исследования физико-механических параметров материалов, и может быть использовано для оценки твердости и упругости поверхности твердых тел и покрытий.

Известен способ измерения статической твердости материалов "по отпечатку" путем вдавливания индентора в исследуемое тело [1]. Здесь мерой твердости служит отношение давления к площади отпечатка.

Недостаток этого метода состоит в том, что он приводит к повреждению поверхности тела. Кроме того, он позволяет оценить, в основном, пластические свойства материалов [1, стр.77; 2, стр. 340].

Также известен способ определения упругой твердости металлов - "метод упругого отскока" [1, стр. 75-76]. Здесь мерой твердости является высота отскока бойка, падающего на поверхность испытываемого тела с заданной скоростью.

Недостаток этого метода - низкая точность. Она объясняется тем, что значительная неконтролируемая часть энергии бойка теряется за счет пластической деформации тела и трения между бойком и телом в процессе их деформации. Кроме того, здесь возникает проблема учета влияния скорости деформирования бойка и тела.

Наиболее близким к предлагаемому является маятниковый способ измерения твердости [3]. В этом способе измеряют время t_1 затухания свободных колебаний маятника, опирающегося двумя шариками на контрольное тело (например, стеклянную пластинку, и тогда это время называют стеклянным числом), затем измеряют время t_2 затухания свободных колебаний этого же маятника на испытываемом теле. Здесь мерой твердости H является отношение [3, стр. 4]:

$$H = \frac{t_2}{t_1} \approx \frac{N_2}{N_1}, \quad (1)$$

где N_1 и N_2 - число колебаний, совершенных маятником в процессе колебаний на испытываемом теле и контрольном теле.

Основной недостаток этого способа заключается в низкой точности. Это связано с большим влиянием трения на результат измерения. Затухание амплитуды колебаний маятника связано, в конечном счете, не с твердостью поверхности испытываемого тела, а с трением, сопровождающим качение шарика по этой поверхности, и с трением от воздействия на маятник окружающей среды. Трение качения шарика обусловлено, в основном, упругим гистерезисом [2, стр. 291], который связан с внутренним трением материала [4, стр. 15, 17-19] испытываемого тела.

Более того, измерение времени или числа колебаний, совершенных маятником в процессе затухающих колебаний между заданными начальной и конечной амплитудами, лежит в основе известного способа измерения коэффициента именно трения качения [5, стр. 9]. Здесь коэффициент трения качения определяют по формуле:

$$f_k = \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}{2N(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (2)$$

где α_1 и α_2 , соответственно, начальная и конечная амплитуды колебаний;

N - число колебаний маятника.

Если взять отношение коэффициентов трения качения двух тел, то получим формулу (1). Следовательно, соотношение (1), по существу, есть отношение коэффициентов трения испытываемого и контрольного тел. Механизм связи трения качения и твердости не установлен и количественная связь между ними неизвестна [2, 6]. Поэтому данный способ может быть мерой твердости лишь косвенно с большой методической погрешностью.

Задачей изобретения является увеличение точности измерений твердости тела.

Решение поставленной задачи обеспечивается тем, что в известном способе измерения твердости, заключающемся в том, что возбуждают свободные колебания маятника, опирающегося двумя шариками на плоскую поверхность испытываемого тела, задавая начальное α_1 и конечное α_2 значения амплитуды колебаний, дополнительно:

ВУ 8093 С1 2006.06.30

измеряют длительность \tilde{T}_i одновременно с промежуточными значениями амплитуд колебаний α_i , соответствующих моментам окончания этих циклов, до заданного значения α_2 ,

определяют экспериментальную зависимость длительности цикла \tilde{T}_i^{-2} от амплитуды α_i , в соответствии с которой выбирают модель аналитической зависимости \tilde{T}_i^{-2} от α_i связанную с деформацией поверхности тела под действием веса маятника,

определяют радиус кривизны $R_{\text{деф}}$ упомянутой деформации при заданном значении амплитуды α_0 ,

безразмерное значение твердости тела определяют из соотношения:

$$H_T = \frac{R_{\text{деф}}}{R_{\text{шар}}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{шар}}$ - радиус шариков.

В частности, в данном способе значение амплитуды α_0 выбирают равным нулю. В частности, в данном способе значение $R_{\text{деф}}$ определяют методом наименьших квадратов, аппроксимируя зависимость параметра \tilde{T}_i^{-2} от амплитуды α_i .

Измерение длительностей \tilde{T}_i последовательных повторяющихся циклов колебаний позволяет измерить тот физический параметр, который непосредственно и физически ясно связан с деформацией поверхности опоры маятника. В этом случае влияние трения на значение твердости сводится к минимуму, поскольку период свободных колебаний очень слабо (квадратично) зависит от коэффициента трения [7]. Это обеспечивает более высокую точность измерения твердости по сравнению с прототипом, где измеряют время затухания колебаний, обусловленного именно трением.

Измерения промежуточных значений амплитуд α_i вместе с измерениями длительностей последовательных циклов \tilde{T}_i позволяет установить зависимость \tilde{T}_i от α_i , причиной которой является деформация поверхности тела под действием веса маятника.

Определение экспериментальной зависимости длительности цикла \tilde{T}_i^{-2} от амплитуды α_i , позволяет выбрать модель аналитической зависимости \tilde{T}_i^{-2} от α_i , которая связана с деформацией поверхности тела под действием веса маятника и, тем самым, найти количественную характеристику деформации поверхности исследуемого тела под действием веса маятника, а именно радиус $R_{\text{деф}}$ лунки, в которой катается каждый из двух шариков. Причем, чем больше твердость поверхности тела, тем больше этот радиус (см. фиг. 1). Абсолютно твердое тело вообще не деформируется, и $R_{\text{деф}} = \infty$; если же твердость тела уменьшается, то $R_{\text{деф}} \rightarrow R_{\text{шар}}$. Сравнивая значения $R_{\text{деф}}$ различных тел, можно сравнить их твердость.

Вычисление радиуса кривизны $R_{\text{деф}}$ деформации поверхности различных тел при одном и том же заданном значении амплитуды α_0 необходимо, поскольку значение $R_{\text{деф}}$ зависит от амплитуды колебаний маятника, и вид этой зависимости, в общем случае, различен у различных материалов. Практика и анализ причин зависимости \tilde{T}_i от α_i показали, что величина α_0 должна быть минимально возможной.

Определение твердости тела по формуле (3) позволяет установить безразмерный критерий твердости материала, не требующий использования каких - либо дополнительных контрольных тел. В данном случае контрольным телом является сам шарик.

Вычисление значения $R_{\text{деф}}$ при $\alpha_0 = 0$ может позволить увеличить точность оценки твердости, поскольку позволяет определить минимально возможное значение параметра $R_{\text{деф}}$, характерное для каждого тела, исключив влияние такого случайного фактора, как текущее значение амплитуды.

ВУ 8093 С1 2006.06.30

Использование метода наименьших квадратов является стандартной процедурой обработки экспериментальных результатов.

На фиг. 1 показана деформация исследуемого тела под действием веса маятника, опирающегося шариком на поверхность этого тела.

На фиг. 2 представлен график зависимости длительности цикла колебаний маятника от номера цикла в заданном интервале уменьшения амплитуды для исследуемых тел.

На фиг. 3 представлен график зависимости длительности цикла колебаний маятника от амплитуды колебаний в заданном интервале уменьшения амплитуды для исследуемых тел.

На фиг. 4 представлены кривые (сплошные линии), аппроксимирующие зависимость величины \tilde{T}_i^{-2} от амплитуды колебаний (отдельные точки), аналитической зависимостью, полученной методом наименьших квадратов для исследуемых тел.

Фиг. 1 поясняет механизм, приводящий к зависимости периода маятника от амплитуды.

Графики на фиг. 2 и фиг. 3 получены на основе реальных измерений длительностей циклов и амплитуд колебаний.

Кривые на фиг. 2 дают представление о темпе затухания колебаний маятника на каждом из исследуемых тел, выполненных из различных материалов в виде плоских полированных пластин.

Каждый цикл колебаний на фиг. 2-4 включал десять периодов колебаний маятника. Измерение длительности циклов, а не периодов колебаний, позволило уменьшить количество проводимых измерений и уменьшить разброс результатов от влияния вибраций основания. Число периодов, входящих в один цикл, было выбрано из соображения обеспечения простоты измерений.

Значения длительностей циклов, показанные на фиг. 2 и фиг. 3, были получены в одном и том же диапазоне изменения амплитуд колебаний маятника: от начального значения $\alpha_1 \approx 15$ угл. мин. до конечного значения $\alpha_2 \approx 0,6$ угл. мин.

Значения циклов на кривых, обозначенных номером 1, получены для твердого сплава ВК6-ОМ; на кривых с номером 2 - для сапфира; на кривых с номером 3 - для концевых мер длины (сталь ШХ15); на кривых с номером 4 - для латуни; на кривых с номером 5 - для твердого сплава ВК3.

Аппроксимация, результаты которой приведены на фиг. 4, осуществлялась методом наименьших квадратов по первым шести точкам на каждой из экспериментальных зависимостей, показанных на фиг. 3. Эта аппроксимация позволила провести экстраполяцию данных и получить значения $R_{\text{деф}}$ при $\alpha = 0$.

Из фиг. 3 видно, что вид кривых зависимости \tilde{T}_i от α_i , для различных материалов существенно различается: некоторые из кривых имеют максимумы, другие кривые имеют монотонный характер во всем интервале амплитуд. При больших амплитудах это различие еще больше. Однако при амплитудах, стремящихся к нулю, характер этой зависимости у всех материалов одинаковый: при уменьшении α_i длительность \tilde{T}_i циклов колебаний монотонно уменьшается вплоть до самых малых амплитуд.

Этот факт установлен впервые, и именно он позволяет установить физически ясный количественный критерий твердости материалов - $R_{\text{деф}}$.

Качественное обоснование предлагаемого способа состоит в следующем. Монотонное уменьшение длительности периода или цикла колебаний маятника при уменьшении амплитуды в области малых значений этих амплитуд можно объяснить тем, что шарик, входящий в подвижную часть опоры маятника и имеющий радиус $R_{\text{шар}}$, опираясь на плоскую поверхность неподвижной опоры, т.е. на поверхность испытываемого тела, продавливая лунку радиусом $R_{\text{деф}} > R_{\text{шар}}$. Радиус лунки зависит от твердости тела, на которое опирается маятник, и от амплитуды колебаний шарика. С уменьшением амплитуды радиус лунки уменьшается.

Важно, что полученный на опыте характер зависимости \tilde{T}_i от α_i нельзя объяснить влиянием других факторов, например трением. Расчет показал, что для приведенных выше материалов трение могло изменить длительность циклов колебаний не более, чем на 2 % от наблюдаемого.

Получим формулу для вычисления $R_{\text{деф}}$. Известно [8], что при свободных колебаниях маятника с опорой в виде подвижного шарика радиусом $R_{\text{шар}}$, опирающегося на неподвижную вогнутую сферическую поверхность радиусом R_2 , период колебаний T определяется формулой:

$$T^{-2} \approx T_0^{-2} \left(1 + \frac{R_{\text{шар}}}{L} \frac{R_{\text{шар}}}{R_2 - R_{\text{шар}}} \right), \quad (4)$$

где L - расстояние от центра шарика до центра масс маятника;

T_0 - значение T при $R_1 = 0$.

Из формулы (4) следует очевидный результат: чем меньше разность $R_2 - R_{\text{шар}}$, тем меньше период колебаний маятника T . При деформации неподвижной поверхности радиус R_2 зависит от амплитуды колебаний. Эта зависимость приводит к зависимости от амплитуды величины T .

Исходя из этих соображений и полагая, что затухание маятника мало, так что изменение периода колебаний мало в пределах нескольких колебаний, образующих измеряемый цикл, экспериментальную зависимость длительности цикла \tilde{T}_i^{-2} от амплитуды α , показанную в виде отдельных точек на фиг. 3, можно описать аналитически с помощью уравнения регрессии:

$$\tilde{T}^{-2} = p_0 \left[1 + \frac{R_1}{L} \frac{p_1}{(\alpha + p_2)^{1.5}} \right], \quad (5)$$

где p_0 , p_1 и p_2 - параметры регрессии, которые можно найти методом наименьших квадратов.

Тогда из формул (4) и (5) следует, что зависимость R_2 от α имеет вид:

$$R_2(\alpha) = \frac{p_1 + (\alpha + p_2)^{1.5}}{p_1} \quad (6)$$

Определив параметры p_1 и p_2 , из формулы (6) можно найти значение $R_{\text{деф}}$ как значение R_2 при заданном значении α , например при $\alpha = 0$:

$$R_{\text{деф}} = R_2(0) = \frac{p_1 + p_2^{1.5}}{p_1}. \quad (7)$$

Предлагаемый способ, в частности, осуществляют следующим образом. Устанавливают маятник на плоскую полированную поверхность испытываемого тела, отклоняют на заданный начальный угол α_1 и отпускают. В момент прохождения маятником положения равновесия запускают таймер и измеряют длительность \tilde{T}_i последовательных циклов колебаний, каждый включающий десять полных качаний. Одновременно измеряют амплитуды колебаний α_i , соответствующие моментам окончания этих циклов. Измерения проводят до заданного значения амплитуды α_2 .

Используя формулу (5), решают задачу аппроксимации зависимости \tilde{T}_i^{-2} от α_i аналитической зависимостью, определяют параметры p_1 и p_2 и по формуле (7) находят значение параметра $R_{\text{деф}}$.

По формуле (3) находят безразмерное значение твердости H_T испытываемого тела.

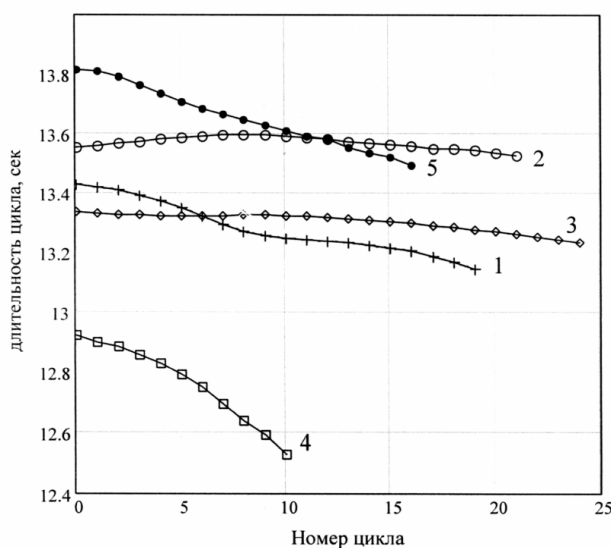
Математическая обработка результатов, представленных на фиг. 4, дала следующие значения H_T для исследуемых тел: сапфир - 65,7; сплав ВК6-0М - 29,1; сплав ВК6 - 20,6; сталь ШХ15- 20,4; латунь - 11,6.

Из этих результатов следует, что предлагаемый способ позволяет существенно расширить диапазон исследуемых материалов и провести измерение твердости любых пластических и хрупких тел, в том числе, минералов, металлов и сверхтвердых материалов, таких как сапфир и сплавы ВК3 и ВК6-ОМ.

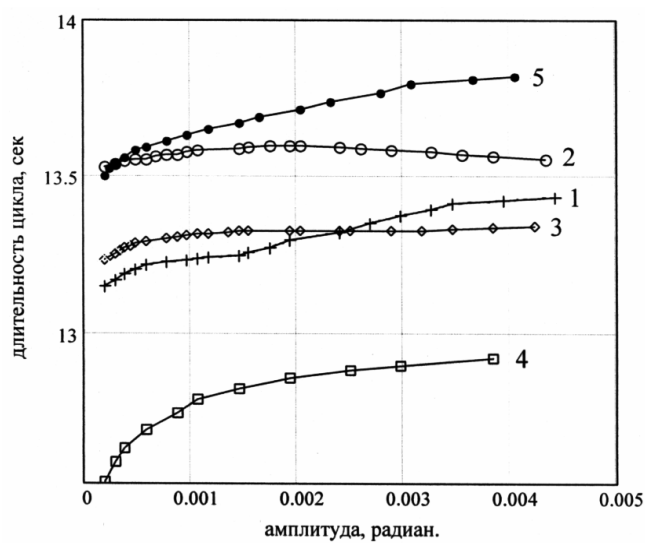
Предлагаемый способ является уникальным, поскольку не существует других методов, позволяющих оценить твердость материалов с такой высокой точностью, не оставляя отпечатка на его поверхности. Точность данного способа обеспечена наличием ясной физической модели поведения испытываемого тела в процессе качаний маятника и точностью математической модели (формула (5)). Эта точность характеризуется точностью процедуры аппроксимации, представленной на фиг. 4. Даже в худшем случае погрешность этой аппроксимации, как среднее квадратическое отклонение экспериментальных точек от кривой регрессии (5), не превышала 0,16 %. В способе - прототипе физическая и математическая модели поведения тел под действием веса маятника фактически отсутствуют, и результаты измерений содержат, в основном, качественную, а не количественную информацию.

Источники информации:

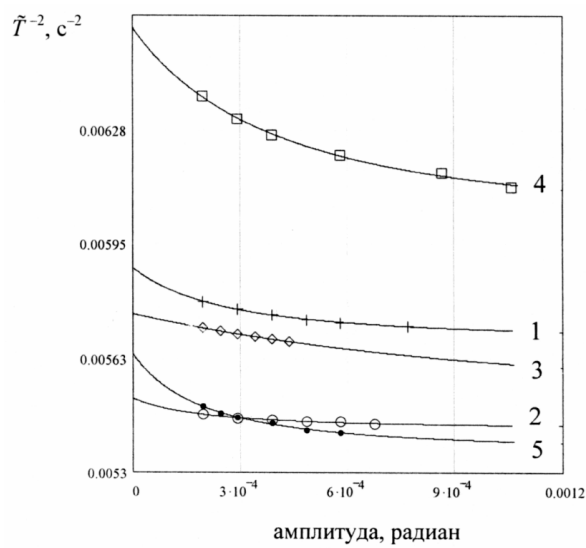
1. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. - М.: Наука, 1976. - 230 с.
2. Боуден Ф.П. и Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. - М.: Машиностроение, 1968. - 543 с.
3. ГОСТ 5233-89. Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытий по маятниковому прибору.
4. Вибрации в технике. Т.2. Колебания нелинейных механических систем. - М.: Машиностроение, 1979. - 351 с.
5. ГОСТ 27640-88. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения.
6. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. - М.: Мир, 1989. - 510 с.
7. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории колебаний. - М.: Наука, 1974.-504 с.
8. Джилавдари И.З. Проблемы динамики физического маятника с опорой качения: Материалы Международной научно-технической конференции "Метрологическое обеспечение качества -2000". - Минск, 28-30 ноября 2000 г. - С. 171-176.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4