

ОБ ОЦЕНКЕ УПРУГОЙ ТВЕРДОСТИ ТЕЛ МАЯТНИКОВЫМ МЕТОДОМ

Докт. техн. наук, проф. ДЖИЛАВДАРИ И. З.

Белорусский национальный технический университет

Испытание на твердость – одна из распространенных операций производственного контроля качества материалов и изделий. В настоящее время существует множество методов оценки твердости. Однако само понятие «твердость» не имеет общепринятого физического смысла [1]. Ее определяют неоднозначно как некую характеристику изделия, отражающую его свойство сопротивляться локальному внедрению индентера, сопровождающегося упругой и пластической деформациями [1, 2]. Значение «твердости» и размерность этого понятия зависят и от метода, и от условий измерений.

В зависимости от метода измерения различают твердость статическую, динамическую и упругую. Первые два понятия связаны с формированием и анализом отпечатков, оставляемых индентером, внедряемым в испытываемое тело при статическом нагружении или в процессе удара. Упругую твердость измеряют методом упругого отскока бойка, когда единственным параметром является высота его отскока при условии, что отпечаток не образуется. Однако это условие, как правило, не соблюдается [1].

Существует также маятниковый метод измерения твердости, который нашел применение, в основном, для измерения твердости лакокрасочных покрытий [3]. Здесь используется маятник с опорой качения в виде двух шариков, которыми он опирается на испытываемое плоское тело, расположенное горизонтально. Метод состоит в том, что задают начальную и конечную амплитуды свободных колебаний маятника и измеряют сначала время t_1 колебаний на стеклянной пластинке, а затем измеряют время t_2 колебаний этого же маятника на испытываемом теле.

Твердость H тела определяют по формуле

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

где N_1 и N_2 – число колебаний, совершенных маятником в обоих случаях.

Известно, что затухание амплитуды колебаний маятника обусловлено, в основном, трением качения из-за гистерезисных потерь, возникающих в процессе деформации контактирующих тел, и их адгезии (прилипания) [4, 5]. Кроме того, измерение числа свободных колебаний маятника лежит в основе метода измерения коэффициента трения качения [6]. Этот коэффициент определяют по формуле

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

где N – число колебаний; α_1 и α_2 – начальная и конечная амплитуды. В этом способе коэффициент μ есть величина, характеризующая диссипацию энергии колебаний, усредненная за все время наблюдения. Если взять отношение коэффициентов μ , определяемых по (2), для двух образцов, то получим формулу (1). Следовательно, (1), по существу, есть отношение коэффициентов трения качения стеклянной пластинки и испытываемого тела.

При исследовании зависимости периода свободных колебаний маятника с опорой в виде двух шариков от амплитуды было обнаружено несколько неожиданное поведение периода колебаний [7]. Оказалось, что период уменьшает-

ся при уменьшении амплитуды по закону, который не соответствует сложившемуся представлению о поведении физического маятника [8, 9]. Это явление имело место для всех исследованных тел, независимо от материала. Так же ведет себя и период маятника, ось вращения которого фиксирована в шарикоподшипниках. Объяснить данный эффект влиянием трения не удастся [7].

Его можно связать с деформацией тела, на которое опираются шарики. В опытах они практически не оставляли отпечатка, т. е. деформации испытываемых тел были упругими. В данной работе устанавливается количественная связь периода колебаний маятника с упругой деформацией тела, что позволяет оценить его упругую твердость или упругую жесткость.

Маятник массой около 300 г содержал два полированных корундовых шарика диаметром 10 мм. Измерялись длительности последовательных циклов колебаний, включавших десять полных колебаний, а также амплитуды колебаний в конце соответствующих циклов.

Измерение амплитуд осуществлялось визуально по положению луча лазера, отраженного от маятника, на шкале, установленной на расстоянии 520 см от маятника. Значение минимальной амплитуды колебаний ограничивалось условиями опытов и составляло примерно 20 угл. с. Измерение длительностей циклов колебаний проводилось гораздо точнее – с помощью частотомера между моментами засветки лучом фотоэлектронного датчика.

Результаты измерений зависимости амплитуды α от времени t представлены на рис. 1. Здесь показаны результаты для следующих материалов: 1 – сплав ВК6-ОМ; 2 – сапфир; 3 – закаленная сталь ШХ15 (концевые меры длины); 4 – латунь; 5 – стекло К8; 6 – сплав ВК3. Эти результаты дают представление о влиянии материала опоры на скорость затухания колебаний маятника, т. е. о трении качения.

Из рисунка видно, что минимальным трением обладает сталь, далее, по мере увеличения трения, идут сапфир, сплав ВК6-ОМ, сплав ВК3, стекло и латунь. Метод измерений по ГОСТ 5233–89 [3] расставит твердость этих материалов в таком же порядке.

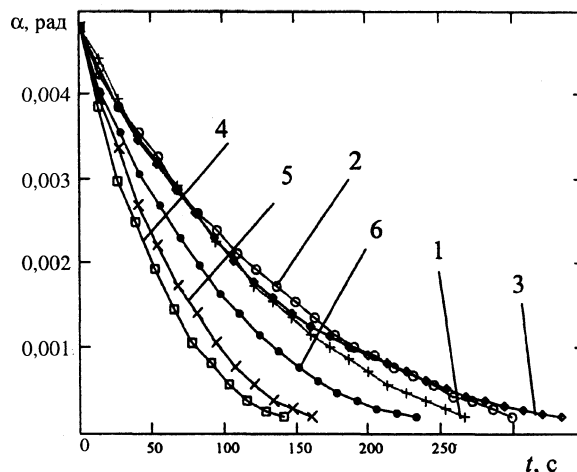


Рис. 1

Зависимость длительностей циклов колебаний от амплитуды для последних шести циклов представлена на рис. 2. Из него видно, что длительности циклов для всех материалов имеют тенденцию более или менее резкого уменьшения при уменьшении амплитуды.

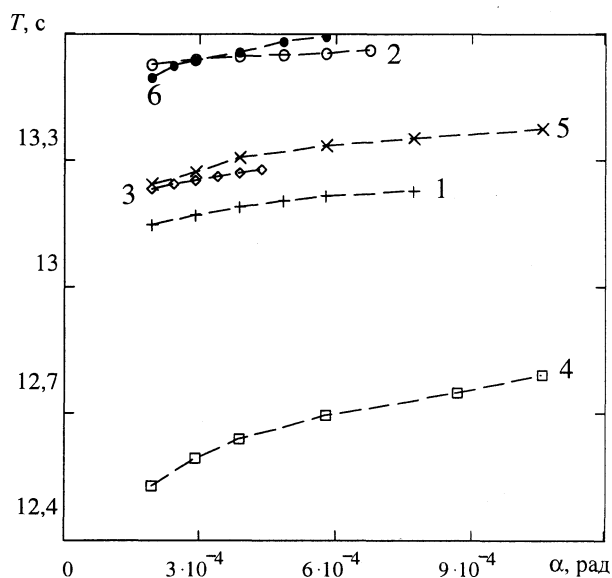


Рис. 2

Представим, что плоская поверхность испытываемых тел под шариками деформируется и образуется лунка (рис. 3). С уменьшением амплитуды колебаний радиус кривизны лунки уменьшается и частота колебаний маятника

растет. При прочих равных условиях чем тверже тело, тем больше радиус лунки и период колебаний.

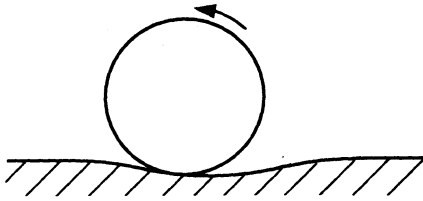


Рис. 3

Строгое решение задачи о колебаниях маятника с учетом деформации опор неизвестно. Поэтому дадим ее приближенное решение. Пусть радиус шарика R_1 и радиус лунки R_2 . Уравнение плоского движения маятника с опорой в виде твердого шарика радиусом R_1 , опирающегося на твердую неподвижную вогнутую сферическую поверхность радиусом R_2 , имеет вид [10]

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \left[\sin \varphi + \frac{R_1}{l} \sin \left(\frac{R_1}{R_2 - R_1} \varphi \right) \right] = -f(|\dot{\varphi}|) \text{sign}(\dot{\varphi}), \quad (3)$$

где φ – отклонение маятника от положения равновесия; $f(|\dot{\varphi}|)$ – момент силы трения, деленный на момент инерции маятника. При $\varphi \ll 1$ и $f(|\dot{\varphi}|) \ll \omega_0^2$ из (3) следует, что частота свободных колебаний маятника определяется по формуле

$$\omega^2 = \omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{l} \frac{R_1}{R_2 - R_1} \right). \quad (4)$$

Из (4) следует очевидный результат: чем меньше разность $R_2 - R_1$, тем больше частота колебаний ω и тем меньше период колебаний маятника.

Пусть T – длительность периода или цикла колебаний, включающего несколько периодов, и допустим, что зависимость T^{-2} от α имеет вид

$$T(\alpha)^{-2} \approx p_0 \left[1 + \frac{p_1^v}{(\alpha + p_2)^v} \right], \quad (5)$$

где v – постоянная, определяемая путем подбора. Это уравнение было выбрано из описанных выше физических соображений и попытки обеспечить максимальную точность при аппроксимации экспериментальной зависимости теоретической зависимостью. Данное уравнение будем рассматривать как уравнение регрессии, а параметры p_0 , p_1 и p_2 – как неизвестные (параметры регрессии), которые можно определить методом наименьших квадратов из экспериментальной зависимости T^{-2} от α .

Из (4) и (5) следует, что зависимость R_2 от α имеет вид

$$R_2(\alpha) = \frac{p_1^v + (p_2 + \alpha)^v}{p_1^v} R_1. \quad (6)$$

За количественную характеристику упругой твердости примем величину радиуса кривизны деформации поверхности тела, определяемую равенством

$$R_{\text{деф}} = R_2(0). \quad (7)$$

Очевидно, что для абсолютно твердого тела $R_{\text{деф}} = \infty$, для тела с малой упругостью $R_{\text{деф}} \approx R_1$. За безразмерный параметр упругой твердости можно также принять величину

$$H_T = \frac{R_{\text{деф}}}{R_1}. \quad (8)$$

Результат аппроксимации экспериментальной зависимости T^{-2} от α аналитической зависимостью (5) при $v = 1,5$ показан на рис. 4 в виде непрерывных кривых. В процессе аппроксимации были определены параметры p_0 , p_1 и p_2 для каждого из исследуемых тел. Их значения, а также значения упругой твердости H_T и средние квадратические отклонения (СКО) аналитических кривых от экспериментальных значений приведены в табл. 1. На рис. 5 представле-

ны зависимости R_2/R_1 от α для всех исследованных тел.

Таблица 1

Значения рассчитываемых параметров

Параметр	Сапфир	Сплав ВК6-ОМ	Сплав ВК3	Сталь	Латунь	Стекло
$p_0 \cdot 10^3, c^{-2}$	5,42	5,68	5,36	5,46	5,99	5,55
$p_1 \cdot 10^4$	0,18	0,40	0,39	2,50	1,22	0,56
$p_2 \cdot 10^4$	2,87	3,73	2,82	1,81	5,90	4,25
$(СКО/p_0) \times 10^4$	3,8	4,5	7,5	0,76	14,7	7,3
$H_T = \frac{R_{деф}}{R_1}$	65,70	29,14	20,56	20,39	11,65	21,80

ВЫВОД

Представленные результаты демонстрируют возможность создания нового универсального неразрушающего метода оценки упругой твердости металлических и неметаллических материалов с практически любой твердостью. Этот метод весьма перспективен при испытаниях хрупких тел и тонких покрытий, поскольку затрагивает очень тонкий слой поверхности.

Все известные методы оценки твердости «по отпечатку» связывают понятие твердости с пластической деформацией исследуемых материалов и не имеют достаточно строгой математической модели. В нашем случае, поскольку деформации являются малыми и упругими, по-видимому, можно построить более точную теорию динамики маятника, которая позволит вычислить модули упругости поверхности тел и покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
2. Завистовский В. Э., Холодилов О. В., Богданович П. Н. Физика отказов механических систем: Учеб. пособие. – Мн.: Технопринт, 1999. – 212 с.
3. ГОСТ 5233–89. Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытий по маятниковому прибору. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
4. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
6. ГОСТ 27640–88. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения.
7. Джилавдари И. З. Исследование упругости и упругого гистерезиса поверхности материалов на основе

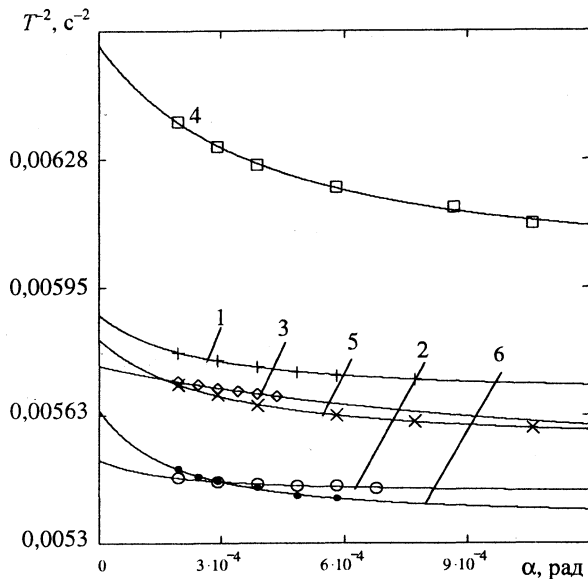


Рис. 4

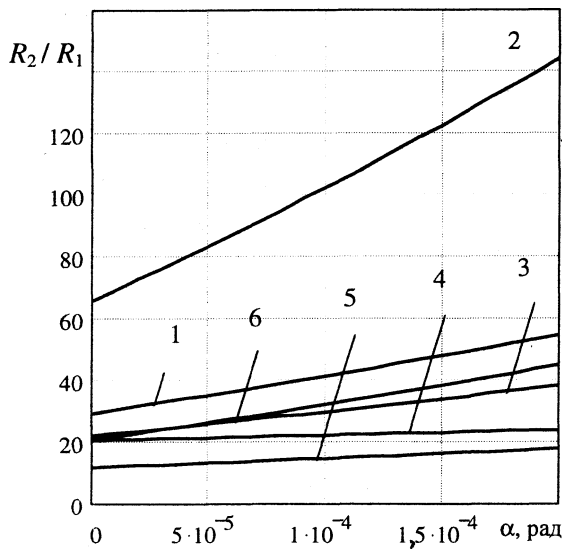


Рис. 5

Из табл. 1 следует, что соотношения между значениями H_T у испытанных тел представляются вполне реальными. Исключение составляет значение H_T у стекла. Для стекла оно слишком велико. Это несоответствие, по-видимому, связано с погрешностью измерений амплитуд в области самых малых углов.

динамики колебаний физического маятника с опорой качения // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 1. – С. – 42–48.

8. Юзефович А. П., Огородова Л. В. Гравиметрия. – М.: Недра, 1980. – 320 с.

9. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории колебаний. – М.: Наука, 1974. – 504 с.

10. Джилавдари И. З. Проблемы динамики физического маятника с опорой качения // Метрологическое обеспечение качества – 2000: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 нояб. 2000 г. – Мн., 2000. – С. 171–176.

УДК 681.513.4

ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОШАГОВО-КОМПЕНСАЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Инж. ТУЗКОВ Ю. Ф.

Белорусский национальный технический университет

Подавляющее число промышленных лазерных интерферометров, используемых в настоящее время в машино- и приборостроении для прецизионных измерений линейных перемещений, построено на основе интерферометра Майкельсона [1].

Схема лазерного интерферометра содержит ряд противоречий. Главное из них заключается в том, что мера перемещения – длина волны лазерного излучения, используется не напрямую, а через сравнение фазовой задержки прохождения сигнала по эталонному и измеряемому путям.

Непосредственное сравнение измеряемого перемещения с длиной волны используемого излучения осуществляется в активном интерферометре на базе линейного лазера со связанными резонаторами (ЛСР). Однако в этом случае необходимо принципиально изменить метод выделения информации о перемещении.

В [2] был предложен пошагово-компенсационный метод измерения линейных перемещений и теоретически рассмотрена возможность его использования на примере активного интерферометра на базе ЛСР. Экспериментальные исследования [3] подтвердили его высокую эффективность при измерении линейных перемещений.

Точность и динамические характеристики такого измерителя линейных перемещений оп-

ределяются работой экстремальной системы автоматического управления (ЭСАУ) (рис. 1).

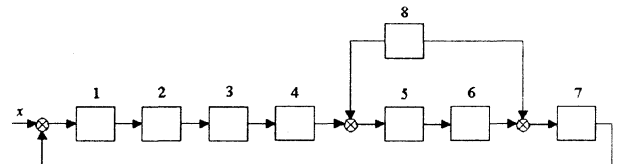


Рис. 1. Схема ЭСАУ: 1 – объект управления (ОУ); 2 – фотоприемник (ФП); 3 – усилитель (У); 4 – полосовой фильтр (Ф1); 5 – синхронный детектор (СД); 6 – фильтр низких частот (Ф2), 7 – пьезокорректор (ПК); 8 – генератор синусоидального напряжения (ГСН)

Входным сигналом объекта управления (ОУ), которым является ЛСР, служит периметр пассивной части ЛСР, выходным – мощность выходного излучения ЛСР, регистрируемая фотоприемником (ФП). Сигнал с ФП усиливается усилителем (У) и поступает на полосовой фильтр (Ф1), который в идеальном случае должен пропускать только составляющую сигнала с частотой поисковых колебаний. В синхронном детекторе (СД) происходит перемножение сигнала, поступающего с фильтра Ф1, и сигнала поисковых колебаний, поступающего с генератора синусоидального напряжения (ГСН). Фильтр низких частот (Ф2) должен пропускать только постоянную составляющую сигнала, приходящего от СД, которая подается на пьезокорректор (ПК), обрабатывающий изменение периметра пассивной части ЛСР.