

Гистерезисные потери при перемещениях и наклонах пятна контакта маятникового трибометра

В. М. Шахпаронов*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики колебаний
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Рассмотрен механизм рассеяния энергии на примере пятна контакта шаровых опор маятникового трибометра с плоскими образцами. Наклоны пятна контакта приводят к запасу упругой энергии системы. Измерение добротности маятника при колебаниях за счёт наклона пятна контакта позволяет определить коэффициент гистерезисных потерь в материалах и тонких покрытиях без разрушения их структуры.

PACS: 62.20.Qr

УДК: 534.08

Ключевые слова: добротность, потери энергии, механические колебания, контакт Герца.

ВВЕДЕНИЕ

Механические колебания маятникового трибометра сопровождаются качением его опор по плоской поверхности. Вследствие перемещения пятна контакта возникает диссипация энергии, по величине которой можно определить величину гистерезисных потерь. Процесс качения реализуется в самых различных механизмах, в том числе в транспортных средствах и приборах точной механики. Он позволяет значительно снизить затраты энергии при движении за счёт частичного замещения скольжения качением.

Маятниковый трибометр при малых амплитудах качений позволяет определить физические параметры исследуемых материалов без разрушения их поверхности. Основное внимание уделяется измерению коэффициента гистерезисных потерь C и коэффициента трения качения f_k . Измерения следует проводить именно при малых амплитудах, когда затухание колебаний идёт по экспоненциальному закону. При этом не требуется размещать трибометр в вакуумной камере, поскольку вязким трением о воздух можно пренебречь.

Предполагается, что при малых амплитудах силы адгезии обеспечивают без разрыва адгезионных связей наклон пятна контакта до некоторого угла. При этом запасается упругая энергия. Если центр тяжести маятника совмещён с плоскостью образцов, потенциальная энергия не добавляется к упругой. При этом обеспечиваются наиболее благоприятные условия для измерения коэффициента гистерезисных потерь. Непосредственное измерение коэффициента трения качения следует исключить, поскольку исчезает взаимное перемещение контактирующих тел. Маятниковый трибометр превращается в упругую систему, в которой происходит взаимная деформация контактирующих тел. Поскольку шаровые

опоры выполнены из твёрдой шарикоподшипниковой стали, основную сложную деформацию испытывают только исследуемые плоские образцы.

1. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПОТЕРИ ПРИ НАКЛОНАХ ПЯТНА КОНТАКТА

Использовался маятниковый прибор. Грузы маятника расположены внутри трубы, занимающей в равновесии горизонтальное положение. Маятник опирался на испытываемые плоские образцы либо двумя большими, либо двумя маленькими шариками. Его центр масс совмещался с плоскостью опоры шариков. Изменение радиуса шаровых опор маятника осуществлялось перемещением образцов. В пятне контакта на экспоненциальном участке периоды возрастают и приобретают другие значения. Кривая затухания позволяет определить добротность Q трибометра и период колебаний T . При совмещении центра масс маятника с плоскостью касания шаровых опор коэффициент гистерезисных потерь C определяется по формуле

$$C = \pi/Q.$$

Некоторые трудности возникают в определении добротности при качениях на концевых мерах длины из стали ШХ15. Они возникают в связи с наличием на поверхности контактирующих тел загрязняющих образований, обладающих большими гистерезисными потерями.

На остальных материалах измерение добротности особых проблем не представляет. Большие гистерезисные потери в испытываемых материалах измеряются с малой погрешностью, поскольку вклад загрязняющих образований становится несущественным.

Установка позволяла проводить измерения добротности и коэффициента гистерезисных потерь при различных нагрузках и радиусах шаровых опор. Изменение нагрузки осуществлялось удалением грузов из трубы.

*E-mail: shahp@phys.msu.ru

Уменьшение нагрузки обычно приводит к увеличению добротности и, соответственно, снижению гистерезисных потерь. Уменьшение радиуса опор приводило к росту гистерезисных потерь и уменьшению радиуса пятна контакта a . При этом заметно увеличивался период затуханий.

Коэффициент трения качения на линейном участке кривой затухания определяли по формуле:

$$f_{\kappa} = \rho(\cos \gamma_n - \cos \gamma_0) / [2nR(\gamma_0 + \gamma_n)],$$

где ρ — расстояние от центра тяжести колеблющегося тела маятника до оси вращения, проходящей по центрам опор радиуса R , γ_0 и γ_n амплитуды колебаний в начале и конце выбранного участка кривой затухания.

Максимальное давление в центре пятна контакта при качении шаров [1]

$$P_0 = \{3MgE^2 / [\pi^3 R^2 (1 - \nu^2)^2]\}^{1/3},$$

где M — масса колеблющегося тела, E , ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала образца.

Радиус пятна контакта при качении шаров по плоским образцам [1]

$$a = [(3/8)MgR(1 - \nu^2)^2/E]^{1/3}.$$

Работа упругой деформации при качении шаровых опор по плоской поверхности на пути S равна

$$W = 3MgaS/(16R).$$

Рассеиваемая вследствие гистерезиса энергия

$$W_1 = 3CMgaS/(16R).$$

Поскольку по определению

$$W_1 = Mgf_{\kappa}S,$$

то коэффициент трения качения

$$f_{\kappa} = 3aC/(16R).$$

Если разность потенциальных энергий, соответствующих амплитудам γ_0 и γ_n , объясняется только наличием гистерезисной составляющей трения качения, то

по коэффициенту f_{κ} определяется коэффициент гистерезисных потерь.

С увеличением пятна контакта жёсткость быстро возрастает. Она имеет размерность энергии. С учётом объёма деформированного при наклоне пятен контакта материала жёсткость [2]

$$\kappa = \pi Ea^3.$$

После подстановки величины a^3

$$\kappa = (3\pi/8)MgR(1 - \nu^2).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Маятниковый трибометр является одним из наиболее эффективных средств изучения процесса диссипации энергии на широком классе упругих материалов. Он позволяет исследовать практически все материалы, которые представлены в виде плоских образцов. Трибометр позволяет определить как коэффициент гистерезисных потерь, так и коэффициент трения качения. Хорошо освоен линейный участок кривой затухания амплитуд колебаний, поскольку проводится строгий расчёт энергии, затрачиваемой на перемещение пятна контакта. При малых амплитудах линейный закон затухания постепенно переходит в экспоненциальный. Он даже более удобен для определения коэффициента гистерезисных потерь материала образцов.

Измерения на малых амплитудах имеют свои преимущества, поскольку практически полностью исключается вязкое трение тела маятника о воздух и исключается адгезионное взаимодействие контактирующих тел. Поэтому размещать маятник в вакуумной камере нет смысла. При этом не повреждается поверхность испытуемого образца. При наклоне пятна на малый угол адгезионные связи не рвутся. При дальнейшем увеличении наклона происходит сначала частичный, а затем и полный разрыв адгезионных связей. Экспоненциальный закон постепенно преобразуется в линейный. Проводить измерения при частичном разрыве связей не следует. Он сопровождается самым сложным законом затухания амплитуд колебаний маятника. Сопоставление коэффициентов гистерезисных потерь при качении, крутильных, струнных и продольных колебаниях наглядно демонстрирует закон о единстве механизма диссипации энергии при различных видах деформирования упругих тел [3].

[1] Bowden F.P., Tabor D. The friction and lubrication of solids. 1. (Oxford university press, 2001).

[2] Izmailov V.P., Karagioz O.V., Shakhparonov V.M. International Journal of Non-Linear Mechanics. 77. P. 307. (2015).

[3] Силин А. А., Карагиоз О. В., Маркачёв В. В., Измайлов В. П. Трение и износ. 1, № 6. С. 957. (1980).

Hysteresis losses at movings and slopes of the pendulum tribometer spot contact**V. M. Shakhparonov**

*Department of the Physics of Oscillations, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: shahp@phys.msu.ru*

Energy dissipation on the example of the contact spot between the ball bearings of the pendulum tribometer with flat pieces is considered. The slope of the contact spot lead to storage the elastic energy of the system. Measuring the quality factor of the pendulum tribometer makes it possible to determine the coefficient of hysteresis losses in materials and thin coatings without destroying their structures.

PACS: 62.20.Qp

Keywords: quality factor, energy dissipation, mechanical oscillations, the Hertz contact.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторе Шахпаронов Владимир Михайлович — канд. физ.-мат. наук, вед. электроник; тел.: (495) 939-21-46, e-mail: shahp@phys.msu.ru.