

УДК 681.2.082:531.45

## ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК С ОПОРОЙ НА ОДИН ШАРИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ КОНТАКТНОЙ АДГЕЗИИ

Джилавдари И.З.<sup>1</sup>, Мекид С.Н.<sup>2</sup>, Ризноокая Н.Н.<sup>1</sup>, Касьмин В.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Университет нефти и минералов короля Фадха, Дхахран, Саудовская Аравия

Одной из задач современного приборостроения является обеспечение точного позиционирования подвижных элементов приборов. Как правило, этого можно добиться путем использования автоматических систем обратных связей (СОС), содержащих датчики положения и исполнительные механизмы управления. Работа СОС учитывает связь «перемещение – сила сопротивления движению (или сила трения)», которая устанавливается теоретически или опытным путем. Именно закономерности связи «перемещение – сила сопротивления движению» в самом начале движения и при реверсе движения ограничивают точность позиционирования твердых тел, поскольку они имеют сложный характер и, как правило, неизвестны [1]. Участки начала движения тел и реверса называют предварительным смещением [1]. Особую роль эти участки играют при трении качения, поскольку измерение и изучение закономерностей данного вида трения представляют трудную проблему, вследствие сложности механизмов трения качения и малой величины силы сопротивления качению.

Ранее авторами данного исследования было установлено, что сопротивление качению при контакте твердых гладких твердых тел в области предварительного смещения определяется, главным образом, силами контактной адгезии этих тел. Эти силы включают силы, связанные с диссипацией энергии катящегося тела, и дополнительные силы упругости, не связанные непосредственно с упругой деформацией тел [2].

Также, силы контактной адгезии играют важную роль в приборах, построенных с помощью МЕМС – технологий, поскольку при уменьшении размеров подвижных тел роль сил контактного взаимодействия их поверхностей возрастает, что приводит к эффектам слипания. Поэтому исследование сил контактной адгезии путем изучения сил сопротивления качению могут помочь решению также и этой важной проблемы.

Среди известных методов измерения сил трения качения стандартизированным является маятниковый метод, описанный в [3]. Данный метод основан на наблюдении затухания амплитуд свободных качаний физического маятника, который опирается двумя твердыми шариками на плоскую поверхность второго твердого тела. Однако, по ряду причин непосредственно, технически и методически, данный метод не может быть использован для измерений в режиме предварительных смещений.

Авторами данной работы был предложен метод и устройство для исследования сил сопротивления качению в области предварительного смещения с более высокими точностью и чувствительностью. В этом методе также используется маятник, аналогичный маятнику, описанному в [3]. В нем измеряют зависимости амплитуды свободных качаний маятника от времени и зависимости периодов этих качаний от амплитуды [2]. Однако использование маятника с опорой на два шарика является существенным недостатком, поскольку это требует использования двух идентичных шариков и идентичных плоских образцов, на которые они опираются, или образцов с размерами поверхности, больших расстояния между шариками. Выполнение этих требований не всегда выполнимо.

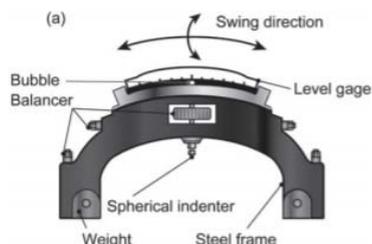


Рисунок 1 – Первичная конструкция маятника Герберта для измерения твердости [4]

Оптимальным вариантом физического маятника является устройство, в котором в качестве опоры используется один шарик. В этом случае требование к шарикам и плоскому исследуемому образцу существенно облегчается – достаточно иметь образец с размерами, большими диаметра пятна контакта шарика и поверхности.

Следует отметить, что маятник с опорой на один шарик был предложен в 20-х годах прошлого века Гербертом [4]. Это устройство использовалось исключительно для измерения твердости поверхности материалов, на которые опирался шарик. Шарик имел диаметр около 1 мм, и он находился под нагрузками, при которых деформации опорной поверхности имели пластический характер. Начальные амплитуды качаний маятника, составляли десятки градусов.

В разрабатываемом авторами устройстве предполагается, что нагрузки должны находиться в области упругих деформаций, контактирующих тел. Только в этом случае можно говорить, что сопротивление качению в области предварительных смещений определяются, в основном, именно силами адгезии, действующими между поверхностями тел, находящихся в контакте.

Данное требование определяет максимальную нагрузку на шарик и радиус шарика.

Однако, очевидно, что, в общем случае, подобная конструкция не может совершать качания лишь в одной плоскости. При отклонении маятника, который опирается на плоскую поверхность лишь одним шариком, от положения равновесия, в нем возбуждаются качания одновременно вокруг двух взаимно перпендикулярных горизонтальных осей и одновременно возбуждается вращение вокруг вертикальной оси. Нашей задачей явилась поиск конструкции маятника и режимов измерений, при которых маятник будет совершать устойчивые качания вокруг лишь одной горизонтальной оси.

Опыт показал, что, такой маятник должен иметь форму, при которой его главные моменты инерции относительно горизонтальных осей значительно отличаются между собой. В этом случае частоты свободных качаний маятника вокруг этих осей также значительно отличаются между собой. Вращения такого маятника вокруг вертикальной оси не возникают вовсе, если в начальный момент маятник не испытывает соответствующих толчков. Существенным оказалось то, что интенсивности затухания указанных качаний также отличаются: качания с большей частотой затухают быстрее, чем качания с меньшей частотой. Данный эффект выражен тем сильнее, чем больше отличаются частоты качаний и чем меньше амплитуды качаний.

Конструкция маятника, разработанная с учетом указанных условий и обеспечивающая его устойчивые качания вокруг одной горизонтальной оси, показана на рисунке 2. При амплитудах качаний  $\approx 10$  градусов отношение периодов качаний относительно центральных главных осей инерции в данной конструкции оказалась равным, примерно, 12,0/2,3. При начальной амплитуде  $\approx 12$  угловых минут данный маятник совершает устойчивые качания вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной плоскости рисунка. При данной амплитуде колебаний длинный период качаний был около 6 с, что отличается вдвое по сравнению с указанными выше 12 с. Этот результат согласуется с установленным авторами ранее эффектом резкого уменьшения периода качаний при уменьшении амплитуды колебаний, который они связывают с упругой составляющей сил контактной адгезии, в соответствии с теорией, разработанной авторами в [2].

В своем окончательном виде в измерительном устройстве предполагается, что амплитуда колебаний маятника будет измеряться с помощью луча лазера, отраженного от плоского зеркала, закрепленного горизонтально на его верхней поверхности, и попадающего на матрицу web-камеры, закрепленной неподвижно, формируя соответствующий электрический сигнал. В этом устройстве будут непрерывно записываться угловые смещения маятника в процессе его качаний от времени. Полученная при этом информация позволит измерять значения диссипативной и упругой составляющих силы контактной адгезии между поверхностями шарика и плоской поверхности, на которую опирается шарик в соответствии с теорией, построенной в [2].



Рисунок 2 – Маятник с опорой на один шарик

Максимальная длина маятника выбрана около 44 см, диаметр шарика – 12,5 мм, масса маятника – около 0,75 кг, центр масс маятника находится вблизи пятна контакта шарика и опорной поверхности

#### Литература

1. Mekid, S. A non-linear model for pre-rolling friction force in precision positioning / S Mekid // Proc. Instn Mech. Engrs Part J : J. Engineering Tribology. – Vol. 218 – P. 305–311.
2. Gilavdary, I. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations / I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology. – 2013. – Vol. 227. – № 6. – P. 618–628.
3. ГОСТ 27640-88. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения. – Введен: 01.06.1988. – М. : Госкомитет по стандартам, 1988. – 22 с.
4. Suzuki, R. Hardness measurement for metals using lightweight Herbert pendulum hardness tester with cylindrical indenter / R. Suzuki, T. Kaburagi, M. Matsubara, T. Tashiro, T. Koyama // Experimental Techniques. – 2016. – Vol. 40. – Issue 2. – P. 795–802.