

УДК 620.1.051:620.172

УНИВЕРСАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

© О. В. Сутягин, В. В. Мешков, С. В. Мединцев¹*Статья поступила 22 апреля 2015 г.*

Описано универсальное устройство для триботехнических испытаний материалов и покрытий. Приведен пример его практического применения. Изложена методика тарировки измерительных систем этого устройства. Определены соотношения для оценки среднего контактного давления и пути трения для ряда сменных узлов, применяемых в устройстве при проведении испытаний на трение и износ. Испытания опытного образца устройства показали достаточную точность входящих в него измерительных систем, многофункциональность и экономическую эффективность его применения.

Ключевые слова: универсальный модуль; триботехнические испытания; средние контактные давления; путь трения; трение и износ.

При проведении трибологических исследований широкое распространение получили устройства для испытаний материалов на трение и износ. Разнообразие их конструкций связано с тем, что режимы проведения испытаний должны имитировать нагрузки, кинематические и тепловые условия работы реальных трибосопряжений современных машин [1, 2].

Цель данной работы — разработка универсального устройства (модуля) для триботехнических испытаний (УМТИ) и методики исследования на нем материалов и покрытий.

В основе конструкции устройства лежит техническое решение, защищенное патентом [3]. Модуль состоит из механического и электронно-измерительного блоков.

Преимуществом механического блока (рис. 1) по сравнению с аналогами [4 – 6] является использование приводов (вращения и приложения нормальной нагрузки) универсальных металлорежущих станков, что позволяет экономить средства на приобретение оборудования.

Механический блок устройства работает следующим образом. На держателе 1 посредством винтов с пластинами 2 радиально закреплены съемные упругие элементы 3, которые с помощью зажимных кулачков 4 жестко связывают их с кольцом 5. На кольце 5 горизонтально установлен индуктивный датчик линейных перемещений 6, взаимодействующий с регулируемым упором 7, закрепленным на держателе 1. При приложении момента к держателю 1 происходят деформация упругих элементов 3 и смещение упора 7, вызывающее линейное перемещение датчика 6. Кольцо 5 через съемные упругие элементы 8 жестко закреплено на основании 9, которое крепится

на невращающемся базовом элементе металлорежущего станка (не показан). На кольце 5, помимо горизонтально установленного датчика 6, имеется вертикально установленный индуктивный датчик линейных перемещений 10, взаимодействующий с регулируемым упором 11, закрепленным на основании 9. При приложении нормальной нагрузки к держателю 1 происходят деформация упругих элементов 8 и линейное перемещение датчика 10 относительно регулируемого упора 11. Деформацией упругих элементов 3 при этом можно пренебречь из-за выбранной ориентации их сечений относительно прикладываемой нагрузки. Описанная механическая часть силоизмерительной системы УМТИ позволяет при смене упругих элементов проводить испытания в различных диапазонах нормальных и тангенциальных нагрузок, что расширяет область его применения.

В зависимости от сменного узла, устанавливаемого на базирующий держатель 1, можно проводить испытания по таким схемам трения, как сфера — плоскость, торцевая, пальчиковая и других, предусматривающих приложение нормальной нагрузки соосно с испытываемыми образцами. При установке и закреплении на держателе 1 специальной ванночки проводят испытания в жидких средах (масле, смазке, умеренно агрессивных жидкостях), а в случае установки компактной электропечи — при повышенных температурах. Электроизоляция основания 9 от базового элемента металлорежущего станка позволяет исследовать электрические свойства фрикционного контакта, а при испытании диэлектрических антифрикционных покрытий — прекращать испытания в автоматическом режиме.

На рис. 1, а представлен сменный узел, реализующий на УМТИ торцевую схему трения. Здесь нижний образец 12 базируется на оси 13 и торце держа-

¹ Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия; e-mail: sutyagine@rambler.ru

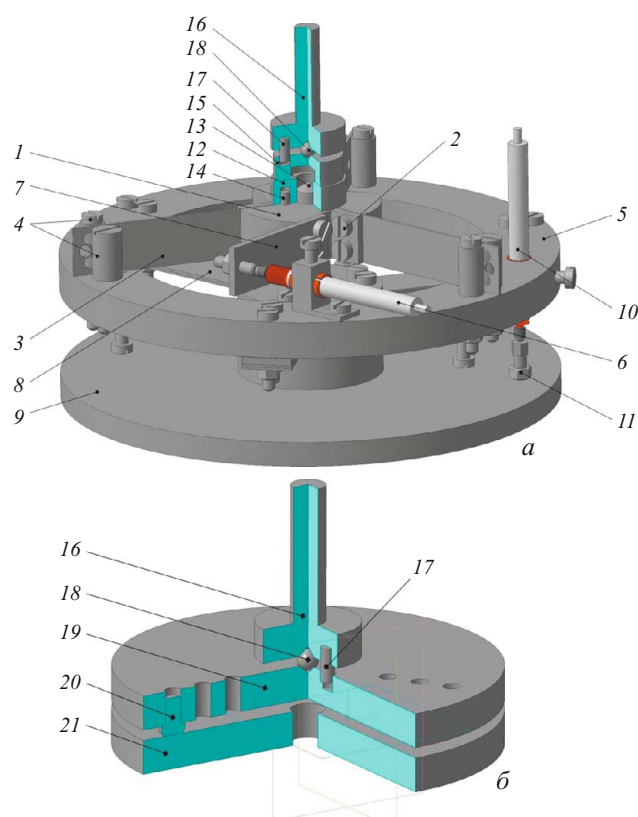


Рис. 1. Схема механической части универсального модуля для триботехнических испытаний материалов и покрытий: *а* — силоизмерительный блок с узлом для реализации торцевой схемы трения; *б* — узел для реализации пальчиковой схемы трения и схемы сфера-плоскость

теля 1, а от вращения под действием момента трения удерживается штифтом 14, запрессованным в торце держателя 1 и свободно входящим в глухое отверстие нерабочего торца образца 12. Верхний образец 15 выполнен в виде стакана, наружный диаметр рабочего торца которого меньше, чем нижнего образца 12, а внутренний — больше, чем оси 13. Причем эти размеры определяются величинами номинальных контактных давлений, которые необходимо реализовать при испытаниях. К плоскому торцу верхнего образца 15 прикладывают нормальную нагрузку и вращающий момент от адаптера 16. Торцевого последнего имеет центральную коническую поверхность, в которую запрессовано водило 17; вид и размеры хвостовика зависят от применяемого в используемом станке приспособления для его закрепления. Плоский торец верхнего образца 15 также имеет центральную коническую поверхность, в которой самоустанавливается стальной шар 18, прижимаемый адаптером, и глухое отверстие для свободного вхождения водила 17, передающего вращающий момент на пару образцов. Такая конструкция торцов адаптера и верхнего образца позволяет снизить влияние суммарных отклонений формы и расположения рабочих торцов образцов УМТИ и используемого станка на результаты триботехнических испытаний.

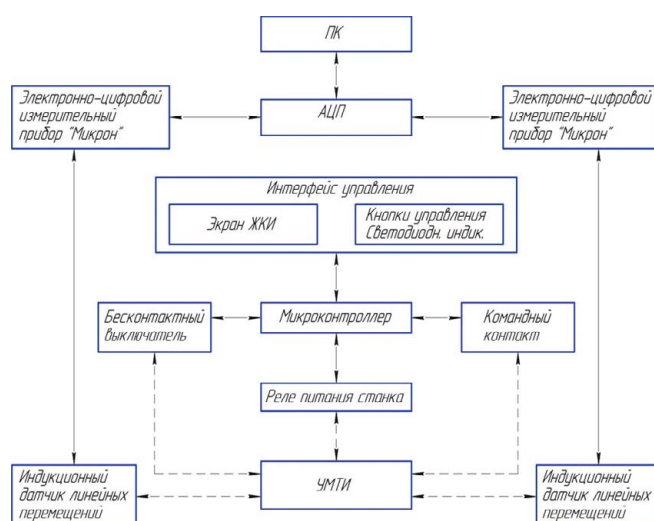


Рис. 2. Схема электронного измерительного блока УМТИ

На рис. 1, *б* показан сменный узел, реализующий на УМТИ пальчиковую схему трения и схему трения сфера — плоскость. В данном случае нижний образец 19 и держатель 20 образцов 21 базируются аналогично рассмотренной выше торцевой схеме трения. Унификация посадочных размеров держателя 1 и адаптера 16 с размерами сменных узлов трения и дополнительного оборудования позволяет расширить область возможного применения УМТИ.

Общая схема электронно-измерительного блока устройства (рис. 2) включает в себя два комплекта для измерений линейных перемещений «Микрон-02», в которые входят индукционные датчики линейных перемещений и электронно-цифровые измерительные приборы, аналоговые выходы которых подключены к двухканальному аналого-цифровому преобразователю (АЦП), соединенному через разъем R332 с персональным компьютером (ПК), имеющим программное обеспечение. Данная схема позволяет измерять деформации упругих элементов (см. 3 и 8 на рис. 1, *а*), преобразовывать их в аналоговый электрический сигнал, оцифровывать его и после программной обработки представлять на экране ПК в виде зависимостей момента трения, нормальной нагрузки и коэффициента трения от времени испытаний. Возможно применение и другого электронно-измерительного оборудования, обладающего необходимыми метрологическими характеристиками.

Кроме того, электронный измерительный блок УМТИ содержит прибор, позволяющий прерывать испытания, который объединен со счетчиком полных оборотов адаптера 16 (см. рис. 1, *а*). Испытания прерывают при выходе функциональных параметров сменного узла трения за допустимые пределы (из-за износа диэлектрического покрытия, роста коэффициента трения и т.д.). Одновременно прибор фиксирует ресурс узла трения в полных оборотах верхнего образца. В упрощенном виде (см. рис. 2) он включает микроконтроллер (модели AVR Atmega 48); интерфейс



Рис. 3. УМТИ в комплекте со сверлильным станком

управления с 8-разрядным жидкокристаллическим индикатором, отображающим количество полных оборотов образцов; бесконтактный выключатель, представляющий собой интегрированную систему, реагирующую на изменение магнитных свойств в области детектирования и генерирующую сигналы, соответствующие полным оборотам адаптера 16; реле питания станка, управляемое от микроконтроллера; командный контакт. Одним из простейших примеров управления является прерывание испытаний диэлектрических покрытий. При электроизоляции основания 9 (см. рис. 1, а) износ диэлектрического покрытия создаст командный контакт между основанием 9 и станиной станка, который будет остановлен. Возможны и электронные реализации функций командного контакта.

Пример использования УМТИ в комплекте с приводом от сверлильного станка представлен на рис. 3. В патроне станка 1 закреплен адаптер 2, приводящий во вращение верхний образец 3, а УМТИ 4 установлен на столе 5 нагружающего устройства 6. Применение нагружающего устройства не обязательно, поскольку в УМТИ ведется непрерывное измерение нормальной нагрузки, которая может создаваться через приводы подачи станка. Элементы электронного измерительного блока представлены датчиками 7, электронно-цифровыми измерительными приборами «Микрон-02» 8, АЦП 9, ПК 10 и прибором для прерывания испытаний, объединенным со счетчиком полных оборотов адаптера 11.

Упругие элементы, воспринимающие тангенциальную нагрузку, тарируют следующим образом (рис. 4, а):

1) в зависимости от предполагаемых нагрузок при испытаниях устанавливают необходимые упругие элементы;

2) в держателе вместо верхнего образца на его посадочные размеры размещают специальный рычаг, к которому в фиксируемой точке крепят нить;

3) другой конец нити, проходящей через блок (см. рис. 4, а), соединяют со штангой нагрузочного устройства, на которую последовательно навешивают

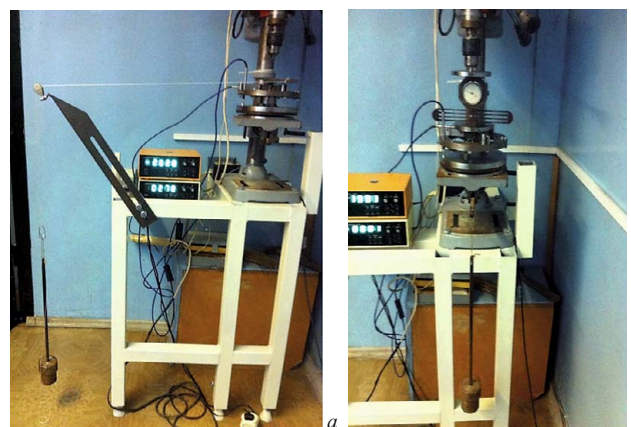


Рис. 4. Схема тарировки упругих элементов, воспринимающих тангенциальные (а) и нормальные (б) нагрузки

грузы, имитирующие деформации упругих элементов от сил трения, и записывают соответствующие показания прибора «Микрон-02», измеряющего тангенциальные нагрузки;

4) проводят необходимые расчеты, строят и анализируют тарировочный график зависимости показаний прибора «Микрон-02» от прикладываемого к держателю момента, оценивают ошибку измерений;

5) необходимый коэффициент вводят в программу ПК.

Тарировку упругих элементов, воспринимающих нормальную нагрузку, производят следующим образом (см. рис. 4, б):

1) устанавливают упругие элементы, соответствующие выбранному ранее диапазону нагрузок;

2) между держателями образцов 20 и нижним образцом 19 (см. рис. 1, б) размещают образцовый динамометр;

3) нормальную нагрузку задают с помощью грузов, последовательно навешиваемых на штангу нагрузочного устройства;

4) с учетом веса динамометра и его показаний определяют действующую нагрузку между верхним и нижним образцами и записывают соответствующие показания прибора «Микрон-02», измеряющего нормальные нагрузки;

5) проводят операции согласно пп. 4 и 5, соответствующим тарировке упругих элементов, воспринимающих тангенциальную нагрузку.

Для приведения экспериментальных результатов к стандартному виду [7, 8] необходим перерасчет измеряемых с помощью УМТИ данных. Так, вместо нормальной нагрузки рекомендуется использовать среднее давление на макроконтakte, а вместо количества полных оборотов — путь трения. Рассмотрим особенности их определения для съемных узлов трения.

В общем случае среднее давление q_c на макроконтakte [7] определяется как нормальная нагрузка N ,

приходящаяся на единицу контурной площади контакта A_c :

$$q_c = N/A_c. \quad (1)$$

Для торцевой схемы (при отсутствии волнистости на поверхностях трения), а тем более пальчиковой схемы можно считать, что контурная площадь A_c равна номинальной A_n , в связи с чем среднее давление q_c равно номинальному q_n . В случае реализации схемы трения сфера — плоскость для образцов без покрытий при упругом контакте среднее давление можно оценить, используя теорию Герца в виде:

$$q_c = \frac{N^{1/3}}{\pi} (0,75\sqrt{mJ_*R})^{2/3}, \quad (2)$$

где $J_* = J_1 + J_2$; $J_1 = \frac{1-\mu_1^2}{E_1}$; $J_2 = \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$, μ_1, μ_2 — коэф-

фициенты Пуассона верхнего и нижнего образцов; E_1, E_2 — модули упругости этих же образцов; R — радиус сферического образца; m — количество сферических образцов, установленных в держателе 20 (см. рис. 1, б).

В случае пластического контакта можно считать, что $q_c = HB$, где твердость более мягкого образца — по Бринеллю. Переход от упругого контакта к пластическому можно оценить по возникновению отпечатка от сферического образца на плоском для текущей нагрузки. Следует учитывать, что увеличение шероховатости образцов и их износ уменьшают значения среднего контактного давления, рассчитываемого по предложенной методике. Влияние антифрикционных покрытий на среднее давление на контакте для схемы трения сфера — плоскость можно оценить, используя соотношения, представленные в работе [9].

Расчет пути трения L_T для торцевой схемы несложен: он одинаков как для вращающегося 15, так и неподвижного 12 образцов (см. рис. 1, а):

$$L_T = \pi D_c n, \quad (3)$$

где D_c — средний диаметр дорожки трения; n — число полных оборотов, совершенное вращающимся образцом за время его износа на зарегистрированную величину.

В случае пальчиковой схемы и схемы сфера — плоскость путь трения нижнего образца 19 (см. рис. 1, б) будет меньше, чем верхних образцов 21. Для нижнего образца путь трения L_D зависит от диаметра макроконтakta d_* , формирующегося между нижним (диск) и верхними (пальчиковые или сферические) образцами, а также от количества образцов:

$$L_D = d_* nm. \quad (4)$$

Для пальчикового образца d_* равен диаметру его рабочей поверхности, а для сферического — зависит от приложенной нагрузки. Исходя из теории Герца,

при упругом контакте $d_* = 2\sqrt{\frac{3J_* RN}{4m}}$, а при пластиче-

ском $d_* = 2\sqrt{\frac{N}{\pi H B m}}$. Для каждого из m пальчиковых или сферических образцов путь трения определяется соотношением (3).

При измерении износа образцов целесообразно руководствоваться рекомендациями стандарта [10].

Испытания опытного образца универсального модуля для триботехнических испытаний показали достаточную точность входящих в него измерительных систем (погрешность нормальной нагрузки не превышала 2 %, а тангенциальной — 5 % в режиме тарировки при многократных циклах нагрузка — разгрузка), многофункциональность и экономическую эффективность его практического применения. Предлагаемая методика проведения экспериментальных исследований позволяет получать данные, необходимые для анализа и моделирования фрикционных характеристик различных трибосопряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камбалов В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / Под ред. К. В. Фролова, Е. А. Марченко. — М.: Машиностроение, 2008. — 384 с.
2. Кукушнова Л. И., Лаптева В. Г., Колманов А. Г. и др. Методы испытаний на трение и износ: Справочное издание. — М.: Интернет Инжиниринг, 2001. — 152 с.
3. Пат. 2531124 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Устройство для испытания материалов на трение и износ / Мешков В. В., Сутягин О. В., Мединцев С. В.; заявитель и патентообладатель Тверской государственный технический университет. — № 2013129644/28; заявл. 27.06.13; опубл. 27.06.14. Бюл. № 29.
4. NANOVEA [сайт компании]. URL: <http://www.nanovea.com>. (дата обращения 10.03.2015).
5. CSM instruments [сайт компании]. URL: <http://www.csm-instruments.com>. (дата обращения 10.03.2015).
6. Taber Industries [сайт компании]. URL: <http://www.taberindustries.com>. (дата обращения 10.03.2015).
7. Р 50-54-107-88. Методы оценки триботехнических свойств материалов и покрытий в вакууме: рекомендации / И. В. Крагельский, Ю. Н. Дроздов, В. С. Камбалов и др. — М.: Госстандарт СССР, ВНИИМАШ, 1989. — 33 с.
8. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 22 с.
9. Сутягин О. В., Болотов А. Н., Васильев М. В. Контакт шероховатых тел с твердосмазочными покрытиями. — Тверь: Тверской государственный технический университет, 2014. — 124 с.
10. ГОСТ 27860-88. Детали трущихся сопряжений. Методы измерения износа. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 32 с.

REFERENCES

1. Kambalov V. S. Metody i sredstva ispytaniy na trenie i iznos konstruktsionnykh i smazochnykh materialov: spravochnik [Methods and means of testing construction and lubricant materials subject to friction and wear: handbook]. — Moscow: Mashinostroenie, 2008. — 384 p. [in Russian].
2. Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Kolmanov A. G. i dr. Metody ispytaniy na trenie i iznos: Spravochnoe izdanie [Test methods for friction and wear: reference book]. — Moscow: Internet Inzhiniring, 2001. — 152 p. [in Russian].
3. RF Pat. 2531124, MPK G01N 3/56. Ustroistvo dlya ispytaniya materialov na trenie i iznos [Unit for friction and wear testing materials] / Meshkov V. V., Sutyagin O. V., Medintsev S. V.; applicant and owner Tverskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. — N 2013129644/28; appl. 27.06.13; publ. 27.06.14. Byull. Otkryt. Izobret. N 29 [in Russian].

4. NANOVEA [company site]. URL: <http://www.nanovea.com>. (accessed 10.03.2015).
5. CSM instruments [company site]. URL: <http://www.csm-instruments.com>. (accessed 10.03.2015).
6. Taber Industries [company site]. URL: <http://www.taberindustries.com>. (accessed 10.03.2015).
7. R 50-54-107–88. Metody otsenki tribotekhnicheskikh svoistv materialov i pokrytii v vakuume: rekomendatsii [Evaluation methods of tribotechnical properties of materials and coatings in vacuum: recommendations]. — Moscow: Izd. Gosstandart SSSR, VNIINMASH, 1989. — 33 p. [in Russian].
8. RF State Standard GOST 27674–88. Trenie, iznashivanie i smazka. Terminy i opredeleniya [friction, wear and lubrication. terms and definitions]. — Moscow: Izd-vo standartov, 1992. — 22 p. [in Russian].
9. **Sutyagin O. V., Bolotov A. N., Vasil'ev M. V.** Kontakt sherokhovatykh tel s tverdostmazochnymi pokrytiyami [Contact of rough bodies and solid lubrication coatings]. — Tver': Tverskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014. — 124 p. [in Russian].
10. RF State Standard GOST 27860–88. Detali trushchikhsoya sopryazhenii. Metody izmereniya iznosa. — Moscow: Izd-vo standartov, 1989. — 32 p. [in Russian].