

УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИС.С. Гаврюшин¹

gss@bmstu.ru

Е.А. Деулин¹

deulin@bmstu.ru

В.Б. Поляков²Е.П. Прохоров¹

evgenprokhor@yandex.ru

Г.А. Емельянов¹

ge.9104765058@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² ООО «СКТБ ЭлПА», г. Углич, Ярославская обл., Российская Федерация**Аннотация**

Рассмотрены физическая модель и техническая возможность реализации устройства для измерения числа монослоев газа, сорбированного на исследуемых поверхностях и рассматриваемого как загрязнение на молекулярном уровне. Число монослоев определено по силе страгивания двух полированных пластин относительно друг друга из положения статического контакта. Указано, что эта сила зависит от энергии взаимодействия молекул сорбата с поверхностью пластин. Приведены структурная схема устройства измерения чистоты поверхностей, принцип его работы, предполагаемые диаграммы сигналов с датчика, регистрируемых измерительным блоком, и внешний вид макета датчика. Наличие корреляции коэффициента покрытия поверхности сорбатом и факторов рабочей среды, давления над поверхностью, температуры и влажности подтверждается экспериментально полученными графиками, что свидетельствует о рабочей пригодности предложенного метода для измерения чистоты поверхностей

Ключевые слова

Чистота поверхности, коэффициент покрытия, сила страгивания, сорбат, монослой, химическая сорбция, физическая сорбция, уравнение Леннарда — Джонса, энергия межмолекулярного взаимодействия, пьезобиморфные приводы, тензодатчики

Поступила в редакцию 23.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Идея измерения количества молекул, находящихся на поверхности, т. е. сорбированных на ней, всегда интересовала и интересует ученых, занимающихся исследованиями процессов в вакууме. Задача создателей датчика состояла в том, чтобы измеряя атомарные силы, действующие на поверхности, выделить из них ту составляющую, которая зависит только от количества слоев молекул (коэффициента покрытия θ), находящихся на поверхностях и выступающих в роли «загрязнения». В настоящей работе предложено использовать силу трения как «механическую» составляющую этих сил.

Отметим, что механическая составляющая силы трения, возникающая от срезания микронеровностей, по модулю меньше адгезионной составляющей [1].

Силу статического трения предложено измерять как силу страгивания $F_{\text{стр}}$ в момент страгивания поверхностей образцов с точки статического контакта,

поэтому использованы образцы с гладкими полированными поверхностями, изготовленные из монокристаллических пластин кремния или кварца.

Физические основы работы датчика для измерения чистоты поверхностей.

Физическая модель зависимости силы статического трения, измеряемой датчиком, от коэффициента покрытия θ основана на физике взаимодействия молекул газа с поверхностью. Известно [2], что первый и последующие монослои сорбата связаны с поверхностью энергией адгезии E_A , которая убывает с увеличением расстояния (или количества слоев сорбата), согласно уравнению Леннарда — Джонса [3] (рис. 1).

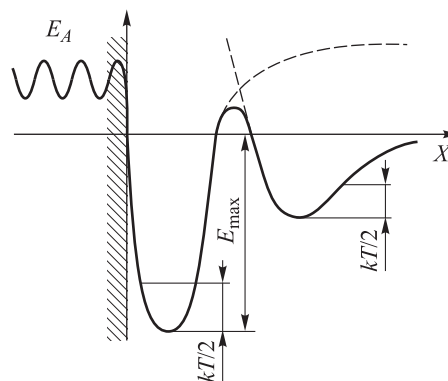


Рис. 1. Энергия взаимодействия молекул (сорбата) с поверхностью твердого тела [3]

Силы поверхностного натяжения на периферии пятен контакта между образцами-пластинами в обычных атмосферных условиях, согласно тому же уравнению, создают нормальную и тангенциальную составляющие, которые определяют силу страгивания поверхностей в виде ее капиллярной составляющей. При уменьшении давления и переходе в вакуум сила межатомарного взаимодействия в контакте пластин (атомарная составляющая силы страгивания) преобразуется из капиллярной в вязкостную, адгезионную, а затем в когезионную составляющую. Этот переход постепенно происходит при уменьшении давления до уровня 10^{-10} Па.

Из принятой модели Леннарда — Джонса следует, что сила удержания молекул, сорбированных на поверхности, зависит от их расстояния до этой поверхности. Вследствие этого наиболее прочная связь атомов сорбата с поверхностью наблюдается в зоне первого монослоя сорбата, т. е. на расстоянии, приближающемся к диаметру молекулы газа ($d_0 \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м), называемом зоной химической сорбции.

С ростом внешнего давления увеличивается количество слоев сорбата на поверхности пластин и, соответственно, расстояние от молекулы газа до поверхности сорбента (пластины). Энергия связи молекулы с поверхностью волнообразно изменяется, возрастает в зоне так называемой физической сорбции и затем постепенно убывает до минимального уровня, называемого теплотой парообразования. При дальнейшем увеличении толщины сорбата, состоящего, например, из молекул воды (более 150 монослоев), поверхность становится влажной, что соответствует представлению Ленгмюра [4] о сухой поверхности.

Из указанного ранее следует подобие диаграммы Леннарда — Джонса (см. рис. 1) и экспериментально полученных значений силы страгивания как функции коэффициента покрытия поверхностей сорбатом [5] (рис. 2).

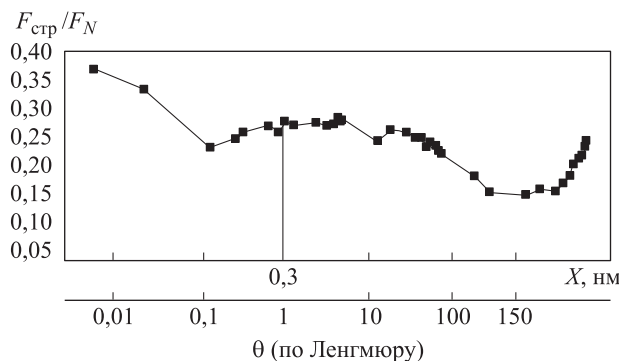


Рис. 2. Экспериментальная диаграмма силы страгивания, затрачиваемой на преодоление силы трения покоя для пары $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$ [5], как функции расстояния X атома от поверхности ($X = d_0\theta$)

Идентичность рис. 1 и 2 становится понятной, если рис. 1 представить в перевернутом, зеркальном по оси ординат изображении (рис. 3).

Сравнивая зависимости энергии E_A и коэффициента статического трения $F_{\text{стр}}$ от расстояния X , можно обнаружить поразительное сходство кривых (см. рис. 2 и 3), с одним исключением: диаграмма на рис. 2 слева начинается из максимума в зоне так называемого когезионного трения [4], когда сорбированных молекул газов между контактирующими поверхностями практически не осталось, а диаграмма на рис. 3 слева начинается из нуля, физического (энергетического) минимума [3] энергии, находящегося в зоне межатомного промежутка, т. е. в зоне, где измерение силы не имеет технического смысла.

Описание устройства. Принцип работы датчика чистоты поверхностей (рис. 4) основан на использовании трех полированных пластин: одной подвижной (2) и двух неподвижных (1, 3), зажимающих между собой подвижную и создающих две плоскости взаимных контактов. При этом одна неподвижная пластина (см. рис. 4, сверху), прижимаясь к средней (подвижной) пластине, создает нормальную (и при этом одинаковую) силу F_N сразу в двух плоскостях контакта поверхностей.

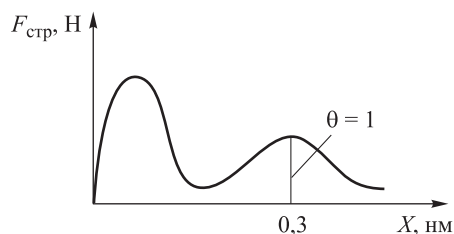


Рис. 3. Диаграмма энергии взаимодействия молекул с поверхностью твердого тела, приведенная в интерпретации ($F_{\text{стр}} = f(X)$), удобной для инженеров

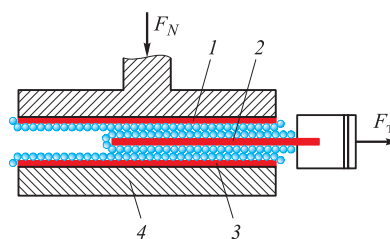


Рис. 4. Принцип работы датчика для измерения чистоты поверхностей

Тангенциальная сила страгивания F_T , инициирующая страгивание средней подвижной пластины, должна обеспечиваться приводом малых (субмикронных) перемещений.

Создание датчика и устройства потребовало решения ряда инженерных задач: обеспечение малых (субмикронных) перемещений; измерение этих перемещений; измерение сил, задающих перемещения; автоматизация процессов преобразования полученных датчиком значений сил статического трения в показатели главного измеряемого параметра — коэффициента покрытия θ .

Реализованная авторами конструкция механической части датчика чистоты приведена на рис. 5, где на вакуумном фланце типа Conflat 40 расположены: основание, прижимная, подвижная и неподвижная пластины.

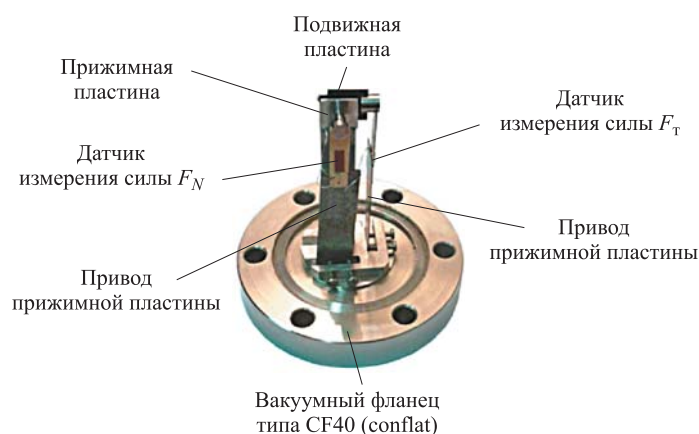


Рис. 5. Вид механических элементов вакуумной части датчика чистоты

Полная структурная схема устройства для измерения чистоты поверхностей приведена на рис. 6.

Для питания блоков управления пьезобиморфами разработан и изготовлен преобразователь напряжения, повышающий первичное напряжение 12 В до вторичного 80 В.

Управление пьезобиморфами осуществляется с помощью ШИМ-сигнала, который формирует микроконтроллер на базе процессора AtMega328. Для гальванической развязки цепей высокого напряжения и питания микроконтроллера ШИМ-сигнал передается на блоки управления пьезобиморфами через оптопары.

Для измерительных цепей использована специальная схема аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на базе микросхемы НХ711, предназначенная для подключения тензодатчиков и имеющая цифровой выход с последовательным выводом информации. Данные с АЦП поступают на микроконтроллер.

Интерфейс взаимодействия оператора с прибором реализован через SCADA-систему, установленную на компьютер оператора. Обмен данными между компьютером и микроконтроллером реализован по протоколу Modbus через последовательный порт.

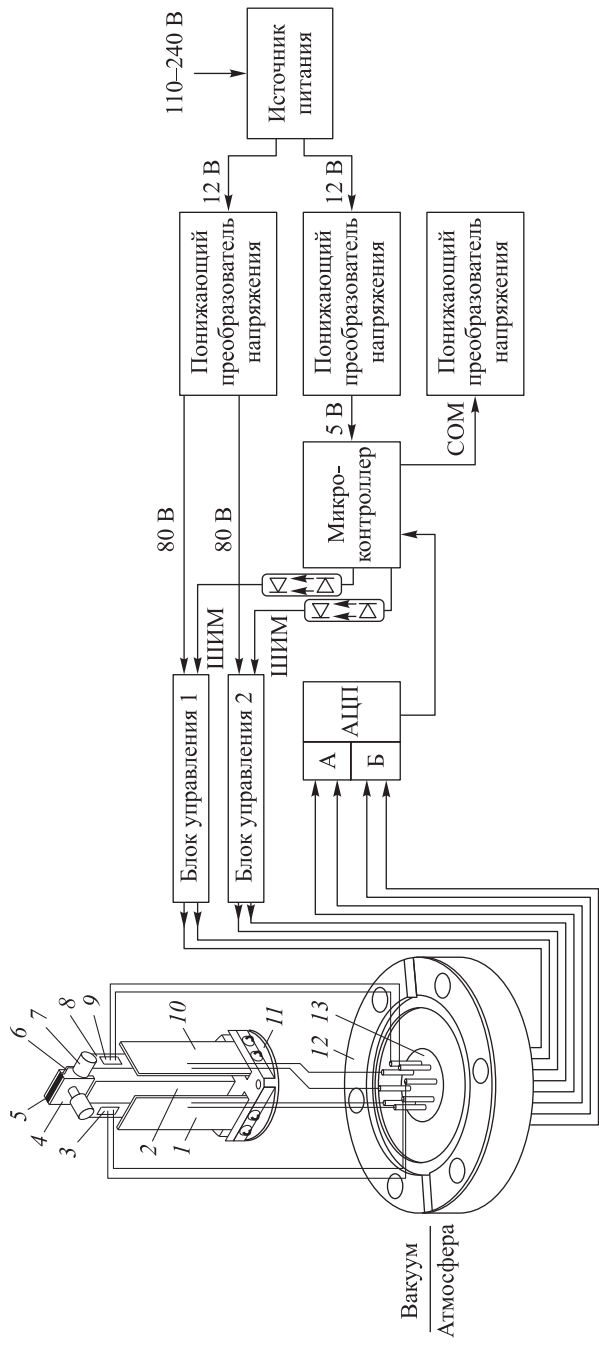


Рис. 6. Структурная схема устройства для измерения чистоты поверхностей:

1 и 2 — пьезобиморфные приводы прижатия и страгивания; 3 — стойка; 4 — упругие пластины; 5 и 6 — тензодатчики измерения сил F_N и F_{τ} ; 7 — державки; 8, 9 и 10 — прижимная, подвижная и неподвижная пластины соответственно; 11 — основание; 12 — фланец SF40 (conflat); 13 — токоввод

Преимущество и принципиальная новизна описываемого устройства заключаются в возможности косвенного измерения коэффициента покрытия, определяемого межмолекулярными связями в верхних слоях сорбата на контактирующих поверхностях пластин, через установленные зависимости путем прямого измерения силы страгивания подвижной пластины относительно двух неподвижных.

Алгоритм работы устройства для измерения чистоты поверхности. В начальный момент времени t_0 работы прибора (перед измерением) напряжение на пьезобиморфах равно нулю, силы F_N и F_T также равны нулю (рис. 7).

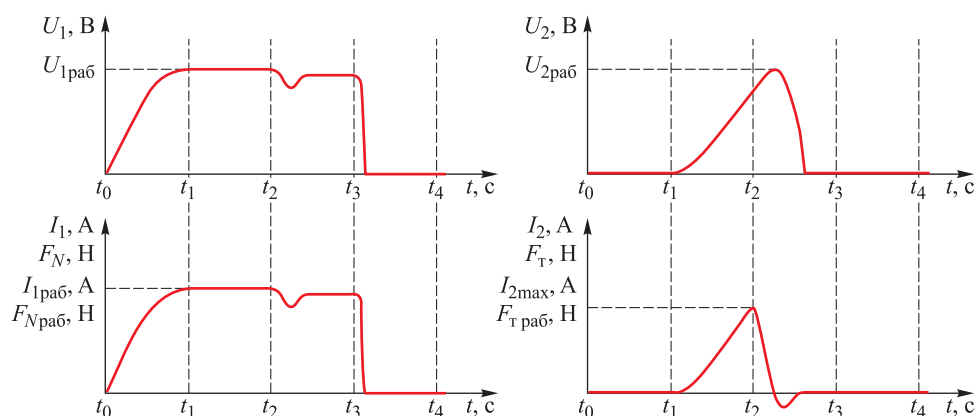


Рис. 7. Диаграммы сигналов при работе устройства:

U_1 и U_2 — напряжение на пьезобиморфном приводе прижатия и страгивания; I_1 и I_2 — сила тока на тензодатчике привода прижатия и страгивания; F_N и F_T — сила прижатия и страгивания

Порядок работы прибора в следующих промежутках времени:

t_0-t_1 — напряжение U_1 на пьезобиморфном приводе прижатия плавно увеличивается от нуля; сила F_N увеличивается вместе с напряжением; по силе тока I_1 на тензодатчике микроконтроллером регистрируется рабочее значение $F_{Nраб}$; напряжение U_1 удерживается на уровне $U_{1раб}$;

t_1-t_2 — напряжение U_2 на пьезобиморфном приводе страгивания плавно увеличивается от нуля; пока пластины находятся в состоянии статического контакта, страгивающая сила F_T растет вместе с напряжением U_2 ;

t_2-t_3 — в момент времени t_2 сила F_T увеличивается до значения, при котором пластины сдвигаются относительно друг друга; микроконтроллер регистрирует на тензодатчике максимальную силу тока I_{2max} и соответствующее ей максимальное значение силы страгивания F_{Tmax} ; напряжение U_2 продолжает возрастать, в то время как сила тока I_2 на тензодатчике падает вследствие освобождения подвижной пластины;

t_2-t_3 — напряжение U_1 и U_2 отключается; прибор возвращается в исходное состояние.

По окончании измерения микроконтроллер передает значения сил $F_{N\text{раб}}$ и $F_{T\text{max}}$ на компьютер, где рассчитывается коэффициент статического трения:

$$f_S = F_{T\text{max}} / F_{N\text{раб}}.$$

Далее в программе, содержащей калибровочные зависимости, происходит перерасчет сил и параметров технологической среды, в которой работает прибор, в значение главного параметра — коэффициента покрытия θ .

Достоверность данных. Выполненный ряд экспериментов [5–7] позволил получить зависимости влияния внешних условий среды (давления, температуры, влажности) на измеряемую устройством силу статического трения, используемые как калибровочные характеристики. Так, на рис. 8 приведены зависимости силы страгивания, как функции различных параметров: давления (вакуума) над поверхностью [5], температуры [6], влажности окружающей среды [7].

Приведенные на рис. 8 экспериментально полученные зависимости использованы в описываемом устройстве как калибровочные, программно вводимые в программную среду системы управления устройством. Решение указанных задач при создании устройства измерения чистоты поверхности потребовало использования практических навыков сопромата, систем управления и автоматизации современного электронного оборудования, что было естественно для такого технического вуза как МГТУ им. Н.Э. Баумана, и выполнено [8] в содружестве с ООО «СКТБ ЭлПА» (г. Углич).

Перспективы использования устройства для измерения чистоты поверхностей. Описанное устройство для измерения чистоты поверхности необходимо в отрасли вакуумного и электронного приборостроения, ядерной техники и других отраслях, требующих строгого контроля чистоты поверхностей, работающих в условиях контролируемой внешней среды. Устройство можно использовать при давлении в диапазоне $10^5 \dots 10^{-10}$ Па при влажности рабочей атмосферы $0,1 \dots 0,95$ RH и температуре от -40 до $+150$ °С.

Потенциальными потребителями устройства на территории России являются организации, использующие сверхвысоковакуумное исследовательское оборудование, такие как Объединенный институт ядерных исследований, НИЦ «Курчатовский институт», Российский федеральный ядерный центр–Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Институт ядерных исследований РАН, Институт реакторных материалов, НИИ физических измерений, Институт спектроскопии РАН, НПО «Геофизика-НВ».

Потенциальными зарубежными потребителями являются компании: VACOM Vakuu Komponent & Messtechnik GmbH, Vacuum Generators Ltd., BOC Edwards, VTD Vakuuentechnik, Oerlikon Leybold Vacuum GmbH, Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH, Pfeiffer Vacuum SAS, MDC Vacuum Products LLC, Riber-LSI; Varian Inc.

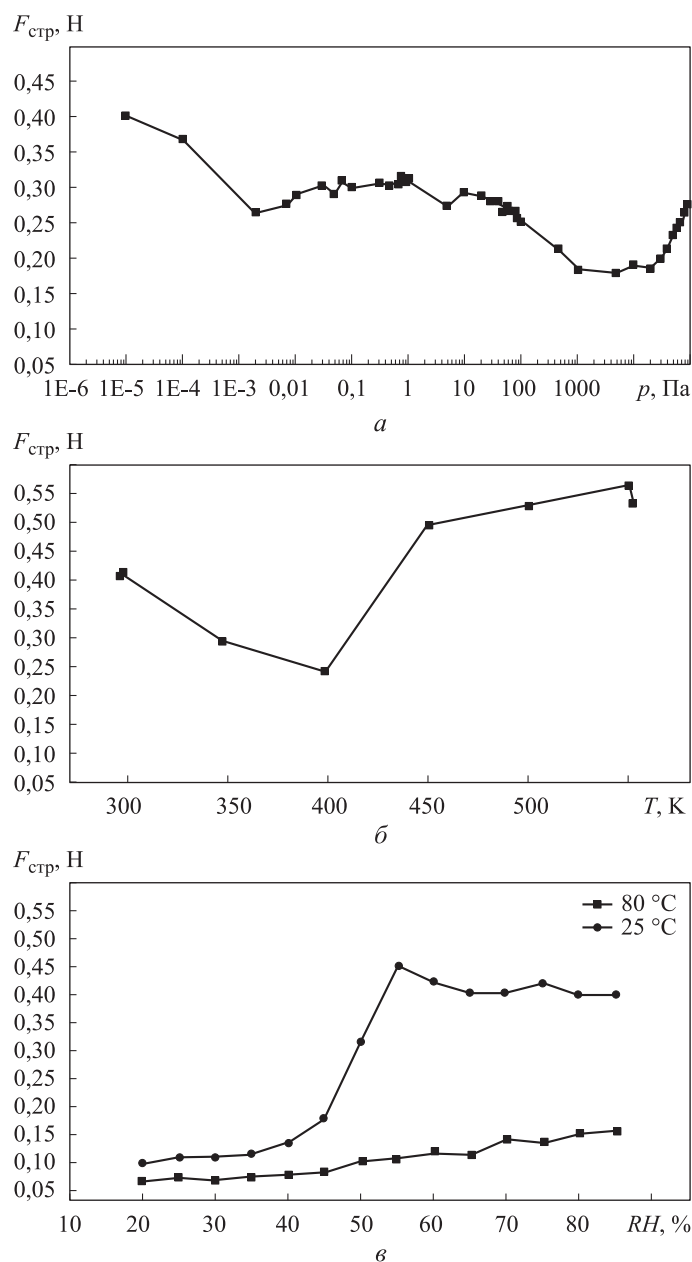


Рис. 8. Экспериментальные калибровочные зависимости $F_{стр}$, полученные как функции θ , при изменении давления (а), температуры (б), влажности (в)

Выводы. 1. Разработана конструкция датчика чистоты поверхности.

2. Предложена и обоснована физическая модель работы датчика чистоты поверхности.

3. Получены статистически достоверные калибровочные зависимости для расчета коэффициента покрытия поверхности в условиях изменяемых параметров среды — давления, температуры и влажности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990. 320 с.
3. Jones J.E. On the determination of molecular fields. I. From the variation of the viscosity of a gas with temperature // Proc. R. Soc. Lond. A. 1924. Vol. 106. No. 738. P. 441–462.
DOI: 10.1098/rspa.1924.0081 URL: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/106/738/441>
4. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964. 716 с.
5. Deulin E.A., Gatsenko A.A., Loginov B.A. Friction force of smooth surfaces of SiO₂–SiO₂ as a function of residual pressure // Surface Science. 1999. Vol. 433–435. P. 288–292.
DOI: 10.1016/S0039-6028(99)00152-1
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039602899001521>
6. Gladyshev I.V. Residual pressure and temperature influence on SiO₂–SiO₂ friction coefficient // Proc. Nordtrib 2002. Keynotes and Abstracts, 2000. 176 p.
7. Невшупа Р.А. Повышение надежности высоковакуумных механизмов на основе учета влияния обезгаживающего прогрева // Автореф. ... дисс. канд. техн. наук. М., 1999. 16 с.
8. Поляков В.Б., Арутюнян З.Р., Деулин Е.А. Датчик чистоты поверхности пластин. Патент RU 2617891. Заявл. 20.02.2016. Опубл. 28.04.2017. Бюлл. № 13.

Гаврюшин Сергей Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Деулин Евгений Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Поляков Владимир Борисович — генеральный директор ООО «СКТБ ЭлПА» (Российская Федерация, 152613, Ярославская обл., г. Углич, Рыбинское шоссе, д. 20Б).

Прохоров Евгений Павлович — аспирант кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Емельянов Георгий Александрович — студент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Гаврюшин С.С., Деулин Е.А., Поляков В.Б., Прохоров Е.П., Емельянов Г.А. Устройство измерения чистоты поверхности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 2. С. 4–14. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-2-4-14

SURFACE-FINISH MEASURING DEVICE

S.S. Gavryushin¹

gss@bmstu.ru

E.A. Deulin¹

deulin@bmstu.ru

V.B. Polyakov²

E.P. Prokhorov¹

evgenprokhor@yandex.ru

G.E. Emel'yanov¹

ge.9104765058@gmail.com

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Special Engineering and Design Bureau of Electronics, Instrument-making and Automation, Uglich, Yaroslavl Region, Russian Federation

Abstract

The article deals with the physical model and technical feasibility of the device for measuring the number of monolayers of gas sorbed on the surfaces under study and considered as contamination at the molecular level. The number of monolayers is determined by the breakaway force of the two polished plates relative to each other from the static contact position. We point out that this force depends on the interaction energy of sorbate molecules with the surface of the plates. The paper gives the structural scheme of the surface-finish measuring device, the principle of its operation, the expected diagrams of signals from the sensor recorded by the measuring unit, and the appearance of the sensor model. The correlation between the surface sorbate coating coefficient and factors of the working medium, pressure above the surface, temperature and humidity is confirmed by experimentally obtained graphs, which indicates the working suitability of the proposed method for surface-finish measurement

Keywords

Surface finish, coating coefficient, breakaway force, sorbate, monolayer, chemical sorption, physical sorption, Lennard — Jones equation, intermolecular interaction energy, piezobimorph drives, strain gauges

Received 23.06.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Kragel'skiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Basic calculations of friction and wearing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 526 p.
- [2] Rozanov L.N. *Vakuumnaya tekhnika* [Vacuum technique]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 320 p.
- [3] Jones J.E. On the determination of molecular fields. I. From the variation of the viscosity of a gas with temperature. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1924, vol. 106, no. 738, pp. 441–462.
DOI: 10.1098/rspa.1924.0081
Available at: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/106/738/441>
- [4] Dushman S., Lafferty J.M. *Scientific foundations of vacuum technique*. John Wiley & Sons, 1962. 808 p.
- [5] Deulin E.A., Gatsenko A.A., Loginov B.A. Friction force of smooth surfaces of SiO₂–SiO₂ as a function of residual pressure. *Surface Science*, 1999, vol. 433–435, pp. 288–292.
DOI: 10.1016/S0039-6028(99)00152-1
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039602899001521>

[6] Gladyshev I.V. Residual pressure and temperature influence on SiO₂-SiO₂ friction coefficient. *Proc. Nordtrib 2002. Keynotes and Abstracts*, 2000. 176 p.

[7] Nevshupa R.A. Povyshenie nadezhnosti vysokovakuumnykh mekhanizmov na osnove ucheta vliyaniya obezgazhivayushchego progreva. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Reliability raising of high-vacuum mechanisms taking into account effect of degasifying warming-up. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1999. 16 p. (in Russ.).

[8] Polyakov V.B., Arutyunyan Z.R., Deulin E.A. Datchik chistoty poverkhnosti plastin [Surface roughness sensor for plates]. Patent RU 2617891. Appl. 20.02.2016, publ. 28.04.2017. Bull. no. 13.

Gavryushin S.S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Computer Systems of Manufacturing Automation, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Deulin E.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Polyakov V.B. — Director General of Special Engineering and Design Bureau of Electronics, Instrument-making and Automation (Rybinskoe shosse 20B, Uglich, Yaroslavl Region, 152613 Russian Federation).

Prokhorov E.P. — post-graduate student, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Emel'yanov G.A. — student, Department of Computer Systems of Manufacturing Automation, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gavryushin S.S., Deulin E.A., Polyakov V.B., Prokhorov E.P., Emel'yanov G.E. Surface-Finish Measuring Device. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 2, pp. 4–14 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3933-2018-2-4-14