

УДК 531.7

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБОКИХ
МИКРООТВЕРСТИЙ С ПОМОЩЬЮ ЗОНДОВ НА ОСНОВЕ
ЭЛАСТИЧНОГО МЕХАНИЗМА****Дючкова Мария Андреевна,**магистрант, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
имени Н. П. Огарёва, г. Саранск
E-mail: marusya_dyuch@mail.ru**Куренщиков Александр Владимирович,**кандидат технических наук, Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет имени Н. П. Огарёва, г. Саранск
E-mail: akur@inbox.ru**Аннотация**

В статье рассматриваются способы измерения геометрических характеристик глубоких микроотверстий. Отмечается насущная необходимость высокоточных измерений непосредственно в цеху предприятия, следствием чего является необходимость создания установок для измерения микрорельефа, обладающих высокой скоростью измерений и разрешением, низкой погрешностью и небольшими размерами и весом. Далее излагаются особенности контактных зондовых измерений и трудности при их реализации. Рассматривается устройство созданных зондовых измерительных установок на основе эластичного механизма. В заключении отмечается, что контактные зонды для измерения микроструктур выпускаются серийно, и могут быть использованы для измерения микроотверстий в промышленном производстве.

Ключевые слова: отверстие, метрология, измерение, зонд, контактные методы, эластичный механизм.

**MODERN METHODS OF MEASURING DEEP MICROHOLES USING
PROBES BASED ON AN ELASTIC MECHANISM****Maria A. Dyuchkova,**Undergraduate, National Research Mordovia State University named after N. P. Ogaryov,
Saransk
E-mail: marusya_dyuch@mail.ru**Alexander V. Kurenshchikov**Candidate of Technical Sciences, National Research Mordovia State University named after N. P.
Ogaryov, Saransk
E-mail: akur@inbox.ru

ABSTRACT

The article discusses methods for measuring the geometric characteristics of deep micro-holes. It notes the urgent need for high-precision measurements directly in the enterprise workshop, which results in the need to create installations for measuring micro-relief that have a high measurement speed and resolution, low error and small dimensions and weight. Further, the features of contact probe measurements and the difficulties in their implementation are described. The device of the created probe measuring installations based on an elastic mechanism is considered. In conclusion, it is noted that contact probes for measuring microstructures are mass-produced and can be used to measure micro-holes in industrial production.

Keywords: hole, metrology, measurement, probe, contact methods, elastic mechanism.

Высокоточные измерения на месте производства являются насущным требованием для многих сложных производственных процессов, обеспечивая качество изделий с малыми допусками и сложными геометрическими формами. Текущие системы, используемые для геометрических измерений на станках, часто представляют собой контактные датчики, невысокая скорость измерения которых приводит к возможности фиксации только простых геометрических форм, для которых достаточно низкой плотности точек данных для описания рельефа. Такие методы измерений не позволяют комплексно проанализировать ход изготовления деталей и не позволяют полностью проверить соответствие деталей требуемым допускам. Необходимы системы измерения, позволяющие быстро адаптироваться к изменениям в конструкции компонентов, обеспечить мониторинг каждого этапа производственного процесса, выявлять проблемы в месте их возникновения, для принятия корректирующих действий без необходимости остановки производственного процесса. Для достижения этой цели требуется прямое измерение изделия посредством переноса сложных метрологических систем из лаборатории в цех, что позволит собирать данные геометрических измерений во время производственного процесса или вскоре после его завершения. Однако из-за пространственных ограничений и воздействия окружающей среды прямое измерение геометрической формы с использованием традиционных, разработанных в настоящее время метрологических инструментов осуществить крайне сложно.

Неразрушающие измерения микрорельефа в высоком разрешении, особенно геометрии и внутренней поверхности микроотверстий, по-прежнему остаются сложной метрологической проблемой. Эта проблема становится все более актуальной из-за возрастающей сложности профиля отверстий и растущих требований к допускам при их изготовлении. Кроме того, все чаще используется функциональное текстурирование внутренней поверхности отверстия для улучшения таких характеристик, как теплопередача и смачиваемость. В результате, методы измерения, способные обеспечить измерение сложного рельефа, а также класса чистоты поверхности, представляют большой интерес. Методы измерения, пригодные для измерения микроотверстий разделяются на контактные и бесконтактные, а затем делятся на подкатегории в зависимости от используемого принципа измерения.

В литературе описано множество контактных методов измерения микроотверстий, но лишь немногие из них дошли до коммерческого производства с возможностью приобретения в готовом виде. Основные проблемы, связанные с контактными микрондами, включают в себя эффекты, связанные с поверхностной силой, жесткостью

стержня зонда, силой воздействия на измеряемую поверхность, скоростью перемещения зонда, необходимостью постоянного контакта наконечника зонда с поверхностью, чувствительностью к условиям эксплуатации, сложностью изготовления, стоимостью и проблемой загрязнения зонда. На микроуровне силы взаимодействия зонда с поверхностью могут стать больше силы тяжести. Эти силы включают в себя капиллярные, ван-дер-ваальсовы и электростатические, и на каждую из них влияют род материала, свойства поверхности, среда и размеры зонда. Поверхностные силы притягивают наконечник зонда к поверхности образца, и могут привести к эффекту прилипания-скольжения во время измерений, потенциально загрязняя наконечник зонда или поверхность, снижая точность и повторяемость измерений. Эти эффекты можно уменьшить, увеличив жесткость зонда или создавая вибрацию зонда.

Для измерения микроструктур глубоких отверстий зонды должны иметь длинный тонкий щуп. Из-за этого изгиб стержня зонда и контактная деформация зондирующей головки ограничивают измеряемую глубину. Увеличение жесткости зонда может привести к большим измерительным усилиям, что приводит к пластической деформации измеряемой поверхности и износу наконечника зонда во время измерений. Работа в области микро-координатных измерительных машин была направлена на снижение зондирующего усилия до нескольких мН [1], однако, в следствие уменьшения силы прижима зонда к поверхности, повысилась вероятность ложных срабатываний, а также из-за инерционности зондов потребовалось снизить скорость измерения. Из-за длинного тонкого стержня зонда, необходимого для измерений глубоких отверстий, во время измерения происходит значительный его изгиб (упругая деформация), который необходимо учитывать при определении момента контакта. Учитывая, что некоторые зонды имеют рабочий диапазон всего в несколько микрометров, если скорость приближения зонда к поверхности слишком высока, то может произойти перебег после контакта с поверхностью образца, что приведет к повреждению образца или зонда, что ограничивает максимальную рабочую скорость зонда заданной массы, и следовательно скорость измерений.

При измерении микрокомпонентов погрешность измерения должна быть очень низкой, часто менее 100 нм, это означает, что влияние окружающей среды, такое как изменение температуры и вибрации пола или акустическое возбуждение, становится решающим фактором, влияющим на качество измерений. Это ограничивает возможность переноса многих методов из лабораторий в цех.

Было предложено много типов контактных систем зондов для измерений микроструктур, которые можно классифицировать по механизму обнаружения разделив на три группы: зонды на основе изгиба с упругим механизмом, вибрационные зонды и зонды на основе оптоволоконна, использующие методы оптического обнаружения.

Изгибающиеся зонды на основе эластичного механизма состоят из трех основных компонентов (рис. 1): зонд, гибкий шарнир и датчики для обнаружения изгиба [2]. Обычно зонд со сферическим наконечником крепится к плавающей пластине. Эта плавающая пластина подвешивается с помощью эластичного механизма. В точке контакта деформация упругого механизма обнаруживается системой датчиков. Эти датчики можно разделить на электрические (емкостные, пьезорезистивные, индуктивные) и оптические (интерферометрические, лазерные дефлекторы, оптоволоконные брэгговские решетки). Профиль детали создается путем определения местоположения датчика после обнаружения контакта с деталью в местах измерения.

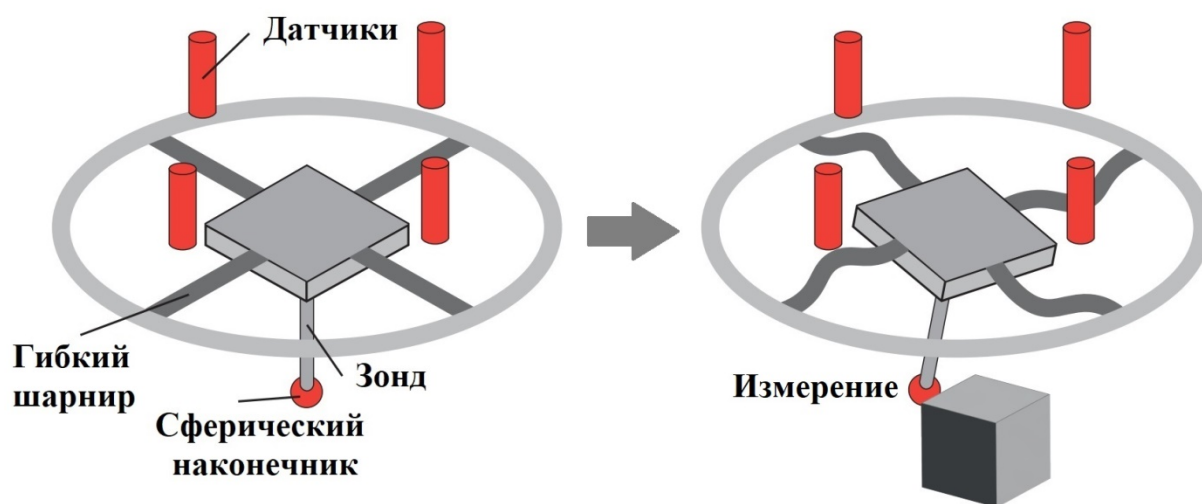


Рисунок 1 – Конструкция зонда на основе эластичного механизма [2].

Эластичный механизм обычно состоит из бериллиево-медных гибких полосок, тонких стержней, гибких шарниров или мембран [2]. Было показано, что использование зондовых систем переменной жесткости позволяет уменьшить контактную силу при сохранении скорости измерения. Переменная жесткость зондирования для эластичных механизмов важна, поскольку она напрямую связана с контактным усилием. Высокая анизотропность материала детали может привести к проскальзыванию наконечника зонда, что приведет к повреждению изделия и снижению качества измерения. Дополнительные конструктивные решения включают использование механо-магнитной связанной структуры для обеспечения постоянной силы прижима сканирующего зонда.

Методы пьезорезистивного зондирования определяют изменение удельного электрического сопротивления вследствие деформации пьезорезистивных полосок, либо прикрепленных к эластичной подвеске, либо составляющих подвеску, что позволяет определять отклонение кончика зонда. Микрорезонды могут быть изготовлены из монокристаллического кремния, проявляющего сильный пьезорезистивный эффект, что позволяет интегрировать чувствительные датчики в тонкие механические конструкции. Зонды из кремния также выигрывают по причине использования при их производстве планарных процессов, следствием чего является их низкая стоимость, высокая точность изготовления и воспроизводимость. Однако на эти датчики влияют изменения температуры, они подвержены самонагреву, и имеют небольшой диапазон линейных измерений.

Контактные зонды для измерения микроструктур появились в конце 1990-х годов [3]. В конструкции использовалась трехэлементная диафрагма со встроенными тензодатчиками (рис. 2).

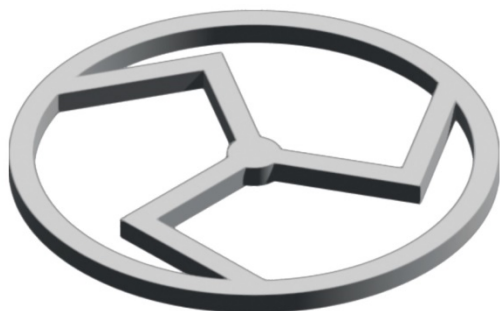


Рисунок 2 – Диафрагма Трискелион [3].

Этот зонд продемонстрировал погрешность ниже 10 нм. Однако из-за шарнирной конструкции, когда эта система смещалась в направлении Z , она демонстрировала паразитные перемещения в направлении стержней, вызывая вращение вокруг оси Z . Была предложена компенсация анизотропного поведения зонда за счет механической конструкции, что привело к четырехкратному увеличению диапазона измерения и снижению погрешности [4]. Этот метод показал, что повторяемость составляет 2 нм во всем диапазоне измерений, а погрешность составляет 17,4 нм. Этот зонд доступен на рынке под маркой «Gannet XP», и обычно используется с наконечниками диаметром 120, 300, 500 нм, имеющими изотропную жесткость 400 Н/м и одинаковую чувствительность в каждом направлении зондирования.

Емкостные датчики расстояний могут достигать нанометрового разрешения с диапазоном измерения в сотни микрометров при малой собственной массе. Однако они демонстрируют нелинейный отклик во всем диапазоне измерений, а измеренный отклик является функцией диэлектрической проницаемости, которая зависит от температуры, давления и содержания CO_2 в окружающем воздухе. В 1999 году впервые продемонстрировали миниатюрный зонд с трехэлементной диафрагмой с использованием бериллий-медных гибких полосок и емкостных датчиков, размещенных над каждой полоской. Зонд продемонстрировал одинаковую жесткость по осям XYZ с низкой силой зондирования 0,1 мН при линейном смещении 10 мкм, рабочим диапазоном ± 20 мкм, подтвержденным разрешением 3 нм и теоретической неопределенностью 11 нм [5].

Для обнаружения отклонения зонда при емкостном измерении с использованием дифференциального конденсатора был разработан новый способ, при котором сам изгиб использовался в качестве емкостного элемента в отличие от внешних емкостных датчиков. Этот подход уменьшает общую массу зонда и решает проблему затрат за счет использования недорогих и высокоточных технологий производства микроэлектромеханических систем. Экспериментальные результаты показывают, что эту зондирующую систему можно использовать для субмикрометровых измерений. Жесткость 22,62 Н/м по осям X и Y и 337,84 Н/м по оси Z была продемонстрирована при линейном смещении больше 10 нм в осевом направлении и 25 нм в радиальном направлении [6]. Однако система имеет диапазон сканирования только 1 мкм.

Индуктивные датчики создают высокочастотное электромагнитное поле, если в это поле попадет металлический объект, поле изменится в зависимости от расстояния, материала и размера объекта. Это обнаруженное изменение может быть использовано для определения расстояния до объекта. Такие датчики обладают широким динамическим диапазоном, и менее чувствительны к влиянию окружающей среды, чем емкостные. Однако, как правило, индуктивные датчики имеют значительные размеры, поскольку для создания электромагнитного поля, необходимого для индукции, требуется катушка металлического провода. Из-за использования электромагнитного поля эти датчики также чувствительны к электромагнитным воздействиям, которые могут повлиять на точность измерения и могут потребовать специальных мер предосторожности, таких как экранирование зонда или использование его в экранированной среде, чтобы предотвратить помехи. Известна контактная зондирующая система, которая использует индуктивные датчики для определения отклонения зонда после контакта с измеряемой поверхностью [1]. В системе зондирования используются три перпендикулярные поперечные оси, образованные монолитным пружинным механизмом с алюминиевыми шарнирами. Смещение по каждой оси измеряется с помощью трех индуктивных датчиков, установленных на корпусе зонда. Зонд имеет изотропную жесткость 20 Н/м, что обеспечивает повторяемость 5 нм в диапазоне измерений ± 200 мкм [7].

Использование оптических методов определения отклонения зондирующей системы является областью весьма активных исследований. Доминируют три подхода: обнаружение

изгиба с использованием положения отраженного лазерного луча на квадрантных фотодетекторах, методы с использованием позиционно-чувствительных детекторов, интерферометрические методы.

В заключении нужно отметить, что опубликовано много методов, подходящих для измерений структур глубоких отверстий, но очень немногие из них дошли до коммерческого производства с возможностью покупки в готовом виде. Например, из рассмотренных методов в данный момент доступны контактные зонды серий Xpress – Ganenn и Heimen и зонд IBSPE – Triskelion. Можно видеть, что методы измерений, использующие гибкий механизм, имеют высокую скорость измерения, высокое разрешение, сохраняя при этом низкую погрешность. Однако эти зонды сложны в изготовлении, и требуют наличия нескольких чувствительных элементов, что увеличивает их стоимость, кроме того, они обычно крупнее датчиков других типов, например, оптоволоконных или вибрационных и, следовательно, имеют худшее боковое разрешение. Тем не менее, исходя из совокупности их метрологических и эксплуатационных свойств, они имеют самые высокие шансы на широкое внедрение в промышленное производство.

Список литературы:

1. Meli, F. Ultra precision micro-CMM using a low force 3D touch probe / F. Meli, A. Küng, R. Thalmann // In Proceedings of the Optics and Photonics. San Diego. CA. USA. 24 August 2005. С. 265-272 URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.618692> (дата обращения: 16.12.2024).
2. Balzer, F. G. Tactile 3D microprobe system with exchangeable styli / F. G. Balzer, T. Hausotte, N. Dorozhovets, E. Manske, G. Jäger // Measurement Science and Technology. 2011. № 22. 094018. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094018> (дата обращения: 16.12.2024).
3. Pril, W. Development of a 2D probing system with nanometer resolution / W. Pril, K. Struik, P. Schellekens // In Proceedings of the 2th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering. Monterey. CA. USA. 9-14 November 1996. С. 438-442.
4. Bos, E. Compensation of the anisotropic behavior of single crystalline silicon in a 3D tactile sensor / E. Bos, R. Heldens, F. Delbressine, P. Schellekens, A. Dietzel // Sensors and Actuators A: Physical. 2007. № 134. С. 374-381. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.05.043> (дата обращения: 16.12.2024).
5. Peggs, G. Design for a compact high-accuracy CMM / G. Peggs, A. Lewis, S. Oldfield // CIRP Annals. 1999. № 48. С. 417-420. URL: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63216-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63216-8) (дата обращения: 16.12.2024).
6. He, M. Tactile probing system based on micro-fabricated capacitive sensor / M. He, R. Liu, Y. Li, H. Wang, X. Lu, G. Ding, J. Wu, T. Zhang, X. Zhao // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. № 194. С. 128-134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.01.030> (дата обращения: 16.12.2024).
7. Thalmann, R. State of the art of tactile micro coordinate metrology / R. Thalmann, F. Meli, A. Küng // Applied Sciences. 2016. № 6. 150. URL: <https://doi.org/10.3390/app6050150> (дата обращения: 16.12.2024).

References:

1. Meli, F. Ultra precision micro-CMM using a low force 3D touch probe / F. Meli, A. Küng, R. Thalmann // In Proceedings of the Optics and Photonics. San Diego CA. USA. 24 August 2005. P. 265-272 URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.618692> (access date: 16.12.2024).
2. Balzer, F. G. Tactile 3D microprobe system with exchangeable styli / F. G. Balzer, T. Hausotte, N. Dorozhovets, E. Manske, G. Jäger // Measurement Science and Technology. 2011. № 22. 094018. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094018> (access date: 16.12.2024).
3. Pril, W. Development of a 2D probing system with nanometer resolution / W. Pril, K. Struik, P. Schellekens // In Proceedings of the 2nd Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering. Monterey. CA. USA. 9-14 November 1996. P. 438-442.
4. Bos, E. Compensation of the anisotropic behavior of single crystalline silicon in a 3D tactile sensor / E. Bos, R. Heldens, F. Delbressine, P. Schellekens, A. Dietzel // Sensors and Actuators A: Physical. 2007. № 134. P. 374-381. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.05.043> (access date: 16.12.2024).
5. Peggs, G. Design for a compact high-accuracy CMM / G. Peggs, A. Lewis, S. Oldfield // CIRP Annals. 1999. № 48. P. 417-420. URL: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63216-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63216-8) (access date: 16.12.2024).
6. He, M. Tactile probing system based on micro-fabricated capacitive sensor / M. He, R. Liu, Y. Li, H. Wang, X. Lu, G. Ding, J. Wu, T. Zhang, X. Zhao // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. № 194. P. 128-134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.01.030> (access date: 16.12.2024).
7. Thalmann, R. State of the art of tactile micro coordinate metrology / R. Thalmann, F. Meli, A. Küng // Applied Sciences. 2016. № 6. 150. URL: <https://doi.org/10.3390/app6050150> (access date: 16.12.2024).