

УДК 62.234.137

## КОНТАКТНЫЙ ЗОНД ДЛЯ МИКРОКООРДИНАТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА\*

К. Ч. Фан<sup>1,2</sup>, Ф. Ченг<sup>1</sup>, В. Т. Пан<sup>2</sup>, Р. Ли<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology,  
Tunxi Rd. 193, Hefei, Anhui, China 230009*

<sup>2</sup>*Department of Mechanical Engineering, National Taipei University of Technology,  
1, Sec. 3, Chung-Hsiao E. Rd., Taipei, Taiwan 106  
E-mail: fan@ntu.edu.tw*

Измерение миниатюрных компонентов с помощью микро- и нанокординатных измерительных машин требует создания специальных механизмов для высокоточных контактных сканирующих зондов. Анализируется механизм действия разработанного контактного зонда в целях определения оптимальных размеров. Зонд состоит из волоконного щупа с шариковым наконечником, механизма с плавающей пластиной, подвешенной на проволоке, и датчиков фокусировки. При приложении контактной силы проволочки претерпевают упругую деформацию. Изучен принцип действия зондового механизма с пластиной на четырёхпроволочной подвеске. Расчёт жёсткости проведён с помощью теории упругости. Показано, что при подходящей длине щупа можно создать контактный зонд с однородной жёсткостью.

*Ключевые слова:* контактный зонд, плавающая пластина, жёсткость, микрокоординатное измерительное устройство.

**Введение.** Всё возрастающие требования к повышению точности измерения микрокомпонентов в промышленности привели к интенсивному развитию работ в области микро- и наноразмерной метрологии [1]. За последнее десятилетие разработано несколько микро- и нанокординатных измерительных устройств для нахождения параметров деталей от мезо- до микроразмера с нанометровым разрешением. Устройства снабжены либо бесконтактными [2, 3], либо контактными зондами [4–6]. Несмотря на то что бесконтактный зонд обеспечивает быстрое сканирование поверхности, возникает необходимость в трёхмерных (3D) контактных зондах. Оснадив такими зондами координатно-измерительную машину, можно эффективно измерять большинство объектов, имеющих геометрию типа линия, круг, сфера, конус и т. д. Для микро- и нанокординатно-измерительных машин разработано множество контактных зондовых систем: на базе кремния [7], изгибного действия [5, 6], на основе брэгговских решёток волоконного типа [8], с использованием босс-мембранных структур [9], с подвешенной (плавающей) пластиной [10, 11] и другие [12].

В представленной работе создан сканирующий контактный датчик, состоящий из упругого механизма и нескольких сенсоров для детектирования движения головки зонда во всех направлениях. Контактная сила должна быть малой — меньше 1 мН, радиус головки зонда — менее 30 нм, жёсткость — менее 1 мН, одинаковая по всем направлениям [6, 10].

В [11] разработан новый аналоговый тактильный зонд. Он состоит из следующих компонентов: монолитного волоконного щупа с шариковым наконечником, подвешенной на проволочках плавающей пластины, являющейся основным механизмом, и нескольких

\*Работа выполнена при поддержке Национального научного фонда Китая (50875073, 50420120134) и Тайваньского национального научного совета (NSC97-2221-E-002-092).

датчиков фокусировки. Хотя этот зонд удовлетворяет большинству требований, его жёсткость не является однородной в различных направлениях. Данное исследование посвящено углублённому рассмотрению расчёта зондового механизма. Анализ жёсткости проведён с применением теории упругости и метода конечноэлементного анализа. Обнаружено, что при подходящей длине щупа можно создать контактный зонд с однородной жёсткостью.

В разд. 1 излагается принцип расчёта и обсуждается структура сканирующего контактного зонда для двух типов механизмов. Анализ жёсткости с применением теории упругости описан в разд. 2.

**1. Конструкция зонда.** 1.1. *Принцип действия.* Полный контактный зонд обычно состоит из трёх модулей: щупа с шариковым наконечником, механического устройства с малым моментом инерции, чувствительного к движению наконечника зонда, и датчиков для детектирования движения механизма. Схема предлагаемого контактного зонда показана на рис. 1. Щуп зонда сделан из оптического волокна путём его плавления и последующего затвердевания [13]. При правильном подборе параметров технологического процесса по методу Тагучи получаемый монолитный щуп с шариковым наконечником может иметь хорошую сферичность [14]. Щуп закреплён на плавающей пластине, которая подвешена на равномерно распределённых проволочках, соединяющих её с корпусом зонда. Контактная сила заставляет плавающую пластину наклоняться и смещаться по вертикали, как твёрдое тело, в это же время проволочки претерпевают упругую деформацию. Движение пластины детектируется с помощью датчиков фокусировки наверху соответствующих зеркал, закреплённых в подходящих местах на плавающей пластине. При движении её в плоскости, исходя из сигналов датчиков  $S_1$ ,  $S_2$ , можно определить смещение шарика по осям  $X$  и  $Y$ . При движении в пространстве требуется, по меньшей мере, три датчика, чтобы определить смещение шарика в трёх направлениях. Сдвиг шарика можно получить в диапазоне измерения датчика. Такое устройство представляет собой разновидность сканирующего контактного зонда.

1.2. *Конструкция зондового механизма.* В данной работе проанализирован четырёх-проволочный зондовый механизм. Возможно множество вариантов конструкции. Первый тип конструкции, которая представляет собой круговую плавающую пластину, подвешенную на четырёх равноотстоящих друг от друга проволочках (или тонких стержнях), показан на рис. 2, *a*. Второй тип — пластина с удлинёнными рычагами для крепления зеркала (рис. 2, *b*), что позволяет обеспечить бóльшую чувствительность к сдвигам шарикового наконечника. Третий тип конструкции (рис. 2, *c*) сводится к уменьшению движущейся массы

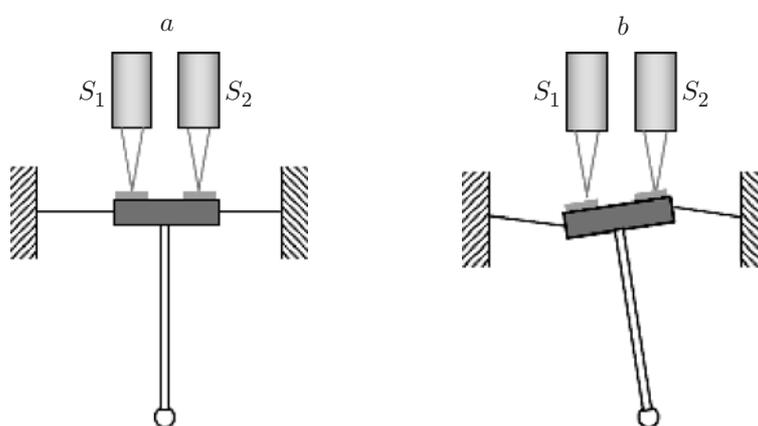


Рис. 1. Принцип действия контактного зонда: при отсутствии контакта (*a*) и в режиме контакта (*b*)

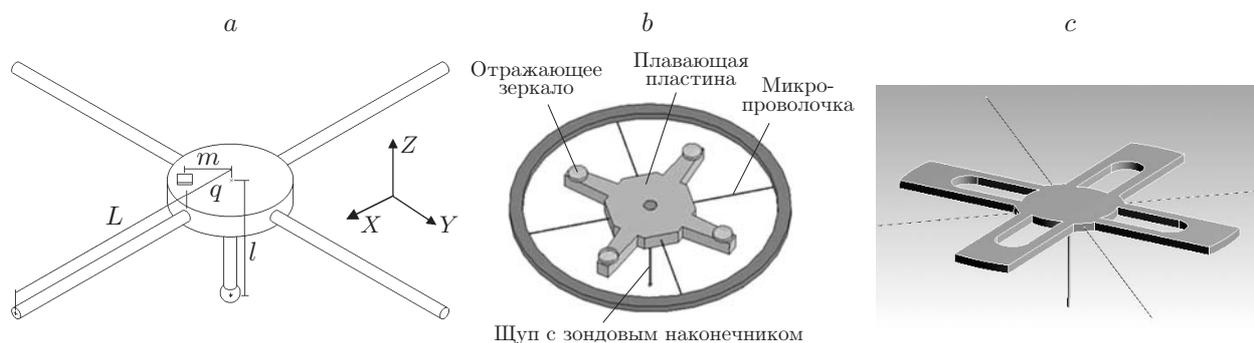


Рис. 2. Примеры конструкций четырёхпроволочной плавающей пластины: круговая пластина (а), с удлинёнными рычагами (б), с уменьшенной массой (с)

для снижения момента инерции. Для увеличения смещения зеркала должны быть закреплены на концах рычагов. Следует отметить, что плавающая пластина рассматривается как движущееся твёрдое тело, тогда как проволоочки являются упругодеформируемыми объектами.

Особенностями четырёхпроволочной схемы являются симметрия и равновесие по направлениям  $X$  и  $Y$ . Хотя трёх датчиков достаточно, чтобы вычислить пространственное движение шарикового наконечника, четвёртый датчик может способствовать проверке точности. Пример конструкции реального четырёхпроволочного механизма приведён на рис. 3,  $a, b$ . Видно, что каждая проволоочка вставлена в канавку на пластине, что создаёт «встроенное» граничное условие, при этом начальное натяжение можно отрегулировать с помощью винта. Длину щупа также можно менять, используя установочный винт. На соответствующих концах рычагов крепятся четыре отражающих зеркала. При сборке они должны быть отъюстированы.

1.3. Сборка зонда. На практике все детали имеют минимальные размеры и соответствуют размерам микрокоординатной измерительной машины. Плавающая пластина должна быть достаточно тонкой. Основная деталь, определяющая размер зонда, — датчик фокусировки. В предлагаемой работе применялся датчик фокусировки с головкой DVD. Являясь предметом массового производства, эта головка недорогая, но достаточно точно изготовленная. Лазерный датчик фокусировки использует принцип астигматизма [15]. Смещение отражающего зеркала приводит к появлению сигнала ошибки фокуса (СОФ) на выходе встроенного квадрантного детектора. Этот сигнал имеет строгую линейную зависимость в пределах диапазона изменения фокуса с разрешением 1 нм [16]. Головка DVD реконструирована специальным образом. Как показано на рис. 4,  $a$ , верхняя правая часть — это головка, у которой линза объектива отсоединена и перенесена в конец ци-

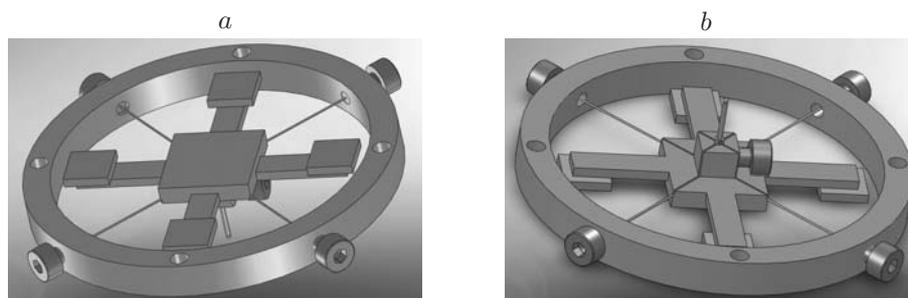


Рис. 3. Виды реального механизма зонда: сверху (а) и снизу (б)

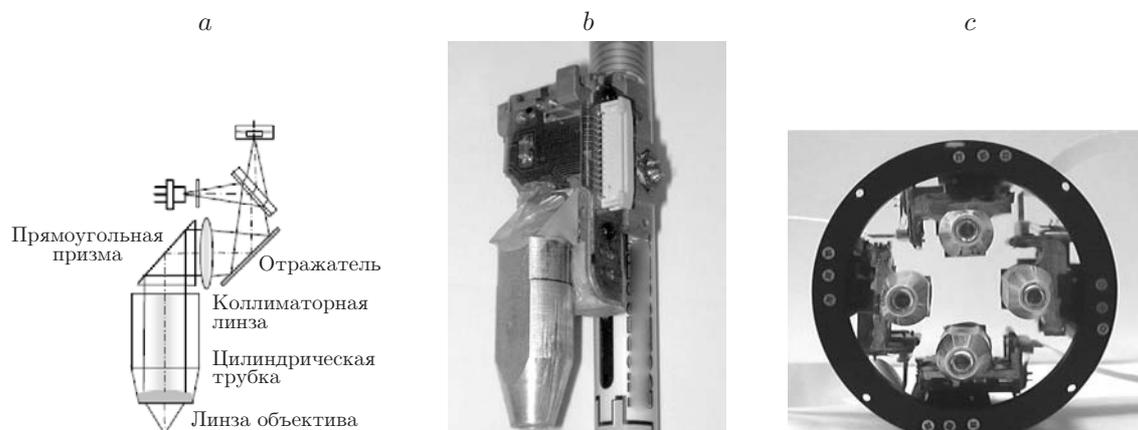


Рис. 4. Датчики фокусировки зонда: оптическая система (а), единственный датчик (b), четыре датчика (с)

линдрической трубки. Для отклонения лазерного луча вниз служит призма. На рис. 4, b приведены сенсор и шариковая ручка для сравнения размеров. На рис. 4, с показаны четыре датчика в сборке. Головка зонда в сборке без крепёжного механизма представлена на рис. 5, а, компьютерное изображение зонда четырёхпроводочного типа — на рис. 5, b.

**2. Анализ конструкции зонда.** Главное назначение плавающей пластины — обеспечение зонду устойчивого исходного положения и придание ему угла наклона по отношению к контактной силе в трёх ортогональных направлениях. Форма и размеры плавающей пластины, так же как длина и диаметр микропроводочки, определяются в соответствии с требуемым движением шарикового наконечника и контактными силами. Сила зондирования должна быть менее 1 мН. Для получения оптимальной геометрии механизма можно воспользоваться методом конечных элементов. Благодаря симметричности геометрии устройства его характеристика «сила—движение» будет симметрична в плоскости  $X - Y$ . Для анализа отклика смещения на контактную силу необходимо принимать во внимание структуру упрощённой круговой пластины (см. рис. 2, а). Механическое поведение под действием контактного усилия можно проанализировать с помощью теории упругости.

2.1. *Деформация под воздействием вертикального контактного усилия.* Отклонение под действием приложенной силы можно смоделировать, используя поперечное сечение структуры «проводка—пластина—щуп». При приложении к шариковому наконечнику

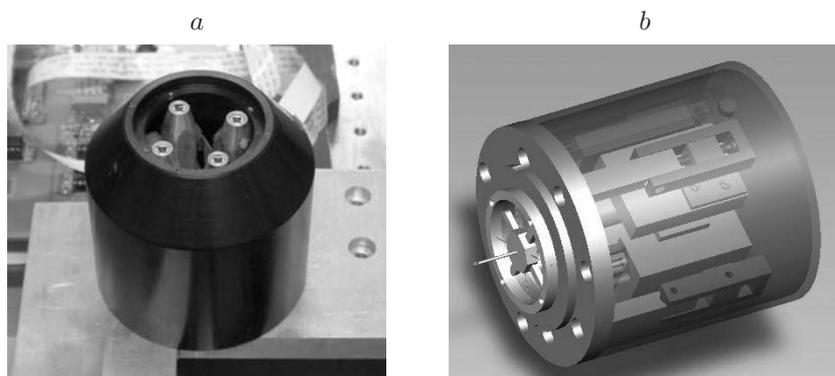


Рис. 5. Головка зонда: без зондового механизма (а) и в полной сборке (b)

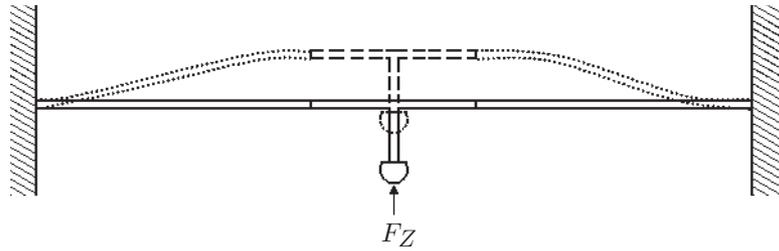


Рис. 6. Прогиб конструкции под действием контактной силы вдоль направления  $Z$

вертикальной силы  $F_Z$  все проволочки отклонятся симметрично в направлении  $Z$ , как показано на рис. 6. Поскольку проволочки встроены в плавающую пластину (каждая проволочка представлена в виде узкой тонкой балки), то отсюда следует, что наклон на свободном конце балки должен быть нулевым. Диаграммы свободного тела для плавающей пластины и правой проволочки показаны на рис. 7. Принимая во внимание диаграмму свободного тела для правой проволочки, получаем, что сдвиговая сила  $P$  и отклоняющий момент  $M$  представляют собой реакцию пластины на нагрузку. Вследствие геометрической симметрии четырёх проволочек имеем  $P = F_Z/4$ . Отметим, что величина  $M$  неизвестна и её требуется найти.

Воспользуемся известными расчётами из теории упругости по определению вертикального смещения и наклона проволочки при разных видах её нагрузки (см. таблицу). Здесь  $L$  — длина проволочки,  $I$  — момент инерции проволочки, а  $E$  — модуль Юнга материала проволочки.

На границе конца проволочки наклон должен быть нулевым, так что  $\theta_1 = \theta_2$ . Отклоняющий момент  $M$  можно определить следующим образом:

$$M = (PL)/2. \quad (1)$$

Поскольку плавающая пластина рассматривается как движущееся абсолютно твёрдое тело, то суммарное смещение на конце проволочки  $\delta_Z$  оказывается точно таким, как смещение шарика головки:

$$\delta_{b,Z} = \delta_1 - \delta_2. \quad (2)$$

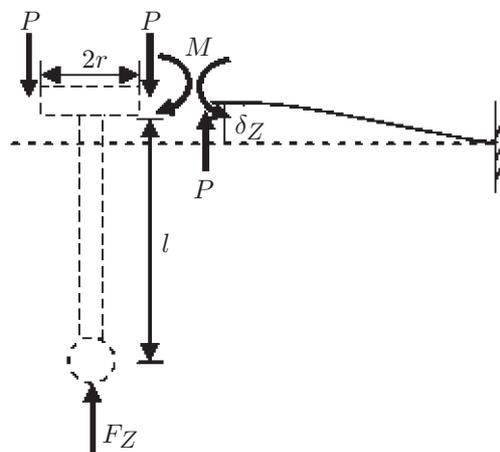


Рис. 7. Диаграммы сил и моментов для плавающей пластины и правой проволочки при приложении к шарика головки вертикальной силы  $F_Z$

**Упругое поведение конца проволоочки  
для разных видов нагрузки**

Нагрузка	Отклонение	Наклон
$P$	$\delta_1 = (PL^3)/(3EI)$	$\theta_1 = (PL^2)/(2EI)$
$M$	$\delta_2 = (ML^2)/(2EI)$	$\theta_2 = (ML)/(EI)$

Подставляя  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $M$  в уравнение (2), можно найти смещение шарика головки под действием контактной силы  $F_Z$ . Для случая зонда в виде четырёх проволоочек ( $P = F_Z/4$ ) получаем

$$\delta_{b,Z} = (F_Z L^3)/(48EI). \tag{3}$$

Отметим, что такой же вывод применим к случаю, когда число проволоочек, на которых подвешена пластина, равно  $N$ . Таким образом, чем больше проволоочек используется для подвешивания пластины, тем выше жёсткость зонда в направлении  $Z$ .

2.2. Деформация под действием горизонтальной контактной силы. При приложении к шариковому наконечнику горизонтальной силы две проволоочки, расположенные в одном и том же направлении, отклоняются в направлении  $Z$  асимметричным образом, в то время как две другие проволоочки закручиваются. То же самое имеет место в случае приложения контактной силы в направлении  $X$ . Если контактная сила приложена в любом направлении в горизонтальной плоскости, то её можно рассматривать как две ортогональные составляющие силы, действующие на шарик головки одновременно в направлениях  $X$  и  $Y$ . Ограничимся случаем  $F_Y$ -составляющей. Система до начала движения показана на рис. 8, *a*, а конфигурация упругой деформации, в которой момент  $M$  является произведением силы  $F$  на длину щупа  $l$ , представлена на рис. 8, *b*. Диаграмма сил для плавающей

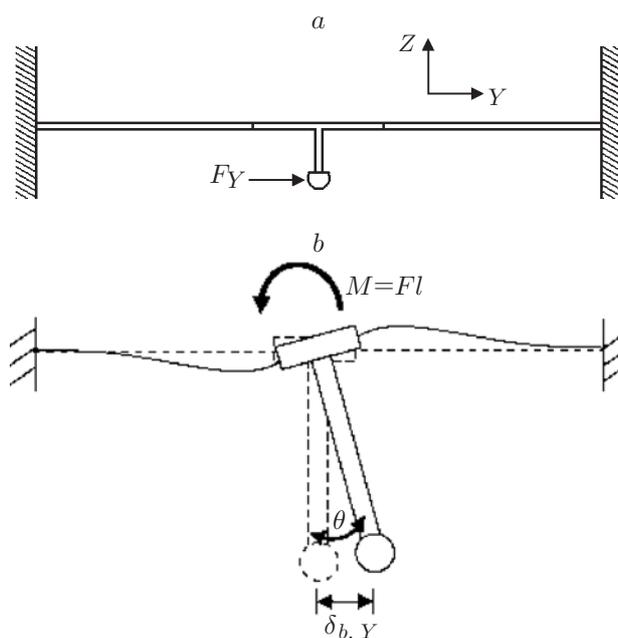


Рис. 8. Поведение механизма под воздействием контактной силы в направлении  $Y$ : перед движением (*a*), после движения (*b*)

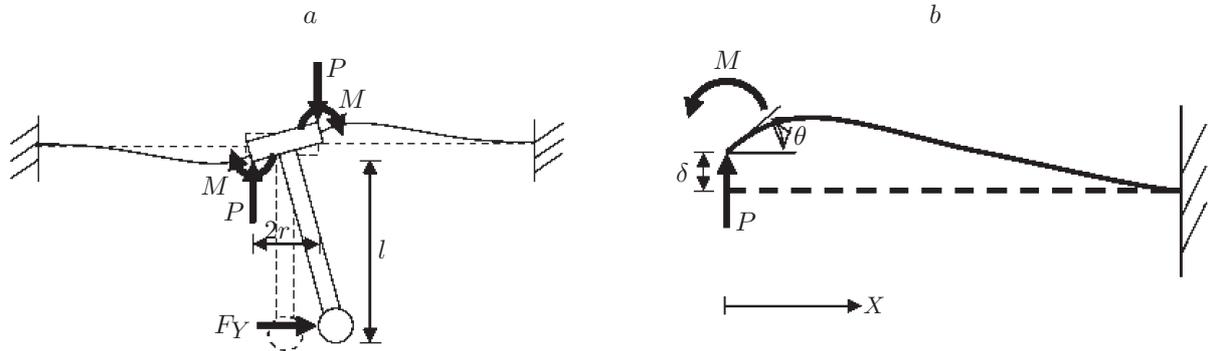


Рис. 9. Диаграмма сил и моментов при приложении к шару головки горизонтальной силы  $F_Y$ : для плавающей пластины (а) и правой проволоочки (b)

пластинки проиллюстрирована на рис. 9, а, а для правой проволоочки — на рис. 9, б.

Пусть отклонение проволоочки равно  $y$ . Воспользуемся при расчётах основным уравнением для отклонения балки:

$$EIy'''' = 0. \quad (4)$$

Тогда при четырёхкратном интегрировании этого уравнения получим

$$EIy = \frac{1}{6} C_1 x^3 + \frac{1}{2} C_2 x^2 + C_3 x + C_4, \quad (5)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4$  — константы.

Далее примем во внимание следующие граничные условия:  $EIy''' = P$ ,  $EIy'' = -M$ ,  $y'(0) = \theta$ ,  $y(0) = \delta$ ,  $y'(L) = 0$  и  $y(L) = 0$ , отсюда получим  $C_1 = P$ ,  $C_2 = -M$ ,  $C_3 = EI\theta$  и  $C_4 = EI\delta$ . В результате будем иметь

$$P = \frac{12EI\delta + 6EI\theta L}{L^3}, \quad (6)$$

$$M = \frac{6EI\delta + 4EI\theta L}{L^2}. \quad (7)$$

Как следует из рис. 9, а, движение шарика головки можно аппроксимировать выражениями

$$\delta_{b,Y} = l\theta, \quad \delta = (r/l)\delta_{b,Y}, \quad (8)$$

$$F_Y l = 2M + 2rP. \quad (9)$$

Таким образом, подставляя уравнения (6)–(8) в (9), получаем

$$F_Y = \frac{8EI}{l^2 L^3} (3rL + L^2 + 3r^2)\delta_{b,Y}, \quad (10)$$

где  $r$  — радиус пластины.

Поскольку зонд устроен симметрично в горизонтальной плоскости, для контактной силы, действующей в направлении  $X$ , результат будет аналогичным. Взаимосвязь между смещением и силой можно получить из уравнений (3) и (10):

$$\begin{bmatrix} \delta_{b,X} \\ \delta_{b,Y} \\ \delta_{b,Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{b,X} \\ F_{b,Y} \\ F_{b,Z} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где

$$C_1 = \frac{l^2 L^3}{8EI(3r^2 + 3rL + L^2)}; \quad C_2 = \frac{L^3}{48EI}.$$

Отметим, что здесь  $r$  — то же самое, что  $q$  на рис. 2, *a*. Жёсткость зонда обратна  $C$  в соответствующем направлении. Итак, параметрами, влияющими на жёсткость, являются: длина проволочки  $L$ , длина щупа  $l$ , радиус пластины  $r$ , момент инерции проволочки  $I$  и модуль Юнга материала проволочки  $E$ . Видно, что при должном выборе размеров плавающего механизма можно создать зонд в виде плавающей пластинки, подвешенной на четырёх проволочках, обладающий одинаковой жёсткостью по всем направлениям, т. е.  $C_1 = C_2$ .

**Заключение.** В данной работе описана конструкция нового контактного сканирующего зонда для микрокоординатной измерительной машины. Такой зонд позволяет получить высокое разрешение при низкой стоимости. С использованием теории упругости произведены расчёты нового плавающего механизма, имеющего высокие чувствительность и жёсткость конструкции. На основе анализа деформаций разработана конструкция зонда четырёхпроволочного типа с плавающей пластиной, имеющего одинаковую жёсткость во всех направлениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **McKeown P.** Nanotechnology — Special article // Proc. of the Nano-metrology in Precision Engineering. Hong Kong, 1998. P. 5–55.
2. **Fan K. C., Fei Y. T., Yu X. F. et al.** Development of a low-cost micro-CMM for 3D micro/nano measurements // Meas. Sci. Technol. 2006. **17**, N 3. P. 524–532.
3. **Jäger G., Manske E., Hausotte T.** Nanopositioning and measuring machine // Proc. of the 2nd EUSPEN International Conference. Turin, 2001. Vol. 1. P. 290–293.
4. **Takamasu K., Furutani K. R., Ozono S.** Development of nano-CMM (Coordinate measuring machine with nanometer resolution) // Proc. of the XIV IMEKO World Congress. Finland, 1997. Vol. 8. P. 34–39.
5. **Peggs G. N., Lewis A. J., Oldfield S.** Design for a compact high-accuracy CMM // Ann. CIRP. 1999. **48**, N 1. P. 417–420.
6. **Küng A., Meli F., Thalmann R.** Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe // Meas. Sci. Technol. 2007. **18**, N 2. P. 319–327.
7. **Haitjema H., Pril W. O., Schellekens P.** Development of a silicon-based nanoprobe system for 3-D measurements // Ann. CIRP. 2001. **50**, N 1. P. 365–368.
8. **Ji H., Hsu H. Y., Kong L. X., Wedding A. B.** Development of a contact probe incorporating a Bragg grating strain sensor for nano coordinate measuring machines // Meas. Sci. Technol. 2009. **20**, N 9. 095304.

9. **Tibrewala A., Phataralaoha A., Buttgenbach S.** Development, fabrication and characterization of a 3D tactile sensor // Journ. Micromech. Microeng. 2009. **19**, N 12. 125005.
10. **Chu C. L., Chiu C. Y.** Development of a low cost nanoscale touch trigger probe based on two commercial DVD pick-up heads // Meas. Sci. Technol. 2007. **18**, N 7. P. 1831–1842.
11. **Fan K. C., Cheng F., Wang W. L. et al.** A scanning contact probe for a micro coordinate measuring machines (CMM) // Meas. Sci. Technol. 2010. **21**, N 5. 054002.
12. **Weckenmann A., Peggs G., Hoffmann J.** Probing systems for dimensional micro- and nanometrology // Meas. Sci. Technol. 2006. **17**, N 3. P. 504–509.
13. **Fan K. C., Hsu H. Y., Hung P. Y. et al.** Experimental study of fabricating a micro ball tip on the optical fiber // Journ. Opt. A: Pure and Appl. Opt. 2006. **8**, N 9. P. 782–787.
14. **Fan K. C., Wang W. L., Chiou H. S.** Fabrication optimization of a micro-spherical fiber probe with the Taguchi method // Journ. Micromech. Microeng. 2008. **18**, N 1. 0150111.
15. **Fan K. C., Lin C. Y., Shyu L. H.** Development of a low cost focusing probe for profile measurement // Meas. Sci. Technol. 2000. **11**, N 1. P. 1–7.
16. **Fan K. C., Jäger G., Chen Y. J., Mastlyo R.** Development of a non-contact optical focus probe with nanometer accuracy // Proc. of the 7th EUSPEN International Conference. Bremen, Germany, 2007. P. 278–281.

*Поступила в редакцию 18 февраля 2010 г.*

---