

К ВОПРОСУ О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОПТОВОЛОКОННОГО ПЬЕЗОСКАНЕРА

В статье обсуждаются физико-технические основы построения и режимы работы систем измерения размеров сложнопрофильных изделий с учетом использования нового пространственного модулятора света в виде оптоволоконного пьезосканера. Описаны его устройство, принцип действия, достигаемые основные технические характеристики. Рассмотрена совместная работа оптоволоконного пьезосканера и низкокогерентного интерферометра в составе трех систем измерения: сканирующих гибридных 3D измерительных головок (ИГ) при введении сверхширокоугольной оптической системы и корундового наконечника, а также двух приборов активного контроля.

Для обсуждаемой конструкции ИГ предложено использовать опорный канал, а при контактировании с изделием измерять зазоры $1_{з1}, 1_{з2} \dots 1_{зн}$, возникающие между корундовым наконечником и изделием вблизи формирующейся зоны контакта с последующим расчетным определением т.н. эквидистантных контуров и итоговой компенсации упругих деформаций.

Ключевые слова: координатные измерения, измерительная головка, корундовый наконечник, низкокогерентный интерферометр, пьезосканер, прибор активного контроля, зондовая микроскопия, сверхширокоугольная оптическая система.

Введение. В настоящее время совершенствование систем измерения размеров изделий, связанное с повышением точности, быстродействия и расширением функциональных возможностей, в основном обусловлено более широким использованием лазерной и/или волоконно-оптической техники. При этом наиболее трудными являются задачи измерения размеров сложнопрофильных изделий, и успешное их решение предполагает необходимость подведения оптического потока (лазерного луча) к зоне контроля и сканирования пространственными модуляторами. Ранее такие устройства [1] имели большие габариты и сложное управление. Однако прогресс в области микромеханики, а именно трубчатых пьезосканеров для зондовой микроскопии [2, 3] и оптоволоконных пьезосканеров (в дальнейшем — пьезосканер) для эндоскопии [4–8] создают предпосылки и для совершенствования пространственных модуляторов света для вышеупомянутых измерительных систем. Такие разработки ранее не были представлены в открытой печати, и данная статья направлена на восполнение этого пробела на примере сканирующей гибридной 3D измерительной головки (ИГ) и двух приборов активного контроля (ПАК).

1. Устройство, принцип действия и основные характеристики пьезосканера. Пьезосканер (рис. 1а) состоит из полого цилиндрического корпуса 1 (диаметром всего 1,1 мм и длиной 13 мм в [5]), внутри которого вблизи заднего торца установлена центросимметричная пьезокерамическая трубка 2 (в дальнейшем — пьезотрубка) с четырьмя

перпендикулярно расположенными электродами, электрически попарно подключенными к внешнему блоку управления. Вдоль центра этой пьезотрубки пропущен гибкий волоконный световод 3 с возможностью передачи лазерного излучения, свободный конец которого в виде волоконного кантилевера длиной консольно выступает за ее пределы. Передний торец пьезосканера образован объективом 4, обеспечивающим выход оптического излучения, проходящего через световод.

При подаче двух переменных сигналов U_y и U_z на две разные пары электродов пьезотрубки происходят периодические сжатия и расширения ее секторов с поперечными смещениями ее конца. В режиме резонанса такие малые смещения существенно усиливаются на конце гибким волоконным кантилевером. Для уменьшения расходимости лазерного луча после волокна на его торце устанавливают микролинзу [9, 10] (на рис. 1а не обозначены).

Для пьезотрубок, использовавшихся в зондовой микроскопии в начале XXI века, с длиной ~ 80 мм с напряжением ± 300 В были получены смещения до 100 мкм с частотой резонанса до 1 кГц [2]. К настоящему времени достигнуто повышение частоты резонанса до 5 кГц с гибким кантилевером на основе стеклянного оптоволокна диаметром 125 мкм с длиной 4,3 мм и до 10 кГц для диаметра 80 мкм с длиной 2,4 мм [5].

Пьезосканер выполняет роль пространственного модулятора света, а изменения амплитудами U_{0y}, U_{0z} частотами f_y, f_z или фазами φ_y, φ_z двух сигналов питания:

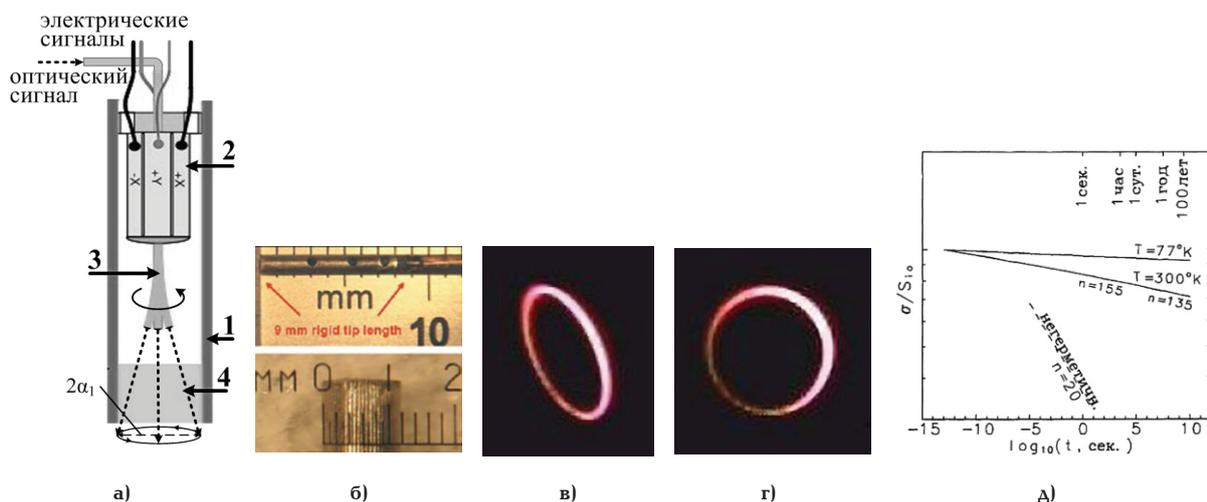


Рис. 1. Пьезосканер: схема (а), фото (б) [5], фигуры Лиссажу, формируемые лазерным лучом при работе пьезосканера [8] (в, г), зависимость времени до разрушения t_p волокна от σ/S_0 (д) [9]

$$\begin{cases} U_y = U_{0y} \cdot (\sin 2\pi f_y t + \varphi_y), \\ U_z = U_{0z} \cdot (\cos 2\pi f_z t + \varphi_z) \end{cases} \quad (1)$$

позволяет управлять движением конца волокна, формируя нужную траекторию движения лазерного луча, например, подобными широко известным фигурам Лиссажу (рис 1б, в) [8], спиралевидными и др.

При оценке долговечности пьезосканера следует учесть, что прочность бездефектного кварцевого волокна выше прочности стальной проволоки такого же диаметра [9], однако любой контакт поверхности волокна с твердым предметом или даже частицей пыли, находящейся в воздухе, приводит к появлению на поверхности стекла микротрещин, которые при приложении растягивающей нагрузки начинают быстро расти. В результате разрывная прочность кварцевых волокон оказывается намного ниже теоретического предела прочности кварцевого стекла.

Согласно [11], время до разрушения t_p от нагрузки σ_s имеет экспоненциальную зависимость

$$t_p = t_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0}{R \cdot T} \left(1 - \frac{\sigma_s}{S_{i0}}\right)\right), \quad (2)$$

где t_0 — величина, приблизительно равная периоду тепловых колебаний атомов (~10–13 сек.); U_0 — энергия ненагруженной Si-O-связи (~110 ккал/моль); R — газовая постоянная; T — температура; S_{i0} — прочность в отсутствие термофлуктуационного роста дефектов.

При этом время жизни световода t_e при статической нагрузке σ_s , равной разрывной прочности, в $(n+1)$ раз короче, чем при динамической σ_d (при $\sigma_s = \sigma_d$). Параметр статической усталости n как наклон графика статической усталости в логарифмических координатах записывается в виде:

$$n = - \frac{d \ln(t_p)}{d \ln(\sigma_s)} = \frac{U_0}{RT} \cdot \frac{\sigma_s}{S_{i0}}. \quad (3)$$

В наиболее интересном, с практической точки зрения, интервале от 1 секунды до 30 лет он успевает снизиться всего лишь со 155 до 135. Получен-

ные из (3) зависимости для комнатной температуры (300 °K) и температуры жидкого азота (77 °K) приведены на рис. 1д.

Минимальный радиус изгиба участка волокна r_B длиной l_B можно рассчитать, используя данные по изгибу подвижного отрезка световода [5], по формуле:

$$r_B = \frac{l_B \cdot 360^\circ}{2\pi \cdot \alpha_1} = \frac{l_B}{\alpha_2}, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 — угол отклонения конца волокна в градусах и радианах соответственно. Для экспериментального образца, бездефектно проработавшего непрерывно в течение 3377 часов, с параметрами $l_B = 4,3$ мм и $\alpha_1 = 50^\circ$ [5] получаем $r_B = 4,9$ мм ≈ 5 мм. Полученные значения соответствуют допустимым значениям по динамической нагрузке пьезосканера.

2. Сканирующая ИГ. В развитии серии авторских работ, посвященных одноканальной и многоканальной гибридных ИГ [12, 13], был разработан компромиссный вариант ИГ со сканированием. На рис. 2а показана сканирующая ИГ (без электро-механического блока, формирующего триггерный сигнал при механическом контактировании), состоящая из низкокогерентного интерферометра 1, блока управления 2, пьезосканера 3, первого 4 и второго 6 граданов (GRIN-линзы), светоделителя 5, оптической системы 7, регистратора 8 с матрицей чувствительных элементов $M \times N$, сверхширокоугольной оптической системой типа «Fisheye» («Рыбий глаз») 9 и корундового наконечника 10 (рис. 2б) из прозрачного и высокопрочного материала, например, корундов (лейкосапфир, сапфир, рубин) или стипшовита.

В процессе работы при контактных измерениях пьезосканер 3 по сигналу от блока управления 2 совершает поперечные колебания (как вариант по спирали с периодами расширения и сужения), соответственно отклоняя в угловом секторе до $100^\circ \times 100^\circ$ [5] коллимированный микролинзой (рис. 2в) выходящий лазерный луч, поступающий от низкокогерентного интерферометра 1. Далее этот лазерный луч, двигаясь по криволинейной траектории через первый градан 4, делится светоделителем 5 на два

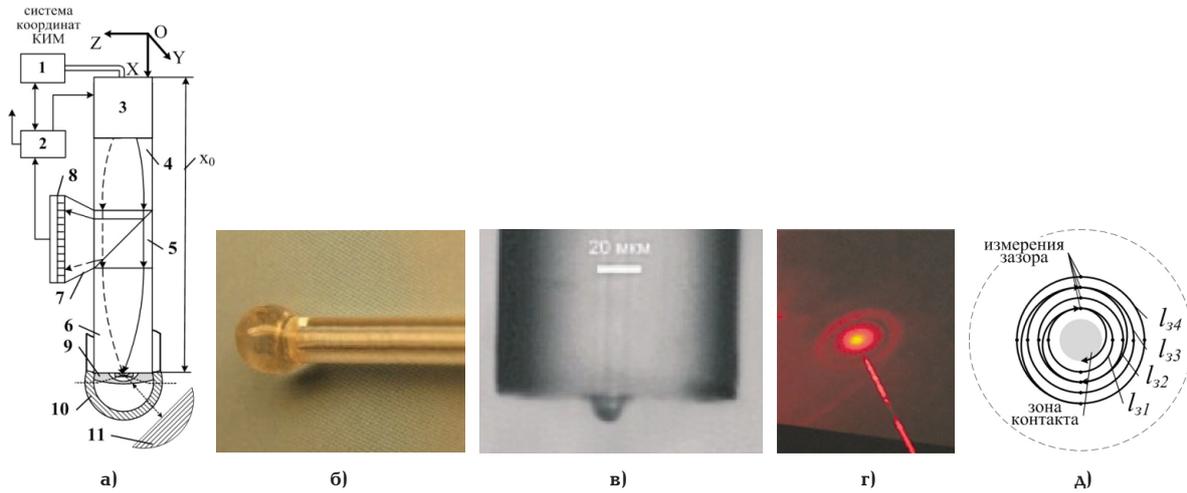


Рис. 2. Сканирующая ИГ: схема (а), торцевой сапфировый сферический наконечник с капиллярной трубкой (б) [12], торец волокна с сердцевинной диаметром 2 мкм с микролинзой (в) и изображение в дальней зоне распределения интенсивности излучения лазера, выходящего из торца световода с микролинзой (г) [9], часть траектории движения по спирали лазерного луча при измерении зазоров между наконечником и изделием (д)

потока. Первый из них, отклоняясь, проходит через оптическую систему 7 и, освещая регистратор 8, образующий опорный канал и измеряющий текущее положение центра лазерного луча, позволяет сформировать сигнал обратной связи для блока управления 2. Второй поток после светоделителя 5 последовательно проходит через второй градан 6, сверхширокоугольную оптическую систему типа «Fisheye» («Рыбий глаз») 9, прозрачный корундовый наконечник 10, сканируя коллимированным лазерным лучом (рис. 2г) окружающее пространство в угловом секторе полусферы до $180^\circ \times 180^\circ$ (по азимуту и углу места).

При освещении изделия 11 и отражении от него часть лазерного излучения следует в обратном направлении через наконечник 10, граданы 4 и 6, светоделитель 5, пьезосканер 3 к низкокогерентному интерферометру 1. Алгоритм его измерения, как и в ранее разработанных ИГ [11, 12], основан на фиксации равенства разности хода $I_{нки}$, заданной в низкокогерентном интерферометре 1 значению зазора I_z между наконечником 10 и изделием 11. Изменяя $I_{нки}$ и отклоняя лазерный луч, например, по спиральной траектории в угловом секторе полусферы $180^\circ \times 180^\circ$ появляется возможность бесконтактно сканировать (ощупывать) окружающее пространство, и в частности, изделие 11, а наступление события $I_{нки} = I_z$ соответствует т.н. «виртуальному касанию» с угловым положением освещающего луча по нормали к поверхности изделия 11.

Серия бесконтактных координатных измерений, полученная в сферической системы координат, при ощупываниях для такой сканирующей ИГ для каждой измеренной точки изделия будет состоять из линейной и двух угловых координат ($I_{нки}$, β , γ). И может быть преобразована для декартовой системы координат, принятой почти во всех координатных измерительных машинах, с учетом координат самой ИГ (x_0, y_0, z_0), положения пьезосканера ($x_{воир}, y_{воир}, z_{воир}$), а также с учетом преобразований регистратора 8 — $\beta = k_m \cdot I_{хир}$ и $\gamma = k_n \cdot I_{уир}$:

$$\begin{cases} x_{ким} = x_{воир} + x_0 + I_{нки} \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma, \\ y_{ким} = y_{воир} + y_0 + I_{нки} \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma, \\ z_{ким} = z_{воир} + z_0 + I_{нки} \cdot \cos \beta. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{ким} = x_{воир} + x_0 + I_{нки} \cdot \sin(k_m \cdot I_{хир}) \cdot \cos(k_n \cdot I_{уир}), \\ y_{ким} = y_{воир} + y_0 + I_{нки} \cdot \sin(k_m \cdot I_{хир}) \cdot \sin(k_n \cdot I_{уир}), \\ z_{ким} = z_{воир} + z_0 + I_{нки} \cdot \cos(k_m \cdot I_{хир}), \end{cases} \quad (5)$$

где k_m и k_n , $I_{хир}$ и $I_{уир}$ — коэффициенты преобразования и число чувствительных элементов $M \times N$ матрицы регистратора 8.

Контактные измерения осуществляются традиционно за счет механического контакта наконечника 10 радиусом R_n в изделием 11 с возможностью компенсации упругих деформаций I_g от образующейся зоны контакта $I_{зк}$. Значение упругих деформаций I_g связано с размером зоны контакта $I_{зк}$ [12]:

$$I_g = R_n - \sqrt{R_n^2 - \frac{I_{зк}^2}{4}}. \quad (6)$$

В [14, 15] предложено расчет упругих деформаций I_g реализовать при визуализации и измерении $I_{зк}$ встроенным микроскопом. Но при малых измерительных усилиях и деформациях $I_g \sim 0,5 \dots 1$ мкм при $R_n = 1,5 \dots 2,0$ мм значение $I_{зк}$ составляет не более 90–130 мкм и использование высокоразрешающего встроенного микроскопа неперспективно из-за его сложной оптической схемы, больших габаритов и массы.

Альтернативой может быть способ измерения размеров зоны контакта за счет измерения зазоров $I_{z1}, I_{z2} \dots I_{zn}$ между наконечником и изделием вблизи ее границы в различных точках с координатами (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ... (x_n, y_n) с погрешностью на уровне долей микromетра. Тогда для серии измерений с движениями лазерного сканирующего луча вокруг зоны контакта по серии концентрических окружностей, например, эквидистантных колец со спиральными переходами между ними (рис. 2д) подобных интерференционным кольцам Ньютона рассчитываются набор n значений деформаций $I_{g1}, I_{g2} \dots I_{gn}$:

$$\begin{cases} I_{g1} = F^{-1}(I_{z1}, x_1, y_1) \\ I_{g2} = F^{-1}(I_{z2}, x_2, y_2) \\ \dots \dots \dots \\ I_{gn} = F^{-1}(I_{zn}, x_n, y_n) \end{cases}, \quad (7)$$

из которых потом определяется искомое усредненное значение I_g :

$$I_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{gi}. \quad (8)$$

Полученное значение упругих деформаций I_g вычитается из результата измерений, повышая точность измерений.

2.1. Физические основы бесконтактных измерений.

Работа низкокогерентного интерферометра [16, 17], включающего сканирующий интерферометр, основана на применении светодиода, спектральная плотность мощности $S(\omega)$ которого описывается функцией Гаусса.

Интенсивность интерферирующих оптических потоков, освещающих фотоприемник, будет иметь вид

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\frac{(I_{on} - I_3)^2}{2I_{кор}^2}\right) \cos[k(I_{on} - I_3)], \quad (9)$$

где I_{on} — разность длин плеч сканирующего интерферометра; I_3 — толщина зазора по нормали между рубиновым наконечником и поверхностью изделия; $I_{кор}$ — длина когерентности светодиода; $k = 2\pi/\lambda$, где λ — центральная длина волны светодиода.

Определение положения максимума аналогично измерениям «по огибающей» сигнала, описываемой формулой

$$A(z) = A_0 \exp\left(-\frac{(I_{on} - I_3)^2}{2I_{кор}^2}\right), \quad (10)$$

и соответствует измерениям «по фазе» интерференционного сигнала и цифрового выходного кода N_ϕ , созданного на основе сигнала $N_{вых}$ с учетом двойного хода луча:

$$N_\phi = 2k_{инт} \Delta l / \lambda, \quad (11)$$

где $k_{инт}$ — коэффициент интерполяции периода интерференционной картины.

Уравнения (10) и (11) показывают возможность работы в двух режимах измерений: «по огибающей» — «быстрые», но грубые измерения, «по фазе» — «медленные» со временем измерения для одного канала ≥ 100 мс, но «точные» измерения. Точность измерений для т.н. «быстрых» и «медленных» измерений может достигать долей мкм и десятков нанометров соответственно.

При фиксированном угловом поле 180° и фиксированном числе чувствительных элементов матрицы регистратора $8 \times M$ (размерами на уровне 2,5 мкм) угловая разрешающая способность сканирующей ИГ будет определяться как $180^\circ/k_{oc} \cdot M$, где k_{oc} — коэффициент преобразования оптической системы 7. Повышение угловой разрешающей способности в некоторых пределах возможно за счет увеличения значений k_{oc} и M , применения более совершенных методов регистрации изображения, в частности, применением методов субпиксельной обработки изображений [18, 19], в т.ч. за счет применения двух регистраторов в опорном канале. Также можно корректировать изображения, искаженные от изменения чувствительности пикселей, смаза изображения, влияниям шумов: внутреннего

и импульсного, вызванных сбоем в работе чувствительных элементов регистратора или их выхода из строя (появление «битых пикселей»), шума в электронных цепях и т.п. Для этого используются одномерные интегральные уравнения Вольтерра I рода, Фредгольма I рода типа свертки или двумерные интегральные уравнения Фредгольма I рода типа свертки [20, 21].

Представляется, что более существенного повышения угловой разрешающей способности потенциально можно достичь при использовании высокоточных методов двумерного измерения поперечных смещений лазерного луча на основе использования акустооптических гетеродинных лазерных измерительных систем [22]. При использовании современных электронных измерительных систем со специальными мерами по шумоподавлению за счет использования систем фазовой автоподстройки фазы и твердотельных акустооптических модуляторов на кристаллах TeO_2 с длиной ультразвуковой волны на уровне $\approx 10,3$ мкм можно достичь значений разрешающей способности поперечных смещений лазерного луча $\approx 0,6$ нм, что существенно выше первого направления. Однако к настоящему времени отсутствуют публикации по акустооптическим гетеродинным лазерным измерительным системам, работающим в режиме низкокогерентной интерферометрии. И это предполагает проведение дополнительных НИОКР, при положительных результатах которых ожидается выход на новый технологический уровень.

3. Зондовый ПАК. Вышеописанный пьезосканер может быть также использован и для совершенствования зондовых ПАК [23], особенность работы которых заключается в осуществлении движений по замкнутой траектории, близкой к эллиптической, описываемой выражением $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$.

Длина ножки зонда I_3 не более 10 мм. С учетом возможных биений при обработке изделий с прерывистыми поверхностями максимальная амплитуда движений зонда по вертикали Δl_y должна составлять с небольшим запасом не более 100 мкм. Как следует из [23], максимальная амплитуда движений зонда по горизонтали Δl_x не превышает $\approx 1,5$ мм. С учетом вышесказанного максимальное угловое отклонение θ может быть оценено как $\theta = \arctg \frac{\Delta l_y}{I_3}$ и для вышеприведенных значений параметров имеем $\theta = \arctg \frac{100 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-3}} \approx 0,6^\circ$. Как видно, угловые отклонения зонда существенно меньше углового отклонения лазерного луча, обеспечиваемого пьезосканером: $0,6^\circ \ll 100^\circ$. Кроме того, резонансная частота зонда, достигающая 1 кГц [23], также существенно меньше вышеуказанной резонансной частоты пьезосканера 10 кГц. Это подтверждает возможность использования пьезосканера для координатных измерений, осязывающих движение зонда в зондовых ПАК. Схема одного из вариантов зондового ПАК приведена на рис. 3а, а на рис. 3б показано увеличенное изображение корундового наконечника.

4. ПАК размеров изделий с несимметричным расположением режущих кромок. Данная конструкция ПАК разработана для измерения размеров изделий, в первую очередь, режущего инструмента со спиральной (винтовой) поверхностью и несимметричным расположением по сечению режущих кромок (рис. 4а, б) — фрезы, зенкеры, развертки. В данном ПАК используется измерительная голов-

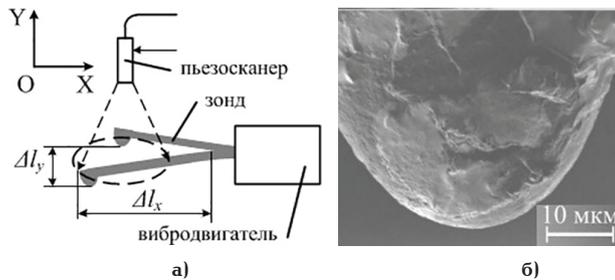


Рис. 3. Схема зондового ПАК (а) и фотография корундового наконечника (б)

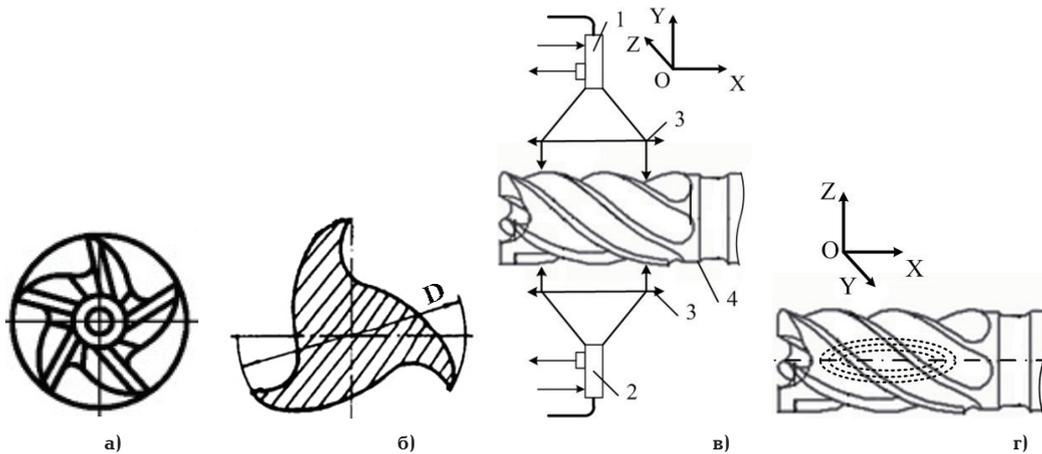


Рис. 4. Изделия с несимметричным расположением по сечению режущих кромок: фреза (а), зенкер (а) и схемы измерений размеров таких изделий: виды сбоку (в) и сверху (г)

ка, конструкция которой близка к сканирующей ИГ, описанной выше. Отличие заключается в отсутствии сверхширокоугольной оптической системы типа «Fisheye» и корундового наконечника.

Измерительная схема (рис. 4в) состоит из двух пар измерительных головок 1, 2 и линз 3, 4, расположенных с противоположных сторон контролируемого изделия 5. В процессе измерений происходит синхронное сканирование лазерным лучом каждым пьезосканером 1 и 2 поверхности изделия, например, по эллиптической или спиралевидной траектории, включая его большую ось.

Длины большой $L_{\text{бo}}$ и малой $L_{\text{мo}}$ осей эллиптической траектории подбираются с учетом двух условий:

$$\begin{cases} L_{\text{бo}} > 2L_{\text{шаг}} \\ L_{\text{мo}} \leq D_{\text{изг}} \end{cases}, \quad (12)$$

где $L_{\text{шаг}}$ — шаг винтовой поверхности изделия; $D_{\text{изг}}$ — диаметр изделия.

Методика определения размера изделия с несимметричным расположением режущих кромок состоит из двух этапов. Геометрические схемы показаны на рис. 4в, г для случая расположения двух вершин сверху и одной снизу.

Итак, на первом этапе измеряется положение трех вершин режущих кромок изделия: две с одной стороны y_b, y_a , одна y_n с другой. Это осуществляется за счет регистрации положения пятна на режущих кромках с противоположных сторон изделия в момент эллиптических движений освещающего лазерного луча.

По результатам измерений с учетом преобразования сферической системы координат в пря-

моугольную, согласно системе уравнений (5), образуется множество точек (результатов) измерений с координатами (x, y, z) . В связи с тем, что изделие является телом вращения, каждая точка принадлежит окружности, то на основе измеренных значений на основе метода наименьших квадратов могут быть определены радиус $R_{\text{изг}}$ и положение центров x_0, y_0 и трех вершин y_b, y_a, y_n режущих кромок изделия (рис. 5б). На втором этапе, определяя разность между y_b и y_a (рис. 5б), рассчитывается изменение положения верхней границы изделия $\Delta y_{\text{изг}}$. Для координаты x_2 : $\Delta y = y_b - y_a$. Текущее значение положения верхней границы изделия y_c , находящейся напротив нижней y_n , рассчитывается исходя из предположения линейного изменения размера изделия. Длины отрезков [А;В] и [А;С] определяются как $l_{\text{ав}} = x_b - x_a$ и $l_{\text{ан}} = x_n - x_a$ соответственно, и положение координаты x_n внутри отрезка [А;В] можно рассчитать $\frac{l_{\text{ан}}}{l_{\text{ав}}} = \frac{x_n - x_a}{x_b - x_a} = g$. С учетом этого положение верхней границы изделия y_c рассчитывается как $y_c = g \cdot \Delta y = \frac{(x_n - x_a) \cdot (y_b - y_a)}{x_b - x_a}$, а искомый размер изделия $D_{\text{изг}}$ следующим образом:

$$D_{\text{изг}} = y_c - y_n = \frac{(x_n - x_a) \cdot (y_b - y_a)}{x_b - x_a} - y_n. \quad (13)$$

Как видно, использование пьезосканера позволяет успешно решить обсуждаемую задачу.

Заключение. 1. Совместная работа пьезосканера, обеспечивающего управляемую пространственную модуляцию света, с низкокогерентным интерферометром, обладающим микронной и суб-

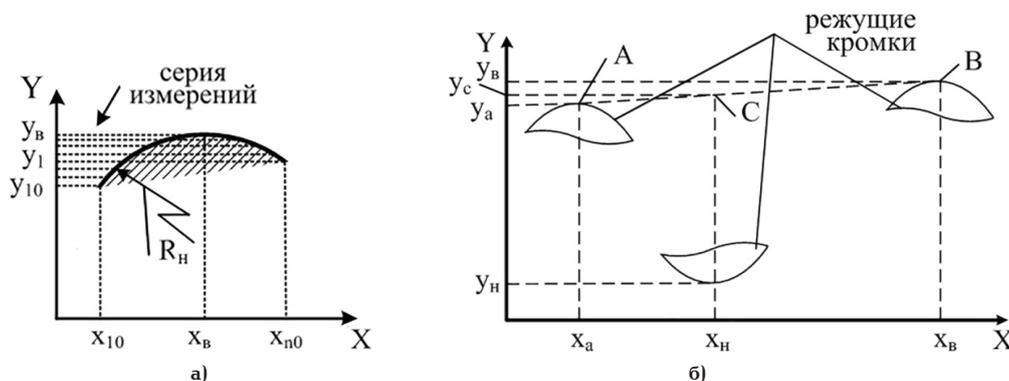


Рис. 5. Упрощенные геометрические схемы измерений: положения верхней границы изделия y_a (а) и искомого размера изделия (б)

микронной точностью измерения, позволяет создать сканирующую ИГ и приборы активного контроля для координатных измерений размеров изделий со сложными профилями.

2. Повышение угловой разрешающей способности сканирующей ИГ возможно при использовании в опорном канале более совершенных методов регистрации изображения, например, методов субпиксельной обработки изображений, а также его корректировки от искажений, среди которых изменения чувствительности пикселей, смаза изображения и влиянием шумов.

Однако более перспективно использование в опорном канале методов измерения двумерных поперечных смещений лазерного луча на основе акустооптических гетеродинных лазерных измерительных систем, хотя к настоящему времени отсутствуют публикации по таким системам, работающим в режиме низкокогерентной интерферометрии. Это предполагает проведение дополнительных НИОКР в данном направлении, при положительных результатах которых ожидается выход на новый технологический уровень.

3. Технические характеристики пьезосканера, в частности, угловое отклонение лазерного луча, рабочая частота и точность измерений удовлетворяют техническим характеристикам, предъявляемым к зондовым ПАК, создавая предпосылки для успешного использования в них.

4. Технические характеристики пьезосканера позволяют использовать его для построения ПАК размеров изделий с несимметричным расположением режущих кромок, тем самым расширяя их функциональные возможности.

Библиографический список

1. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970. 295 с.
2. Быков В. А. Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 403 с.
3. Стовпяга А. В. Технология создания и исследование пьезорезонансных зондовых датчиков для сканирующего зондового микроскопа: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 112 с.
4. Akhoundi F., Qin Y., Peyghambarian N. [et al.]. Compact fiber-based multi-photon endoscope working at 1700 nm // *Biomedical Optics Express*. 2018. Vol. 9, no. 5. P. 2326–2335. DOI: 10.1364/BOE.9.002326.
5. Самарин А. Лазерный микропроектор со спиральной разрезкой // *Компоненты и технологии*. 2008. Т. 10. P. 101–104.
6. Schowengerdt B., Johnston R., Melville C. [et al.]. 3D Displays using scanning laser projection // *SID Symposium Digest of Technical Papers*. 2012. Vol. 43. P. 640–643. DOI: 10.1002/j.2168-0159.2012.tb05863.x.
7. Wu Y., Leng Y., Xi J. [et al.]. Scanning all-fiber-optic endomicroscopy system for 3D nonlinear optical imaging of biological tissues // *Optics Express*. 2009. Vol. 17, no. 10. P. 7907–7915. DOI: 10.1364/OE.17.007907.
8. Zhao Y., Hiroshi Nakamura H., Gordon R. J. Development of a versatile two-photon endoscope for biological imaging // *Biomedical Optics Express*. 2010. Vol. 1, Issue 4. P. 1159–1172. DOI: 10.1364/BOE.1.001159.
9. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // *Российские нанотехнологии*. 2006. Т. 1, № 1-2. С. 240–244.
10. Фокина М. И. Формирования микрооптических поверхностей на основе фотоотверждения мономерных композиций в ближнем поле световой волны: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2012. 128 с.
11. Семенов С. Л. Прочность и долговечность волоконных световодов на основе кварцевого стекла: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2008. 224 с.
12. Леун Е. В. Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий сложной формы // *Омский научный вестник*. 2017. № 5 (155). С. 140–146.
13. Леун Е. В. Вопросы построения многоканальных гибридных 3D измерительных головок для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий // *Омский научный вестник*. 2017. № 6 (156). С. 126–131.
14. Leun E. V. Hybrid single channel fiber-optic measuring head with a built-in microscope for contact and non-contact measurement of products size in rocket and space, chemical and petroleum engineering // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141 (1). P. 050024-1–050024-8. DOI: 10.1063/1.5122167.
15. Леун Е. В., Шаханов А. Е., Никель А. В. Возможности повышения точности контактных измерений при использовании корундовых наконечников и видеорегистрации изображения области контакта // *Омский научный вестник*. 2019. № 2 (164). С. 68–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-68-75.
16. Иванов В. В. Развитие методов низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2005. 154 с.
17. Кононенко В. В., Конов В. И., Волков П. В., Иванов В. В. [и др.]. Контроль лазерной обработки поликристаллических алмазных пластин методом низкокогерентной оптической интерферометрии // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35, № 7. С. 622–626.
18. Кавиева Е. С. Методы и алгоритмы субпиксельной обработки цифровых изображений: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 126 с.

19. Резник А. Л. Методы, алгоритмы и программы для ускоренного решения трудоемких задач обработки случайных дискретных полей и цифровых изображений: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2004. 241 с.

20. Sizikov V. S., Ekzemliarov R. A. Operating sequence when noise is being filtered on distorted images // Journal of Optical Technology. 2013. Vol. 80 (1). P. 28–34. DOI: 10.1364/JOT.80.000028.

21. Rimsikh M. V., Evseev V. O., Sizikov V. S. Reconstruction of smeared images by various methods // Journal of Optical Technology. 2007. Vol. 74 (11). P. 764–768. DOI: 10.1364/JOT.74.000764.

22. Леун Е. В. Совершенствование методов и средств контроля отклонений от прямолинейности на основе акустооптических гетеродинных лазерных измерительных систем // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 71–77. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-71-77.

23. Леун Е. В. Вопросы построения зондовых приборов активного контроля размеров изделий // Омский научный

вестник. 2018. № 4 (160). С. 127–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-127-133.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер.

SPIN-код: 6060-8056, AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В. К вопросу о совершенствовании систем измерения размеров изделий при использовании оптоволоконного пьезосканера // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 73–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-73-79.

Статья поступила в редакцию 17.01.2020 г.

© Е. В. Леун