

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГИБРИДНЫХ СКАНИРУЮЩИХ 3D ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГОЛОВОК С АКУСТООПТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ

В статье представлен способ определения упругих деформаций изделия, возникающих при механическом контактировании со сферическим наконечником, позволяющий исключить влияние на результат измерения деформаций материала в виде навалов («pile-up»). Обсуждаются вопросы построения гибридной сканирующей 3D волоконно-оптической измерительной головки (ВОИГ) с формированием сканирующих движений лазерного луча в угловом секторе полусферы  $180^\circ \times 180^\circ$  на основе низкокогерентного интерферометра, пространственного модулятора света в виде оптоволоконного пьезосканера и объектива типа «fisheye». Рассмотрены возможности высокоточных двухкоординатных измерений сканирующего лазерного луча за счет использования акустооптического модулятора в датчике обратной связи ВОИГ в качестве пространственно-чувствительного преобразователя.

**Ключевые слова:** координатные измерения, измерительная головка, наноиндентирование, навал, низкокогерентный интерферометр, пьезосканер, сверхширокоугольная оптическая система, акустооптический модулятор.

**Введение.** Повышение точности и расширение функциональных возможностей определяют необходимость дальнейшего совершенствования конструкций гибридных 3D волоконно-оптических измерительных головок (ВОИГ) [1, 2]. Один из резервов этого связан с повышением точности определения возникающих при механическом контактировании наконечника ВОИГ с изделием (в дальнейшем — контактирование) упругих деформаций (в дальнейшем — деформации)  $l_g$  для их последующей компенсации [3, 4]. Для этого контактирование может рассматриваться с учетом таких специфических деформаций поверхности как навал («pile-up») по периметру зоны контакта, изучаемого с позиций методов наноиндентирования, возникших в результате эволюции из методов контроля твердости, в частности, метода Бринеля [5–7].

Совершенствование 3D ВОИГ возможно также и в направлении повышения точности регистрации размеров зоны контакта за счет перехода от матричных видеорегистраторов с разрешением  $\approx 3-4$  мкм к пространственно-чувствительным преобразователям субмикронного разрешения, например, акустооптическим (АО) модуляторам. Эти вопросы ранее не рассматривались в открытой печати и дан-

ная статья направлена на восполнение этого пробела.

**1. Особенности механического контактирования наконечника с изделием в процессе координатных измерений.** Известно [5–7], что особенности деформаций поверхности в виде упругого отклика материала существенно влияют на площадь контакта индентора с материалом. Так, для многих металлов, моно- и поликристаллические материалы, используемых в ракетно-космических отраслях, машино-, станко- и приборостроении с большим значением отношения модуля упругости к пределу текучести, при внедрении в них твердого наконечника образуются специфические деформации поверхности по периметру отпечатка в виде навалов («pile-up») (рис. 1а). Навалы, созданные пирамидой Берковича при измерении твердости материала наноиндентированием, показаны на рис. 1б. Если же вышеуказанное отношение мало, то при нагружении поверхность вокруг области контакта упруго прогибается (рис. 1в), вызывая провал («sink-in»).

Несмотря на многочисленные попытки учесть вклад навалов, проявляемых, как сказано выше, в большинстве случаев и рассматриваемых подробно в дальнейшем, в результат измерений без непо-

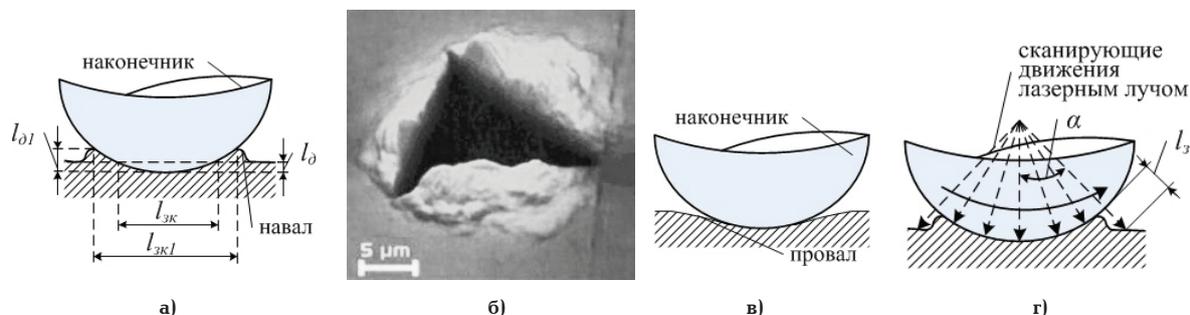


Рис. 1. Деформации поверхности изделия при механическом контактировании: навал (а) и его изображение (б), провал (в), сканирование лазерным лучом при измерении размеров зоны контакта

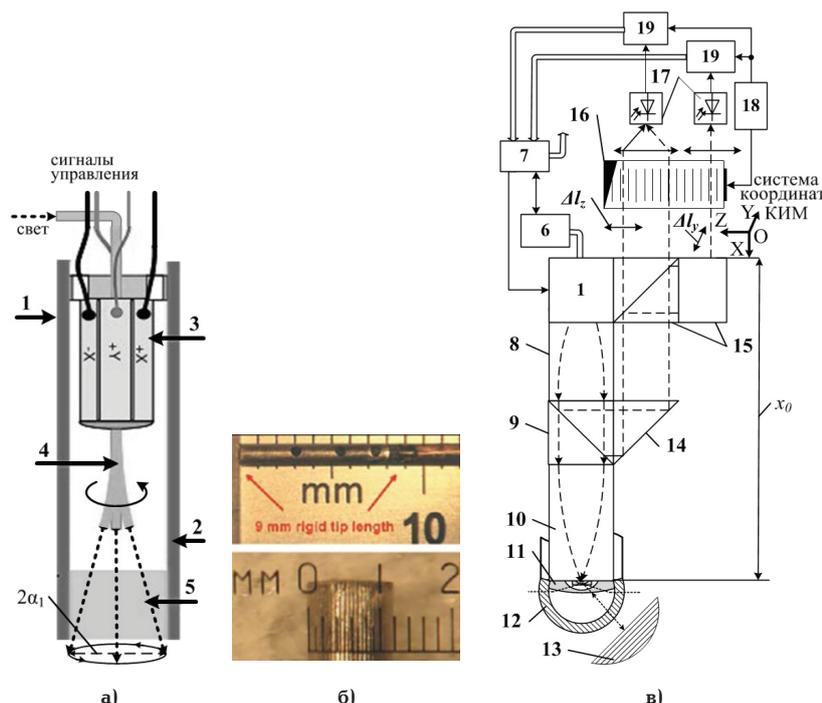


Рис. 2. Пьезосканер: схема (а) и фото (б), схема сканирующей гибридной 3D ВОИГ (в)

средственного измерения размера отпечатка, такого метода к настоящему времени не разработано [6].

Ранее в работах [3, 4] было предложено повысить точность измерений за счет видеоизмерения встроенным микроскопом размеров зоны контакта  $l_{зк}$ , возникающей от погружения наконечника в изделие, для определения и компенсации в режиме on-line фактических деформаций

$$l_g = R_{нак} - \sqrt{R_{нак}^2 - \frac{l_{зк}^2}{4}}, \quad (1)$$

где  $R_{нак}$  — радиус наконечника. Однако этот способ имеет ограничения, определяемые тем, что при малых измерительных усилиях и деформациях  $l_g \approx 0,5-1$  мкм для наконечников  $R_{нак} = 1,5-2,0$  мм значение  $l_{зк} < 90-130$  мкм. Для регистрации зоны контакта таких размеров необходимо использование высокоразрешающего встроенного микроскопа со сложной оптической схемой. Также нужно дополнительно учесть длину навала  $l_{нав}$  и «шаг шероховатости» (шаг неровностей профиля)  $l_{шер}$  для поверхности с шероховатостью  $R_z$  (на рис. 1а

не показана) увеличивающие зону контакта  $l_{зк}$ . С учетом этого формула (1) можно записать в следующем виде

$$l_{g1} \approx R_{нак} - \sqrt{R_{нак}^2 - \frac{(l_{зк} + l_{нав} + l_{шер})^2}{4}}. \quad (2)$$

При расчетах по этим выражениям для  $R_{нак} = 2,0$  мм,  $l_{зк} = 100$  мкм и  $l_{нав} \approx l_{шер} \approx 5$  мкм абсолютная  $\Delta l_g = l_{g1} - l_g$  и относительная  $\delta l_g = \Delta l_g / l_{g1}$  погрешности измерений, составят  $\approx 0,13$  мкм и  $\approx 20\%$  соответственно. Повышение точности определения деформаций  $l_g$  за счет исключения влияния навалов на результат измерения может быть обеспечено при измерении зазоров между сферическим наконечником и поверхностью изделия угловыми поворотами сканирующего лазерного луча в областях за пределами навалов (рис. 1г). Отличительной особенностью этого является формирование зеркальной поверхности на внешней стороне наконечника во «внутринавальную» область за счет беззазорного упругого сжатия материала изделия. Данный способ измерения является основой для построения

разработанной сканирующей 3D ВОИГ, описанной далее.

**2. Основы построения сканирующей гибридной ВОИГ с акустооптическим датчиком обратной связи.** В соответствии с формированием сканирующих движений лазерного луча в угловом секторе полусферы  $180^\circ \times 180^\circ$  на основе низкокогерентного интерферометра, пространственного модулятора света в виде оптоволоконного пьезосканера и объектива типа «fisheye». Конструкция разработанной сканирующей гибридной ВОИГ изображена на рис. 2а.

В разработанной сканирующей ВОИГ предложено использовать наконечник в виде полусферической оболочки из материала более технологичного с точки зрения простоты изготовления сложных изделий за счет горячего прессования [8] (химическая формула, модуль упругости, микротвердость) оксинитрида алюминия ( $\text{AlON}/\text{Al}_{23}\text{O}_{27}\text{N}_5$ , 323 ГПа, 18 ГПа), который при сравнении ненамного хуже параметров других подобных материалов: алмаз (С, 950 ГПа, 84–98 ГПа), стিশовит ( $\text{SiO}_2$ , 450 ГПа, 32–33 ГПа), карбид кремния ( $\text{SiC}$ , 375 ГПа, 33–36 ГПа), фианит ( $\text{ZrO}_2/\text{Zr}_{0,8}\text{Ca}_{0,2}\text{O}_{1,92}$ , 200–370 ГПа, 12 ГПа), корунды ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 350 ГПа, 20–23 ГПа).

**2.1. Оптоволоконный пьезосканер.** В [9–12] приведены описание устройства и принципа действия оптоволоконного пьезосканера 1 (в дальнейшем — пьезосканер) (рис. 2а). Он состоит из полого цилиндрического корпуса 2 (диаметром до  $\approx 1,1$  мм и длиной 13 мм в [11], рис. 2б), внутри которого вблизи заднего торца установлена центросимметричная пьезокерамическая трубка 3 с двумя парами перпендикулярно расположенных электродов, подключенных электрически попарно для внешнего управления.

Вдоль центра пьезотрубки 3 пропущен гибкий волоконный световод с возможностью передачи лазерного излучения, свободный конец которого в виде волоконного кантилевера 4 выступает консольно. Передний торец пьезосканера 1 образован объективом 5, обеспечивающим выход оптического излучения, проходящего через световод.

При подаче двух синхронизированных переменных сигналов  $U_{nm1}$  и  $U_{nm2}$  на две разные пары электродов пьезотрубки 3 происходят периодические сжатия и расширения ее секторов с поперечными круговыми смещениями ее конца. На частоте резонанса в диапазоне до  $\approx 5 \dots 10$  кГц смещения ее существенно усиливаются на конце гибким волоконным кантилевером 4. Для уменьшения расходимости лазерного луча на выходном торце кантилевера 4 устанавливаются микролинзы. Подача лазерного излучения на вход колеблющегося по круговой (или близкой к ней) траектории кантилевера 4 с одновременным управлением амплитудой и фазой переменных сигналов  $U_{nm1}$  и  $U_{nm2}$  позволяет сформировать соответствующую траекторию лазерного луча на оптическом выходе пьезосканера 1.

**2.2. Принцип действия гибридной сканирующей 3D ВОИГ.** Итак, в разработанной конструкции измерительной головке (рис. 2в) пьезосканер 1 по электрическим сигналам  $U_{nm1}$  и  $U_{nm2}$  от блока управления 7 в течение цикла измерения формирует спиралевидную траекторию движения лазерного луча, подаваемого от низкокогерентного интерферометра 6 и распространяющегося по следующему пути: первый градан 8 → светоделитель 9 → второй градан 10 → сверхширокоугольная оптическая система «fisheye» 11 ([13, 14]) → наконечник 12 →

изделие 13. Часть оптического сигнала отраженно-го от изделия 13 следует в обратном направлении. Таким образом осуществляется сканирование пространства окружающего наконечник 12 в угловом секторе  $180^\circ \times 180^\circ$ . В процессе сканирующих движений цикла измерения низкокогерентный интерферометр 6 меняет разность хода  $\Delta l_{\text{нхи}} = \text{var}$ .

Угловое отклонение лазерного луча определяется акустооптическим датчиком обратной связи за счет оптического деления светоделителем 9 и направленной призмой 14 части лазерного луча на поворотное устройство 15. Оно формирует из входного два лазерных потока, второй из которых поворачивается относительно исходного вокруг оси на  $90^\circ$ , позволяя измерять смещения обеих лучей вокруг осей ОХ и ОУ вдоль оси ОZ с помощью АОМ 16, возбуждаемого генератором 18. Далее каждый из лучей следует на фотоприемники 17 и на фазоцифровые преобразователи 19, выходные коды которых с информацией о текущих смещениях лазерного луча поступают в блок управления 7.

В процессе бесконтактных измерений определяются углы отклонения в полярной системе координат  $\alpha_{1x}$  и  $\alpha_{1y}$  по осям ОХ и ОУ, при которых  $\Delta l_{\text{нхи}} = \text{min}$ . Этот момент совпадает с виртуальным касанием формируемой виртуальной сферической поверхности, формируемой головкой.

При контактных измерениях (рис. 1г) реализуется алгоритм измерения, при котором измеряется зазор между наконечником и поверхностью изделия за пределами навала для исключения его влияния на результат измерения.

**2.3. Акустооптический (АО) датчик обратной связи.** Как следует из схемы (рис. 2в), угловые отклонения лазерного луча пьезосканера 1, формирующие двухкоординатные угловые отклонения сканирующего лазерного луча на выходе 3D ВОИГ в угловом секторе  $180^\circ \times 180^\circ$ , преобразуются первым граданом 8 на уровне светоделителя 9 в его поперечные смещения по осям ОZ и ОУ. Эта особенность используется для высокоточного измерения угловых отклонений за счет контроля его поперечных смещений АО датчиком обратной связи. Использование АОМ в качестве пространственночувствительного преобразователя, одноименных гетеродинных интерференционных измерительных систем [15] особенно с использованием систем фазовой автоподстройки фазы или частоты [16] позволяют реализовать субмикронную точность измерения поперечных смещений лазерного луча.

Итак, в опорном канале лазерный луч следует по маршруту: светоделитель 9 → отражатель 14 → поворотное устройство 15 → АО модулятор 16 → фотоприемники 17 → измерительные схемы 19 (блок 18 является тактовым генератором).

Известно [15, 16], что двухкоординатные поперечные смещения могут быть измерены двумя ортогональными однокоординатными АОМ (рис. 3а), двухкоординатным АО модулятором (рис. 3б), а также однокоординатным АОМ с использованием поворотного устройства для входного оптического потока, один из вариантов измерительной схемы которого с учетом технических решений на основе систем ФАПФ [16] представлен на рис. 3в. Использование поворотного устройства для входного оптического потока по критериям минимума массы и габаритных размеров, вероятно, является самым перспективным. На рис. 3в приведен вариант такой двухканальной измерительной системы на основе фазовой автоподстройки фазы (ФАПФ), подобной

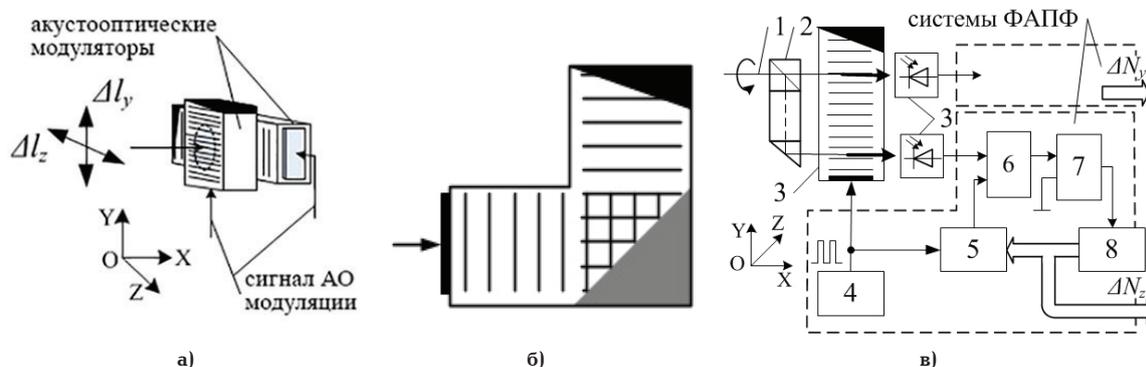


Рис. 3. Варианты реализации датчика обратной связи: на основе двух ортогональных однокоординатных АОМ (а), двухкоординатного АОМ (б) [8] и однокоординатного АОМ с использованием поворотного устройства для входного оптического потока (в)

подробно рассмотренным в [16]. Для такой схемотехники лучшим будет вариант измерительной системы с увеличенным пространственным периодом  $l_{nn}$ , со значением, например,  $\approx 1$  мм, при работе в режиме т.н. «абсолютных измерений» [16]:

$$l_{nn} = \Lambda(1 + k_{фанф}), \quad (3)$$

где  $\Lambda$  — длина ультразвуковой волны в АО модуляторе,  $k_{фанф}$  — коэффициент преобразования системы ФАПФ.

Такой режим работы позволяет исключить нелинейные процессы в виде фазовых перескоков, соответствующие переходам от минимального к максимальному значению  $\Delta\varphi = 2\pi \rightarrow \Delta\varphi = 0$  и/или, наоборот,  $\Delta\varphi = 0 \rightarrow \Delta\varphi = 2\pi$ , ограничивающих быстродействие. В этом случае разрешающую способность, определяемую погрешностью квантования (без учета шумовой составляющей, анализ которой предполагает отдельного большого исследования), можно оценить как

$$\Delta l_{аом} = \frac{l_{nn}}{2^q} = \frac{\Lambda(1 + k_{фанф})}{2^q}, \quad (4)$$

где  $q$  — число разрядов системы ФАПФ [16]. Так, при  $q = 12$  с числом квантов  $2^{12} = 4096$  и  $l_{nn} \approx 1$  мм имеем  $\Delta l_{аом} \approx 0,25$  мкм, соответствующего углу отклонения  $\approx 0,7''$ . Такое разрешение почти в 10 раз выше, чем у матричных видеорегистраторов.

**2.3.1. Расчет минимального диаметра ВОИГ.** Основой для расчета минимального диаметра 3D ВОИГ может быть то, что диаметр перетяжки  $d_{пер}$  сфокусированного лазерного луча на оптическом

выходе градана (с учетом дополнительного воздушного зазора вокруг нее) может быть на уровне  $\approx 50$  мкм. Тогда с учетом эмпирических соотношений с небольшим запасом между внешними диаметрами дополнительных линз (отрицательных менисков) объектива типа «fisheye» [13, 14] для набора из двух (диаметрами  $d_2$  и  $d_1$ , рис. 4а) и трех (диаметрами  $d_3:d_2:d_1$ , рис. 4б) таких линз, собранных в виде микросборки, можно записать в следующих соотношениях:  $d_2:d_1:d_{пер}$  и  $d_3:d_2:d_1:d_{пер}$  и в числовом соотношении  $\approx 10:3:1$  и  $\approx 5:3:1,5:1$  соответственно. Тогда максимальный внешний диаметр объектива типа «fisheye» в виде микросборки может быть не более 0,5 мм.

С учетом небольших усилий ( $\leq 5$  Н) при контактировании наконечника с изделием минимальное значение толщины ALON-оболочки может составить не более  $\approx 0,3$  мм. Толщина воздушного зазора между ALON-оболочкой и внешним диаметром объектива типа «fisheye», равного  $\approx 0,1$  мм. Тогда общее утолщение диаметра наконечника над внешним диаметром объектива типа «fisheye» составит 0,4 мм.

С учетом вышеуказанных данных внешний диаметр ALON-оболочки, превышая на 0,5 мм, максимальный диаметр объектива типа «fisheye», составляющий 0,4 мм, составит  $\approx 0,9$  мм, будучи немного меньше диаметра вышеуказанного пьезосканера. На практике диаметр ALON-оболочки должен быть чуть больше диаметра пьезосканера, чтобы исключить его боковое с изделием. И с учетом того, что граданы, производимые на фирме GRINTECH GmbH (Германия) с  $NA = 0,8$ , имеют диаметр 1,4 мм, минимальный диаметр 3D ВОИГ можно оценить диапазоном значений (в зависимости от технологических особенностей)  $\approx 1,6 - 2,0$  мм.

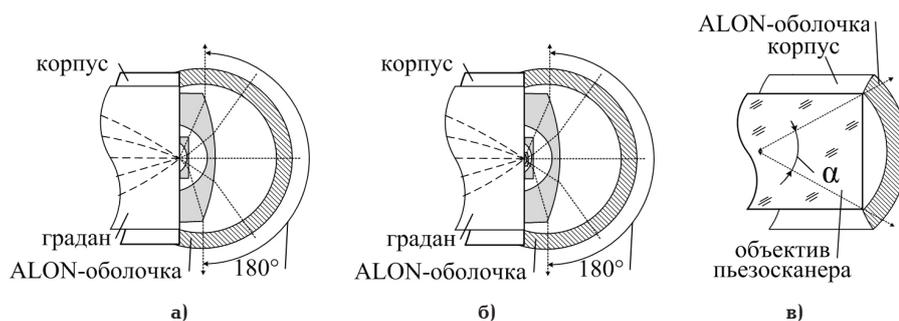


Рис. 4. Конструкции наконечников ВОИГ: с двумя (а) и тремя (в) дополнительными линзами, без дополнительных линз с узким углом обзора (б)

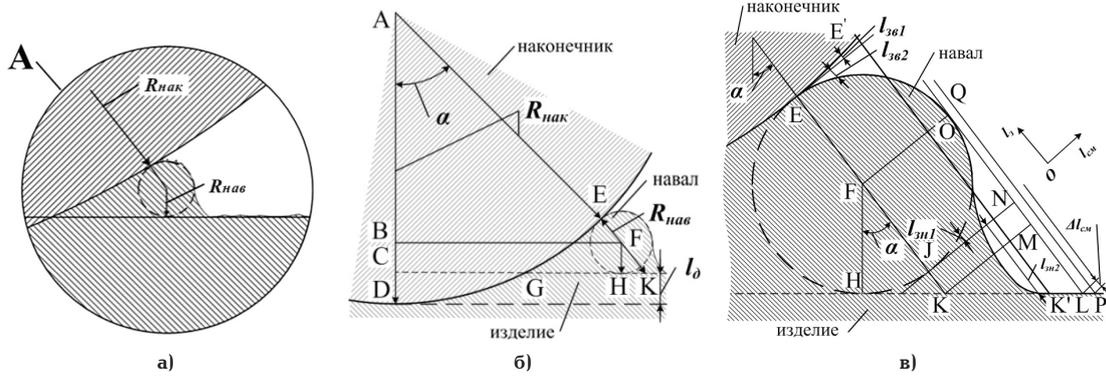


Рис. 5. Образование навала в зазоре между наконечником и изделием (а, б), с увеличенным масштабом (б)

Пользуясь случаем, можно определить и минимальный диаметр ВОИГ с узким углом обзора. Конструктивно у этого варианта наконечник в виде АІОН-оболочки может крепиться к оптическому выходу пьезосканера (рис. 4в) и поэтому минимальный диаметр ВОИГ может быть равен диаметру пьезосканера, т.е., как сказано выше,  $\approx 1,1$  мм.

**3. Модель механического контактирования наконечника с изделием.** В разделе представлены методики расчета зазора между наконечником и изделием и измерений размеров изделий с учетом наличия навалов, а также определения их геометрических размеров.

**3.1. Расчет зазоров между наконечником и изделием.** Итак, контактирование наконечника и изделия основано на частичном заполнении зазора между ними упругим навалом (рис. 5). Общий зазор, состоящий из верхнего  $I_{зв}$  и нижнего  $I_{зн}$  зазоров, определяются как  $I_{зв} = I_{зв1} + I_{зв2}$  и  $I_{зн} = I_{зн1} + I_{зн2}$  соответственно, а первые составляющие каждого уравнения  $I_{зв1}$  и  $I_{зн1}$  связаны с округлой формой вершины навала. В соответствии со схемой (рис. 5б) для треугольника АВF можно записать

$$\cos \alpha = \frac{|AB|}{|AF|} = \frac{|AD| - |CD| - |BC|}{|AE| + |EF|} = \frac{R_{нак} - l_g - R_{нав}}{R_{нак} + R_{нав}}. \quad (5)$$

В связи с тем, что  $R_{нак} \gg R_{нав}$  можно пренебречь угловыми отклонениями лазерного луча при его смещении на уровне  $\sim 1-3$  мкм, соответствующих размеру навала, то можно записать с учетом теоремы Пифагора для расчета  $I_{зв1}$  и  $I_{зн1}$  соответственно:  $I_{зв1} = R_{нак} - \sqrt{R_{нак}^2 - l_{см}^2}$  и  $I_{зн1} = R_{нав} - \sqrt{R_{нав}^2 - l_{см}^2}$ . И далее с учетом условия, что  $R_{нак} \gg l_{см}$  запишем:

$$I_{зв} = R_{нав} - \sqrt{R_{нав}^2 - l_{см}^2}. \quad (6)$$

Расчет нижнего зазора  $I_{зн}$  произведен для случая, когда навал имеет округлую, выступающую форму с формированием между точками О и L (рис. 2б) «впадины», т.е. вогнутости материала изделия. При этом длину нижнего зазора  $I_{зн}$  можно определить как сумму длин нескольких отрезков:

$$I_{зн} = |ON| + |NM| + |ML| + \Delta l_{зн} = R_{нав} + l_{зн0} + (R_{нав} + \Delta l_{см}) \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

Используя подобие треугольников АВF и FHK (рис. 5б, в), можно записать  $\cos \alpha = \frac{|FH|}{|FK|} =$

$$= \frac{|FH|}{|FJ| + |JK|} = \frac{R_{нав}}{R_{нав} + l_{зно}}, \text{ где } l_{зно} \text{ — длина отрезка } [NM], \text{ т.е. начальное, нулевое значение нижнего зазора, а затем можно вывести выражение } l_{зно} = R_{нав} \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right), \text{ подставляя в которое формулу (5), получим}$$

$$l_{зно} = R_{нав} \left( \frac{R_{нак} + R_{нав}}{R_{нак} - l_g - R_{нав}} - \frac{R_{нак} - l_g - R_{нав}}{R_{нак} - l_g - R_{нав}} \right) = \frac{R_{нав}(2R_{нав} + l_g)}{R_{нак} - l_g - R_{нав}} \approx \frac{R_{нав}(2R_{нав} + l_g)}{R_{нак}}. \quad (8)$$

С учетом того, что  $R_{нак} \gg R_{нав}$ , можно считать, что прямые (OL) и (EK) параллельны, и тогда, как следует из схемы на рис. 5в,  $R_{нав} = |FE| = |FH| = |FJ| = |FO| = |JN| = |ON| = |KM|$ . В связи с тем, что угол  $\angle MKL = \alpha$ , а  $R_{нав} = |KM|$ , то  $|ML| = R_{нав} \operatorname{tg} \alpha$ , то уравнение для нижнего зазора  $I_{зн}$  можно записать

$$I_{зн} = R_{нав} + \frac{R_{нав}(2R_{нав} + l_g)}{R_{нак}} + (R_{нав} + \Delta l_{см}) \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

Используя равенство  $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1}$ , формула (5) принимает вид  $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{(R_{нак} + R_{нав})^2 - (R_{нак} - l_g - R_{нав})^2}{(R_{нак} - l_g - R_{нав})^2}}$ ,

которую с учетом пренебрежения членами  $R_{нав}^2 \approx l_g^2 \approx (R_{нав} + l_g)^2 \approx 0$  можно записать как  $\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{\sqrt{2R_{нак}(2R_{нав} + l_g)}}{R_{нак} - l_g - R_{нав}}$ , что позволяет изменить выражение (10) к следующему виду:

$$I_{зн} = R_{нав} + \frac{R_{нав} \cdot (2R_{нав} + l_g)}{R_{нак}} + (R_{нав} + \Delta l_{см}) \cdot \frac{\sqrt{2R_{нак}(2R_{нав} + l_g)}}{R_{нак} - l_g - R_{нав}}. \quad (10)$$

При  $l_{см} = R_{нав}$ , согласно (6), имеем  $I_{зв} = R_{нав}$ , и формула для  $I_3$  принимает вид:

$$I_3 = I_{зн} + I_{зв} = 2R_{нав} + \frac{R_{нав} \cdot (2R_{нав} + l_g)}{R_{нак}} + (R_{нав} + \Delta l_{см}) \cdot \frac{\sqrt{2R_{нак}(2R_{нав} + l_g)}}{R_{нак} - l_g - R_{нав}}. \quad (11)$$

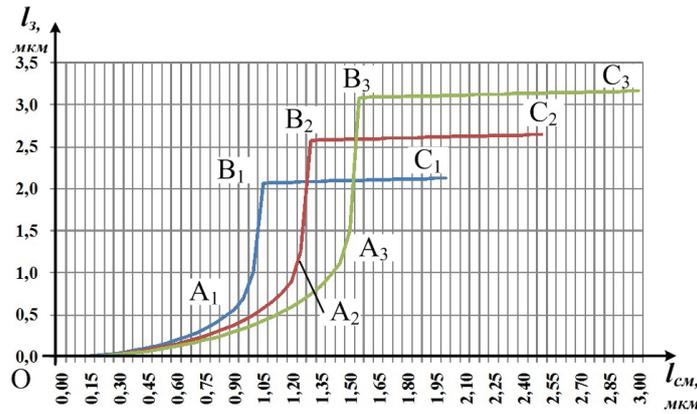


Рис. 6. Зависимости функции зазора  $I_3$  между наконечником и изделием от смещения  $I_{cm}$

Таким образом, выражение для зазора  $I_3$  можно записать в виде системы уравнений для двух диапазонов: верхнего  $I_{3в}$  диапазона на участке  $[0; R_{нав}]$  и общего  $I_3$  диапазона (суммы верхнего и нижнего диапазонов:  $I_{3в} + I_{3н}$ ) на участке, превышающем положение  $R_{нав}$ :  $[R_{нав}; n \cdot R_{нав}]$

$$I_3 = \begin{cases} R_{нав} - \sqrt{R_{нав}^2 - I_{cm}^2}, & \text{при } I_{cm} \in [0; R_{нав}] \\ 2R_{нав} + \frac{R_{нав} \cdot (2R_{нав} + I_g)}{R_{нак}} + (R_{нав} + \Delta I_{cm}) \times \\ \times \frac{\sqrt{2R_{нак}(2R_{нав} + I_g)}}{R_{нак} - I_g - R_{нав}}, & \text{при } I_{cm} \in [R_{нав}; nR_{нав}] \end{cases}, \quad (12)$$

где  $n$  — натуральное число. На основании выражения (15) построено три зависимости значения зазора  $I_3$  от смещения  $I_{cm}$  (рис. 6) для трех совокупностей значений параметров:  $R_{нав} = 1$  мкм,  $R_{нак} = 1500$  мкм и  $I_g = 1$  мкм,  $R_{нав} = 1,25$  мкм,  $R_{нак} = 2000$  мкм и  $I_g = 1$  мкм и  $R_{нав} = 1,5$  мкм,  $R_{нак} = 2500$  мкм и  $I_g = 1$  мкм. Как видно, форма каждого графика близка к функции единичного скачка  $\sim 1(1 - R_{нав})$  и включает в себя по два участка  $[O; A_1]$ ,  $[O; A_2]$ ,  $[O; A_3]$  и  $[B_1; C_1]$ ,  $[B_2; C_2]$ ,  $[B_3; C_3]$  с относительно плавными изменениями функции  $I_3(I_{cm})$ , соответствующими двум зазорам наконечник — навал и наконечник — изделие. При этом первые участки  $[O; A_1]$ ,  $[O; A_2]$ ,  $[O; A_3]$  полностью отражают характер навала (для его округлой формы), а последние участки трех кривых  $[B_1; C_1]$ ,  $[B_2; C_2]$ ,  $[B_3; C_3]$  являются т.н. «безнавальными» участками, в которых влияние навала на зазор полностью отсутствует. Участки  $[A_1; B_1]$ ,  $[A_2; B_2]$ ,  $[A_3; B_3]$  является переходными от первых ко вторым с резким изменением значения функции соответственно.

Таким образом, нелинейная форма этих графиков демонстрирует границы влияния навала на процесс измерений  $I_g$  и это нужно использовать в качестве рекомендации для выбора значений  $I_{cm}$ , исключая влияние навала на процесс измерения зазора  $I_3$  между наконечником и поверхностью изделия при сканирующих движениях лазерного луча.

3.2. Особенности измерений размеров изделий при наличии навалов. Серия бесконтактных координатных измерений, полученная в сферической системе координат, при ощупываниях для такой сканирующей 3D ВОИГ для каждой измеренной точки изделия будет состоять из линейной и двух угловых координат  $(I_{нки}, \alpha_y, \alpha_z)$ , где  $I_{нки}$  — значения

измеряемого зазора, заданные низкокогерентным интерферометром,  $\alpha_y, \alpha_z$  — угловые отклонения лазерного луча в плоскостях  $OY$  и  $OZ$ . Такие результаты измерений могут быть преобразованы для декартовой системы координат, принятой почти во всех координатных измерительных машинах  $(x_{кум}, y_{кум}, z_{кум})$ , с учетом координат самой 3D ВОИГ  $(x_0, y_0, z_0)$ , положения пьезосканера  $(x_{воиг}, y_{воиг}, z_{воиг})$ , а также с учетом преобразований датчиком обратной связи на основе АО модулятора:  $\alpha_y = k_m \cdot I_{хир}$  и  $\alpha_z = k_n \cdot I_{уир}$ :

$$\begin{cases} x_{кум} = x_{воиг} + x_0 + I_{нки} \cdot \sin \alpha_y \cdot \cos \alpha_z \\ y_{кум} = y_{воиг} + y_0 + I_{нки} \cdot \sin \alpha_y \cdot \sin \alpha_z = \\ z_{кум} = z_{воиг} + z_0 + I_{нки} \cdot \cos \alpha_y \end{cases} \\ = \begin{cases} x_{кум} = x_{воиг} + x_0 + I_{нки} \cdot \sin(k_m \cdot I_{хир}) \cdot \cos(k_n \cdot I_{уир}) \\ y_{кум} = y_{воиг} + y_0 + I_{нки} \cdot \sin(k_m \cdot I_{хир}) \cdot \sin(k_n \cdot I_{уир}) \\ z_{кум} = z_{воиг} + z_0 + I_{нки} \cdot \cos(k_m \cdot I_{хир}) \end{cases}, \quad (13)$$

где  $k_m$  и  $k_n$  — коэффициенты преобразования датчика обратной связи.

Способ измерения размеров зоны контакта за счет измерения серии зазоров  $I_{31}, I_{32}, \dots, I_{3n}$  между наконечником и изделием вблизи ее границы в различных точках с координатами  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  с погрешностью на уровне долей микрометра

$$I_g = R_{нак} - (R_{нак} + I_3) \cdot \cos(k \cdot I_{ур}). \quad (14)$$

Тогда для серии измерений с движениями лазерного сканирующего луча вокруг зоны контакта по серии концентрических окружностей, например, эквидистантных колец со спиральными переходами между ними подобными интерференционным кольцам Ньютона рассчитываются набор  $n$  значений деформаций  $I_{g1}, I_{g2}, \dots, I_{gn}$  по следующей формуле:

$$\begin{cases} I_{g1} = R_{нак} - (R_{нак} + I_{31}) \cdot \cos(k \cdot I_{ур1}) \\ I_{g2} = R_{нак} - (R_{нак} + I_{32}) \cdot \cos(k \cdot I_{ур2}) \\ \dots \\ I_{gn} = R_{нак} - (R_{нак} + I_{3n}) \cdot \cos(k \cdot I_{урn}) \end{cases}, \quad (15)$$

из которых потом определяется искомое усредненное значение  $I_g$ :

$$I_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{gi}. \quad (16)$$

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

3.3. *Определение геометрических размеров навала.* Для эффективного проектирования измерительных устройств, использующих механическое контактирование измерительных наконечников с изделием, а также связанных с этим практических расчетов важно знать основные геометрические соотношения размеров, образующихся в процессе упругих деформаций навалов.

Итак, основным условием при выведении размеров навалов можно принять условие о том, что в процессе упругих деформаций часть объема выдавливаемого материала изделия, зависящая от упругих свойств материала, равна объему образующегося навала:  $V_{выг} \approx k_{упр} \cdot V_{навал}$ , где  $k_{упр}$  — коэффициент пропорциональности, связанный с коэффициентом упругости материала.

Исходя из этого условия и в соответствии с рис. 5в можно сформировать условие равенства объемов с бесконечной малой толщиной, т.е. площадей полусегмента CDG и треугольника GE'K', форму которого удобно представить прямоугольной:  $S_{CDG} \approx k_{упр} \cdot S_{GE'K'}$ .

Площадь полусегмента  $S_{CDG}$  равна площади  $S_{ADG}$  полусектора ADG без площади  $S_{ACG}$  прямоугольного треугольника ACG:  $S_{CDG} = S_{ADG} - S_{ACG}$ . Площадь полусектора ADG  $S_{ADG}$  равна  $S_{ADG} = \frac{\alpha}{2} \cdot R_{нак}^2$ , где угол  $\alpha$  вершины определяется в прямоугольном треугольнике ACG исходя из отношения катета  $|AC| = |AD| - |CD| = R_{нак} - l_g$  к гипотенузе  $|AG| = R_{нак}$ :  $\cos \alpha = \frac{R_{нак} - l_g}{R_{нак}}$  и  $\alpha = \arccos\left(\frac{R_{нак} - l_g}{R_{нак}}\right)$  соответственно. С учетом вышесказанного имеем:

$$S_{ADG} = \frac{R_{нак}^2}{2} \cdot \arccos\left(\frac{R_{нак} - l_g}{R_{нак}}\right). \quad (17)$$

Площадь  $S_{ACG}$  треугольника ACG можно определить с учетом того, что  $|AD| = |AG| = R_{нак}$ ,  $|CD| = l_g$ ,  $|AC| = |AD| - |CD| = R_{нак} - l_g$ :  $S_{ACG} = \frac{|AC| \cdot |CG|}{2} = \frac{(R_{нак} - l_g) \cdot |CG|}{2}$ . При этом длина полухорды  $|CG|$  рассчитывается по теореме Пифагора:  $|AC|^2 + |CG|^2 = |AG|^2$  или  $(R_{нак} - l_g)^2 + |CG|^2 = R_{нак}^2$ , откуда можно получить  $|CG| = \sqrt{R_{нак}^2 - (R_{нак} - l_g)^2} = \sqrt{2R_{нак} \cdot l_g - l_g^2} \approx \sqrt{2R_{нак} \cdot l_g}$ . И тогда имеем

$$S_{ACG} = \frac{|AC| \cdot |CG|}{2} = \frac{(R_{нак} - l_g) \cdot \sqrt{2R_{нак} \cdot l_g}}{2}. \quad (18)$$

Вычитая из выражения (15) формулу (16), получаем площадь полусегмента  $S_{CDG}$ :

$$S_{CDG} = \frac{R_{нак}^2}{2} \cdot \arccos\left(\frac{R_{нак} - l_g}{R_{нак}}\right) - \frac{(R_{нак} - l_g) \cdot \sqrt{2R_{нак} \cdot l_g}}{2}. \quad (19)$$

Площадь  $S_{GE'K'}$  прямоугольного треугольника GE'K', образованного навалом, определяется по формуле  $S_{GXX} = \frac{n \cdot m}{2}$ , в которой  $n$  и  $m$  — катеты, связанные между собой  $n = m \cdot \operatorname{tg} \alpha$ , позволяют запи-

сать  $S_{GXX} = \frac{m^2}{2} \operatorname{tg} \alpha$ . Искомая длина катета  $m$  может быть определена выражением:

$$m = \sqrt{\frac{2S_{GXX}}{\operatorname{tg} \alpha}}. \quad (20)$$

На основе известного тригонометрического равенства  $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1}$ , и тогда можно записать  $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{R_{нак}^2}{(R_{нак} - l_g)^2} - 1} \approx \frac{\sqrt{2R_{нак} l_g}}{R_{нак} - l_g}$ . Поэтому выражение (20) с учетом того, что  $S_{CDG} \approx k_{упр} \cdot S_{GE'K'}$  изменится к следующему виду:

$$m = \sqrt{\frac{2S_{GE'K'} \cdot (R_{нак} - l_g)}{\sqrt{2R_{нак} l_g}}} = \sqrt{\frac{\sqrt{2} S_{CDG}}{k_{упр}} \left( \sqrt{\frac{R_{нак}}{l_g}} - \sqrt{\frac{l_g}{R_{нак}}} \right)}. \quad (21)$$

Если принять эмпирическое соотношение между  $m$  и диаметром навала  $D_{навал}$  (или его радиусом  $R_{навал}$ ):  $m \approx 1,3 \cdot D_{навал} = 2,6 \cdot R_{навал}$ , тогда формулу (21) можно переписать

$$R_{навал} = 0,46 \sqrt{\frac{S_{CDG}}{k_{упр}} \left( \sqrt{\frac{R_{нак}}{l_g}} - \sqrt{\frac{l_g}{R_{нак}}} \right)}. \quad (22)$$

Полученное выражение позволяет получить оценку размера навала с учетом всех параметров измерительной схемы. Оно требует дополнительной экспериментальной апробации с целью уточнения фактических значений  $k_{упр}$  для разных материалов контролируемых изделий, шероховатости поверхности и др., и этот вопрос планируется обсудить в следующих авторских публикациях.

**Закключение.** 1. Повышение точности определения деформаций, возникающих при механическом контактировании наконечника с изделием, предполагает учет специфических деформаций поверхности изделия как навал («pile-up»), изучаемого с позиций наноиндентирования.

2. Функция зазора состоит из двух плавных и одного нелинейного участка. Первый плавный и нелинейный участки образованы формирующимся упругим навалом, а второй плавный участок — поверхностью изделия. Измерение зазоров между наконечником и изделием за пределами навалов, т.е. после нелинейного участка позволяет исключить их влияние на результат измерения упругих деформаций, достигая более высокой точности измерений.

3. Для учета параметров контролируемых материалов необходимы дополнительные экспериментальные исследования по определению фактических размеров навалов, возникающих при контактировании сферического наконечника с изделием, для разных материалов при разных усилиях прижима.

4. Минимальный диаметр 3D ВОИГ в зависимости от технологических особенностей ее изготовления может быть уменьшен до  $\approx 1,6 - 2,0$  мм.

5. Для измерения поперечных смещений лазерного луча вдоль двух осей OY и OZ лучшим вариантом по простоте, минимуму массы, габаритов является использование однокоординатного АО модулятора для двух лазерных лучей, второй из которых создан из первого поворотом вокруг своей

оси на 90°. Такое техническое решение позволит повысить разрешающую способность определения угловых отклонений лазерного луча до 10 раз по сравнению с использованием матричных видеорегистраторов.

#### Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. Леун Е. В., Шаханов А. Е., Никель А. В. Возможности повышения точности контактных измерений размеров изделий при использовании корундовых измерительных наконечников и видеорегистрации зоны контакта // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 68–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-68-75.
4. Leun E. V. Metrological analysis of measurements of elastic deformations in the contact zone of spherical corundum of the tips with the surface of the product // IOP Conf. Series. Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1260 (3). 032025. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032025.
5. Головин Ю. И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикророботах, тонких приповерхностных слоях и пленках. (Обзор) // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, вып. 12. С. 2113–2142.
6. Усеинов С. С. Измерение твердости конструкционных материалов методами индентирования и склерометрии на субмикронном и нанометровом масштабах: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 127 с.
7. Соловьев В. В. Разработка метрологического обеспечения измерений геометрических и механических величин методами полуконтактной сканирующей зондовой микроскопии и наноиндентирования: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 152 с.
8. Nag N., Jha S., Sastri S. [et al.]. ALON GRIN Optics for Visible-MWIR Applications // Proc. Vol. 9822, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR, 98220V (17 May 2016). DOI: 10.1117/12.2224961.
9. Akhondi 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.
10. Самарин А. Лазерный микропроектор со спиральной разверткой // Компоненты и технологии. 2008. Т. 10. P. 101–104.
11. 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.
12. 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.
13. Пат. 2347251 Российская Федерация, МПК G 02 B 13/06, G 02 B 9/60. Объектив «рыбий глаз» для видеокамеры / Колючкин В. Я., Тимашова Л. Н., Колобов К. В., Князев А. А. № 2006133676/28; заявл. 21.09.06; опубл. 20.02.09, Бюл. № 5.
14. Пат. 113374 Российская Федерация, МПК G 02 B 9/00. Широкоугольный объектив типа рыбий глаз / Васильев В. Н., Волков Д. Ю., Ермолаева Е. В., Лившиц И. Л., Ким Ю. И. № 2011132668; заявл. 03.08.11; опубл. 10.02.12, Бюл. № 4.
15. Яковлев Н. А. Построение лазерных систем для измерения перемещения по трем координатам на основе акустооптического преобразования измерительной информации: дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 235 с.
16. 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.

**ЛЕУН Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

**ШАХАНОВ Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, начальник отдела.

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

#### Для цитирования

Леун Е. В., Шаханов А. Е. Повышение точности гибридных сканирующих 3D волоконно-оптических измерительных головок с акустооптическим датчиком обратной связи для контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 63–70. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-63-70.

Статья поступила в редакцию 18.02.2020 г.

© Е. В. Леун, А. Е. Шаханов