

УДК 681.786

КОНТРОЛЬ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ КАНАЛОВ СТВОЛОВ ОРУЖИЯ МЕТОДОМ СВЕТОВОГО СЕЧЕНИЯ

© П. С. Завьялов, Д. Р. Хакимов, А. А. Гущина, А. В. Ермоленко,
Д. В. Скоков, В. Ю. Сартаков

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru*

Разработана система бесконтактного контроля прямолинейности каналов стволов оружия на основе метода структурного освещения. Предложена и разработана конструкция компактного оптического зонда, в котором для освещения канала ствола используется дифракционный оптический элемент. Представлены алгоритмы обработки изображений, получаемых при сканировании канала ствола, по которым затем восстанавливается 3D-форма контролируемого изделия и вычисляются требуемые геометрические параметры. Приведены результаты испытаний системы контроля прямолинейности на образцах реальной продукции.

Ключевые слова: метод структурного освещения, коническое зеркало, дифракционный оптический элемент, контроль прямолинейности, обработка изображений.

DOI: 10.15372/AUT20200408

Введение. Непрямолинейность канала ствола стрелкового оружия — явление довольно частое, возникающее не только при деформациях готового ствола, но и в процессе его изготовления, что крайне нежелательно, так как при незначительном пологом изгибе ствола ухудшается кучность стрельбы, а при значительном — ствол может даже разорваться.

При производстве стволов оружия на разных стадиях осуществляется операция их правки, в процессе которой добиваются минимальных значений отклонений от прямолинейности оси канала ствола (соответствие допуску). При этом зачастую для контроля прямолинейности используется визуальный метод «по тени» [1], когда правщик через зеркальное отражение от стенки канала наблюдает за границей света и тени. Вращая ствол, правщик по форме тени определяет места искривления и тут же производит их правку на прессе или ударным инструментом.

Эта технология возникла ещё на заре производства огнестрельного оружия и применяется до сих пор. Её основным недостатком является субъективность контроля, при котором результат напрямую зависит от квалификации и состояния правщика. К тому же при производстве высокоточного снайперского оружия этот визуальный метод работает уже на пределе своей чувствительности.

В последнее время стали появляться оптико-электронные методы и устройства для непосредственного измерения геометрических параметров протяжённых отверстий. В основном измерения базируются на автоколлимационном методе [2] или слежении за лазерным лучом [3], задающим виртуальную ось. Большинство предложенных методов предполагает использование зонда, контактирующего с контролируемым каналом. Зонд центрируется и проталкивается через ствол. Это обстоятельство снижает точность измерений таких методов (погрешность более 10 мкм). При этом диапазон контролируемых диаметров начинается от 20–30 мм, что не позволяет их применять для контроля стрелкового оружия.

Существует способ прямого поточечного измерения канала ствола на универсальных координатно-измерительных машинах (КИМ) с удлинённым щупом. Известны также специализированные КИМ, в которых используется вращение либо самого изделия, либо зонда для спиралеобразного сканирования канала [4]. Такие КИМ обладают высокой точностью (0,5–3 мкм), но скорость их измерений недостаточна для производственного оперативного контроля стволов по всей длине. Поэтому координатно-измерительные машины применяются только для исследований в заводских лабораториях и выборочного контроля.

Высокой производительностью контроля обладают датчики на основе метода структурного освещения, поскольку позволяют регистрировать сразу большую площадь контролируемой поверхности. В качестве осветителей в них обычно используются светодиоды либо LCD-, DLP-проекторы. В работах [5, 6] представлены конструкции зондов, использующих структурное освещение для 3D-контроля труб и внутренних полостей. Однако низкая точность измерений (на уровне 0,1 мм) не позволяет осуществлять контроль стволов.

Целью данного исследования является разработка оптико-электронного метода бесконтактного контроля отверстий, обеспечивающего высокую производительность и точность измерений, что позволяет создавать на его основе измерительные системы для оперативного производственного контроля прямолинейности каналов стволов оружия.

Метод контроля геометрических параметров отверстий на базе дифракционно-оптических элементов. В работах [7, 8] нами был предложен оптико-электронный метод контроля отверстий с применением дифракционного фокусатора в кольцо. На основе данного метода может быть создан малогабаритный зонд для контроля диаметров отверстий, непрямолинейности их оси, отклонения формы поверхности от цилиндрической. Использование ДОЭ для формирования структурного освещения (светового сечения) позволяет достичь высокой точности измерений (3–5 мкм), достаточной для контроля геометрических параметров стволов.

В [9] был предложен схожий метод измерений, где для формирования кольца применяются фокусирующая линза и коническое зеркало. На лабораторном макете авторам удалось достичь радиального разрешения 10 мкм при использовании в качестве источника освещения He—Ne-лазера и 2 мкм при использовании суперконтинуумного лазера.

Методика измерения заключается в формировании освещённого участка в виде узкого кольца на внутренней поверхности изделия, приёме и обработке изображения этого участка. Свет, рассеянный от внутренней поверхности объекта, попадает на матрицу камеры благодаря коническому зеркалу. Сканирование всей поверхности осуществляется посредством перемещения объекта вдоль оси (рис. 1).

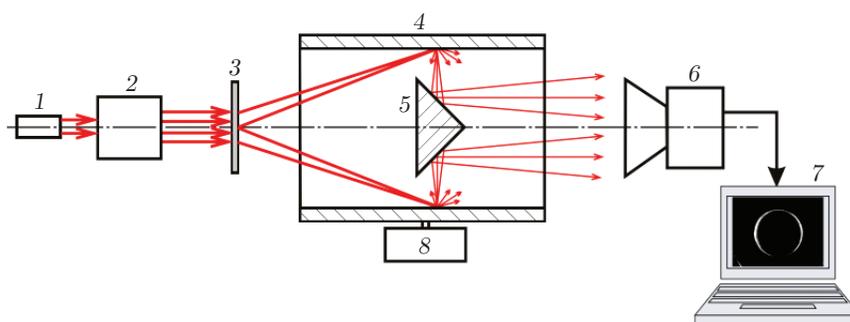


Рис. 1. Принцип контроля отверстий: 1 — лазер, 2 — коллиматор, 3 — ДОЭ, 4 — цилиндрический канал, 5 — коническое зеркало, 6 — камера, 7 — компьютер, 8 — устройство перемещения детали

Для описания формирующегося изображения кольцевой метки была построена математическая модель оптической системы.

Очевидно, что изображение представляет собой кольцо. В случае, если исследуемое отверстие имеет строго цилиндрическую форму и его ось совпадает с осью измерительной системы, изображение метки представляет собой окружность с центром на оптической оси. При искривлении отверстия и смещении его оси изображение будет меняться. Необходимо получить аналитическое выражение, описывающее поведение кольца, которое затем можно использовать при обработке изображений для вычисления геометрических параметров контролируемых отверстий.

Освещённый участок на внутренней поверхности образуется при пересечении лучей с измеряемой поверхностью. Для упрощения примем, что освещающие лучи образуют коническую поверхность, а измеряемая поверхность — цилиндрическую.

Решая систему из двух уравнений, найдём уравнение кривой, описывающее оптическую метку на внутренней поверхности:

$$\begin{cases} (x - \Delta x)^2 + y^2 = R^2; \\ x^2/R^2 + y^2/R^2 = z^2/z_0^2, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y(x) = \sqrt{R^2 - (x - \Delta x)^2}; \\ z(x) = z_0 \sqrt{R^2 - \Delta x^2 + 2\Delta x \cdot x}/R. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) представляет оптическую метку на внутренней поверхности отверстия при его смещении относительно оси измерительной системы на величину Δx . Затем проецирующее коническое зеркало строит изображение этой метки вблизи оптической оси. На рис. 2 показано формирование коническим зеркалом мнимого изображения точки.

Точка A в декартовой системе имеет координаты (x, y, z) , коническое зеркало строит изображение этой точки — точку A' с координатами (r, φ) . Таким образом, со стороны камеры точка A' будет видна на расстоянии r от оптической оси под углом φ :

$$\begin{cases} r = -z + z_1; \\ \varphi = \arctg(y/x). \end{cases} \quad (2)$$

Можно показать, что решение систем уравнений (1) и (2) будет иметь вид [10]:

$$r(\varphi) = z_1 - \frac{z_0}{R} [2\Delta x (\Delta x \cos^2(\varphi) \pm \cos(\varphi) \sqrt{\Delta x^2 \cos^2(\varphi) + R^2 - \Delta x^2}) + R^2 - \Delta x^2]^{1/2}. \quad (3)$$

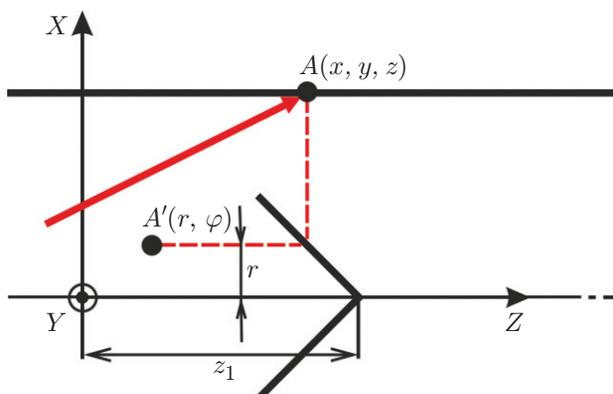


Рис. 2. Формирование мнимого изображения коническим зеркалом

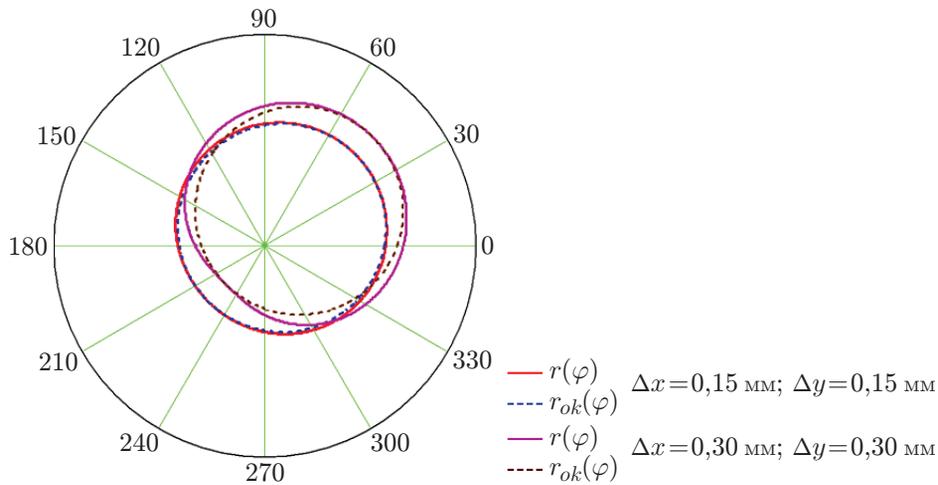


Рис. 3. Изменение формы изображения кольцевой метки при смещении оси отверстия

Уравнение (3) описывает изображение оптической метки вблизи оптической оси, которое формирует коническое зеркало 5 (см. рис. 1). Объектив камеры 6 настроен на плоскость, на которой находится точка A' (см. рис. 2), и строит изображение этой точки на фотоприёмной матрице камеры с заданным увеличением.

Аналогичным образом решается задача, когда смещение происходит и по оси X , и по оси Y . Но выражение будет иметь более сложный вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(\varphi) = \cos(\varphi)(\Delta x \cos(\varphi) + \Delta y \sin(\varphi)) - \\ \quad - \cos(\varphi) \sqrt{(\Delta x \cos(\varphi) + \Delta y \sin(\varphi))^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 + R^2}; \\ r(\varphi, \Delta x, \Delta y) = \begin{cases} z_1 - z_0 [x^2(\varphi) - (\Delta y - \sqrt{R^2 - (x(\varphi) - \Delta x)^2})^2]^{1/2} / R, & \varphi \in [0; \pi]; \\ z_1 - z_0 [x^2(\varphi) - (\Delta y + \sqrt{R^2 - (x(\varphi) - \Delta x)^2})^2]^{1/2} / R, & \varphi \in [\pi; 2\pi]. \end{cases} \end{array} \right. \quad (4)$$

График данной кривой в полярных координатах при различных значениях смещения Δx представлен на рис. 3. Видно, что одновременно со смещением изображения кольцевой метки происходит изменение формы кривой: чем больше величина смещения, тем сильнее кривая отличается от окружности.

Чтобы показать процесс изменения формы кривой более наглядно, она была построена совместно с окружностью в полярных координатах:

$$r_{ок}(\varphi) = x_0 \cos(\varphi) + y_0 \sin(\varphi) + \sqrt{(x_0 \cos(\varphi) + y_0 \sin(\varphi))^2 - x_0^2 - y_0^2 + \rho_0^2}, \quad (5)$$

где x_0, y_0 — координаты центра окружности в декартовой системе; $\rho_0 = z_1 - z_0$ — радиус окружности.

По графикам видно, что при малых смещениях ($\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \ll R$) кривая незначительно отличается от окружности. При значительных смещениях отличие существенно, что необходимо учитывать при обработке изображений.

Ещё одной особенностью формирования изображения в такой оптической системе является то, что изображение метки смещается в обратном направлении смещению оси отверстия, а при увеличении диаметра отверстия ($D_h = 2R$) происходит уменьшение диаметра светового кольца. Это связано с тем, что коническое зеркало развёрнуто в сторону от ДОО.

Следует отметить, что наблюдение за поверхностью отверстия через коническое зеркало — не единственный способ. Также возможно применение широкоугольных объективов и специализированных объективов для контроля отверстий, имеющих увеличенную кривизну поля в пространстве объектов [11]. Такие объективы целесообразно применять при контроле отверстий малой протяжённости ($L/D_h < 2$) методом многокольцевого структурного освещения [12]. При использовании метода светового сечения (одного кольца) применение конического зеркала более предпочтительно, так как в этом случае оптическая система обладает большей чувствительностью к изменению геометрических параметров контролируемого отверстия.

В предлагаемом методе измерения важнейшей задачей является фокусировка светового пучка в узкое кольцо. В качестве такого оптического элемента был использован дифракционный фокусатор в кольцо [13] со следующей фазовой функцией:

$$\varphi(r) = -k\sqrt{f_0^2 + (r - r_0)^2}, \quad 0 \leq r \leq a, \quad (6)$$

где r — полярный радиус, f_0 — фокусное расстояние, a — радиус фокусатора, r_0 — радиус светового кольца.

Использование ДОЭ позволяет добиться высокой точности измерений и минимизации габаритов оптической схемы зонда.

Разработка зонда для 3D-сканирования отверстий. Представленная на рис. 1 оптическая схема имеет недостаток, затрудняющий её применение при контроле стволов оружия, имеющих большую протяжённость ($L/D_h > 50$). Чтобы зонд имел достаточную жёсткость в этом случае, его диаметр должен быть максимально приближён к диаметру контролируемого канала ($D_{pr} = D_h - \Delta D$). Оставшийся зазор $\Delta D/2$ должен быть достаточным для обеспечения необходимого диапазона измерений и удобства эксплуатации (не должно происходить касания зонда и контролируемого изделия). В такой конструкции крайне неудобным является расположение лазера 1 и камеры 6 (см. рис. 1) в противоположных концах зонда, так как к этим оптико-электронным устройствам необходимо прокладывать электрические кабели по стенкам зонда в обход остальных оптических элементов, что достаточно сложно сделать в условиях миниатюризации всех элементов. Для устранения данного недостатка предложены модифицированная оптическая схема и конструкция зонда с использованием в качестве источника излучения волоконного лазера [14] (рис. 4).

Излучение лазера (длина волны 660 нм, мощность 80 мВт) вводится в зонд по оптоволокну 1, которое проложено внутри зонда, выведено на оптическую ось и проходит через отверстия в центре конического зеркала 2 и ДОЭ 3. Затем расходящийся лазерный пучок коллимируется вогнутым зеркалом 4 и освещает ДОЭ 3, который формирует на поверхности контролируемого отверстия 5 узкое световое кольцо. Для наблюдения освещённой поверхности в стенках корпуса 6 зонда сделаны прорезы. Рассеянный от стенок отверстия свет отражается от конического зеркала 2 и фокусируется объективом 7 на матрице камеры 8. Изображение по протоколу USB передаётся в компьютер для обработки.

Разработанная оптическая схема зонда имеет высокую чувствительность к изменению геометрических параметров контролируемого канала (около 4 мкм на 1 пиксель изображения) и позволяет сканировать отверстия диаметрами от 12,6 до 13,2 мм. На рис. 5 приведены регистрируемые изображения канала ствола.

Для иллюстрации работы метода проведено моделирование работы оптической системы зонда в непоследовательном режиме программного пакета Zemax. На рис. 5, а—с показано, как ведёт себя изображение кольцевой метки при смещении (от 0 до 0,2 мм) оси канала нарезного ствола. Видно, что в несмещённом положении изображение представляет

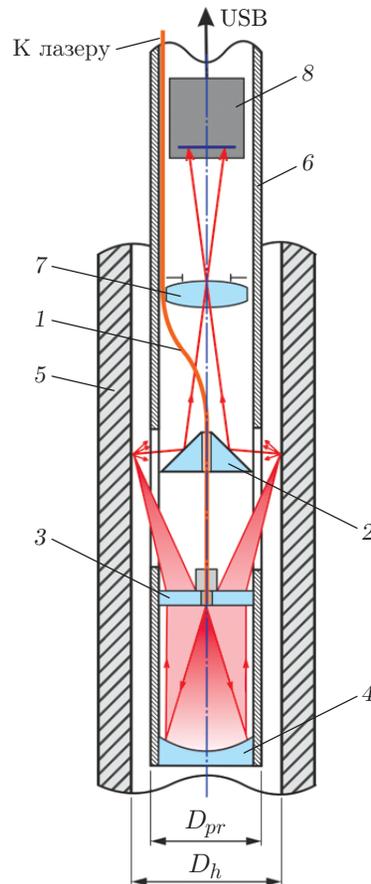


Рис. 4. Конструкция зонда: 1 — оптоволоконно, 2 — коническое зеркало, 3 — ДОЭ, 4 — коллимирующее зеркало, 5 — контролируемое изделие, 6 — корпус, 7 — объектив, 8 — камера

собой две концентрические сегментированные окружности разного диаметра. При смещении отверстия изображение кольцевой метки также смещается и происходит её искажение. Путём соответствующей математической обработки можно вычислить как положение оси, так и диаметр и овальность контролируемого канала [15].

На рис. 5, *d* приведено реальное изображение кольцевой метки, полученное в процессе сканирования канала нарезного ствола. Видны три области, в которых метка экранируется деталями корпуса зонда. Поскольку съёмка осуществляется в движении, спекл-шум на изображении отсутствует. Для сравнения на рис. 5, *e* приведено такое же изображение в статичном положении, на котором спеклы видны отчётливо.

Обработка изображений. При обработке изображений производится их радиальное сканирование из центра, соответствующего положению оптической оси системы (определяется в процессе калибровки). Шаг сканирования по углу $\Delta\varphi$ выбирается примерно равным угловому размеру пикселя на радиусе кольцевой метки ρ_0 .

Вдоль *i*-го направления сканирования имеется распределение интенсивности $I(r)$, содержащее один яркий пик. Положение центра пика r_i определяется методом центра масс с соответствующей пороговой обработкой сигнала.

После радиального сканирования находится распределение $r_i(\varphi_i)$, по которому можно вычислить геометрические параметры отверстия: смещение оси (Δx и Δy) и средний диаметр $D_h = 2R_0$. Для этого следует использовать выражение (4). Если радиальные координаты светового кольца r пересчитаны в расстояния R до объекта с помощью ка-

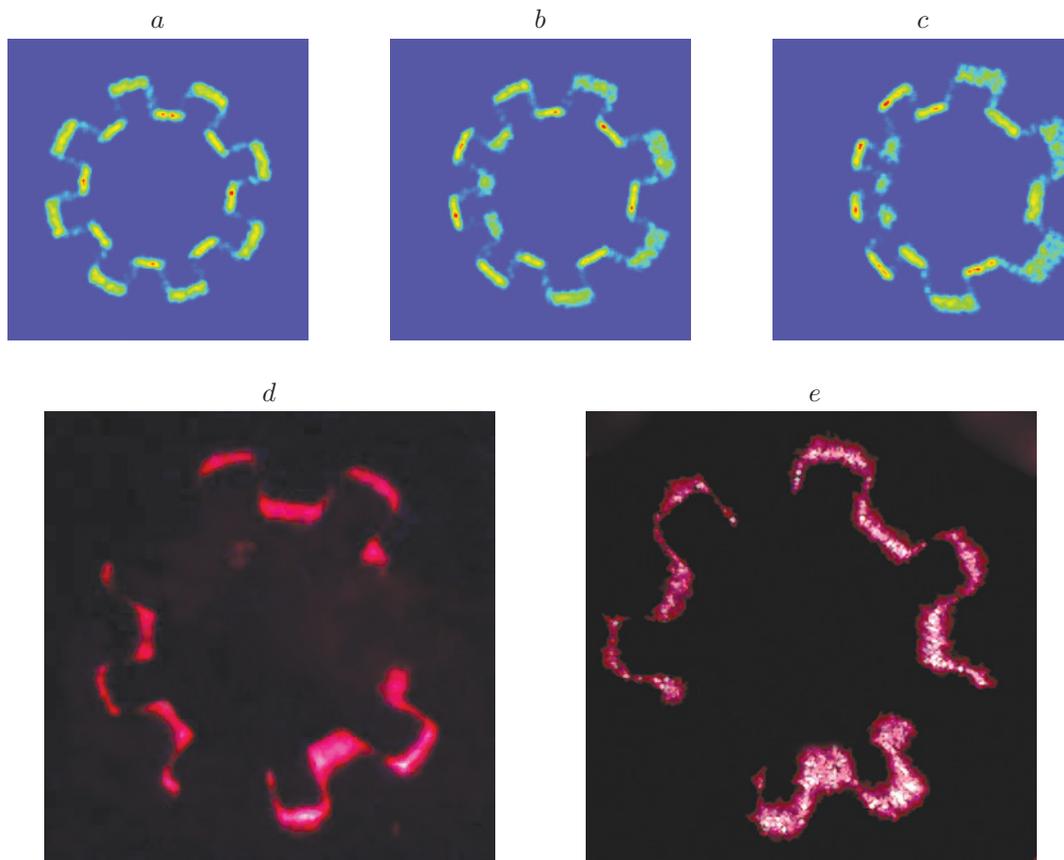


Рис. 5. Изображения кольцевой метки: *a*, *b*, *c* — изображения, полученные путём моделирования при различных смещениях оси ствола (0; 0,1; 0,2 мм), *d* — реальное изображение при сканировании ствола, *e* — изображение кольцевой метки на внутренней поверхности ствола в статике

либровочной функции $R = F_c(r)$, то можно применять более простое выражение (5). Для вычислений используется метод наименьших квадратов

$$S(\Delta x, \Delta y, D_h) = \sum_i [r_i - r(\varphi_i, \Delta x, \Delta y, D_h)]^2, \tag{7}$$

где $S(\Delta x, \Delta y, D_h)$ — сумма квадратов разностей, i — номер направления сканирования. Далее путём итерационного поиска находятся значения Δx , Δy , D_h , при которых данная сумма минимальна. Минимум S соответствует максимальному совпадению экспериментального распределения $r_i(\varphi_i)$ и аналитической кривой $r(\varphi, \Delta x, \Delta y, D_h)$.

Процедура определения геометрических параметров отверстия справедлива для гладкого цилиндрического отверстия. В случае контроля нарезных стволов она осложняется наличием в картине, по сути, двух отверстий («диаметр по полям» и «диаметр по нарезам»), а также переходных областей. Поэтому предварительно производится процедура разделения $r_i(\varphi_i)$ на два массива: $r_i^1(\varphi_i)$, $r_i^2(\varphi_i)$. Для этого по найденной круглограмме $r_i(\varphi_i)$ проводится средняя окружность, которая служит критерием для разделения точек между полями и нарезам. Затем по отдельным круглограммам $r_i^1(\varphi_i)$ и $r_i^2(\varphi_i)$ вычисляются геометрические параметры Δx_1 , Δy_1 , D_h^1 и Δx_2 , Δy_2 , D_h^2 . На рис. 6 показан результат такой обработки.

В процессе сканирования всего изделия по длине регистрируется серия изображений,

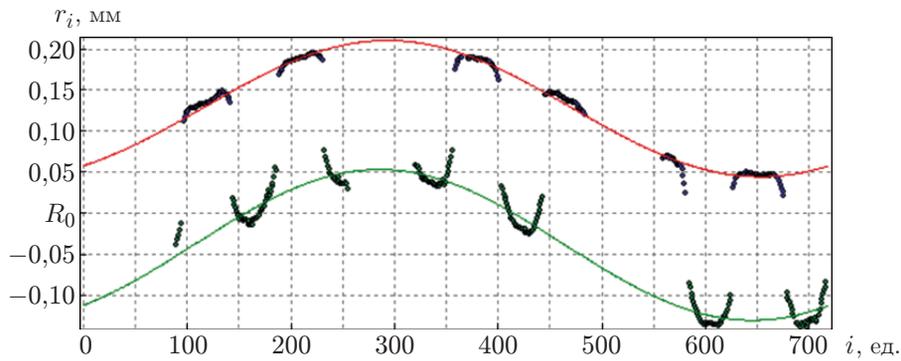


Рис. 6. Вычисленная круглограмма одного сечения нарезного ствола

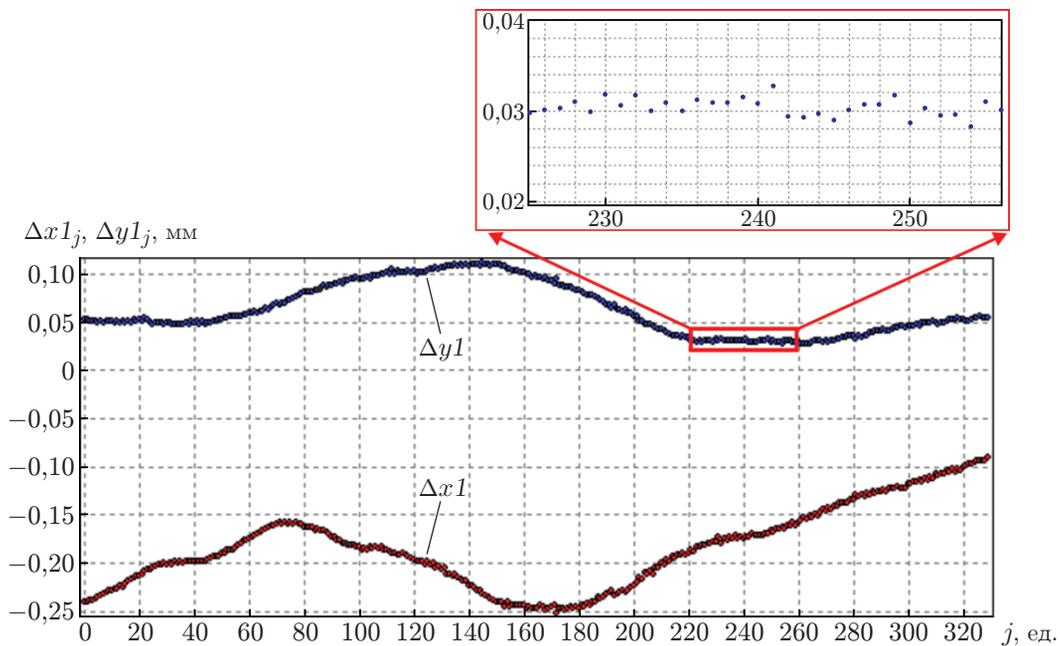


Рис. 7. Результат обработки серии изображений

по каждому из которых производится вычисление геометрических параметров сечения. Таким образом производится 3D-сканирование всего канала ствола. Результат сканирования одного из изделий в виде графиков отклонения оси по полям $\Delta x1$, $\Delta y1$ приведён на рис. 7. Увеличенный фрагмент графика показывает уровень шума на кривой. Видно, что шум составляет единицы микрометров (2–3 мкм). Как уже упоминалось, оптическая система зонда обладает высокой чувствительностью. При смещении оси изделия на 4 мкм происходит соответствующее смещение изображения всей оптической метки на 1 пиксель. Такая чувствительность как раз и обеспечивает малый шум и высокую точность измерений.

Следует отметить, что в графиках $\Delta x1$, $\Delta y1$ (см. рис. 7), помимо собственно искривления оси изделия, присутствует непрямолинейность хода каретки, перемещающей изделие. Поскольку изготовление и применение прецизионных линейных направляющих, обладающих высокой прямолинейностью на больших ходах (более 1 м), — достаточно сложная задача, то было решено использовать направляющие средней точности, а для учёта возникающих ошибок применяется специальная процедура их тарирования. Повторяемость хода каретки составляет величину порядка 3–4 мкм при поддержании температуры в помещении в пределах ± 1 °С. Общая непрямолинейность хода около 0,08 мм на длине 1200 мм.



Рис. 8. Общий вид установки «Струна»: 1 — линейный привод, 2 — блок оптический, 3 — рама, 4 — стойка управления, 5 — блок электроники, 6 — основание, 7 — опора

Установка для контроля прямолинейности канала ствола. Разработана и изготовлена установка для контроля прямолинейности канала ствола «Струна» [14] (рис. 8).

Контролируемые параметры и технические характеристики установки:

- отклонение от прямолинейности оси канала ствола и диаметр;
- частота измерений каждые 2 мм;
- диаметр контролируемого канала 12,6–13,2 мм;
- длина контролируемого участка до 1200 мм;
- контролируемое отклонение от прямолинейности до 0,35 мм;
- погрешность измерения геометрических параметров $\pm 0,004$ мм;
- время контроля одного изделия < 2 мин.

В процессе измерения контролируемый ствол устанавливается вертикально и зажимается пневматическими центрирующими захватами. Затем его перемещают вверх по направляющим. При этом зонд входит внутрь контролируемого канала и производит его сканирование световым кольцом по всей длине. За одно измерение регистрируется и обрабатывается порядка 300 изображений с разрешением 640×480 пикс., по каждому из которых определяются отклонение оси отверстия и диаметр сечения. Результаты измерений выводятся оператору в виде 3D-кривой, иллюстрирующей искривление оси канала (рис. 9, ствол был намеренно деформирован в двух местах). При этом указывается величина и координаты (по длине и углу) наибольшего отклонения оси.

Однако вид 3D-графика не совсем удобен для правщика. Для представления данных о всех локальных отклонениях используется 2D-график отклонений на некоторой базовой длине, принятой в технологическом процессе, а угловые координаты экстремумов выводятся отдельно в виде фрагментов (рис. 10). Точки графика, вышедшие за допуск Δs , по-

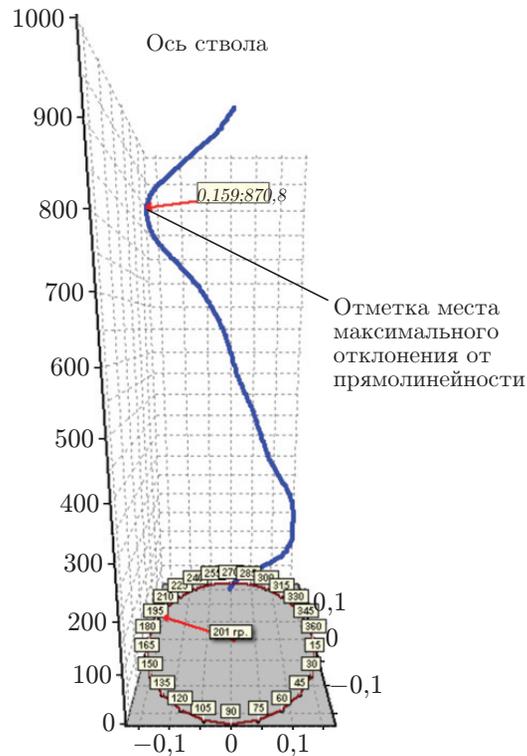


Рис. 9. Результаты сканирования канала ствола — 3D-визуализация формы оси

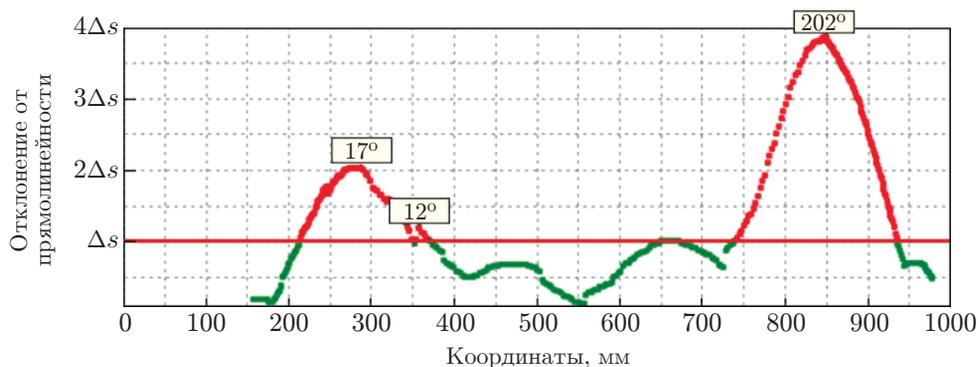


Рис. 10. 2D-визуализация формы оси — отклонение от прямолинейности на базе 300 мм

мечаются цветом. Эти данные по локальным экстремумам используются затем для правки изделий с помощью специального пресса.

Были проведены испытания установки на образцах реальных стволов. В процессе испытаний проверялась повторяемость измерений. Для этого проводились многократные измерения изделий с поворотом по углу. В итоге повторяемость измерений составила ± 4 мкм.

Для общей оценки корректности измерений установки использовались изделия с намеренно внесёнными искривлениями оси каналов. По показаниям установки проводилась последующая правка стволов под прессом. В результате удалось снизить искривление оси на базе 300 мм в 2–7 раз. Проверка производилась проходными калибрами длиной 300 мм и диаметром меньше диаметра канала на соответствующую величину (0,01; 0,02; 0,03 мм).

Заключение. Разработана и изготовлена лазерная установка для бесконтактного автоматизированного контроля геометрических параметров каналов стволов нарезного стрелкового оружия.

В основу работы системы положен метод светового сечения, в котором в качестве осветителя используется дифракционный фокусатор в кольцо. В установке применяется оригинальная оптическая схема в виде компактного зонда. Погрешность измерения геометрических параметров составляет 0,004 мм. Установка используется для производственного контроля прямолинейности стволов нарезного оружия на разных стадиях их изготовления.

Применение разработанного оборудования позволяет объективизировать контроль стволов в сравнении с распространённой методикой визуального контроля «по тени», сделать его более управляемым. Получение цифровых данных о форме канала по всей длине в перспективе даёт возможность внедрить полностью автоматическую правку изделий.

Применение дифракционного оптического элемента в качестве осветителя позволяет добиться высокой точности измерений по сравнению с другими методами структурного освещения. При этом в отличие от специализированных КИМ для контроля стволов, где требуется дополнительное вращение зонда или изделия, разработанная установка обладает быстродействием (менее 2 мин), достаточным для оперативного производственного контроля изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов А. Д.** Правка ружейных стволов. Теория и практика выпрямления погнутостей в гладких и нарезных стволах по теням их каналов. М.: Издание Артиллер. управ. УС РККА и НТС треста РУЖ, 1928. 44 с.
2. **Zhou R.-B., Xie T.-B.** Measurement for non-straightness and muzzle angle of artillery barrel based on laser collimation technology // Proc. of the 3rd Intern. Symp. on Instrumentation Science and Technology. Aug. 18–22, 2004, Xi'an, China. P. 2-0753.
3. **Соколов А. В., Вяткин М. Д., Головизнина Т. В. и др.** Оптико-электронная система контроля прямолинейности глубоких отверстий // Практика приборостроения. 2002. № 1. С. 19–21.
4. **Application** note for defense industry automated barrel inspection and 3D measurement with Novacam 3D metrology systems. URL: <https://www.novacam.com/barrel-inspection-and-3d-measurement/> (дата обращения 15.06.2020).
5. **Abulkhanov S. R., Ivliev N. A.** Optical inspection device for the inner surface of pipe ends // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2019. **1368**. P. 022075. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022075.
6. **Schick A., Forster F., Stockmann M.** 3D measuring in the field of endoscopy // Proc. SPIE. **8082**. 808216. DOI: 10.1117/12.889167.
7. **Пат. 2245516 РФ.** Устройство контроля отверстий деталей /Ю. В. Чугуй, Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов, В. Г. Никитин, А. Р. Саметов. Опубл. 10.10.2004, Бюл. № 3.
8. **Zavyalov P. S., Finogenov L. V., Zhimuleva E. S. et al.** Using diffractive optical elements for industrial products geometrical parameters inspection // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2018. **1096**. P. 012009-1–012009-7.
9. **Wakayama T., Takahashi Y., Ono Y. et al.** Three-dimensional measurement of an inner surface profile using a supercontinuum beam // Appl. Opt. 2018. **57**, N 19. P. 5371.
10. **Финогенов Л. В.** Контроль геометрических параметров отверстий с использованием дифракционного кольцевого фокусатора // Автометрия. 2005. **41**, № 6. С. 23–31.
11. **Zavyalov P.** 3D hole inspection using lens with high field curvature // Measurement Sci. Rev. 2015. **15**, N 1. P. 52–57.

12. **Lemeshko Yu. A., Finogenov L. V., Zav'yalov P. S.** Using the diffractive optics for 3D inspection of nuclear reactor fuel assembly grid spacers // Measurement Sci. Rev. 2008. **8**, N 3. Section 3. P. 74–77.
13. **Сойфер В. А.** Методы компьютерной оптики. М.: Физматлит, 2000. 688 с.
14. **Пат. 2721716 РФ.** Устройство для контроля отверстий деталей /Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов, А. В. Белобородов, А. В. Ермоленко, Д. В. Скоков, Д. Р. Хакимов. Опубл. 21.05.2020, Бюл. № 15.
15. **Chugui Yu., Finogenov L., Kiryanov V. et al.** Inspection of holes parameters using a ring diffractive focuser // VDI-Berichte. 2004. N 1844. P. 433–443.

Поступила в редакцию 18.05.2020

После доработки 15.06.2020

Принята к публикации 29.06.2020
