

ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ

Петр Сергеевич Завьялов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, директор, тел. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Дмитрий Радионович Хакимов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, инженер, тел. +7(383)306-59-40, e-mail: baita@mail.ru

Анна Александровна Гущина

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, ведущий программист, тел. (383)306-59-40, e-mail: agushchina@tdisie.nsc.ru

Алексей Вадимович Белобородов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, ведущий программист, тел. +7(383)306-59-40, e-mail: b.a.v@inbox.ru

Евгений Владимирович Власов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник, тел. +7(383)306-59-40, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Работа посвящена использованию дифракционных оптических элементов в системах, использующих метод структурного освещения для контроля геометрических параметров промышленных изделий. Объектами контроля в системах являются: стволы оружия, топливные таблетки, тепловыделяющие элементы, дистанционирующие решетки, керамические кольцевые изоляторы. Дифракционные оптические элементы, используемые в работе, представляют собой компьютерно синтезированные голограммы, фокусирующие лазерное излучение в геометрические фигуры, конфигурация которых оптимально сочетается с формой контролируемых объектов.

Ключевые слова: метод структурного освещения, дифракционный оптический элемент, контроль 3D объектов, обработка изображений, обнаружение дефектов

APPLICATION OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOR OPTICAL-ELECTRONIC DIMENSIONAL INSPECTION SYSTEMS

Petr S. Zavyalov

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St, Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., laboratory head, director, phone: (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Dmitry R. Khakimov

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St, Novosibirsk, 630058, Russia, Engineer, phone: (383)306-62-24, e-mail: baita@mail.ru

Anna A. Guschina

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St, Novosibirsk, 630058, Russia, Lead programmer, phone: (383)306-62-24, e-mail: agushchina@tdisie.nsc.ru

Alexey V. Beloborodov

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St, Novosibirsk, 630058, Russia, Lead programmer, phone: (383)306-62-24, e-mail: b.a.v@inbox.ru

Evgeny V. Vlasov

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St, Novosibirsk, 630058, Russia, researcher, phone: (383)306-62-24, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

The work is devoted to the application of diffractive optical elements in systems using the structured illumination method to the geometric parameters inspection of industrial articles. The objects of inspection in these systems are: weapon barrels, fuel pellets, fuel elements, spacer grids, ceramic ring insulators. The used diffractive optical elements are computer-synthesized holograms that focus laser radiation into geometric shapes, the configuration of which is optimally combined with the inspected objects shape.

Keywords: structured illumination method, diffractive optical element, 3D objects inspection, image processing, defect detection

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой уникальные оптические элементы, обладающие уникальными оптическими характеристиками. Широкое развитие ДОЭ получили благодаря применению компьютерной техники и лазерных технологий в задачах синтеза голограмм математически заданных объектов. ДОЭ применяют для исправления аберраций оптических систем, корректировки модового состава лазерного излучения, высокоточного контроля асферических поверхностей в оптическом приборостроении и ряда других задач.

Актуальным применением дифракционных элементов является бесконтактный контроль геометрических параметров объектов, имеющих светорассеивающую поверхность. Способ контроля таких изделий заключается в освещении измеряемой поверхности световым полем сложной конфигурации (полосы, матрицы точек, сетки и т.п.) и регистрации его изображения (одним или несколькими фотоприемниками). В результате последующей обработки производится вычисление необходимых геометрических параметров. Существует множество подобных методов, которые обобщенно можно назвать методами структурного

освещения [1], которые применяются для измерения 3D формы различных объектов. При этом обычно достаточно использования всего одного кадра изображения [2].

В качестве формирователей структурного освещения, как правило, используются серийно выпускаемые LCD или DLP проекторы, что ограничивает применение таких устройств в виду низкой точности измерений (погрешность более 0,1 мм) [3]. Это не позволяет использовать в полной мере такие осветители в промышленном производстве, где требуется существенно большая точность измерений. Для уменьшения погрешности измерений необходимо применять высокоточные проекторы на базе элементов цифровой и дифракционной оптики [4].

В КТИ ИП СО РАН предложены методы структурного освещения на базе ДОЭ и разработаны системы контроля ряда ответственных промышленных изделий. В работе представлен обзор полученных результатов с акцентом на вопросы разработки и использования дифракционных оптических элементов в задачах размерного контроля.

Контроль параметров протяженных отверстий на базе ДОЭ

В работах [5, 6] был предложен высокопроизводительный оптико-электронный метод контроля отверстий с использованием дифракционного фокусатора в кольцо. Данный метод позволяет создать малогабаритный зонд для контроля 3D формы отверстий.

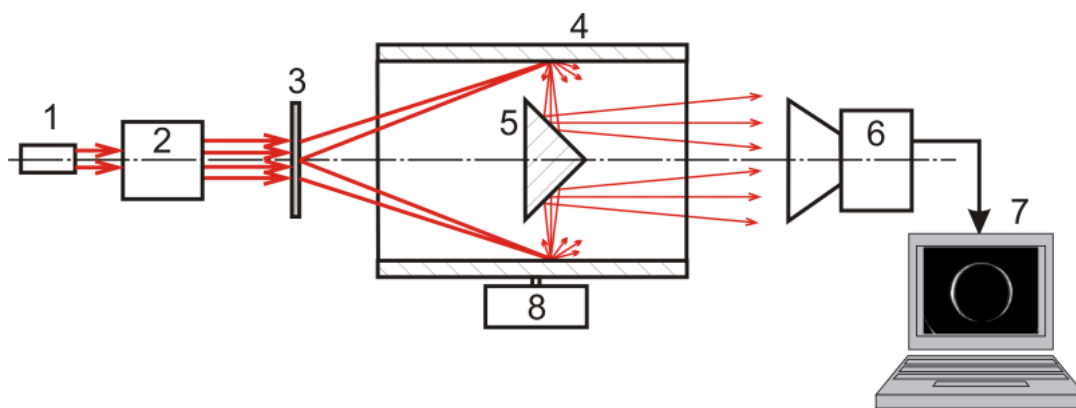


Рис. 1. Принцип контроля отверстий:

1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – ДОЭ; 4 – цилиндрический канал; 5 – коническое зеркало; 6 – камера; 7 – компьютер; 8 – устройство перемещения детали

Метод измерения заключается в формировании узкого светового кольца на внутренней поверхности изделия, приеме и обработке изображения освещенного участка поверхности. Свет, рассеянный от стенки отверстия, попадает на матрицу камеры благодаря коническому зеркалу. Сканирование всей поверхности осуществляется посредством перемещения объекта вдоль оси (рис. 1).

В предлагаемом методе измерения важнейшей задачей является фокусировка светового пучка в узкое кольцо (рис. 2). В качестве такого оптического элемента был использован дифракционный фокусатор [7], со следующей фазовой функцией:

$$\phi(r) = -k\sqrt{f_0^2 + (r - r_0)^2}, \quad 0 \leq r \leq a, \quad (1)$$

где r – полярный радиус; f_0 – фокусное расстояние; a – радиус фокусатора; r_0 – радиус кольца фокусировки.

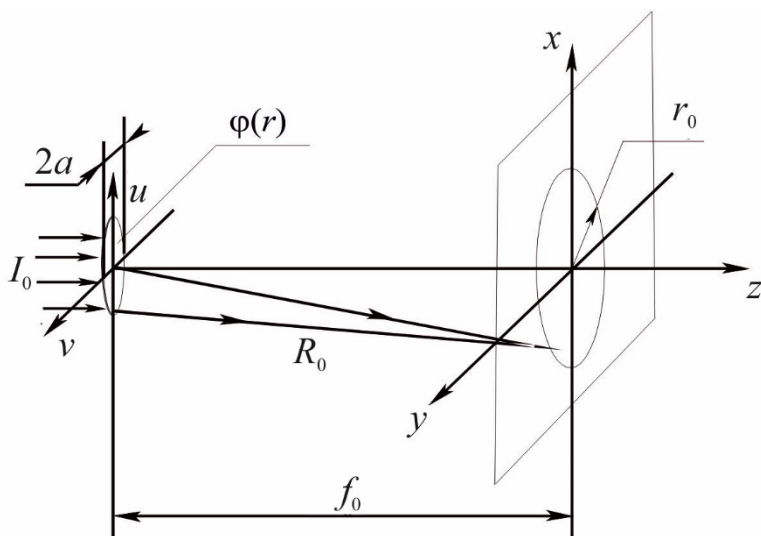


Рис. 2. Геометрия фокусировки в кольцо

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

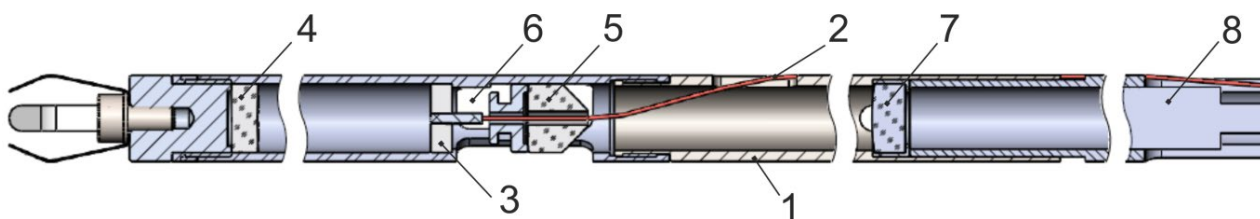


Рис. 3. Конструкция зонда:

1 – корпус; 2 – оптоволокну; 3 – ДОЭ; 4 – сферическое зеркало; 5 – коническое зеркало; 6 – окна в корпусе зонда; 7 – линза; 8 – эндоскоп

Разработана конструкция компактного зонда для бесконтактного контроля протяженных отверстий (рис. 3). В качестве источника света используется полупроводниковый лазер с волоконным выходом (длина волны 660 нм, мощность 80

мВт). Для введения излучения в зонд используется волоконный кабель 2, который прокладывается внутри и снаружи зонда и выводится в его центр – на оптическую ось. Расходящийся лазерный пучок коллимируется сферическим зеркалом 4 и освещает ДОЭ 3. Далее излучение выходит через окна 6 в корпусе зонда и попадает на контролируемое отверстие, формируя на его поверхности узкое световое кольцо. Наблюдение за освещенной поверхностью производится с помощью конического зеркала 5, линзы 7 и эндоскопа 8. Корпус зонда выполнен в виде трубки диаметром 10 мм и длиной более 1 м.

Разработанная оптическая схема зонда имеет высокую чувствительность к изменению геометрии контролируемого канала (около 4 мкм на 1 пиксель изображения) и позволяет сканировать отверстия диаметром от 12,6 до 13,2 мм.

На рис. 4 приведено реальное изображение кольцевой метки, полученное в процессе сканирования канала нарезного ствола. Видны три области, в которых метка экранируется на деталях корпуса зонда. Так как съемка осуществляется в движении, то спекл-шум на изображении достаточно хорошо сглаживается.

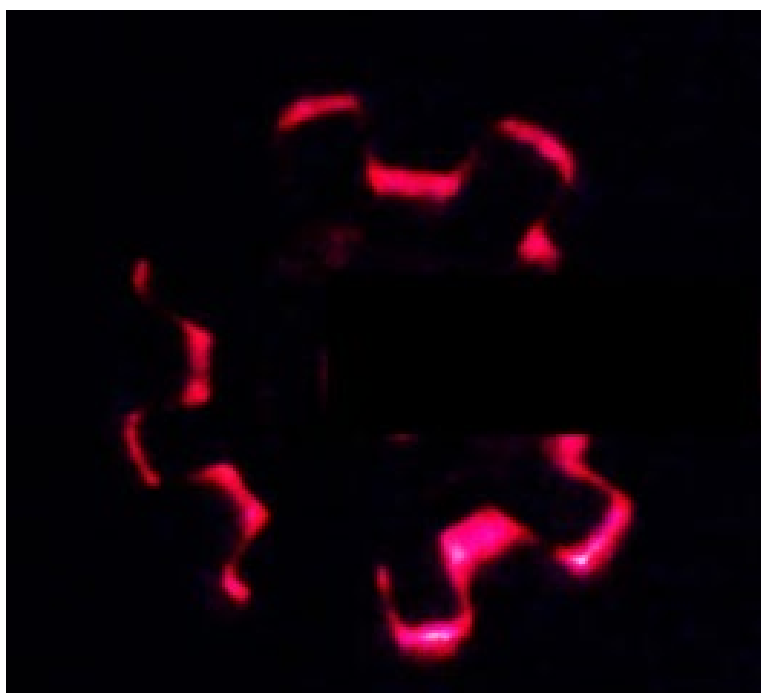


Рис. 4. Изображение кольцевой метки, полученное при сканировании ствола диаметром 12,7 мм

В рамках работ с ОАО «Завод им. В. А. Дегтярева» разработана и изготовлена Установка для контроля прямолинейности канала ствола (шифр «Струна») [8, 9]. Результаты измерений выводятся оператору в виде 3D-кривой, иллюстрирующей искривление оси канала. При этом указывается значение и координаты (по длине и углу) наибольшего отклонения оси (рис. 5).

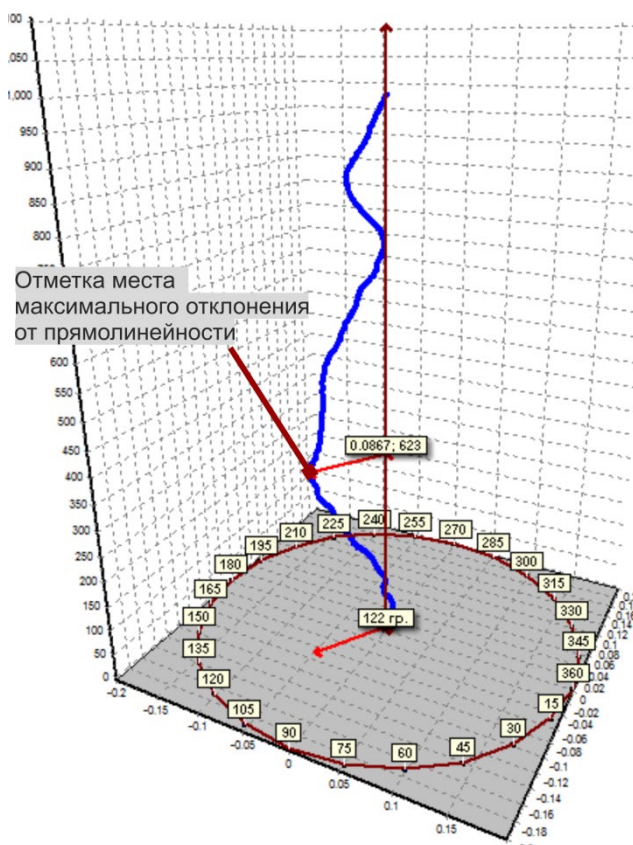


Рис. 5. Результаты сканирования канала ствола: 3D визуализация формы оси

Контроль дистанционирующих решеток

Для контроля таких сложных 3D-объектов как дистанционирующие решетки (ДР) тепловыделяющих сборок (ТВС) предложен метод структурного освещения на основе мультикольцевых фокусаторов (МКФ) [10, 11]. Метод обеспечивает контроль следующих параметров шестиугольных ДР: диаметров ячеек и отверстий под канал, формируемых их выступами – пуклевками; расстояний между центрами соседних ячеек; сдвигов центров ячеек относительно номинального положения по чертежу; габаритных размеров ТВС. Для квадратных ДР вместо диаметров контролируются расстояния между противоположными пуклевками.

В предложенном методе увеличение быстродействия достигается путем освещения внутренней поверхности 3D-объекта мультикольцевым световым зондом, который может быть создан на основе ДОЭ. При этом измерение одной ячейки ДР по всей длине производится за один кадр, содержащий всю информацию о ее геометрии. Также при таком мультикольцевом структурном освещении не имеет принципиального значения количество и расположение пуклевок ячейки, поэтому метод позволяет контролировать геометрические параметры как шестигранных (российских), так и квадратных (зарубежных) дистанционирующих решеток.

Суть метода поясняется на рис. 6. Структурное освещение в виде набора колец формируется специально рассчитанным ДОЭ – МКФ, который фокусирует падающее на него лазерное излучение в систему колец равного диаметра, расположенных вдоль оси Z ячейки с некоторым шагом Δz . Освещенная поверхность ячейки проецируется на фотоприемную матрицу камеры с помощью специального объектива для контроля отверстий, имеющего большую кривизну поля и дисторсию. Он фокусирует различные сечения по глубине в плоскость фотоприемника, при этом, чем ближе сечение объекта, тем больше радиус его изображения. Для измерения геометрических параметров всех ячеек и параметров решетки в целом используется сканирующий двухкоординатный стол для ее перемещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы.

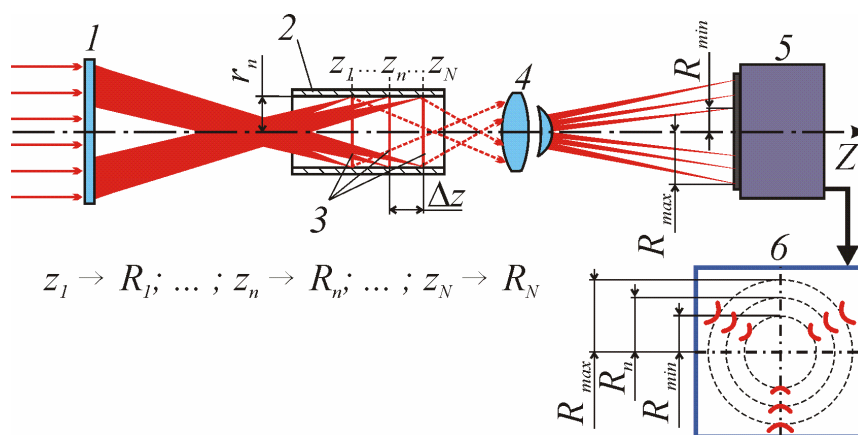


Рис. 6. Иллюстрация метода контроля ДР на основе МКФ:

1 – МКФ; 2 – контролируемая ячейка; 3 – световые кольца; 4 – объектив для контроля отверстий; 5 – камера; 6 – изображение ячейки; R_{min} и R_{max} – минимальный и максимальный радиусы изображения; Δz – шаг колец; $2r_n$ – диаметр ячейки

К МКФ предъявляются следующие требования. Для обеспечения информативности контроля по длине пуклевки необходимо контролировать от 10 до 15 сечений, поэтому МКФ должен формировать на пуклевках такое же количество колец с шагом $\Delta z = 0,5 - 1$ мм. Диапазон фокусировки кольца в радиальном направлении должен соответствовать допуску на положение центра ячейки (0,15 – 0,3 мм).

Дифракционные элементы, фокусирующие излучение в систему колец, можно создать двумя способами. Во-первых, можно разбить поверхность дифракционного элемента на радиальные сегменты, каждый из которых будет создавать одно световое кольцо. Во-вторых, можно создать дифракционный элемент, который всей поверхностью формирует набор световых колец вдоль оптической оси. В этом случае он работает как голограмма, а передаточная функция такого МКФ имеет следующий вид:

$$H(\rho) = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{J_i} \cdot \exp \left[jk \sqrt{(\rho + r_0)^2 + (f_0 + i \cdot \Delta z)^2} \right], \quad \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \quad (2)$$

где J_i – относительная интенсивность i -го светового кольца; r_0 – радиус колец; f_0 – фокусное расстояние МКФ; Δz – шаг колец; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Такие МКФ с диаметром 45 мм могут генерировать до 20 узких световых колец равного диаметра с шириной 50 – 100 мкм и шагом по глубине в пределах от 0,5 до 1 мм. На рис. 7, а показана структура разработанных МКФ.

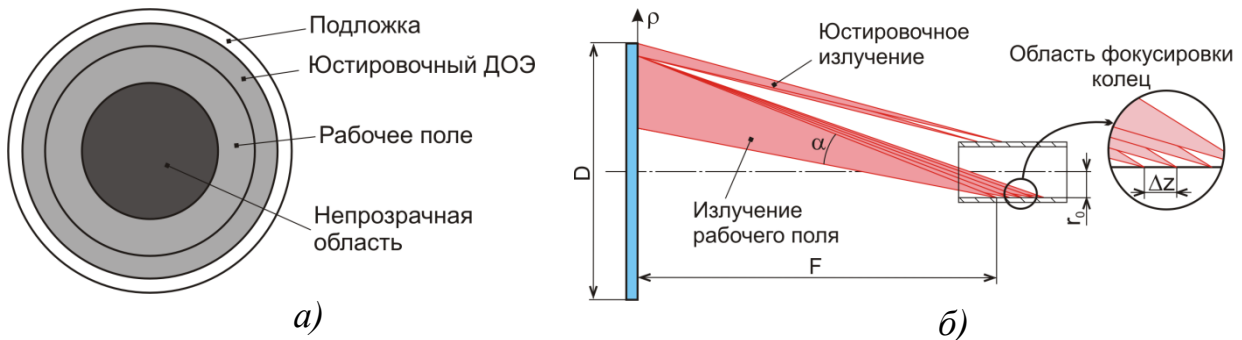


Рис. 7. Дифракционный оптический элемент:
а) структура ДОЭ; б) ход лучей МКФ

Кроме рабочего поля, МКФ имеет в центре непрозрачную область, а на периферии – дополнительный юстировочный элемент. Непрозрачная область в центре выполняет несколько функций. Во-первых, она не пропускает прямое излучение от лазера в проекционный объектив. Во-вторых, эта область уменьшает угловую апертуру α рабочего поля (рис. 7, б), вследствие чего освещение поверхности производится излучением, в котором отсутствуют скользкие лучи. Юстировочный ДОЭ создает два кольца того же диаметра, что и рабочее поле (рис. 7, б), однако в этом случае юстировочные лучи не пересекают оптическую ось. Таким образом, при наличии ячейки в зоне контроля эти лучи не попадают в апертуру проекционного объектива, и поэтому юстировочные кольца не наблюдаются. Когда же ячейка отсутствует, в апертуру объектива не попадает рассеянное от ячейки излучение рабочего поля ДОЭ. При этом видны два юстировочных кольца, по которым можно настраивать приемную оптическую часть по отношению к освещающей оптической системе.

На рис. 8 показаны зарегистрированные ПЗС-линейкой (ширина пикселя 14 мкм) распределения интенсивности, формируемые изготовленными ДОЭ. В рабочее поле намеренно введен признак (пропуск одного кольца посередине, рис. 8, а), позволяющий при обработке изображений безошибочно пронумеровать световые полосы.

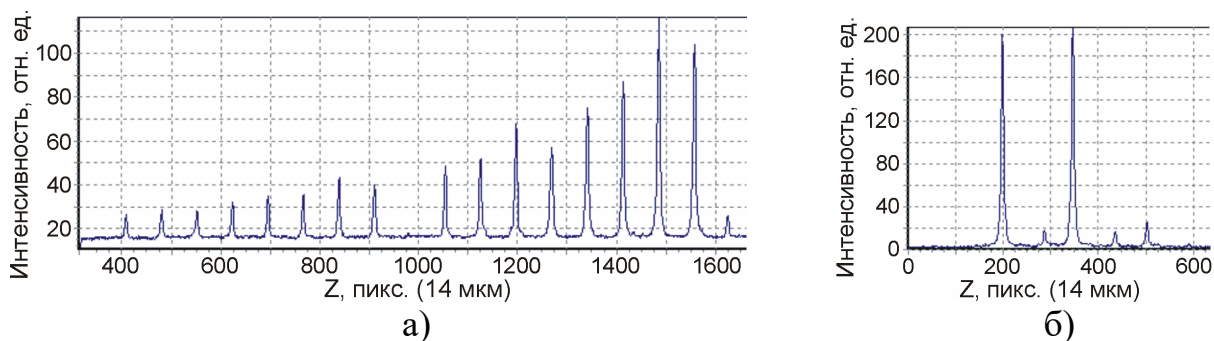


Рис. 8. Экспериментально полученные распределения интенсивности МКФ, генерирующего 16 колец с шагом $\Delta z = 1$ мм (а), два юстировочных кольца (б)

На основе предложенного метода разработаны и созданы системы контроля геометрических параметров дистанционирующих решеток («Решетка-Н», 2 шт.). Разработанная система с января 2009 г. находится в эксплуатации в ПАО «НЗХК», г. Новосибирск.

Контроль внешнего вида оболочек ТВЭЛ

Задача автоматического обнаружения дефектов внешнего вида (наколов, царапин, вмятин) с определением их размеров является при контроле поверхности оболочек ТВЭЛ, изготовленных из циркониевого сплава. Диаметр оболочек равен примерно 9 – 14 мм, а длина 3,8 – 4,5 м. Однако требования к чувствительности обнаружения дефектов на оболочке ТВЭЛ достаточно жесткие. При высокой скорости контроля (скорость движения около 170 мм/с) требуется обнаруживать дефекты глубиной несколько десятков микрометров. Существующие установки контроля оболочек используют токовихревой метод обнаружения дефектов, который позволяет только определять наличие дефектов, а их обмер осуществляется на отдельной позиции на высокоточном приборе с изъятием ТВЭЛ из конвейера.

Известен оптический метод светового сечения, который широко применяется для контроля формы протяженных объектов [12]. Суть метода заключается в формировании на поверхности объекта световой полосы, лежащей в плоскости, перпендикулярной продольной оси объекта. Регистрация изображения производится с помощью камеры, расположенной под некоторым углом к плоскости полосы. Недостатком данного метода является низкая производительность в случае контроля изделий с большой кривизной формы поверхности, таких как оболочки ТВЭЛ. Зарегистрированное изображение, будет иметь форму дуги и, следовательно, будет занимать большое количество строк, а считываемые кадры будут иметь большой объем информации, значительная часть которой, при наличии мелких дефектов, будет бесполезной. Это обстоятельство ограничивает производительность контроля и применение данного метода для контроля оболочек ТВЭЛ.

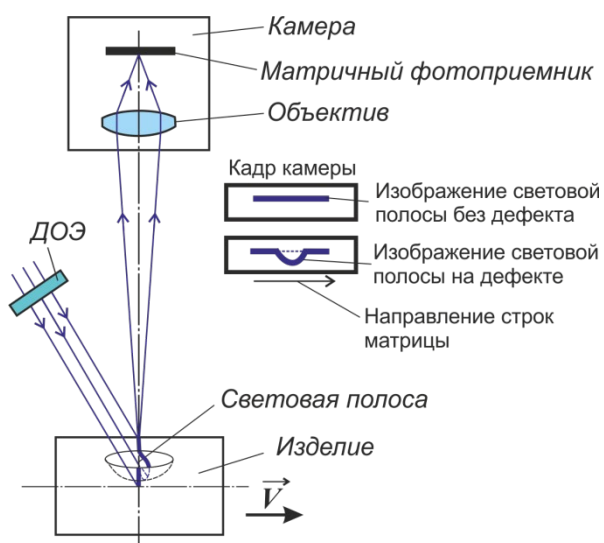


Рис. 9. Структурная схема оптического канала, реализующего метод светового сечения с использованием ДОО

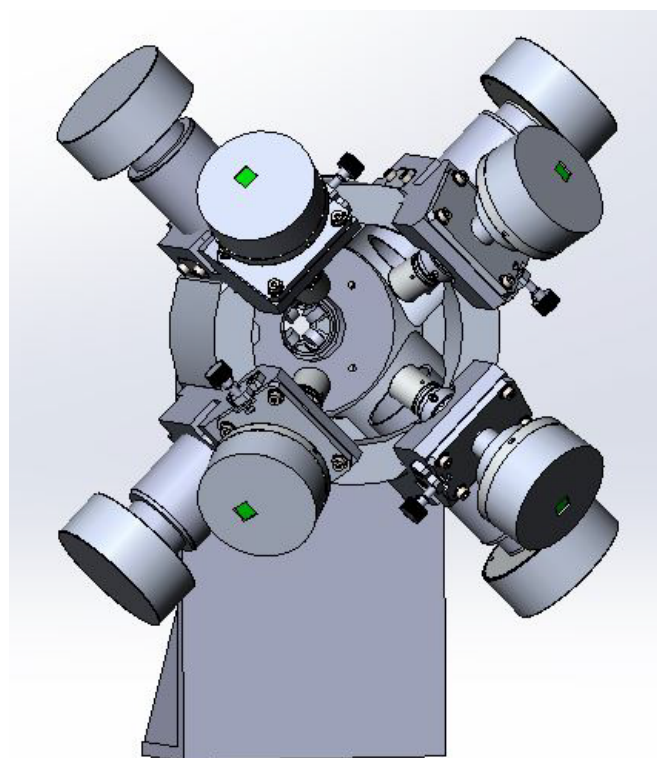


Рис. 10. 3D-модель блока светового сечения для контроля оболочек ТВЭЛ

С целью преодоления этих ограничений исследован высокопроизводительный оптико-электронный метод контроля с определением глубины дефектов, основанный на использовании в качестве формирователя световой полосы дифракционного оптического элемента (ДОО) [13]. Трехмерная конфигурация освещающего пучка позволяет минимизировать объем считываемой информации и регистрировать только отклонения формы поверхности от номинальной (дифференциальный режим считывания). При этом высокая производительность контроля достигается за счет обработки малоразмерных кадров изображений (5 ÷ 20 строк).

На рис. 9 представлена структурная схема одного канала устройства, реализующего предлагаемый метод контроля с определением глубины дефектов. Блок контроля оболочек ТВЭЛ содержит четыре идентичных канала (рис. 10).

Для измерения глубины дефектов необходимо, чтобы ДОО формировал на цилиндрической поверхности световую дугу – фрагмент окружности, диаметр которой равен диаметру контролируемого цилиндра ДС. При использовании 3 – 4 оптических каналов угловой размер дуги должен быть $90^\circ \div 120^\circ$. Известны методы аналитического расчета фазовой функции дифракционного фокусатора в дугу окружности [7, 14].

Однако, нами использовался более простой и универсальный метод расчета на основе численного решения интеграла Френеля – Кирхгофа. Данный метод подразумевает дискретизацию формируемой световой картины. Формируемое поле задается в виде набора из N точек (δ -функций), лежащих на дуге окружности с некоторым шагом Δ друг относительно друга (рис. 11).

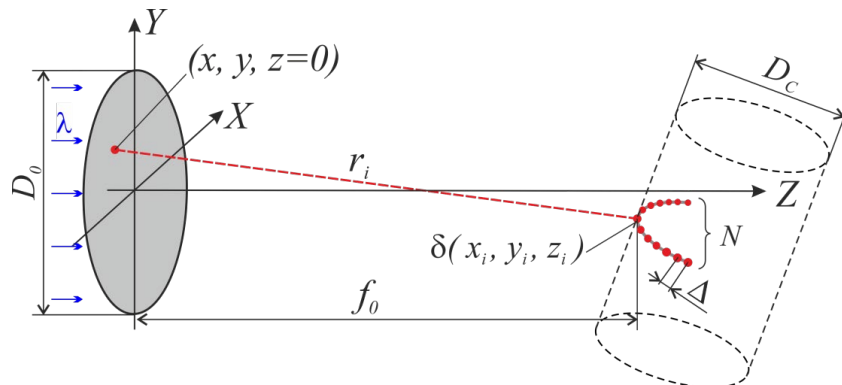


Рис. 11. Расчет ДОЭ на основе преобразования Френеля – Кирхгофа

Поле в каждой точке ДОЭ описывается суперпозицией N импульсных откликов:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^N \sqrt{I_i} \cdot h_i(x, y), \quad (3)$$

где I_i – относительные интенсивности точек; $h_i(x, y)$ – импульсный отклик свободного пространства.

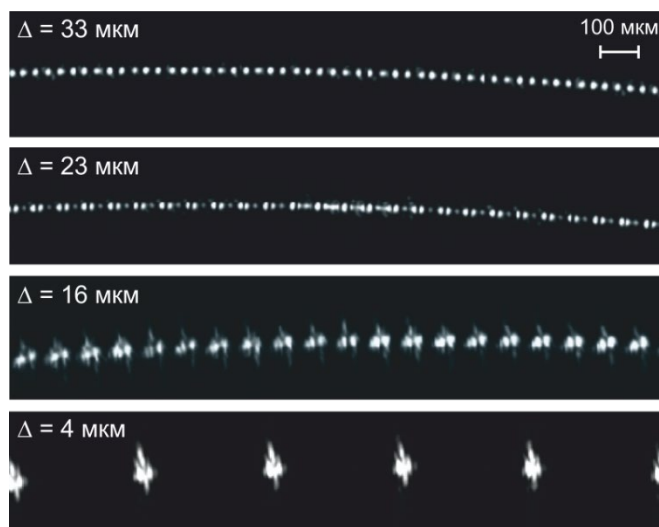


Рис. 12. Изображения световых дуг, сформированных изготовленными ДОЭ с разным шагом дискретизации Δ

При таком методе расчета также существует возможность задания некоторой неравномерности I_i при расчете ДОЭ для выравнивания яркости разных участков дуги на изображении.

Представленный метод расчета имеет ограничение, связанное с дискретизацией формируемой световой картины. С одной стороны, шаг дискретизации Δ нельзя делать слишком большим. В этом случае на контролируемом объекте будет видна прерывистая световая полоса. С другой стороны, нельзя сильно уменьшать шаг дискретизации ввиду того, что в формируемой полосе будет происходить интерференция близлежащих точек. Они начнут группироваться между собой, поэтому произойдет ухудшение разрешения в световой полосе. Этот процесс наглядно представлен на рис. 12. Приведены изображения световых дуг, сформированных ДОЭ с различным шагом дискретизации. Таким образом, существует некоторое оптимальное значение шага дискретизации Δ_{opt} . При этом для корректной работы предложенного метода контроля должно выполняться следующее условие:

$$\Delta_{opt} < R_{min} \cdot M \quad , \quad (4)$$

где R_{min} – размер минимально обнаруживаемого дефекта (разрешение); M – увеличение объектива.

Высокая производительность метода достигается за счет регистрации и обработки малоразмерных кадров изображений (750×24 пикселей), содержащих информацию о форме и глубине дефектов. Частота кадров – около 5000 в секунду. Обработка кадров с субпиксельной точностью производится в реальном времени, аппаратно в устройстве обработки камеры на базе программируемой логики. По интерфейсу USB 2.0 в промышленный компьютер передается готовая информация о глубине и амплитуде сигнала в каждой точке регистрируемого профиля поверхности. На рис. 13 приведены фрагменты результатов работы блока светового сечения.

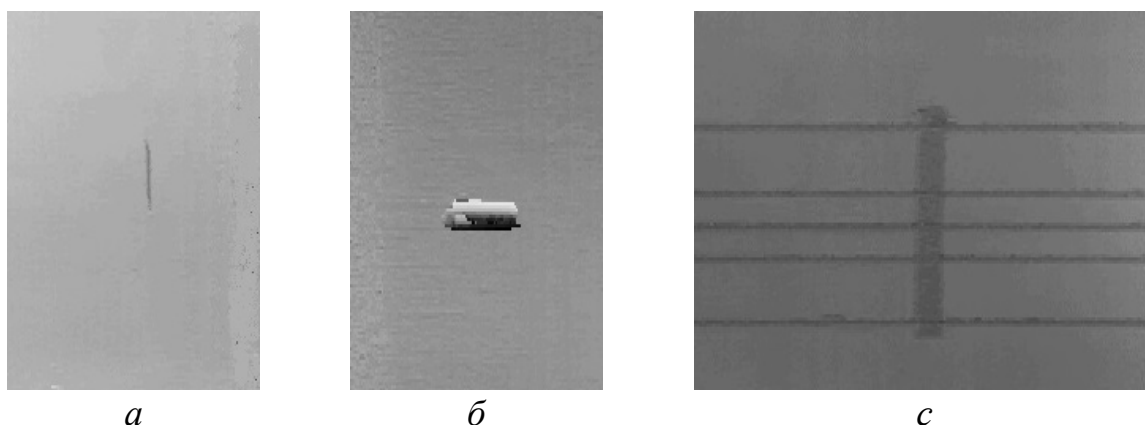


Рис. 13. Фрагменты изображений поверхности оболочек с дефектами, полученные блоком светового сечения:

а – царапина; б – глубокий накол; с – нанесенная лазером маркировка

Далее отдельные профили складываются в общую двухмерную карту поверхности трубы, по которой производится поиск участков с отклонениями высот, превышающими установленные допусковые значения. В случае обнаружения подобных участков установка передает в систему управления технологической линии сигнал «Брак» или «Условный брак» (в зависимости от указанных в базе данных требований по разбраковке дефектов). Если не зафиксировано выхода высот профиля за установленные пределы, то передается сигнал «Годен».

Заключение

Предложен и исследован ряд методов структурного освещения, использующих в качестве осветителей дифракционные оптические элементы. Применение ДОЭ, фокусирующего лазерное излучение в геометрические фигуры определенной конфигурации (кольца, дуги, линии), позволяет оптимальным образом согласовать характеристики структурного освещения с геометрией контролируемого объекта. Кроме того показано, что использование ДОЭ, изготовленных на прецизионных лазерных записывающих системах [15], позволяет существенно увеличить точность измерений. Погрешность измерения геометрических параметров может при этом достигать от 4 до 10 мкм.

На основе разработанных методов контроля на базе ДОЭ созданы и внедрены в производство ряд оптико-электронных систем: система контроля прямолинейности каналов стволов «Струна» для ОАО «Завод им. В. А. Дегтярева», системы контроля геометрических параметров дистанционирующих решеток («Решетка-Н») для ПАО «НЗХК», установка для бесконтактного контроля геометрических параметров и измерений наружных дефектов труб для АО «ЧМЗ» и ряд других.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Geng, J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial, *Adv. Opt. Photon.* – 2011. – Vol. 3(2). – P. 128–160. – DOI:10.1364/AOP.3.000128.
2. Grosse, M. Fast data acquisition for three-dimensional shape measurement using fixed-pattern projection and temporal coding / M. Grosse, M. Schaffer, B. Harendt, R. Kowarschik // *Opt. Eng.* – 2011. – Vol. 50(10). – P. 100503-1–100503-3. – DOI:10.1117/1.3646100.
3. Zhao, Y. 3D mouse shape reconstruction based on phase shifting algorithm for fluorescence molecular tomography imaging system / Y. Zhao, D. Zhu, R. Baikjiang, C. Li // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54(32). – P. 9573–9582. – DOI:10.1364/AO.54.009573.
4. Steckenrider, J. J. High-resolution moiré interferometry for quantitative low-cost, real-time surface profilometry / J. J. Steckenrider, J. S. Steckenrider // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54(28). – P. 8298–8305. – DOI:10.1364/AO.54.008298
5. Пат. 2245516 Российская Федерация, МПК7 G 01 C 11/30. Устройство контроля отверстий деталей [Текст] / Ю. В. Чугуй, Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов, В. Г. Никитин, А. Р. Саметов; заявитель и патентообладатель Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН. – № 2003110530/28; заявл. 15.04.2003; опублик. 10.10.2004, Бюл. № 3.
6. Using diffractive optical elements for industrial products geometrical parameters inspection / P. S. Zavyalov, L. V. Finogenov, E. S. Zhimuleva, M. S. Kravchenko, D. R. Khakimov, K. I. Savinov, M. V. Savchenko, A. V. Beloborodov and V. E. Karlin // *Journal of Physics:*

Conference Series. – 2018. – Vol. 1096, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012009>.

7. Соифер В. А. Методы компьютерной оптики / Ред. В. А. Соифер. – Москва: Физматлит, 2000. – 688 с.

8. Light section method of alignment control for weapon barrels / P. S. Zavyalov, D. R. Khakimov, A. A. Gushchina, A. V. Ermolenko, D. V. Skokov, V. Yu. Sartakov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2020. – V. 56, No. 4 – P. 375–385. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S8756699020040160>.

9. Пат. 2721716 Российская Федерация, МПК G01B 11/12, СПК G01B 11/12. Устройство для контроля отверстий деталей / Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов А. В. Белобородов, А. В. Ермоленко, Д. В. Скоков, Д. Р. Хакимов // заявитель и патентообладатель КТИ НП СО РАН. – № 2019117493, заявл. 05.06.2019; опубл. 21.05.2020, Бюл. № 15. – 10 с.

10. Zavyalov P. 3D Hole Inspection Using Lens with High Field Curvature / P. Zavyalov // Measurement Science Review. – 2015. – Vol. 15(1). – P. 52–57. – DOI:10.1515/msr-2015-0008.

11. Завьялов П. С. Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов / П. С. Завьялов, Ю. А. Лемешко, Л. В. Финогенов, Ю. В. Чугуй // Автометрия. – 2008. – Т.44, № 2. – С. 23–31.

12. Patent US 20140152771 A1, 05.06.2014.

13. Завьялов П. С., Карлин В. Э., Кравченко М. С., Финогенов Л. В., Хакимов Д. Р. Применение дифракционных элементов для повышения производительности систем контроля цилиндрических поверхностей // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 5. – С. 40–47. – DOI: 10.15372/AUT20170504.

14. Golub M. A., Kasanskiy N. L., Soifer V. A. et. al // Proceedings SPIE. – 1991. – V. 1500. – P. 194–206.

15. Верхогляд А. Г. Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. Е. Каличкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков // Датчики и системы. – 2015. – Т. 9–10. – С. 45–52.

© П. С. Завьялов, Д. Р. Хакимов, А. А. Гущина, А. В. Белобородов, Е. В. Власов, 2021