

УДК 006.91 + 531.7

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОТВЕРСТИЙ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.А. Зуйков  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)  
А.В. Шулепов  
(ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»)

*Рассматриваются проблемы повышения точности измерения на оптических измерительных микроскопах малогабаритных и труднодоступных элементов деталей на основе цифрового изображения зоны измерения.*

*Представлена информационно-измерительная система, разработанная на базе компьютеризированного универсального измерительного микроскопа УИМ-21, оснащённого цифровой системой обработки изображения зоны визирования. Представлены результаты исследования разработанных методик и дополнительных измерительных устройств для измерительного микроскопа, которые значительно расширяют функциональные возможности таких приборов, уменьшают погрешность измерения, позволяют применять оптические микроскопы для измерения ранее недоступных контролируемых элементов деталей.*

**Ключевые слова:** измерительный микроскоп, погрешность, дифракция, цифровая обработка изображения, оптоволоконный щуп.

Измерительные микроскопы и проекторы находят широкое применение при измерениях деталей сложной конструкции и формы, высокой точности и имеющих размеры измеряемых элементов, вплоть до микроскопических.

Достоинствами этих средств измерений являются:

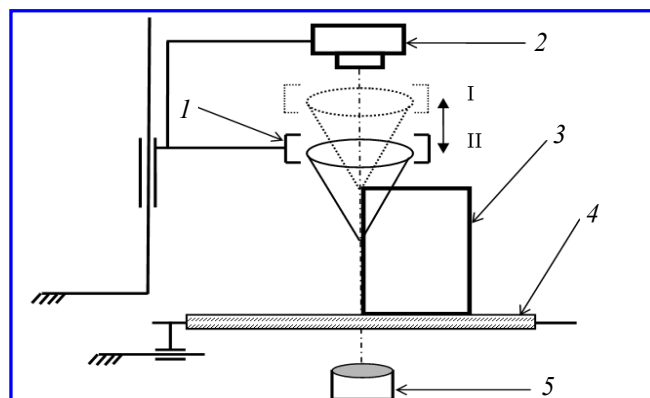
- возможность бесконтактных измерений в условиях, когда недопустимы силовые воздействия от измерительных щупов;
- простота обнаружения и измерения дефектов на поверхности объектов;
- возможность измерения малогабаритных отверстий (диаметр менее 0,01 мм), для контроля которых невозможно изготовление измерительных щупов координатно-измерительных машин (КИМ).

Компьютеризация измерительных микроскопов, оснащение их системами цифровой обработки видеоизображения зоны визирования на основе матричных (многооконых) видеосенсоров, применение эффективных методов и алгоритмов обработки информации позволяют расширить и функциональные возможности средств измерений и повысить точность измерения параметров геометрической точности деталей [1]. С этой целью для этих средств измерений разрабатываются технологии компьютерного зрения с элементами искусственного интеллекта на основе алгоритмов обучения распознаванию образов.

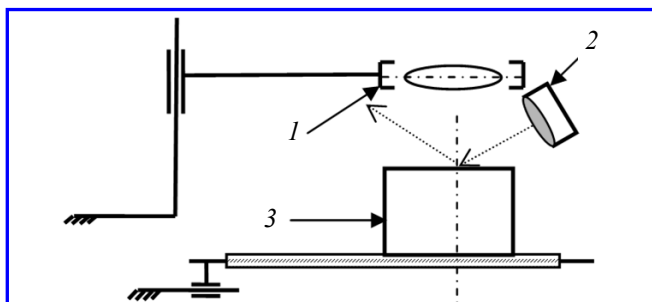
Измерение геометрических характеристик точных и малогабаритных деталей на измерительном микроскопе сопряжено с характерными для микроскопии проблемами [2].

Во-первых, при определении координат точек объекта погрешности при визировании от дифракции света на краях измеряемого объекта могут достигать значений

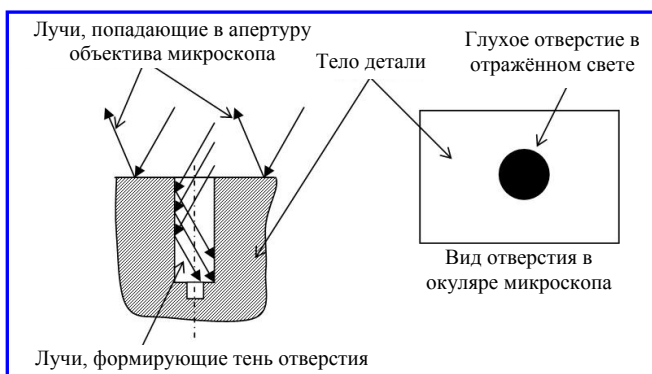
до 0,02 мм. Во-вторых, измерение на микроскопе с удовлетворительной точностью возможно только для объектов, у которых измеряемые элементы расположены в одной плоскости. Погрешности при визировании существенно зависят от состояния края и кромок объектов измерения, на которые можно точно сфокусировать оптическую систему визирного микроскопа [2]. Однако кромки деталей могут иметь нечёткие фаски, иметь произвольные скругления или повреждения. Это затрудняет фокусировку оптической системы визирного микроскопа на объекте измерения и является дополнительным источником неопределённости при измерении координат точек измеряемой поверхности. Кроме того, размер поверхности, измеренный у самого края, не всегда является действительным размером поверхности, с помощью которой деталь выполняет своё функциональное назначение.



**Рис. 1.** Визирование на различные точки измеряемой поверхности: I – визирование на краю объекта; II – визирование на среднем сечении; 1 – оптическая система; 2 – цифровая камера; 3 – объект измерения; 4 – предметный стол; 5 – осветительная система для измерения в проходящем свете



**Рис. 2. Измерение в отражённом свете:**  
 1 – оптическая система микроскопа;  
 2 – источник света; 3 – объект измерения



**Рис. 3. Особенности измерения глухого отверстия в отражённом свете**

При попытке провести измерение в сечении, расположенном ниже верхней грани объекта, изображение зоны визирования становится нечётким, размытым из-за влияния точек объекта, расположенных выше фокальной плоскости объектива (рис. 1).

При высокоточных измерениях на микроскопах используются измерительные ножи, которые позволяют уменьшить влияние на точность визирования дифракции и произвести фокусировку на выбранном сечении объекта. Однако их применение при измерении отверстий, труднодоступных и закрытых поверхностей малогабаритных деталей невозможно.

Значительные проблемы возникают при измерениях в отражённом свете отверстий, не видимых на просвет, и глухих элементов объектов измерений.

Даже самые совершенные источники подсветки с кольцевым расположением источников с компьютерным управлением лучами по направлению и углу не позволяют устранить неопределённость при визировании микроскопа на таких объектах. Например при измерении в отражённом свете глухого отверстия (рис. 2, 3), часть светового потока отражается от верхней плоскости детали и попадает в объектив, формируя освещённое изображение этой поверхности [3]. Часть светового потока попадает в глухое отверстие, многократно отражается от стенок отверстия и теряет свою интенсивность. В результате глухое отверстие наблюдается в окуляре микроскопа как чёрное поле, на котором невозможно различить конструктивные особен-

ности измеряемого отверстия, например, ступенчатое углубление на дне отверстия. Такие глухие отверстия можно рассматривать как некоторый аналог абсолютно чёрного тела, поглощающего всю световую энергию.

Учитывая все изложенные выше проблемы, была поставлена цель работы: спроектировать, изготовить и исследовать измерительную систему, позволяющую измерять геометрические параметры микроскопических отверстий и труднодоступных элементов на оптических измерительных микроскопах.

Система реализована на базе измерительного микроскопа УИМ-21. Отличительной особенностью системы является применение вспомогательного тела, которое подводится в зону измерения и выполнено в виде специального малогабаритного щупа, установленного на подводящем устройстве с возможностью регулирования положения щупа в точке фокуса оптической визирной системы (рис. 4) [3]. Стержень щупа выполнен из оптоволокна диаметром 0,25 – 0,5 мм. На конце щупа установлен сферический наконечник из оптического материала. Такой щуп может работать как при измерении в проходящем свете, так и для подачи светового потока в зону измерения в качестве излучающего дополнительного тела при измерении глухих элементов объектов в отражённом свете (режим «самосвечения» щупа).

Оптоволоконный щуп на измерительном микроскопе обладает рядом преимуществ:

- небольшим измерительным усилием (от 1 мкН);
- возможностью бесконтактных измерений с нулевым измерительным усилием;
- небольшим диаметром щупа (от 0,3 мм);
- возможностью проводить измерения в любых сечениях отверстий и поверхностей, имеющих значительную протяжённость в направлении оптической оси микроскопа, а не только по верхней кромке;
- возможностью проводить измерения наклонённых объектов;
- возможностью измерения в проходящем и отражённом свете;
- подводом света в зону измерения (измерение глухих отверстий в режиме «самосвечения» щупа).

Процедура измерения с использованием такой системы заключается в следующем:

- проводят аттестацию размера щупа;
- щуп подводится к измеряемой точке объекта в выбранном сечении;
- при касании щупа поверхности цифровая видеосистема обрабатывает изображение зоны измерения, распознает изображение щупа, вычисляет координаты центра щупа (XЦ, YЦ);
- с учётом аттестованного размера щупа определяются координаты измеряемой точки поверхности.

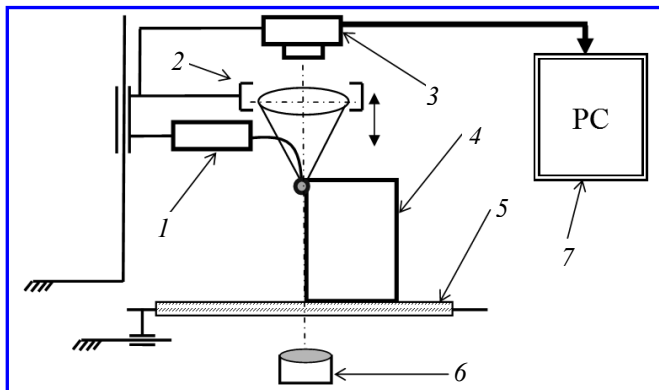


Рис. 4. Принципиальная схема предлагаемой измерительной системы: 1 – оптоволоконный шуп с системой микроподдачи; 2 – оптическая система микроскопа; 3 – цифровая видеосистема; 4 – объект измерения; 5 – прозрачный измерительный стол; 6 – подсветка; 7 – компьютер

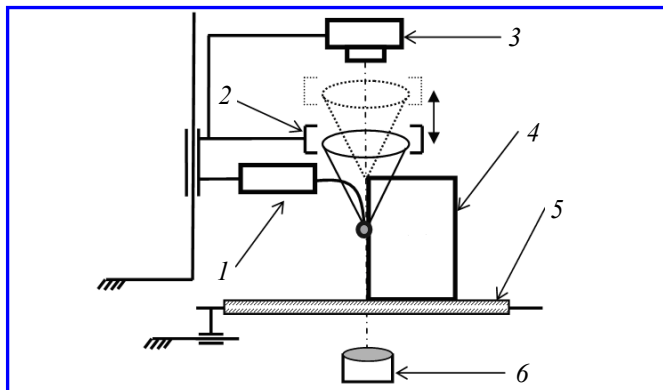


Рис. 5. Условия возникновения изображения сферы шупа в теле детали: 1 – оптоволоконный датчик; 2 – оптическая система микроскопа; 3 – цифровая видеосистема; 4 – объект измерения; 5 – прозрачный предметный стол; 6 – подсветка

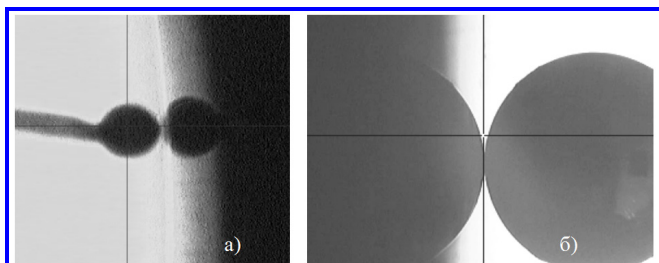


Рис. 6. Изображения шупа и отражения шупа в теле детали при измерении внутреннего диаметра точного цилиндрического отверстия: а) оптоволоконный шуп (диаметр 0,51 мм); б) металлический шуп (диаметр 1,885 мм)

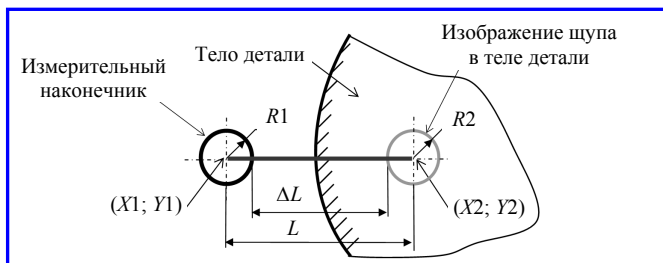


Рис. 7. Схема измерения координат точки поверхности детали при подводе шупа: R1 – радиус измерительного наконечника; R2 – радиус окружности изображения шупа в теле детали; (X1; Y1) и (X2; Y2) – координаты центров окружностей; L – расстояние между центрами окружностей; ΔL – расстояние до касания

В ходе исследования и испытания системы был обнаружен оптический эффект, который может быть использован для повышения точности визирования микроскопа на измеряемой точке поверхности в труднодоступных местах объекта измерения.

Фокальная плоскость объектива визирного микроскопа располагалась в среднем сечении измеряемого объекта. В этой же плоскости располагался сферический наконечник шупа. При подходе к измеряемой поверхности в поле зрения камеры появляется резкое изображение наконечника шупа на фоне нерезкого изображения края детали (рис. 5, 6). Такой эффект наблюдается при измерении как в проходящем свете, так и в режиме «самосвечения» шупа. Была проведена серия экспериментов, позволившая выявить особенности и условия возникновения такого оптического эффекта.

В качестве объекта измерения использовались детали и меры, изготовленные из различных материалов и имеющие различные характеристики, формы и шероховатости поверхностей. При измерении по разработанной методике стало возможным проводить визирование на сечениях, удалённых от верхней грани поверхности на 5 – 50 мм.

Установлено значительное уменьшение погрешности визирования измеряемой точки поверхности объекта. Среднее квадратичное отклонение координат при многократном наведении на поверхность объекта составило 0,4 мкм для измерения в проходящем свете и 0,8 мкм при измерениях глухих поверхностей с использованием режима «самосвечения» шупа.

Программно-математическое обеспечение реализовано с помощью технологии компьютерного зрения на базе библиотеки OpenCV, написанной на языке C++, которая поддерживает платформы Linux, Windows и MacOS. Широкий ассортимент реализованных функций позволяет решать множество различных задач, связанных с детектированием различных объектов на изображении зоны измерения.

В разработанной системе процесс измерения координат точек поверхности объекта проводится путём детектирования изображения шупа и его отражения от измеряемой поверхности на фоне изображения зоны измерения (рис. 7).

Алгоритм измерения следующий:

1. Поиск окружностей на изображении – детектирование контура сферического наконечника шупа и его отражения,

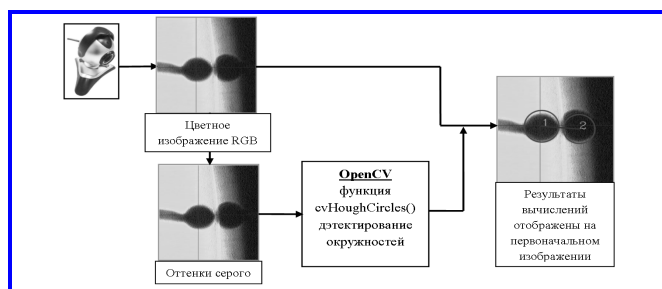


Рис. 8. Алгоритм обработки изображения

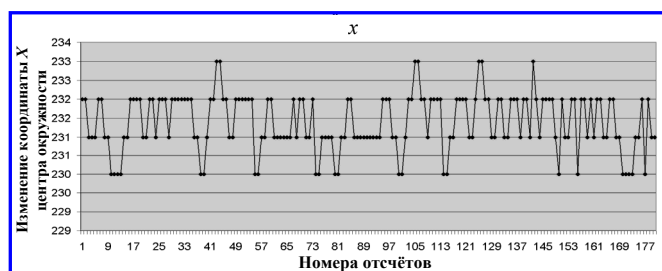


Рис. 9. Изменение координаты X центра окружности

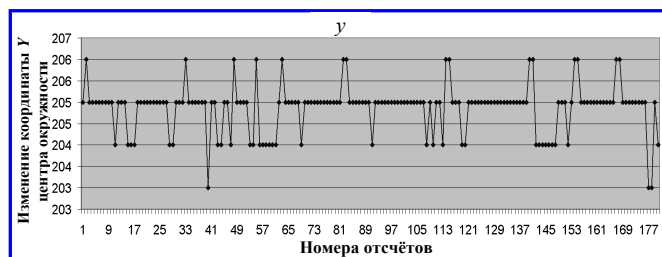


Рис. 10. Изменение координаты Y центра окружности

нахождение координат центров этих окружностей.

2. Вычисление расстояния между центрами окружностей  $L$  (рис. 7).

3. Вычисление расстояния до касания  $\Delta L = L - R1 - R2$ , при  $\Delta L$  равном нулю подвод наконечника завершается, определяются координаты точки центра щупа  $X1, Y1$ , и вычисляются координаты точки поверхности.

Нахождение контура и координат центра окружностей на изображении происходит путём использования функции поиска окружностей `cvHoughCircles()` библиотеки OpenCV [4]. Упрощённая схема алгоритма представлена на рис. 8.

Получаемое с камеры изображение является последовательностью кадров. Каждый кадр, даже если сцена в зоне измерения не изменяется, будет отличным от последующего или предыдущего. Отличие заключается в изменении интенсивности пикселей. Это может быть связано с влиянием шумов ПЗС матрицы видеокамеры, влияние внешней засветки и т. п.

Поступила в редакцию 14.12.2011

В результате изменения величины интенсивности пикселей каждого отдельно взятого кадра будут получены различные результаты детектирования контура и координат центра щупа. Указанные факторы влияют на погрешность определения координат измеряемой точки объектов.

Для исследования влияния таких шумов была проведена серия экспериментов. Были взяты результаты поиска окружности по 180 кадрам (180 результатов). Изменение координат центра окружности представлены на графиках (рис. 9 и 10).

Среднеквадратичное отклонение по координатам изображения составило  $\sigma X = 0,6872$  пикселя,  $\sigma Y = 0,5633$  пикселя. При цене одного пикселя в 2 мкм это составит в среднем 1,4 мкм по обеим координатам.

Для уменьшения влияния шумов разрабатывается процедура предварительной обработки изображения на основе дополнительной фильтрации изображения – это поможет снизить влияние шума изображения. Помимо этого уменьшение шума можно обеспечить путём подбора камеры по критерию шумности.

### Выводы

Для решения поставленной задачи – измерения малых отверстий разработана информационно-измерительная система на базе измерительного микроскопа УИМ-21.

Предложенные методики измерения и разработанная аппаратура позволяют существенно расширить функциональные возможности оптических измерительных микроскопов, уменьшить погрешность измерения деталей.

Применение дополнительного щупа на основе оптоволокну позволяет выполнять подсветку зоны измерения и проводить измерения труднодоступных поверхностей и несквозных отверстий. Разработанная система позволяет выполнять измерения в различных сечениях вдоль оптической оси визирного микроскопа.

### Литература

1. Метод интеллектуальной компьютерной микроскопии при измерении линейных и угловых размеров / В. И. Телешевский, А. В. Шулепов, Е. М. Роздина // Измерительная техника. – М., 2011. – № 8. – С. 3 – 6.
2. Компьютеризация измерительных микроскопов с цифровым анализом изображений / В. И. Телешевский, А. В. Шулепов, О. Ю. Красюк // Измерительная техника. – М., 2006. – № 8. – С. 39–42.
3. Повышение точности визирования измерительного микроскопа на основе цифровой обработки изображения / А. А. Зуйков, А. В. Шулепов // Машинстроение – традиции и инновации (МТИ-2011). – М., 2011. – С. 153 – 156.
4. Gary Bradski, Adrian Kaehler Learning OpenCV. – 2008.

Андрей Андреевич Зуйков, аспирант, инженер,  
т. (903) 283-02-94, e-mail: dvoetut@mail.ru.

Алексей Валентинович Шулепов, канд. техн. наук, доцент,  
т. (916) 439-05-24, e-mail: avshul@yandex.ru.