

Повышение точности измерений линейно-угловых размеров изделий в интеллектуальной компьютерной микроскопии

Increase of accuracy of measurements of the linearly-angular sizes of products in intellectual computer microscopy

Рассмотрены проблемы компьютеризации и интеллектуализации универсальных и инструментальных измерительных микроскопов. Предложены методы повышения точности наведения на края объектов, имеющих призматическую и цилиндрическую формы, на основе решений обратных задач математической оптики. Применение разработанных алгоритмов позволяет проводить измерения призматических и цилиндрических деталей с высокой точностью без использования измерительных ножей.

Problems of a computerization and intellectualization of universal and tool measuring microscopes are considered. Methods to increase the accuracy of prompting on edges of the objects having prismatic and cylindrical forms, on the basis of decisions of inverse problem of mathematical optics are offered. Application of the developed algorithms allows to measure prismatic and cylindrical objects with micron accuracy without use of measuring knives.

Ключевые слова: микроскоп, компьютеризация, дифракция, ретрофитинг.

Key words: microscope, computerization, diffraction, retrofitting.

Инструментальные и универсальные измерительные микроскопы принадлежат к числу наиболее распространенных оптико-механических приборов в измерительных лабораториях машино-, приборостроительных предприятий и научно-исследовательских институтов [1].

При помощи измерительных микроскопов решаются разнообразные задачи измерения линейно-угловых размеров деталей различной конфигурации, контрольных и технологических приспособлений, точного режущего инструмента, изделий опто- и микроэлектроники, средств измерений (калибров, шаблонов, линейных и круговых шкал и др.).

В основу принципа работы измерительного микроскопа положен метод визирования оптической системы на точку теневого изображения края объекта измерения, наблюдаемого под большим увеличением. При каждом визировании фиксируют положение точки в прямоугольных или полярных координатах по микровинтам у инструментального и по отсчетным устройствам у универсального микроскопа. Затем по совокупности измеренных координат расчетным методом определяют геометрические параметры объекта.

Зачастую измерения геометрических параметров изделий призматической и цилиндрической формы, резьбовой поверхности необходимо проводить с высокой точностью [1]. При этом необходима высокая квалификация контролеров и специалистов измерительных лабораторий. Резкое увеличение объема точек при измерениях изделий сложной формы приводит к быстрой утомляемости персонала при визировании, фиксации координат и обработке результатов измерения, к потере зрения и снижению производи-

тельности труда. В большинстве отечественных измерительных микроскопов визирование на край объекта и отсчет координатных перемещений стола оператор проводит визуально, поэтому при измерениях неизбежно возникают погрешности из-за субъективных ошибок контролеров.

На точность визирования также влияют шероховатость поверхности и четкость контуров объекта или штрихов шкалы, качество оптики и сетки визирного микроскопа, освещение объекта. Основной вклад в погрешность измерений вносит дифракционное размытие изображения края объекта.

Для повышения точности визирования применяют измерительные ножи в сочетании со штриховой сеткой окулярной головки микроскопа [1]. Стоит отметить, что ножи быстро изнашиваются, требуют индивидуальной и трудоемкой настройки и их применение в ряде случаев невозможно.

Также для повышения чувствительности наведения применяют приспособление ИЗО-2 в сочетании с окулярной головкой двойного изображения и оптико-электронные щупы на базе перффлектометра.

Полная компьютеризация измерительного микроскопа за счет автоматизации отсчета, наведения оптической системы и создания программно-математического обеспечения, осуществляющего анализ теневого изображения объекта с применением различных алгоритмов и автоматизацию обработки результатов измерений, позволяет избежать применения зачастую недоступных приспособлений.

Автоматизация отсчета базируется на замене традиционных шкальных систем с визуальным визированием на автоматизированные отсчетные устройства (оптоэлектронные измерительные системы с растро-

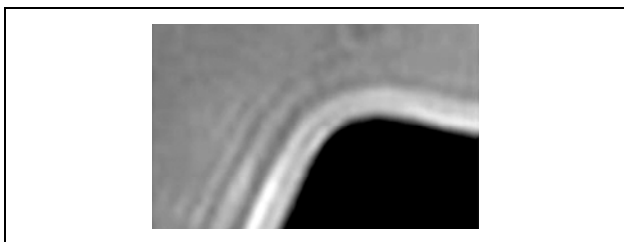


Рис. 1. Дифракция на режущей кромке резца

выми или дифракционными решетками, лазерные интерферометры). Автоматизация наведения оптической системы предполагает установку видеокамеры в визирную оптическую систему, с подключением ее к компьютеру для анализа и цифровой обработки изображения в реальном времени.

Компьютерная обработка результатов измерения по отсчетным устройствам позволяет учесть геометрические погрешности узлов микроскопа, такие как несоблюдение принципа Аббе, перекосы направляющих и тд. Они легко учитываются при аттестации и поверке измерительных микроскопов и вводятся как автоматические поправки в результат измерения.

Однако при визуальном визировании на край объекта, имеет место источник погрешности, не устраняемый при аттестации и многократных измерениях. Речь идет о явлении дифракции на краю измеряемого объекта (рис. 1), которая в случае микроскопа имеет вид дифракции Френеля [2, 3]. Эта погрешность целиком передается в результат измерения и ограничивает его точность.

В данной работе предлагается методика, снижающая неопределенность визирования точки на краю измеряемого объекта без использования измерительных ножей, описанная в [4], применительно как к призматическим, так и гладким цилиндрическим деталям.

Основные принципы построения интеллектуальной измерительной системы (ИИС), преимущества, характеристики и возможности компьютеризированного микроскопа подробно рассмотрены в более ранних публикациях [4, 5].

На дисплее возможно получить изображение измеряемой зоны объекта с выбранным увеличением и визирной марки (перекрестия) (Рис. 2). Специальный алгоритм осуществляет анализ изображения дифрак-

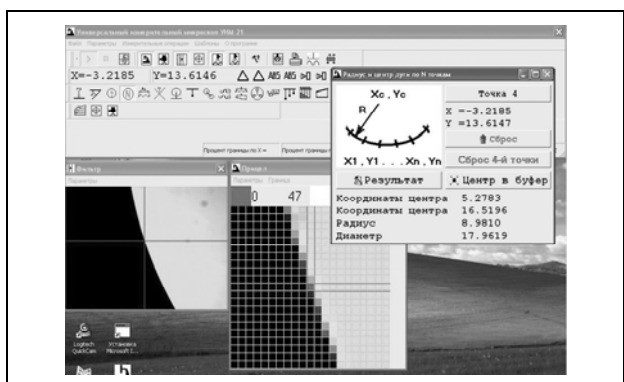


Рис. 2. Отображение процесса измерения на мониторе компьютера

ции Френеля на краю объекта и исследует распределение интенсивности света во френелевской дифракционной картине. Алгоритмически решается обратная задача математической оптики, заключающаяся в том, что по характеру распределения интенсивности определяется положение края объекта, породившее это распределение. Определяются координаты элементов цифрового изображения, отвечающие условиям нахождения на крае. Визирование выполняется в специальном окне путем захвата в перекрестии отмеченных элементов изображения, принадлежащих краю объекта.

Экспериментально полученные распределения интенсивности (рис. 3) по форме близки к идеальному распределению, но, как правило, интерференционные полосы, расположенные вдоль границы могут быть неявно выражены. Чаще всего наблюдается одна черная и одна светлая полоса.

В соответствии с классическим видом отклика оптической системы [2,3] необходимо определить уровень интенсивности, соответствующий затуханию осцилляций, что представляет собой сложную задачу в реальном случае. В этой связи нахождение уровня I_0 , к которому «сходится» осцилляция, вызывает значительную погрешность.

На основе анализа задачи, описывающей дифракцию на краю полуплоскости [2], найдено решение, которое заключается в том, что интенсивность первой, самой яркой полосы составляет 1,37 от установившегося значения. Эта полоса для рассматриваемых объектов всегда явно просматривается и легко может быть различима в зоне измерения. Обработка с помощью программно-математического обеспечения позволяет найти первый максимум интенсивности.

Принимая, что на границе тени $I = 0,25 I_0$, а для первого максимума $I/I_0 = 1,37$, можно найти такие элементы изображения в зоне визирования, интенсивность которых соответствует их нахождению на краю объекта. Но, к сожалению, далеко не всегда вычисленное значение совпадает со значениями интенсивности I , представленными в текущий момент в изображении зоны визирования. Поэтому целесообразно задать интенсивность интервалом значений. Затем необходимо найти элементы изображения (пиксели), удовлетворяющие условию попадания в интервал.

Алгоритм нахождения положения границы объекта сводится к следующему:

1. На видеокамеру попадает изображение края объекта, где происходит его оцифровка. Получается матрица целых чисел от 0 до 255 (256 градаций серого цвета), каждое из которых соответствует интенсивности в данной точке изображения.

2. Среди элементов матрицы отыскиваются наиболее яркие и самые темные. Затем элемент с наибольшей яркостью принимают за $1,37$ от установившегося значения I_0 , а с наименьшей яркостью – за 0 от I_0 .

3. Далее вычисляется значение, соответствующее $0,25 I_0$ и отыскиваются элементы матрицы, близкие к этому значению. Эти элементы выделяются. Для осуществления визирования перекрестие совмещают с выделенными элементами изображения.

4. Исследования, проведенные для призматических деталей с краем различной протяженности в направлении оптической оси, показали в целом сходный характер распределения интенсивности света в дифракционной картине, наблюдаемой на теневой границе изображения.

5. При измерении объектов с малой протяженностью края погрешность наведения на край одинакова и не имеет существенного отличия, при измерении же объектов с большой протяженностью края возрастает погрешность, прежде всего связанная с неперпендикулярностью боковых поверхностей объектов и погрешностью базирования, а также с уменьшением интенсивности света, попадающего в объектив. Для объектов с большой протяженностью края наблюдается распределение интенсивности, характерное для некогерентного освещения и первый максимум является невыраженным и близок к установившемуся значению.

Применение данного алгоритма для призматических деталей позволило бесконтактно проводить измерения с микронной точностью. Например, при измерении размеров деталей с протяженностью края 0,02 мм применение данного алгоритма позволило снизить погрешность определения координат края до 0,6 мкм.

Предварительные экспериментальные исследования для объектов цилиндрической формы показали сходный характер отклика на такие объекты, но погрешность измерения цилиндров превышает погрешность измерения призматических деталей.

Существуют строгие решения задачи дифракции на цилиндре, но они чрезвычайно сложны и малоприменимы для инженерного использования. В работе [6] проведено исследование упрощенной модели формирования дифракционной картины Френеля от кругового отражающего цилиндра на базе представлений Фурье-оптики в рамках теории Гюйгенса-Киргофа.

Согласно [6] формируемое объектом дифракционное поле представляется как результат суперпозиции отраженной волны от цилиндрической поверхности и прошедшей волны, дифрагированной краем цилиндра (модель тонкого экрана). При малых углах дифракции и на расстоянии $z \gg 10\lambda$ от диаметральной плоскости цилиндра полное дифракционное поле имеет вид:

$$E = e^{ikz} \left(\tilde{Y}(x) - \frac{\sqrt{Rx}}{2z} \exp \left\{ ik \left(\frac{x^2}{2z} - \frac{Rx^3}{8z^3} \right) \right\} \right) \quad (1)$$

где $\tilde{Y}(x)$ - френелевский образ ступенчатой функции Хевисайда, R - радиус цилиндра, k - волновое число.

Первый член формулы (1) описывает дифракцию проходящей волны на краю объекта, а второй - поле волны, отраженной от поверхности цилиндра.

Используя аппроксимацию френелевского образа функции Хевисайда

$$\tilde{Y}(x) \approx Y(x) - \frac{b \exp \{ ikx^2/2z \}}{2(|x|+b)} \text{sign}(x),$$

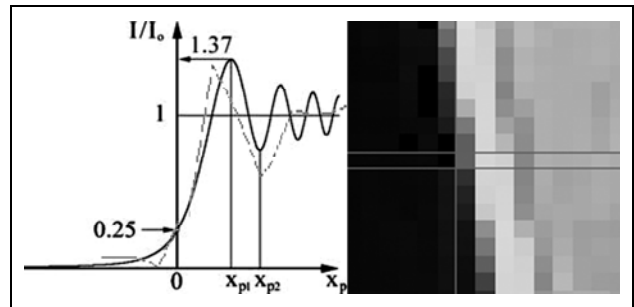


Рис. 3. Распределение интенсивности света во френелевской дифракционной картине: сплошная кривая - теоретическое распределение для бесконечно тонкой полуплоскости; штриховая линия - наблюдаемое распределение на краях измеряемых деталей.

где $b = \sqrt{i\lambda z}/\lambda$, $2 \leq \gamma \leq \pi$, $\text{sign}(x)$ - знаковая функция, получено распределение интенсивности дифракционной картины от края отражающего цилиндра:

$$I(x) \approx 1 + p^2 - 2p \cos(\phi_1) - 2p \cos(\phi_2) + pq \cos(\phi_2 - \phi_1)$$

$$\text{где } p = 0.5 \left[\frac{\pi^2}{\lambda z} x^2 + \pi \sqrt{\frac{2}{\lambda z}} x + 1 \right]^{-0.5},$$

$$q = \frac{\sqrt{Rx}}{2z}, \quad (2)$$

$$\phi_1 = \frac{\pi x^2}{\lambda z} + \text{arctg} \left(\left[1 + \frac{\sqrt{2\lambda z}}{\pi x} \right]^{-1} \right),$$

$$\phi_2 = \frac{\pi x^2}{\lambda z} - \frac{\pi Rx^3}{4\lambda z^3}.$$

Математическое моделирование распределения интенсивностей дифракционной картины для отражающего и черного цилиндров позволило сделать вывод [6]: в большинстве случаев детали имеют отражающую поверхность, что приводит к смещению дифракционных максимумов и минимумов и увеличению их контраста в дифракционной картине Френеля.

Результаты, рассчитанные по формуле (2), совпадают с экспериментом, обнаруживая, например, для $\lambda=0,65$ мкм, $z=20$ мм, $R=20$ мм смещение первого максимума интенсивности порядка 2,3 мкм.

Таким образом, имеет место возрастание погрешности для цилиндрических деталей, измеренных с помощью алгоритма для призматических, но сходный характер отклика на эти объекты позволяет дать оценку поправке, снижающей неопределенность положения границ объектов цилиндрической формы и учитывающей форму объекта, степень отражения поверхности, шероховатость поверхности, размер диафрагмы.

Поправка на действительное значение диаметра измеряемого цилиндра составляет $\Delta = \Delta_{iu} + \Delta_{оиаф}$, где Δ_{iu} - поправка на шероховатость поверхности

объекта, $\Delta_{\text{диаф}}$ - поправка на размер диафрагмы. Тогда действительный диаметр измеряемого цилиндра $D_0 \approx D_{\text{изм}} + \Delta$, где $D_{\text{изм}}$ - диаметр цилиндра, измеренный по алгоритму для призматических деталей.

Таким образом, алгоритм измерения цилиндрических деталей сводится к применению алгоритма для призматических деталей с учетом поправки на форму объекта, степень отражения и шероховатость поверхности.

При вводе таких поправок, в экспериментах значения диаметров цилиндров, предварительно измеренных при помощи ножей, были близки в пределах долей микрометра к диаметрам тех же цилиндров, измеренных бесконтактно.

Результаты исследований, направленных на выявление поправок для каждого выбранного диапазона диаметров, степени отражения поверхности и обработки деталей, предполагается отразить в последующих работах авторов.

Выводы

1. При измерении положения края, эффективна классическая модель дифракции Френеля на полубесконечном непрозрачном экране, и алгоритм определения края, построенный на основе этой модели, обеспечивает достаточно высокую точность при протяженностях края изделия в направлении оптической оси до нескольких десятков миллиметров.

2. При определении границы края цилиндрических деталей, необходимо введение поправки, зависящей от диаметра, шероховатости поверхности, размера диафрагмы, оптических характеристик освещения. В этом случае положение края определяется как суперпозиция двух решений: строгого классического решения дифракции Френеля на полубесконечном непрозрачном экране и соответствующей поправки.

3. При точном определении поправки, точность определения границы существенно возрастает без измерительных ножей бесконтактно.

4. Результаты исследований могут быть использованы как при разработке новых интеллектуальных измерительных систем, так и при модернизации (ретрофитинге) действующего парка измерительных микроскопов.

5. Опытный образец ИИС был создан на базе универсального измерительного микроскопа УИМ-21 на кафедре ИИСиТ ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», внедрен на ряде ведущих предприятий авиационно-космической, нефтегазовой и других отраслей промышленности.

Библиографический список

1. Телешевский В.И., Григорьев С.Н. Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. №7. С.3-7.
2. Ражев А.М., Клишкин В.Ф., Кубарев В.В. и др.. Дифракция света: сборник лабораторных работ по физической оптике. Ч.1. : учеб. пособие / Под ред. А.М. Ражева. - Новосибирск: Изд - во НГУ, 2009.
3. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. - М.: Мир, 1970.
4. Телешевский В. И., Шулепов А.В., Красюк О.Ю. Компьютеризация измерительных микроскопов с цифровым анализом изображений // Измерительная техника. 2006. №8. с. 39-42.
5. Шулепов А.В., Роздина Е.М., Есин А.П. Повышение точности визирования измерительного микроскопа на основе цифровой обработки изображений // Сборник материалов 10-й Всероссийской научно-технической конференции "Состояние и проблемы измерений", - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2008. с. 67-68.
6. Лемешко Ю.А., Чугуй Ю.В., Яровая А.К. Прецизионный размерный контроль диаметров круговых отражающих цилиндров // Автометрия. 2007. Т. 43. № 3. С. 112-121.

Телешевский Владимир Ильич - доктор технических наук, профессор кафедры ИИСиТ МГТУ «СТАНКИН»
Тел.: 8 (499) 972-94-65

Шулепов Алексей Виленинович - кандидат технических наук, доцент кафедры ИИСиТ МГТУ «СТАНКИН»
Тел.: 8 (499) 972-94-65

Роздина Елена Максимовна – магистр техники и технологии, аспирант кафедры ИИСиТ МГТУ «СТАНКИН»
Тел.: 8 (499) 972-94-65 / 972-94-64; 8 (926) 610-53-54
E-mail: l-e-n-o-k@yandex.ru

Teleshevsky Vladimir Ilyich - Doctor in Science, Ph.D., Professor of the sub-department of «Measuring information systems and technologies», MSTU «STANKIN»
Tel.: +7 (499) 972-94-65 / 972-94-64

Shulepov Alexey Vileninovich - Ph.D., Associate Professor of the sub-department of «Measuring information systems and technologies», MSTU «STANKIN»
Tel.: +7 (499) 972-94-65 / 972-94-64

Rozdina Elena Maximovna – MA, post-graduate student of the sub-department of «Measuring information systems and technologies», MSTU «STANKIN»
Tel.: +7 (499) 972-94-65 / 972-94-64; +7 (926) 610-53-54
E-mail: l-e-n-o-k@yandex.ru