

## Автоматизация измерений параметров шероховатости

С. Е. ПЕДЬ, П. В. ДРУЖИНИН

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Россия, e-mail: seped@mail.ru

*Приведены результаты проектирования аппаратно-программного комплекса на базе прибора светового сечения для автоматизированных измерений параметров шероховатости. Представлены конструктивные решения комплекса, исследованы метрологические характеристики и особенности программно-математического обеспечения.*

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, приборы светового сечения, аппаратно-программный комплекс, специальное программное обеспечение.

*The results of work on design of hardware and software complex based on light section instrument for automated measurements of roughness parameters have been presented. The construction solutions the features of software-mathematical assurance and the results of metrological characteristics study are considered.*

**Key words:** surface roughness, devices light section, hardware and software complex, special software.

Шероховатость, которая образуется на поверхности детали при любом способе обработки, является одним из показателей точности геометрической формы и существенно влияет на эксплуатационные характеристики деталей [1—4].

В настоящее время для измерений параметров шероховатости поверхности в машино- и приборостроении, в основном, используют щуповой (контактный) и оптический (бесконтактный) методы. К достоинствам последнего относят отсутствие механического (разрушающего) контакта с контролируемой поверхностью и достаточно высокая точность. Однако необходимость обработки изображения измеряемой поверхности для получения параметров шероховатости по стандарту [5] требует квалифицированных специалистов (операторов). Поэтому актуальны снижение трудоемкости процедуры измерений и повышение информативности оптических приборов при сохранении или улучшении их метрологических характеристик.

В данной статье рассмотрен аппаратно-программный комплекс на базе одного из оптических приборов для измерений параметров шероховатости поверхности — прибора светового сечения МИС-11. Принцип его действия основан на получении изображения профиля поверхности с помощью лучей, направленных наклонно к поверхности. Прибор состоит из осветительного и измерительного микроскопов, расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу в вертикальной плоскости и наклоненных к предметному столику под углом  $45^\circ$ . В поле зрения измерительного микроскопа наблюдается световая полоса с изломами, соответствующими профилю исследуемой поверхности в определенном масштабе. Для получения различных коэффициентов увеличения, а следовательно, для изменения диапазона измерений характеристик микронеровностей, применен набор из четырех парных объективов, установленных в микроскопы. Значения геометрических параметров микронеровностей отсчитывают по шкале окулярного винтового микрометра МОВ-1-15, установленного на микроскопе, с учетом выбранного коэффициента увеличения.

Прибор МИС-11 позволяет измерять параметры средних неровностей ( $R_z$ ,  $R_{\max}$  в диапазоне 0,5—40 мкм и  $S$ ,  $S_m$  в диапазоне 0,002—2,5 мм), наиболее распространенных в современном машиностроении. Анализ алгоритма работы МИС-11 показал, что его полной автоматизации добиться невозможно. При настройке и измерении контролируемая поверхность должна располагаться определенным образом относительно плоскости оптических осей прибора, что можно обеспечить лишь регулировкой вручную. Кроме того, за выбор участка контролируемой поверхности также отвечает оператор. Поэтому основными задачами разрабатываемого комплекса при обеспечении требуемой точности и удобства эксплуатации являются:

автоматическое запоминание, а затем преобразование изображения в поле зрения микроскопа в функцию, описывающую профиль микронеровностей, создавший это изображение;

обработка полученной функциональной зависимости и вычисление параметров шероховатости, нормируемых стандартами.

**Структурная схема комплекса.** Для решения поставленных задач предложена следующая схема. Тубус измерительного микроскопа снабжен согласующей оптической насадкой с устройством, регистрирующим изображение в поле зрения окуляра микроскопа и преобразующим его в электрический цифровой сигнал, передаваемый в ПЭВМ по стандартному интерфейсу. Обычно подключение осуществляется по универсальному последовательному порту (USB). В настоящее время устройства регистрации изображения и сопряжения объединяются в одно. Сигнал, содержащий информацию об изображении, обрабатывается с помощью специального программного обеспечения (ПО), промежуточные и окончательные результаты (текущее изображение и вычисленные параметры) отображаются на мониторе. В задачу ПЭВМ также входит управление устройствами сопряжения и регистрации как цифровыми устройствами информационно-измерительной системы, а также их питание.

В современных устройствах регистрации изображений реализован матричный принцип: чувствительные элементы расположены в определенной последовательности и образуют естественную систему координат, в которой происходят измерения [6, 7]. В этом случае измерения выполняют в пикселах, соответствующих чувствительным элементам устройства регистрации, а коэффициенты горизонтального  $K_r$  и вертикального  $K_b$  увеличений определяют по формулам

$$K_r = N/l; K_b = \sqrt{2} K_r,$$

где  $l$  — измеряемая длина, воспроизводимая шкалой объект-микрометра;  $N$  — число пикселей, соответствующих длине  $l$  в поле зрения устройства регистрации изображения.

В настоящее время в качестве простых и недорогих устройств регистрации изображений широко используют цифровые камеры [8—12], подключенные к ПЭВМ. Камеру выбирают таким образом, чтобы разрешающая способность комплекса не снизилась по сравнению с МИС-11. При ненапряженном наблюдении средняя острота зрения человеческого глаза составляет  $2'$ . Для этого значения и всех парных объективов, устанавливаемых в микроскопы, были проведены расчеты, показавшие, что разрешение у цифровой камеры должно быть не менее 1212 пикс. В рассматриваемом комплексе применена цифровая камера-окуляр DCM800 (Scopetek, Китай), специально предназначенная для регистрации изображений в оптических приборах, в первую очередь в микроскопах [13].

#### Характеристики цифровой камеры-окуляра DCM800

|                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Чувствительный элемент            | 8000000 пикс., 1/2,5" CMOS |
| Максимальное разрешение (в покое) | 3264×2448 пикс.            |
| Размер пиксела                    | 1,75×1,75 мкм              |
| Диаметр поля зрения               | 18 мм                      |
| Чувствительность                  | 1,3 В/(лк·с)               |
| Спектральный диапазон             | 400—650 нм                 |
| Тип выхода                        | USB2.0, 480 Мбит/с         |
| Габаритные размеры                | Ø 60×100 мм                |

**Программное обеспечение комплекса.** В основу ПО положена блочно-модульная структура, при которой последовательно вызываются блоки, соответствующие частным задачам и схеме работы, что очень схоже с работой МИС-11 в режиме фотографиярования. Поэтому при разработке ПО применен алгоритм, представленный на рисунке. В качестве исходных данных, которые оператор задает вручную, используется информация об ожидаемой чистоте поверхности и используемых объективах или известный коэффициент  $K_r$ . Знание ориентировочной чистоты поверхности позволяет задать базовую длину и число исследуемых базовых длин для определения параметров шероховатости. При этом пользователь может вводить вид обработки или диапазон значений этих параметров ( $R_a$  или  $R_z$ ), определенных приближенно, например, визуальным методом. При работе с комплексом должна быть предусмотрена калибровка (определение коэффициентов  $K_r$ ,  $K_b$ ), так как возможно применение сменных объективов. При этом калибровка обязательна при непрерывной работе прибора. Для нахождения указанных коэффициентов принимается следующая страте-

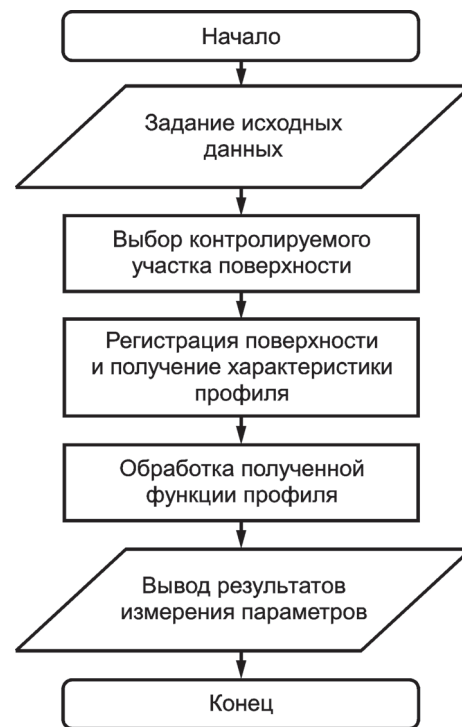


Схема работы ПО комплекса

гия. Определение  $K_r$  происходит либо с помощью объект-микрометра, либо по номинальному увеличению с использованием выбранного объектива. При многократных измерениях параметров сходных поверхностей коэффициент  $K_r$  не изменяется, поэтому необходимо сохранение его значения в файле данных для дальнейшего использования.

Контролируемый участок поверхности выбирают путем вывода на монитор изображения, находящегося в поле зрения объектива. Это требуется для исключения влияния на результаты измерений локальных непредвиденных дефектов поверхности (сколов, раковин, пор, царапин).

Важнейшие функции разработанного ПО — регистрация поверхности (захват видеоизображения в поле зрения объектива, запоминание его на базовой длине, распознавание точек границы светотени для верхней и (или) нижней линии кромки щели, запоминание координат точек с последующим переводом пикселей в единицы длины — миллиметры) и получение характеристик профиля.

В процессе захвата изображения, применив специальные функции среды программирования, его помещают в двумерный массив  $A(i, j)$ , где  $i, j$  — индексы, совпадающие с номером пиксела по горизонтали и вертикали, соответственно;  $A$  — число, показывающее яркость в данной точке, в пределах 0—255. Диапазон значений  $i, j$  зависит от выбранного разрешения устройства регистрации.

Вследствие использования объективов с различным увеличением и отклонений параметров оптической схемы комплекса изображение во входном зрачке микроскопа проектируется не на всю чувствительную поверхность регистратора. Поэтому полезная область изображения занимает лишь часть поля зрения, а область, не содержащая полезной информации, должна быть вырезана. При этом точное опре-

деление границ полезной области не требуется, так как изображение будет подвергаться дальнейшей обработке.

Размеры полезной области находят по минимальным и максимальным значениям вертикальной и горизонтальной координат, яркость  $I(x, y)$  которых больше порогового значения  $I_{\text{п}}$ . На основании проведенного экспериментального исследования получено значение  $I_{\text{п}} \approx 40$ . В качестве базового метода нахождения минимальных и максимальных значений координат выбран метод последовательного перебора вариантов. Для ускорения процесса вычислений предложено выполнять поиск границ не в каждой строке (столбце), а с некоторым шагом, например 10 пикс. После нахождения границ полезной области из массива  $A(x, y)$  исключаются элементы, не несущие информацию.

Профиль поверхности определяют по верхней и нижней границам изображения щели в два этапа. На предварительном этапе границу находят, задавая некоторое значение  $I_0$ . Дело в том, что из-за погрешностей оптической системы, ее настройки и дифракционных эффектов, граница получается размытой. Для ряда задач (например, дифракции на краю полуплоскости) значение  $I_0$  можно получить теоретически, однако оно будет сильно зависеть от отражающей способности материалов, неравномерности освещения щели и микронеровностей границы. Поэтому значения  $I_0$  отличаются даже для одной поверхности в достаточно широких пределах. Однако данный способ распознавания границы весьма прост и позволяет быстро выявить положение края. Для уточнения границы используют то обстоятельство, что в ее окрестности производная от яркости достигает максимума. Следовательно, можно ассоциировать положение границы с координатой точки максимума производной. Допускаемая при этом погрешность сопоставима с размером пиксела и носит систематический характер. Чтобы понизить влияние шумов при оцифровке изображения и паразитной засветки, производную функции яркости следует вычислять по наибольшей окрестности точек, используя стандартные разностные схемы. В разработанном ПО производную находят по четырем точкам с применением многочленов наилучшего среднего квадратического приближения.

В результате обработки полученной функции профиля существующими стандартными методами для профилограмм получают значения стандартных параметров шероховатости исследуемой поверхности.

Работа ПО завершается выводом результатов измерений параметров шероховатости на монитор и формированием файла данных для хранения и дальнейшего использования. При создании ПО в среде Borland Delphi использовали стандартные библиотеки работы с видеоустройствами, файлами данных и математической библиотеки [14]. При разработке ПО число глобальных переменных было сведено к минимально возможному, а промежуточные результаты передавали либо через них, либо через файлы промежуточных данных, формируемых в процессе работы.

Интерфейс программы — набор функциональных окон, обеспечивающих диалог оператора с пользователем. Переход между окнами осуществляется нажатием соответствующих кнопок по указанию пользователя при выполнении необходимых действий. Между закрытием текущего окна и появлением следующего решается частная задача, определенная схемой работы ПО.

Исследование погрешности комплекса проводили, сравнивая результаты измерений параметров шероховатости од-

ной и той же поверхности, полученные с использованием разработанного комплекса и эталонного средства измерений, в качестве которого использовали профилограф Talysurf mod.120 с вертикальным и горизонтальным увеличениями 1000 и 100 $\times$ , соответственно. Результаты измерений некоторых параметров шероховатости образцовой детали приведены в таблице.

Результаты исследования точности комплекса

| Параметр шероховатости | Средство измерений     |           | Относительная погрешность, % |
|------------------------|------------------------|-----------|------------------------------|
|                        | разработанный комплекс | эталонное |                              |
| $R_a$ , мкм            | 8,5                    | 8,1       | 4,9                          |
| $R_z$ , мкм            | 37,9                   | 36,2      | 4,7                          |
| $R_{3z}$ , мкм         | 37,8                   | 36,0      | 5,0                          |
| $R_q$ , мкм            | 9,6                    | 9,1       | 5,5                          |
| $R_{\text{max}}$ , мкм | 40,4                   | 39,0      | 3,0                          |
| $S$ , мм               | 725,0                  | 718,0     | 1,0                          |
| $S_m$ , мм             | 384,0                  | 379,0     | 1,3                          |
| $t_{25}$ , %           | 21,0                   | 24,0      | -12,5                        |
| $t_{50}$ , %           | 52,7                   | 52,0      | 1,3                          |
| $t_{75}$ , %           | 82,9                   | 82,0      | 1,1                          |

Анализ данных показал, что погрешность измерений параметров шероховатости с использованием разработанного комплекса не превышает значений, указанных в [15]. Отклонения результатов от эталонных связаны со значительной размытостью границы в областях впадин (эффект недоощупывания), что приводит к существенному снижению контраста изображения.

**Выводы.** Разработанный комплекс позволяет расширить функциональные возможности приборов светового сечения и повысить точность измерений параметров шероховатости путем устранения субъективных погрешностей, вносимых оператором, так как снижается утомляемость оператора благодаря дистанционному наблюдению измеряемой поверхности на мониторе компьютера и автоматизации обработки результатов измерений. Производительность повышается в два-три раза, выполняется компьютерное документирование и архивирование результатов измерений с возможной их последующей передачей в локальную компьютерную сеть предприятия.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (государственное задание № 9.2545.2014/К, соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004).

## Л и т е р а т у р а

1. Емельянов П. Н., Черкасова Н. Ю. Исследование точности обработки при сверлении // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 4. С. 31—33.
2. Григорьев С. Н., Телешевский В. И., Глубоков А. В., Педь С. Е., Глубокова С. В. Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 27—29.

3. Григорьев С. Н., Мастеренко Д. А., Телешевский В. И., Емельянов П. Н. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56—59.

4. Григорьев С. Н., Телешевский В. И. Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 3—7.

5. ГОСТ 2789—73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

6. Григорьев С. Н., Кутин А. А., Долгов В. А. Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 4. С. 10—15.

7. Клевалин В. А., Поливанов А. Ю., Шатунов К. В. Повышение точности систем технического зрения промышленных роботов за счет калибровки приемника изображения // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2013. № 1. С. 34—37.

8. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Роздина Е. М. Метод интеллектуальной компьютерной микроскопии при измерении линейных и угловых размеров изделий // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 3—6.

9. Латонов И. В., Шулепов А. В. Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по ее цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2013. № 1. С. 141—145.

10. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Роздина Е. М. Методы повышения точности универсальных и инструментальных компьютерных измерительных микроскопов // Технология машиностроения. 2012. № 1. С. 41—44.

11. Телешевский В. И., Богомолов А. В. Компьютеризация контактных интерферометров в белом свете на основе оптической обработки изображений // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 35—38.

12. Зуйков А. А., Шулепов А. В. Повышение точности измерений малогабаритных объектов с применением специальных систем визирования в компьютеризированных измерительных микроскопах // Приборы. 2012. № 9. С. 39—44.

13. Microscopes. [Официальный сайт] <http://tut.ru/15917> (дата обращения 01.04.2015 г.)

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610600 «Программное обеспечение компьютеризированного прибора светового сечения» / С. Е. Педь, П. В. Дружинин, Д. С. Щербицкий // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2015.

15. ГОСТ 9847—79. Приборы оптические для измерения параметров шероховатости поверхности. Типы и основные параметры.

Дата принятия 15.04.2015 г.

681.786.4

## Применение структурированного света для фотограмметрического метода измерений поверхностей сложной формы

С. Г. КОНОВ, А. А. ХОХОЛИКОВ, А. А. ГОЛОЛОБОВА

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Россия, e-mail: [public32@gmail.com](mailto:public32@gmail.com)

*Исследованы технологии идентификации сопряженных пар точек на изображениях путем применения структурированного света. Оценено влияние основных источников погрешности на работу фотограмметрической информационно-измерительной системы.*

**Ключевые слова:** фотограмметрия, пространственная измерительная система, структурированный свет, сопряженные точки, поверхности сложной формы.

*The technologies of identification of conjugated dots on the images using the structured light have been studied. The influence of the main error sources on the information-measuring system operation have been assessed.*

**Key words:** photogrammetry, three-dimensional measuring system, structured light, conjugated dots.

В машиностроении усложнение геометрических форм поверхностей объектов способствует появлению новых функциональных возможностей и росту качества продукции [1]. Так, проектирование автомобилей, самолетов и других транспортных средств осуществляется с учетом аэродинамических характеристик, что позволяет снижать расход топлива при эксплуатации, добиваться более высоких скоростей передвижения. Аналогичные примеры можно привести и из других областей [2], поэтому вопрос обеспечения качества

изделий сложной формы в машиностроении является актуальным, при этом особое внимание следует уделять процедурам контроля геометрической точности изготовления поверхностей.

При исследовании поверхностей сложной формы используют два основных вида измерений: контактные и бесконтактные [3]. Учитывая уровень развития измерительной техники, можно заключить, что отдельные виды контактных методов обеспечивают высокую точность (достижимая