

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 620.179.119

Система контроля геометрии поверхностей на наноуровне

А. В. Марков, В. В. Спиридонов

В статье рассмотрены показатели качества поверхностей на наноуровне, среди которых можно выделить основные: средняя линейная высота неровностей и ее разброс, наклон и кривизна неровности и их разброс, площадь вершин неровностей, концентрация неровностей и ее разброс. Для реализации контроля качества поверхностей на наноуровне предлагается структура системы автоматизированного визуального контроля, содержащая: зондовый микроскоп, аддитивные и мультипликативные тесты длины, компьютер с установленным специализированным программным обеспечением. Предлагаемая структура была реализована в экспериментальном стенде. В результате проведенных экспериментальных исследований определена погрешность автоматизированной системы визуального контроля качества, которая не превышает 160 нм, что доказывает соответствие погрешности системы рабочему средству измерений государственной поверочной схемы для средств измерений длины.

Ключевые слова: *показатели качества поверхности, наноуровень, автоматизированная система визуального контроля.*

Введение

Улучшение функциональных свойств материалов коррелировано с оценкой качества геометрии их поверхностей на наноуровне. Актуальность исследования геометрии поверхностей на наноуровне во многом определяется необходимостью снижения сил трения в парах, работающих в специфических условиях высоких нагрузок. Относительно металлов и сплавов существенно улучшить триботехнические характеристики путем легирования и применения специальных методов механообработки и т. п. уже невозможно. Профиль поверхностей на микро- и наноуровнях во многом определяет их фрикционные свойства. Описание неровностей на микроуровне широко представлено в научной литературе [1–4]. Современные нанотехнологии позволяют улучшать триботехнические характеристики металла модифицированием структуры поверхностного слоя. Описание геометрии таких поверхностей с использованием параметрического, непараметрического, вейвлет-фракталь-

ного методов и анализа автокорреляционной функции не всегда возможно, так как процессы, происходящие на микро- и наноуровнях, принципиально различные. Учитывая результаты, полученные в работах [5–7], и специфические условия работы пар трения, предлагается классификация поверхностей по топологическим свойствам. Оценка геометрии поверхностей на наноуровне зависит от технического уровня систем контроля.

Структура автоматизированной системы визуального контроля

Распространение компьютерных технологий и улучшение технических характеристик зондовых микроскопов приводят к изменению методов контроля геометрии поверхностей на наноуровне. Для повышения эффективности контроля требуется разработка автоматизированных систем контроля, состоящих из устройства регистрации объектов наноуровня (электронный микроскоп, средства сканиру-

ющей зондовой микроскопии и т. д.), тестов линейных размеров и соответствующего программного обеспечения.

Разработка подобных систем осложняется необходимостью решить ряд теоретических и практических задач, основная из которых заключается в том, что погрешность измерений может носить как аддитивный, так и мультипликативный характер. Для решения этой задачи предлагается использовать два теста линейных размеров, что позволит минимизировать аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности измерений.

Предлагается следующая структура системы автоматизированного контроля для измерения линейных размеров нанопродукции (рис. 1). Система содержит аддитивные и мультипликативные тесты, установочные поверхности которых соединены с рабочей поверхностью измерительного стола 4. Нанопродукция с исследуемой поверхностью 3, подлежащая измерению, установлена на рабочую поверхность измерительного стола 4. В связи с малым ходом иглы зондового микроскопа тесты установлены последовательно. Измерительный стол 4 соединен со стойкой 5, которая соединена с прибором регистрации объектов 6 (в нашем случае с зондовым микроскопом). Электрический выход прибора регистрации объектов 6 соединен с портом ввода компьютера 7. Изображения тестов длины 1 и 2 (показаны штриховыми линиями) и нанопродукция 3 преобразуются прибором регистрации 6 в цифровой сигнал, удобный для обработки в компьютере 7. Диапазон измерений определяется техническими возмож-

ностями прибора регистрации объектов и тестов длины.

Для автоматизированного контроля геометрии поверхностей на наноуровне ограничимся рассмотрением следующих параметров: средняя линейная высота неровностей и ее разброс, наклон и кривизна неровности и их разброс, площадь вершин неровностей, концентрация неровностей и ее разброс.

Анализ погрешностей автоматизированной системы контроля геометрии поверхностей на наноуровне выявил ее основные составляющие: точность выделения границ объектов, точность распознавания объектов, точность определения зашумленности и др., которые могут носить как аддитивный, так и мультипликативный характер.

Для реализации контроля геометрии поверхностей на наноуровне структура системы автоматизированного визуального контроля должна содержать зондовый микроскоп, аддитивные и мультипликативные тесты длины, компьютер с установленным специализированным программным обеспечением [8].

В предлагаемой системе для повышения достоверности автоматизированного визуального контроля модифицированных поверхностей металла на наноуровне измерение может быть реализовано за $n + 1$ такт (n — количество тестов). В первом такте измерения контролируемая величина x одного из показателей качества поверхности на наноуровне преобразуется в соответствии с выражением (1), а в дополнительных тактах преобразуются тесты длины $z_1(x), z_2(x), \dots, z_n(x)$, являющиеся функциями x (2). В результате получим систему уравнений:

$$y_0 = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= a_0 + a_1x + \dots + a_nz^n; \\ \dots & \\ y_n &= a_0 + a_1z_n + \dots + a_nz^n. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В рамках предлагаемой структуры ограничимся использованием двух тестов (аддитивного L_1 и мультипликативного L_2). Следовательно, в первом такте получим

$$y_1 = a_0 + a_1x, \quad (3)$$

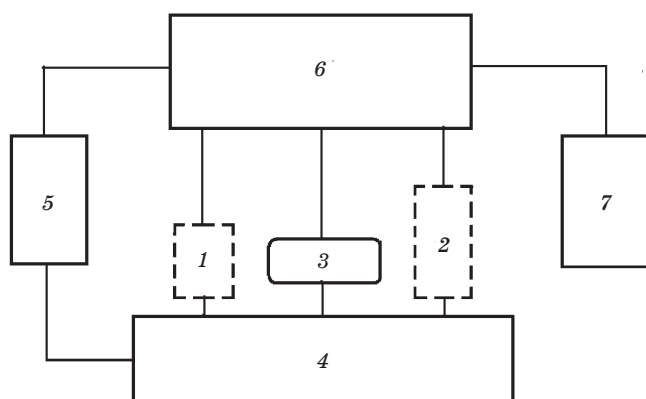


Рис. 1. Структура автоматизированной системы визуального контроля качества поверхностей на наноуровне

где a_0 — аддитивная погрешность; a_1 — коэффициент, обуславливающий появление мультипликативных погрешностей.

Во втором такте измерения получим

$$y_2 = a_0 + a_1 L_1. \quad (4)$$

В третьем такте измерения получим

$$y_3 = a_0 + a_1 L_2. \quad (5)$$

Совместное решение уравнений (3)–(5) позволяет получить

$$x = L_1 + (L_2 - L_1)(y_1 - y_2)/(y_3 - y_2), \quad (6)$$

где y_1, y_2, y_3 — результаты измерений.

Операция вычисления (6) реализуется программно на компьютере.

Тесты длины (аддитивного и мультипликативного) формировались на основе эталонных решеток в соответствии с РМГ 64-2003 ГСИ «Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений».

Предлагаемый метод повышения достоверности автоматизированного контроля нанопродукции, основанный на тестовых методах измерения, позволяет скомпенсировать аддитивные и мультипликативные погрешности системы контроля геометрии поверхностей на наноуровне.

В системах автоматизированного контроля обработка изображений может осуществляться как для получения изображения на выходе (например, предобработка для каких-либо других задач), так и для получения другой информации (например, выделение объектов, измерение геометрических параметров, подсчет объектов, распознавание образов и др.).

Специализированное программное обеспечение разрабатывалось в среде Labview. При этом необходимо было исследовать и проанализировать следующие алгоритмы обработки изображений: оптимизированный алгоритм глобальной пороговой обработки, оптимизированный алгоритм локальной пороговой обработки и оптимизированный алгоритм аддитивной пороговой обработки.

Реализация и верификация алгоритма анализа нанобъектов на изображении

Для реализации и верификации алгоритма анализа нанобъектов на поверхностях был применен метод анализа частиц (англ. blob analysis, particle analysis) [9]. Здесь под частицей понимается двумерный нанобъект на изображении поверхности или ее части.

Анализ частиц позволяет определить количество, местоположение, форму, направление, площадь, периметр и другие геометрические параметры нанобъектов. Частицей является группа связанных пикселей с приблизительно одинаковой интенсивностью. Чтобы максимально точно выявить такие группы пикселей в алгоритме анализа нанобъектов, необходимо предусмотреть конвертирование цветного изображения или черно-белого с оттенками серого в чисто черно-белое (бинарное), где каждый пиксель может принимать два значения: 1 (черный) и 0 (белый). Таким образом фильтруются представляющие интерес частицы от фона и погрешностей на границах изображения, что повышает точность анализа.

Процедуру анализа частиц можно разделить на следующие этапы: захват изображения с прибора регистрации объектов; построение гистограммы для подбора пороговых значений; бинаризация изображения; фильтрация шумов и погрешностей на границах изображения; анализ и измерение основных параметров частиц.

Захват изображения может осуществляться с любого современного зондового микроскопа. Благодаря наличию в системе Labview драйвера NI-Imaq, а также поддержке библиотеки Imaq Vision и большого количества плат расширения можно принимать с устройства как цифровые, так и аналоговые сигналы.

Гистограмма изображения позволяет оценить распределение и разброс интенсивности цвета пикселей на изображении. Она использовалась для оптимизации пороговых значений при бинаризации изображения и снижения погрешности этого преобразования.

Построение гистограммы в Labview осуществляется с помощью компонента Imaq Histogram. Обобщенный алгоритм с его использованием приведен на рис. 2.

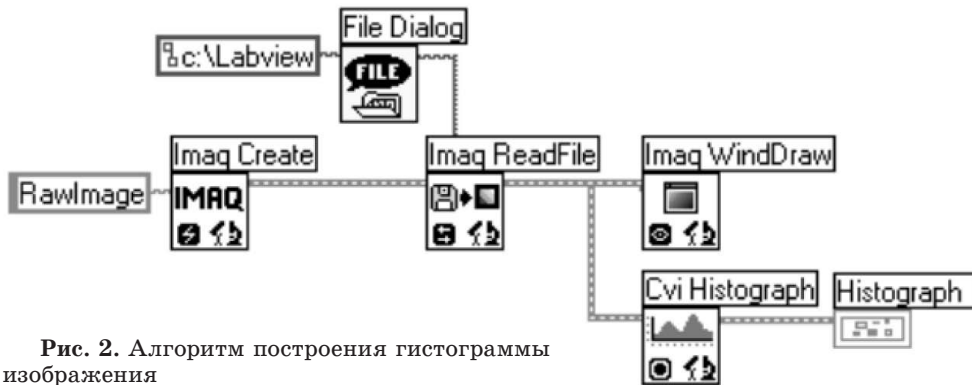


Рис. 2. Алгоритм построения гистограммы изображения

Исходное изображение загружается с устройства захвата изображения на жесткий диск компьютера. Компонент Imaq Create выделяет соответствующую область оперативной памяти и передает ее адрес компоненту Imaq ReadFile, который запрашивает у пользователя путь к каталогу с изображением с помощью FileDialog и считывает изображение в выделенную область, присваивая ему имя RawImage. Далее это изображение открывается в новом окне при помощи Imaq WindDraw и поступает на вход Imaq Histogram, где и выполняется построение гистограммы с последующим отображением на элементе пользовательского интерфейса Histogram.

На рис. 3 приведен интерфейс программы обработки изображений с загруженным изображением и построенной на основе вышеописанного алгоритма гистограммой.

Как видно из гистограммы, наибольшее количество пикселей имеют интенсивность между цветами 100 и 120, а максимальное значение интенсивности цвета составляет примерно 238. Соответственно в качестве порога для белого цвета необходимо взять значения между 100 и 120, а верхний порог для черного — ограничить на уровне 238. Это обеспечит наибольшую точность при бинаризации изображения.

Бинаризация изображения значительно упрощает и ускоряет его обработку, а также отфильтровывает лишние частицы, относящиеся к фону или границе изображения.

Бинаризация изображения в Labview осуществляется с помощью компонента Imaq Threshold. Упрощенный алгоритм с его использованием приведен на рис. 4.

По сравнению с алгоритмом построения гистограммы здесь были использованы до-

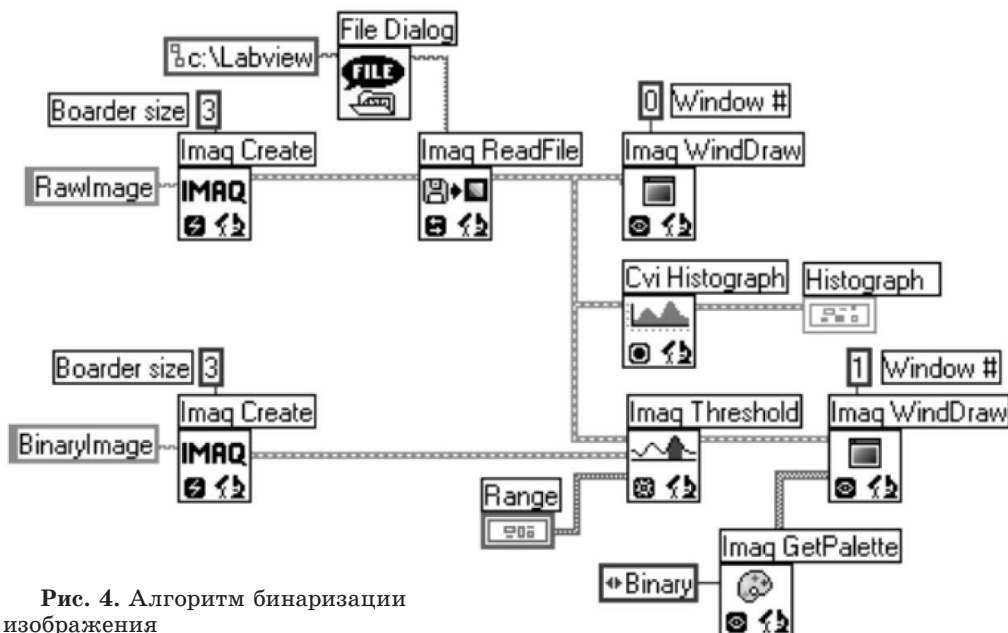


Рис. 4. Алгоритм бинаризации изображения

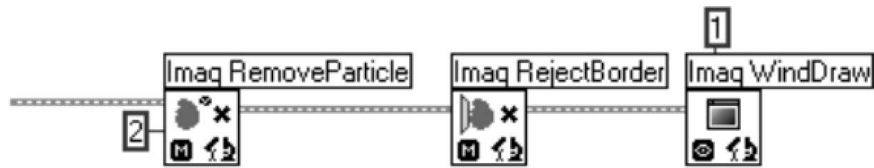


Рис. 5. Фрагмент алгоритма фильтрации шумов на изображении

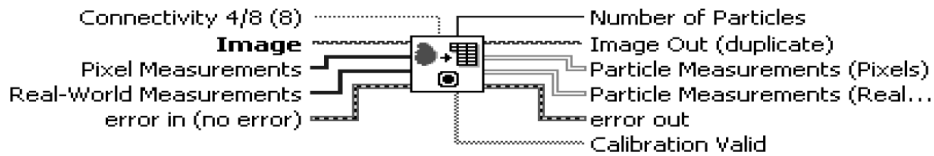


Рис. 6. Компонент Imaq Particle Analysis

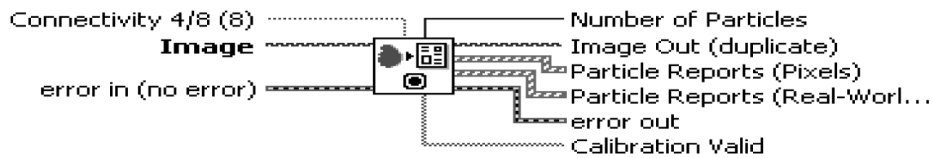


Рис. 7. Компонент Imaq Particle Analysis Report

полнительные компоненты. Компонент Imaq Create выделяет объем оперативной памяти, необходимый для построения бинарного изображения, присваивает изображению имя BinaryImage и подает его адрес на средний вход (Destination image) компонента бинаризации Imaq Threshold. На верхний вход (Source image) подается исходное 256-цветное изображение, на нижний вход (Range) — пороговые значения диапазонов белого и черного цветов, также полученные на основе показаний гистограммы. На выходе Imaq Threshold получается бинарное изображение с соответствующими характеристиками, которое выводится в окне Imaq WindDraw с соответствующей бинарной палитрой, полученной компонентом Imaq GetPalette.

Для реализации алгоритма фильтрации шумов и погрешностей на границах изображения воспользуемся двумя компонентами системы Labview: Imaq RemoveParticle и Imaq RejectBorder. Первый компонент удаляет из изображения все частицы меньше определенного размера, а второй — удаляет частицы на границе изображения. Фрагмент алгоритма фильтрации нежелательных частиц приведен на рис. 5.

Бинарное изображение последовательно подается сначала на вход Imaq RemoveParticle, затем на вход Imaq RejectBorder и, наконец,

выводится в отдельном окне компонентом Imaq WindDraw.

После выполнения описанных выше алгоритмов можно приступить непосредственно к анализу частиц на изображении. Система Labview предлагает два компонента: Imaq Particle Analysis (рис. 6) и Imaq Particle Analysis Report (рис. 7). Первый из них служит для анализа с расчетом только основных параметров частиц — количества и линейных

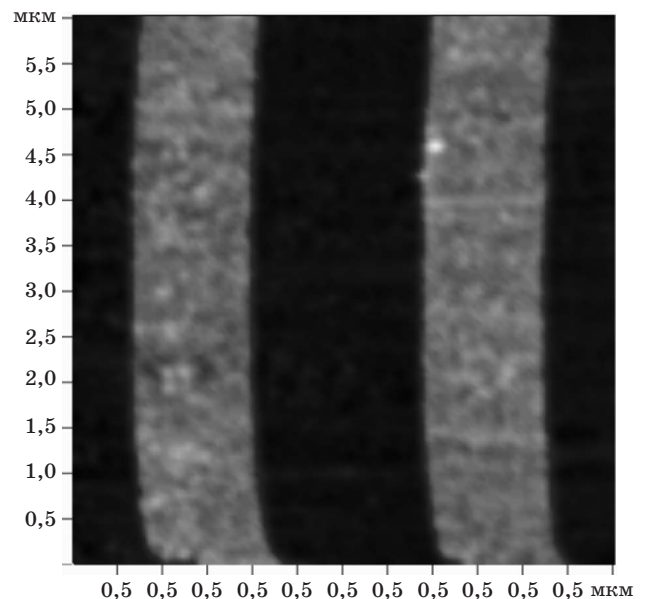


Рис. 8. Эталонная решетка

размеров. Компонент Imaq Particle Analysis Report значительно мощнее и позволяет вычислять те же параметры, что и компонент Imaq Particle Analysis, а также количество разрывов (просветов) в частицах, периметр, центр масс, момент инерции и др.

Среда графического программирования Labview в сочетании с библиотекой Imaq Vision позволяют эффективно решить задачу анализа частиц на изображении. Среда Labview содержит удобные средства построения интерфейса и наглядно отображает алгоритм работы благодаря тому, что программный код представляется в графическом виде, а не в текстовом, как в других средах разработки. Библиотека Imaq Vision создана специально для разработки систем технического зрения и значительно облегчает программирование связанных с ними алгоритмов.

Погрешность системы автоматизированного визуального контроля определена сличением ее показаний с номинальными размерами эталонной решетки (рис. 8).

Выводы

В статье освещена актуальная в научном отношении и практически важная задача автоматизированного контроля геометрии поверхностей на наноуровне, включающая предложения по параметрам контроля, разработку структуры автоматизированной системы контроля и алгоритмов обработки изображения. Предлагаемая структура реализована в экспериментальном стенде и защищена патентом РФ на полезную модель [6].

Литература

1. Валетов В. А. Оптимизация микрогеометрии деталей в приборостроении. Л.: Изд-во ЛИТМО, 1990, 100 с.
2. Валетов В. А., Васильков Д. В., Печенок Д. Ю. Эффективность использования международных стандартов при контроле микрогеометрии функциональных поверхностей деталей машин // Межвузов. сб. «Машиностроение и автоматизация производства». Вып. 11. СПб., 1998. С. 84–88.
3. Валетов В. А., Иванов С. Ю. Проблемы комплексной оценки и контроля характеристик поверхностного слоя деталей машин, приборов и систем. Инструмент и технологии. 2002. С. 164–167.
4. Валетов В. А., Третьяков С. Д. Исследование закономерностей применения микрогеометрии поверхностей деталей при трении-скольжении // Науч.-техн. вестн. СПб. 2001. С. 79–82.
5. Тополянский П. А., Тополянский А. П. Прогрессивные технологии нанесения покрытий — наплавка, напыление, осаждение // Ритм. 2011. № 1. С. 63–68.
6. Тополянский П. А. Ионно-плазменное напыление износостойких покрытий на инструмент // Материалы 6-й Международ. практ. конф.-выставки «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во. СПбГПУ, 2005. С. 323–338.
7. Гаркунов Д. Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 2000. 424 с.
8. Марков А. В., Спиридонов В. В. Повышение достоверности автоматизированного визуального контроля изделий на наноуровне // Материалы Междунар. конф. «Восьмые Окуневские чтения». СПб, 2013. С. 147–149.
9. Визильтер Ю. В., Ососков М. В. Опыт разработки и использования интегрированной программной среды для анализа и обработки цифровых изображений // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2008. № 5. С. 7–11; 2008. № 6. С. 12–14.
10. Пат. РФ на полезную модель № 134630 МПК G01B21/02. Оптико-электронная система для измерения линейных размеров изделия / А. В. Марков, В. В. Спиридонов.