

## Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по ее цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа

## The way of contactless evaluation of the surface roughness through its digital image, forming by the measuring microscope optical system

*Предложен способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности, основанный на сравнении цифровых изображений поверхностных неровностей детали и образцов шероховатости. Разработан алгоритм сравнения изображений на основе теории фракталов. Выявлены основные факторы, определяющие точность предложенного способа.*

*The way of contactless evaluation of the surface roughness based on comparison of surface roughness digital images of the measuring object and comparison roughness specimens is proposed. The comparison algorithm for images based on fractal theory is designed. Main factors affecting the accuracy of the proposed method are determined.*

**Ключевые слова:** оптическая микроскопия, оценка шероховатости, бесконтактные измерения, фрактальная теория.

**Keywords:** optical microscopy, surface roughness evaluation, contactless measurements, fractal theory.

Повышение точности измерения линейных и угловых размеров деталей и инструмента – является одной из актуальных задач современной измерительной техники в области станкостроения и инструментального производства [1,2]. Для решения поставленной задачи широкое применение получили измерительные микроскопы. Они используются для проведения высокоточных измерений деталей сложной формы и конструкции, элементов технологических и контрольных приспособлений, режущего инструмента.

Однако наряду с повышением точностных характеристик таких средств измерения (СИ) часто требуется решать ещё одну актуальную задачу – повышение их универсальности и функциональных возможностей. Для этого микроскопы оснащаются прецизионными цифровыми отсчетными устройствами, средствами визуализации зоны измерения и соответствующим программным обеспечением (ПО), что позволяет построить на их основе современные измерительные информационные системы (ИИС) [3, 4, 5, 6], которые могут быть оснащены возможностью проведения бесконтактных трехкоординатных измерений [7]. Применение цифровых методов обработки изображений поверхностей на оптических измерительных микроскопах открывает возможность выполнения оценки шероховатостей измеряемых объектов.

Шероховатость поверхности является одним из важнейших нормируемых и контролируемых параметров геометрической точности, определяющим эксплуатационные свойства поверхностей. Шероховатость поверхности является также важным источником информации о технологических процессах, в которых была получена эта поверхность. Шероховатость поверхности измеряют контактными (щуповыми) и бесконтактными (оптическими и оптоэлектронными) системами, а также оценивают методом сравнения с образцами шероховатости. Метод сравнения с образцами применяется на производстве достаточно часто, особенно в тех случаях, когда измеряемые поверхности малы, имеют сложную форму или труднодоступны для традиционных контактных и бесконтактных средств измерения шероховатости.

При измерении детали на микроскопе в системе визуирования получают увеличенное изображение участка шероховатой поверхности измеряемой детали, по которому можно провести сравнение шероховатости с образцом. Применение автоматизированной процедуры сравнения в цифровой системе обработки изображения позволяет повысить точность сравнения, особенно для малогабаритных и микроскопических поверхностей объектов измерения. Необходимо отметить, что для оценки шероховатости на компьютеризи-

рованном измерительном микроскопе не требуется создание каких-либо дополнительных измерительных систем. Информация, необходимая для оценки шероховатости, возникает попутно в процессе измерения других геометрических параметров деталей, измеряемых на микроскопе. Достаточно лишь провести обработку цифрового изображения на основании процедур, входящих в состав программного обеспечения.

Образцы шероховатости позволяют проводить сравнение шероховатости поверхности детали и образца по параметру шероховатости Ra по ГОСТ 2789-73. Это параметр является характеристикой профиля шероховатости, определяет среднюю высоту микронеровностей на базовой длине и применяется наиболее часто для нормирования шероховатости поверхностей деталей в машиностроении и приборостроении. Несмотря на то, что при оценке шероховатости с помощью образцов сравнивают не профили неровностей, а целые площадки с неровностями, шероховатость образцов нормируется по параметру Ra.

В разрабатываемой ИИС на базе компьютеризированного микроскопа возникает возможность перейти от процесса сравнения с образцами к процессу оценки параметра шероховатости поверхности по ее цифровому изображению. Для этого необходимо создать цифровые модели образцов шероховатости и сравнивать их с исследуемыми поверхностями.

При таком подходе сравниваемые поверхностные неровности на образцах шероховатости и детали представляют собой распределения яркостей элементов изображения (пикселей), которые зависят от размеров поверхностных неровностей и характеристик освещения этой поверхности.

Для выполнения процедуры сравнения шероховатостей поверхности образца и детали необходимо разработать эффективные параметры сравнения на основе цифровой обработки таких изображений. В качестве такого параметра может быть использована площадь поверхности упомянутого яркостного рельефа, для вычисления которой может быть применена теория фракталов.

В настоящей работе алгоритм вычисления площади поверхности изображения основан на фрактальном анализе изображения и получил широкое применение для исследования рельефа поверхности методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) [8].

Понятие фрактальной (дробной) размерности, известное под названием размерности Хаусдорфа-Безинковича, было введено Мальденбротом для из-

мерения объектов, получивших название фрактальных [9]. Согласно определению Мандельброта, фрактал – это множество, размерность Хаусдорфа-Безинковича строго больше его топологической размерности. К числу таких объектов относятся рассматриваемые шероховатые поверхности, полученные различными видами обработки.

Фрактальный объект может быть охарактеризован мерой множества  $M_d$  элементарных сегментов  $h(\delta)$ , покрывающих (заполняющих) измеряемый объект:

$$M_d = N(\delta) \cdot h(\delta) = N(\delta) \cdot \gamma(\delta) \cdot \delta^d, \quad (1)$$

где  $N(\delta)$  – число элементов, необходимое для покрытия (заполнения) объекта;  $h(\delta) = \gamma(\delta) \cdot \delta^d$  – некоторая пробная функция;  $d$  – топологическая размерность ( $d = 1$  – для прямой;  $d = 2$  – для плоскости;  $d = 3$  – для объема);  $\delta$  – коэффициент, удовлетворяющий условию  $\delta < 1$ . Величина  $\gamma(\delta) = A$  равна длине прямой, соединяющей концы измеряемого контура (одномерный случай), площади проекции измеряемой поверхности на плоскость (двумерный случай), объему, построенному на проекциях боковых поверхностей объема (трехмерный случай). Для рассматриваемого нами случая поверхности,  $A$  равна  $S_0$  – топологической площади окна изображения, тогда:

$$h(\delta) = A \cdot \delta^d. \quad (2)$$

При этом размер  $l$  укладываемых элементов (сторона основания пирамиды для двумерного случая) будет равен:

$$l = \sqrt[d]{A \cdot \delta^d} = \delta \cdot \sqrt[d]{A}. \quad (3)$$

С другой стороны, число элементов  $N(\delta)$ , заполняющих измеряемый объект, может быть представлено в виде [10]:

$$N(\delta) = \delta^{-D}, \quad (4)$$

где  $D$  размерность Хаусдорфа-Безинковича (фрактальная размерность). Таким образом, выражение (1) преобразуется к виду:

$$M_d = N(\delta) \cdot \gamma(\delta) \cdot \delta^d = A \cdot \delta^{d-D}, \quad (5)$$

где  $M_d$ , фактически, является мерой величины площади  $S$  поверхности измеряемого фрактального объекта, и, следовательно, площадь поверхности можно представить в виде:

$$S(\delta) = S_0 \cdot \delta^{2-D_s}, \quad (6)$$

где  $d = 2$  для двумерного случая,  $D_s$  – фрактальная размерность поверхности.

Для определения площади  $S$  изображения поверхности использовался так называемый метод триангуляции [11]. Он заключается в последовательной аппроксимации изображения поверхности исследуемого участка набором пирамид и измерением площади их боковых поверхностей. В результате получается набор суммарных площадей  $S$  боковых поверхностей пирамид в зависимости от длины ребра  $l$  основания пирамиды, а, следовательно и величины  $\delta$ , которая связана с  $l$  соотношением (3).

Очевидно, что при  $\delta \rightarrow 0$  определяемая площадь  $S$  поверхности будет стремиться к ее реальной площади. Однако возможность бесконечного уменьшения  $\delta$  ограничена не только достаточно длительным временем вычисления, но также объемом оперативной памяти используемой ЭВМ. Таким образом, искомая площадь  $S$  поверхности может быть найдена из условия:

$$S = S(\delta_{\min}), \quad (7)$$

где  $\delta_{\min}$  – минимально достижимое при вычислениях значение  $\delta$ .

В качестве объектов измерения были выбраны поверхности образцов шероховатости с известными значениями параметра Ra: 0,32 мкм, 0,63 мкм, 1,25 мкм и 2,5 мкм. Поверхности всех образцов получены плоским шлифованием. Измерения проводились на компьютеризированном универсальном измерительном микроскопе УИМ-21, оснащенный цифровыми отсчетными устройствами и средствами визуализации зоны измерения. Обработка получаемых изображений производилась при помощи специального разработанного авторами ПО, реализованного в пакете прикладных программ Matlab.

Цифровое изображение поверхности размерностью 240x240 пикселей формировалось ПЗС-матрицей и обрабатывалось в виде массива интенсивностей пикселей изображения реальной поверхности. Измеряемая поверхность освещалась светодиодным источником излучения под углом порядка 45° к

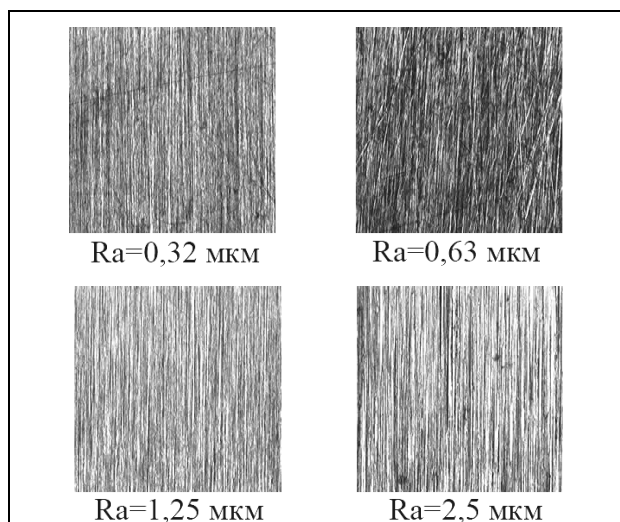


Рис. 1. Изображения исследуемых поверхностей образцов шероховатости с известными параметрами Ra (указаны)

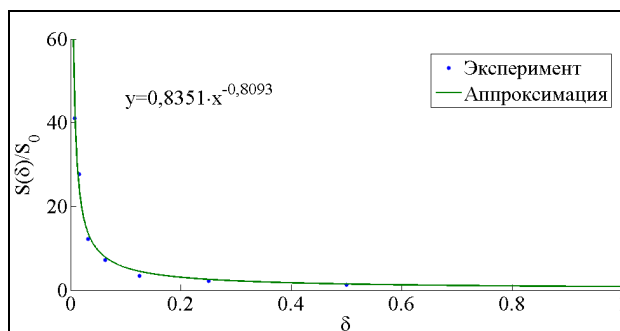


Рис. 2. Зависимость отношения площади  $S$  поверхности к площади  $S_0$  окна от величины  $\delta$  для образца шероховатости с Ra=1,25 мкм

поверхности. Получаемые цифровые изображения поверхностных неровностей показаны на рис. 1.

Диапазон значений  $l$  выбирался из условия оптимального быстродействия и составлял от 239 пикселей (на изображение поверхности укладывалась одна пирамида) до порядка 2 пикселей (на изображение поверхности укладывались 16 384 пирамиды). Для условий проводимого эксперимента  $\delta = \frac{l}{\sqrt[3]{S_0}} = \frac{l}{239}$ ,  $S_0 = 239^2$ .

Результат вычисления площади изображения поверхности в зависимости от величины  $\delta$  для образца шероховатости с Ra=1,25 мкм показан на рис. 2. Видно, что при более плотном покрытии пирамидами исследуемой поверхности, ее площадь резко возрастает и стремится к  $\infty$  при  $\delta \rightarrow 0$ . Однако очевидно, что при  $l < 1$  площадь изображения поверхности должна оставаться неизменной, поскольку в этом случае

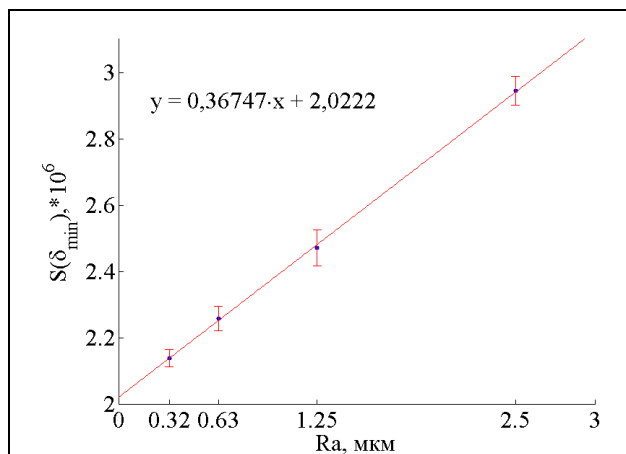


Рис. 3. Зависимость площади изображения поверхности от значения ее параметра шероховатости Ra

плотность заполнения поверхности пирамидами такова, что суммарная площадь их боковых граней становится равной площади изображения. Для определения значения  $l$ , при котором необходимо вычислять площадь изображения поверхности по аппроксимирующей кривой на рис. 2, были проведены вычисления для максимально возможного числа укладываемых пирамид – более одно миллиона. При этом  $l$  составила порядка 0,2 пикселя и  $S(\delta)/S_0 = 51,85$ . Подставляя полученное значение в уравнение кривой на рис. 2 получим  $\delta_{\min} \approx 0,006$ , что соответствует значению  $l$  порядка 1,5 пикселя.

Теперь, производя вычисления для меньшего числа пирамид и определяя площадь изображения поверхности по найденному уровню на аппроксимирующей кривой, обеспечивается быстрое и точное вычисление искомой площади, согласно условию (7).

При проведении эксперимента на поверхности каждого образца шероховатости выделялись пять участков, на которых проводилось вычисление площади изображения поверхности по вышеописанному алгоритму. На рис. 3 приведены усредненные по пяти участкам результаты вычисления площади изображений для каждого образца шероховатости с соответствующими 95%-ными доверительными интервалами. Изменение вычисленной площади поверхности с увеличением параметра шероховатости Ra этой поверхности хорошо аппроксимируется линейной зависимостью:  $S(\delta_{\min}) = 0,36747 \cdot Ra + 2,0222$ . При этом норма остатков составляет 0,012.

Таким образом, оценить величину параметра шероховатости Ra можно, используя формулу:

$$Ra = \frac{S(\delta_{\min}) - 2,0222}{0,36747} \quad (8)$$

Для проверки найденной зависимости была использована нерабочая поверхность концевой меры длины (КМД) первого класса. Согласно требованиям методики поверки МИ 2079-90, шероховатость по параметру Ra нерабочих поверхностей таких КМД не должна превышать 0,63 мкм, то есть  $Ra \leq 0,63$  мкм.

Измерения проводились по описанному выше алгоритму. В результате вычислений усредненная площадь поверхности изображения составила  $S_{\text{КМД}} = 2,22 \pm 0,02$ , что с учетом соотношения (8), дает значение шероховатости поверхности  $Ra_{\text{КМД}} = 0,54 \pm 0,05$  мкм  $\leq 0,63$  мкм. Найденное значение  $Ra_{\text{КМД}}$  соответствует предъявляемым нормам и свидетельствует о возможности использования разработанного способа для оценки шероховатости поверхности.

Показанный на рис. 3 разброс значений вычисляемой площади изображений для различных участков объясняется неоднородностью шероховатости поверхностей самих образцов.

Дальнейшие исследования показали, что основными факторами, влияющими на точность способа, являются точность фокусировки оптической системы визирного микроскопа на исследуемую поверхность и повторяемость условий освещения шероховатых поверхностей. Известно, что при наилучшей сфокусированности оптической системы достигается максимум контрастности изображения, а, следовательно, и вычисляемого в данном способе площади яркостного рельефа наблюдаемого цифрового изображения. Таким образом, важно, чтобы как при обучении системы по образцам шероховатости, так и при измерениях шероховатости, достигалась наилучшая фокусировка оптической системы на исследуемую поверхность. Для этой цели могут быть использованы различные критерии автоматической фокусировки, в том числе на основе фрактальной размерности. Аналогичные требования относятся и к условиям освещения исследуемых поверхностей и образцов шероховатости.

Разработанный способ оценивания шероховатости на основе сравнения цифровых изображений исследуемых поверхностей и образцов шероховатости позволяет эффективно решить задачу оперативного оценивания шероховатости поверхностей малогабарит-

ных и микроскопических деталей. Зависимость фрактальных характеристик изображений шероховатости от сфокусированности оптической системы, что позволяет использовать их в качестве критерия фокусировки визирной системы компьютеризированного микроскопа.

#### Библиографический список

1. **Телешевский В.И., Григорьев С.Н.** Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. №7. С. 3 - 7.
2. **Григорьев С.Н., Кутин А.А., Схиртладзе А.Г.** Подготовка технологов для модернизации машиностроительного комплекса России // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 5. С. 18-20.
3. **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.
4. **Teleshevsky V.I., Shulepov A.V., Krasnyuk O.Yu.** Computerization of measuring microscopes with digital analysis of images // Measurement Techniques. 2006. V. 49, № 8. P. 797-802.
5. **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.
6. **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.
7. **Латонов И.В., Шулепов А.В.** Разработка методов измерения по координате  $z$  на трехкоординатной информационно-измерительной системе на базе компьютеризированного измерительного микроскопа // 12-я Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений»: сб. докл. – М.: Изд-во НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – С. 67-71.
8. **Торхов Н.А., Божков В.Г., Ивонин И.В., Новиков В.А.** Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального  $n$ -GaAs в локальном пределе // Физика и техника полупроводников. 2009. Том. 43. Вып. 1. С. 38-47.
9. **Мандельброт Б.Б.** Фракталы в физике. – М.: Мир, 1988. – 672 с.
10. **Морозов А.Д.** Введение в теорию фракталов. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
11. **Федер Е.** Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.: ил.

**Латонов Игорь Владимирович** – аспирант кафедры измерительных информационных систем и технологий МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8 (903) 588-56-95. E-mail: icecold87@mail.ru

**Шулепов Алексей Виленинович** – канд. техн. наук, доцент кафедры измерительных информационных систем и технологий МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8 (495) 619-95-85. E-mail: avshul@yandex.ru

**Latonov Igor Vladimirovich** – postgraduate student of MSTU “STANKIN”.

Тел.: +7 (903) 588-56-95. E-mail: icecold87@mail.ru

**Shulepov Alexey Vileninovich** – candidate of Science in engineering, associate professor of the sub-department of “Information Control Systems and Technologies” of MSTU “STANKIN”.

Тел.: (495) 619-95-85. E-mail: avshul@yandex.ru

