

Л и т е р а т у р а

1. Цыбульский О. А. Критерий для обобщенной оценки широкодиапазонного прибора по точности и диапазону измерений // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 5—7.
2. Арутюнов В. О. Расчёт и конструирование электроизмерительных приборов. Госэнергоиздат, 1956.
3. Левин М. И., Прытков В. Т., Демидова-Панфилова Р. М., Кутяшова Е. М. Основы электроизмерительной техники. М.: Энергия, 1972.
4. Цыбульский О. А. Проективные свойства широкодиапазонных измерений // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 27—29.
5. Ефимов Н. В. Высшая геометрия. Москва: Наука, 1978.
6. Цыбульский О. А. Применение метода сложного отношения в широкодиапазонных измерительных приборах // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 11—12.

7. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968.
8. Темников Ф. Е. Автоматические регистрирующие приборы. Машгиз, 1960.
9. Кёстер У. Аналого-цифровое преобразование. М.: Техносфера, 2007.
10. Пат. 1336240 СССР. Н ОЗМ 1/48 Способ аналого-цифрового преобразования / О. А. Цыбульский. 1987. Открытия. Изобретения. Бюл. 33.
11. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы. Киев: Вища школа, 1980.
12. Цыбульский О. А. Аналого-цифровое преобразование с гиперболической шкалой // Метрология. 1990. № 12. С. 9—19.

Дата принятия: 09.09.2016.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.2

Алгоритм построения морфологического дискового фильтра для анализа шероховатости поверхности

Б. Н. МАРКОВ, О. Н. МЕЛИКОВА, А. В. ШУЛЕПОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: bnmarkov@rambler.ru, avshul@yandex.ru

Рассмотрено применение морфологической фильтрации профиля и 3D-рельефа поверхностных неровностей в задачах исследования влияния морфологических особенностей поверхности на её функциональные свойства. Предложены простые и эффективные алгоритмы построения огибающих профиля и рельефа для морфологического анализа поверхности. Алгоритмы могут быть реализованы в составе программно-математического обеспечения средств измерений шероховатости.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, морфологическая фильтрация, огибающая профиля.

The application of morphological filtering of surface's 2-D and 3-D roughness for investigation of surface morphology influence on its functional properties was considered. The simple and efficient algorithms for profile and topography envelopes plotting for morphological analysis of surface are proposed. The algorithms can be integrated into software of roughness measuring devices.

Key words: surface roughness, morphological filtering, profile's envelope.

В области нормирования и измерения параметров микронеровностей поверхностей изделий применяются главным образом две системы отсчёта. Система *E* основана на отсчёте отклонений профиля от его огибающей (envelope line) — линии, возникающей при обкатке реального профиля окружностью определенного радиуса. В [1] для выделения волнистости предложено использовать окружность радиусом $R = 25$ мм, а для выделения отклонений формы — окружность радиусом $R = 250$ мм. Эти условия были приняты в соответствующем стандарте DIN. Система *M* базируется на отсчёте отклонений профиля от его средней линии (middle

line). Средняя линия строится с помощью стандартизованных линейных фильтров (Гаусса и сплайн-фильтров), а также робастных фильтров при решении специальных задач [2—6].

В настоящее время применяется комплекс стандартов ISO в области морфологической фильтрации. В соответствии со стандартами ISO именно огибающая даёт наилучшее (близкое) приближение к действительной поверхности, определяемое по принципу максимума (или минимума) материала. Поэтому наиболее верные сведения о функциональной пригодности поверхности изделия можно получить с по-

мощью морфологических фильтров [7]. Эти фильтры были разработаны для анализа микронеровностей поверхностей по системе E , что важно при изучении вопросов, связанных с трением, обтеканием тел жидкостями и газами, при построении уплотнений и т. д.

Огибающая представляет линию в виде траектории движения центра диска при его скольжении (или качении) вдоль профиля, смещённую к профилю поверхности на расстояние, равное радиусу R диска. Форма огибающей зависит от профиля фильтруемой поверхности и радиуса диска, который определяет глубину фильтрации. При условии $R \rightarrow 0$ эффект фильтрации исчезает. При увеличении радиуса результатом фильтрации становится некоторая кривая, «прилегающая» к исходному профилю в области его вершин. Характер «прилегания» обусловлен спектральным составом профиля поверхности и радиусом диска. Огибающая профиля, построенная в соответствии с этими заключениями, отличается от огибающих Гилберта или Хуанга [8].

Все современные средства измерений (СИ) шероховатости базируются на системе M . Однако любая профилограмма, полученная с применением щуповых СИ, является результатом морфологической фильтрации реального профиля с помощью диска радиусом, равным радиусу измерительного наконечника. Более того, в стандарте [9] механическая поверхность изделия определяется как геометрическое место центров идеальной сферы определенного радиуса при её обкатке по реальной поверхности изделия. Это означает, что для описания поверхности изделия используются термины морфологической фильтрации.

Смысл морфологической фильтрации по стандартам ISO заключается в том, что профилограмма поверхности изделия обрабатывается как бинарное изображение сечения изделия. В компьютерной системе обработки изображений используются морфологические операторы: наращивания, эрозии и их комбинации, операции открытия и закрытия. При этом неизбежно возникают трудности, связанные с необходимостью преобразования дискретной профилограммы поверхности изделия в изображение сечения этой поверхности и обратным преобразованием результата фильтрации в профилограмму [10–13]. В [14, 15] рассмотрены возможности другого подхода к морфологической фильтрации, основанного на применении триангуляции и метода « α -shapes».

Предлагаемый авторами настоящей статьи алгоритм построения огибающей профиля шероховатости базируется на простых геометрических соотношениях и не требует сложных множественных построений и обработки изображений неровностей. На рис. 1 показан участок профилограммы поверхности изделия в виде последовательности ординат, состоящей из N отсчётов, полученных с дискретностью $x_d = 0,5$ мкм по оси абсцисс. Виртуальный измерительный наконечник имитирует форму диска морфологического фильтра радиусом $R = 15$ мкм и занимает положение, соответствующее отсчёту $z_n, n = 0 \dots N - 1$ в положении $x_n = 2070$ мкм = 2,07 мм. По причине различия масштабов по осям профилограммы диск приобретает эллиптическую форму.

Касание наконечником поверхности происходит в некоторой точке с абсциссой $x_{n-M/2+m}$, где M — число отсчётов диаметра виртуального измерительного наконечника вдоль оси абсцисс; $m = 0 \dots M - 1$ — текущие номера отсчётов при нахождении центра наконечника в положении x_n .

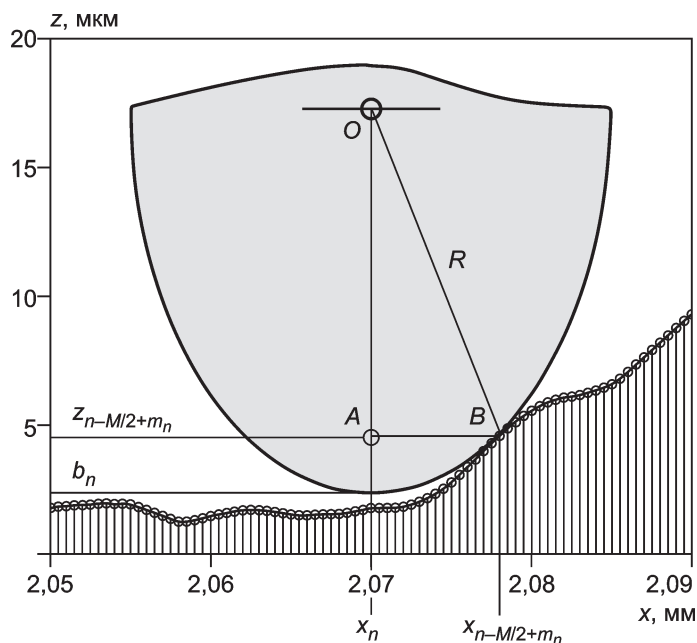


Рис. 1. Схема реализации морфологического дискового фильтра: x — координата вдоль профиля шероховатости; z — высота профиля

Используя соотношения в треугольнике OAB (см. рис. 1), можно получить выражения для траектории нижней точки измерительного наконечника

$$b_n = \begin{cases} z_{n-M/2+m_n} + \left[R^2 - (x_{n-M/2+m_n} - x_n)^2 \right]^{1/2} - R, \\ S_a. \end{cases} \quad \text{если } n \geq M \wedge n \leq N - M; \quad (1)$$

Условие (1) учитывает концевые эффекты, связанные с необходимостью нахождения всей сферы наконечника над обрабатываемой поверхностью. В действительности эти участки могут быть и несколько меньшими. Параметру шероховатости S_a можно придать любое значение, в частности $S_a = 0$. Для определения набора индексов m_n , соответствующих точкам касания диска фильтра сечения поверхности в момент нахождения центра диска (точка O на рис. 1) в положении x_n , строят совокупность траекторий нижней точки измерительного наконечника, соответствующих M значениям индекса m . В результате получают матрицу a размером $n \times m$, строки которой состоят из чисел, равных N отсчётам значений высот h профиля, соответствующих этим траекториям. Элементами матрицы являются числа

$$a_{n,m} = b_n. \quad (2)$$

Далее из каждого столбца e_n транспонированной матрицы aa^T вычитают вектор отсчётов высот профиля z , находят вектор $c = \max(e - z)$ максимальных расхождений векторов e, z и значения индексов m для каждого отсчёта с номером n , при которых эти расхождения будут максимальными. При работе в системе Math Cad индексы m имеют форму одноместных векторов, затем векторы переводят в числа и

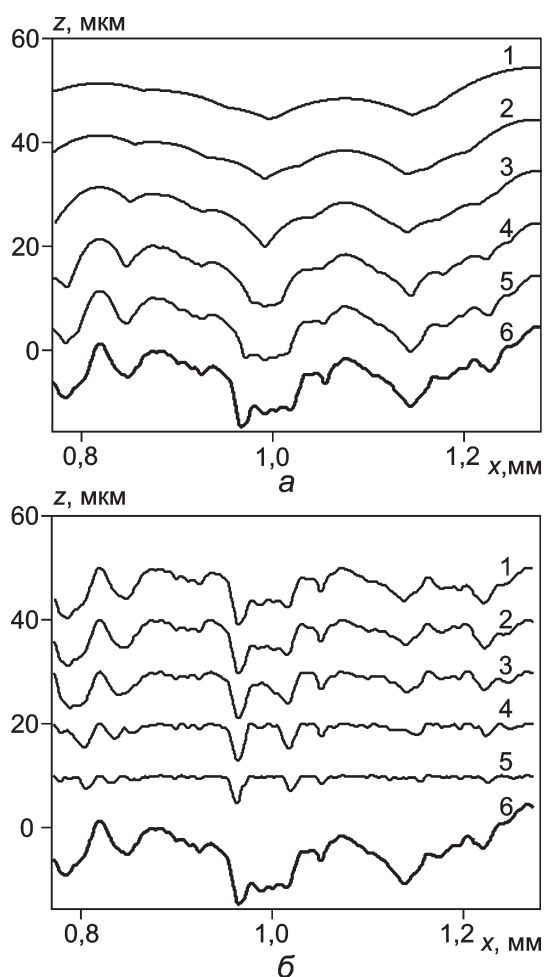


Рис. 2. Системы огибающих профиля для мультишкального анализа (а) и отклонений профиля от огибающих (б) при радиусах виртуального измерительного наконечника 0,70; 0,35; 0,15; 0,05; 0,02; 0 мм — кривые 1—6, соответственно

подставляют в (1). В итоге получают последовательность отсчётов, определяющую результат морфологической фильтрации профиля шероховатой поверхности.

Для реализации алгоритма построения огибающей средствами Math Cad была выполнена программа следующего вида:

```

for n ∈ 0...N
    bn ← S
for m ∈  $\frac{M}{2} \dots N - \frac{M}{2}$ 
    for m ∈ 0...M
        hm ←  $z_{n - \frac{M}{2} + m} + \sqrt{R^2 - \left(x_{n - \frac{M}{2} + m} - x_n\right)^2} - R$ 
    bn ← max(h)
b :=

```

Перед запуском программы необходимо ввести исходные данные: профилограмму в виде N -мерного вектора отсчётов профиля, шаг дискретизации профиля x_d , радиус R фильтрующего измерительного наконечника и число $M = 2R/x_d$ отсчётов профиля наконечника.

На рис. 2, а представлена последовательность огибающих профиля (нижняя кривая), построенных с использованием виртуальных измерительных наконечников радиусами 0,02—0,70 мм, на рис. 2, б — полученная при этом последовательность отклонений профиля от соответствующих огибающих. Такая последовательность огибающих позволяет совершенствовать анализ особенностей трения, скольжения, контакта сопряжённых поверхностей, поскольку в значительной степени взаимодействие при сопряжении происходит как раз по огибающим поверхностям. Анализ отклонений профиля от огибающих различного порядка (см. рис. 2, б) позволяет детально изучить характер, протяжённость и частоту чередования локальных впадин поверхности. Это особенно важно, например, при определении объёма смазки или посторонних веществ, которые потенциально могут находиться в сопряжении [16]. Согласно предложенному алгоритму морфологической фильтрации можно построить и систему «нижних» огибающих, находящихся в материале изделия. Для этого достаточно поменять знак профилограммы. Отклонения реального профиля от «нижних» огибающих дают возможность подробно исследовать количество и положение локальных пиков профиля при изучении износостойкости и долговечности сопряжений.

С применением геометрических соотношений (1), (2) разработан алгоритм морфологической пространственной фильтрации 3D-рельефа поверхности, полученный, например, с помощью атомного силового или конфокального микроскопа. Для программы в Math Cad, реализующей пространственный морфологический фильтр, требуется матрица данных — высот h неровностей на некоторой сетке на поверхности изделия. В программе приняты следующие обозначения: N_x, N_y, M_x, M_y — числа отсчётов рельефа поверхности и сферы фильтрующего измерительного наконечника по двум взаимно перпендикулярным направлениям x, y ; n_x, n_y, m_x, m_y — текущие номера отсчётов рельефа поверхности и сферы наконечника. Программа имеет вид

```

for nx ∈ 0...Nx
    for ny ∈ 0...Ny
        bnx, ny ← S
for mx ∈ 0...Mx
    for my ∈ 0...My
        hnx, ny ← C
for nx ∈  $\frac{M_x}{2} \dots Nx - \frac{M_x}{2}$ 
    for ny ∈  $\frac{M_y}{2} \dots Ny - \frac{M_y}{2}$ 
        for mx ∈ 0...Mx
            for my ∈ 0...My
                hmx, my ←  $z_{nx - \frac{M_x}{2} + mx, ny - \frac{M_y}{2} + my} +$ 
 $+\sqrt{R^2 - \left(x_{nx - \frac{M_x}{2} + mx} - x_{nx}\right)^2 - \left(x_{ny - \frac{M_y}{2} + my} - x_{ny}\right)^2} -$ 
 $-R \quad \text{if } \left(\left|\frac{M_x}{2} - mx\right| \cdot x_d\right)^2 + \left(\left|\frac{M_y}{2} - my\right| \cdot y_d\right)^2 \leq R^2$ 
            bnx, ny ← max(h)
b :=

```

На рис. 3 представлен результат морфологической фильтрации участка 1 рельефа поверхности изделия площадью $0,07 \times 0,07$ мм с параметром шероховатости $S_a = 0,008$ мм, диаметр измерительного наконечника $D = 0,03$ мм. Поверхность 2, полученная в результате фильтрации, представлена в виде сетки на исследуемом рельефе. Далее можно построить систему различных прилегающих поверхностей, определяемых диаметрами наконечников, и отклонений от действительного рельефа.

Предложенные алгоритмы обработки результатов сканирования профиля или рельефа поверхности позволяют исследовать результаты морфологической фильтрации микронеровностей поверхности с целью изучения влияния морфологических особенностей поверхности на её функциональные свойства.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания на выполнение научных проектов № 9.2545.2014/К (соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004). Исследования проведены на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН».

Л и т е р а т у р а

1. **Herbert von Weingraber, Mohamed Abou-Aly.** Handbuch Technische Oberflächen: Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten. Springer-Verlag, 2013.
2. **Марков Б. Н., Шулепов А. В.** Алгоритмы робастной фильтрации профиля шероховатости // Измерительная техника. 2015. № 7. С. 4—7.
3. **Марков Б. Н., Шулепов А. В.** Двухмерные фильтры изображения рельефа шероховатости поверхности // Измерительная техника. 2015. № 8. С. 3—5.
4. **Григорьев С. Н., Телешевский В. И.** Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 3—7.
5. **Педь С. Е., Дружинин П. В.** Автоматизация измерений параметров шероховатости // Измерительная техника. 2015. № 7. С. 18—21.
6. **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.
7. **Krystek M.** Morphological filters in surface texture analysis // Proc. XI Intern. colloquium on surfaces. Chemnitz, Germany, 2004. P. 43—55.
8. **Марков Б. Н., Логинов А. А.** Применение преобразования Гилберта — Хуанга в области измерения шероховатости поверхностей // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 32—33.

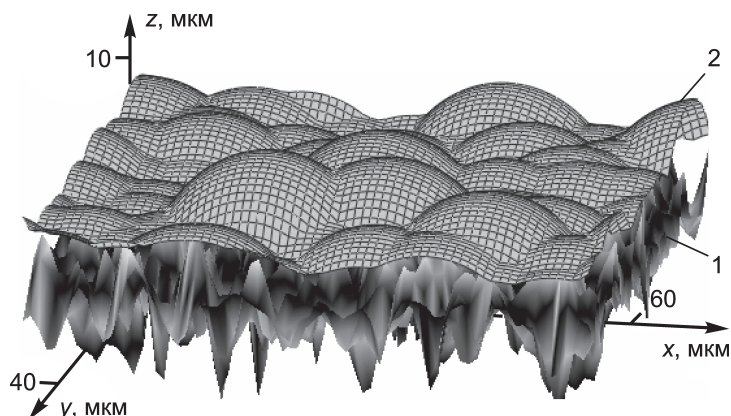


Рис. 3. Участок 1 рельефа поверхности и полученная при его морфологической фильтрации прилегающая поверхность 2

9. **ISO/DTS 14406:2005.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Основная схема.

10. **Мастеренко Д. А., Емельянов П. Н., Ковальский М. Г., Байковский А. Ю.** Разработка прибора для измерения отклонений формы и шероховатости поверхностей особо точных деталей // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 24—28.

11. **Телешевский В. И.** Измерительная информатика в машиностроении // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2008. № 1. С. 33—38.

12. **Телешевский В. И., Шулепов А. В., Роздина Е. М.** Повышение точности измерений линейно-угловых размеров изделий в интеллектуальной компьютерной микроскопии // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 4. С. 35—38.

13. **Игнатьев П. С., Колнер Л. С., Телешевский В. И.** Лазерная модуляционная микроскопия как средство контроля формы и шероховатости оптических поверхностей // Измерительная техника. 2015. № 7. С. 32—35.

14. **Shan Lou, Xiangqian Jiang, Paul J. Scott.** Application of the morphological alpha shape method to the extraction of topographical features from engineering surfaces. University of Huddersfield [Электрон. версия] <http://eprints.hud.ac.uk/13400/> (дата обращения 01.10.2016).

15. **Латонов И. В., Шулепов А. В.** Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по её цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2013. № 1 (24). С. 141—145.

16. **Марков Б. Н., Емельянов П. Н.** Зарубежная практика нормирования параметров 3D-рельефа шероховатости поверхностей // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2015. № 4 (35). С. 95—100.

Дата принятия: 22.12.2016.