

АРЕАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТОПОГРАФИИ И ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ В МИКРО- НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ

С. А. КОНОНОГОВ*, **С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ***, **Ф. В. БУЛЫГИН****,
В. Н. КРУТИКОВ***, **В. Л. ЛЯСКОВСКИЙ*****

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: s.zolotarevskiy@vniims.ru

**Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
(Росстандарт), Москва, Россия

*** Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических
измерений, Москва, Россия

Проанализированы материалы и международные нормативно-методические документы, посвященные методам ареальной (зонной) характеристики топографии и текстуры шероховатой поверхности. Рассмотрены вопросы применения специальных фильтров, призванных устранять нежелательные компоненты измеряемой поверхности. Показан современный стандартизованный подход к разделению шероховатости и волнистости на первичной (основной) поверхности.

Ключевые слова: ареальные методы, характеристика и текстура поверхности, 3D-топограмма.

The analysis of review materials and international normative-methodical documents devoted to methods of the areal (zone) characterization of topography and textures of rough surface. The issues of application of special filters for elimination of undesirable transverse components of the measurement surface are considered. The modern standardized approach to separation of roughness and waviness components on the primary (basic) surface is shown.

Key words: areal methods, characterization and texture of surface, 3D topography.

Топография, применительно к линейно-угловым измерениям в нанометровом диапазоне, – получение инструментальным путем качественной или количественной информации о поверхности в виде 3D-топограммы [1]. Отметим, что во многих источниках топография поверхности в нанометровом диапазоне заменяется понятием рельефа поверхности [2]. Под термином «текстура» понимают строение поверхности, характеризуемое совокупностью 3D-параметров, подлежащих

измерению (для поверхности материала в пределах толщины приповерхностных слоев, не превышающей 100 нм). Термин «характеризация» в литературе по нанотехнологии и нанометрологии звучит как «описание свойств нанообъекта (наноструктуры)».

Методикам и средствам характеристики посвящено значительное количество работ, а наиболее полный их обзор содержит монография [1], отдельные положения которой используем для анализа методов характеристики топографии и текстуры поверхности в нанометровом диапазоне. Важную роль в процессе характеристики с помощью 3D-параметров играет понятие «зона» или «ареал»¹, т. е. область распространения изучаемых свойств поверхности в нанометровом диапазоне.

Характеризация топографии поверхности – одно из сложнейших направлений метрологии с большим количеством и широкой номенклатурой требуемых для ее реализации параметров [1]. В ближайшее время возможно появление согласованной инфраструктуры международных стандартов, посвященных характеристике текстуры поверхности. Профильная характеристика уже стандартизована, а проекты стандартов в области характеристики текстуры поверхности уже доступны.

Ареальная характеристика текстуры поверхности. Существуют ограничения, присущие 2D-поверхностным измерениям и характеристике текстуры поверхности. Фундаментальной считается проблема необязательного указания полученного 2D-профиля на функциональные признаки поверхности. По результатам профильных измерений и характеристики часто трудно определить точно природу топографического признака.

В отличие от 2D-профильной системы характеристика ареальной поверхности не требует применения трех групп (профиль, волнистость и шероховатость) параметров текстуры. Например, для среднего квадратического параметра вместо P_q , W_q , R_q требуется лишь один параметр S_q , зависящий от типа используемой масштабно-ограниченной поверхности.

Применение получили S - и L -фильтры [3]. Первый тип устраняет нежелательные мелкомасштабные поперечные компоненты измеряемой поверхности, такие как шум или незначительные признаки функцио-

¹ В русской технической терминологии применяется понятие «ареал», поэтому в тексте используем термин «ареальный».

нальности. Второй тип убирает нежелательные крупномасштабные признаки поверхности, а F -оператор удаляет номинальную форму с использованием метода наименьших квадратов [4].

Масштаб, в котором функционируют фильтры, контролируется гнездовым индексом, представляющим собой распространение обозначений исходного ограничения ширины полосы и применимым ко всем типам фильтров. Например, для гауссова фильтра он эквивалентен понятию ограничения ширины полосы. Эти фильтры используются для создания SF - и SL -поверхностей.

Эквивалент основной поверхности – SF -поверхность – возникает после ее совместной обработки S -фильтром и F -оператором, а SL -поверхность (вариант шероховатости поверхности) возникает после обработки L -фильтром SF -поверхности. Обе поверхности называются масштабно-ограниченными и зависят от используемых фильтров или операторов с масштабами (шкалами), контролируемыми гнездовыми индексами фильтров.

Ареальная фильтрация. Гауссовый фильтр обладает широкими возможностями, благодаря чему стала возможной разработка современного стандартизованного подхода к разделению групп нерегулярностей – шероховатости и волнистости на первичной (основной) поверхности. Обе поверхности могут быть получены с использованием единой методики фильтрации при минимальном фазовом искажении. Весовая функция ареального фильтра представляет собой гауссову функцию [3]:

$$s(x, y) = \frac{1}{\alpha^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}} \exp \left[-\frac{\pi}{\alpha^2} \left(\frac{x^2}{\lambda_{cx}^2} + \frac{y^2}{\lambda_{cy}^2} \right) \right];$$

$$-\lambda_{cx} \leq x \leq \lambda_{cx}; \quad -\lambda_{cy} \leq y \leq \lambda_{cy},$$

где x, y – двухразмерные (двухкоординатные) расстояния от центра (максимума) весовой функции; λ_c – граничная длина волны (длина волны отсечки); α – константа, обеспечивающая 50 %-ное пропускание при граничной длине волны, причем $\sqrt{\ln 2 / \pi} \approx 0,4697$.

При отделимости и симметрии гауссовой функции двухразмерная, отфильтрованная гауссовым фильтром поверхность может быть получена сверткой двух одномерных гауссовых фильтров по строкам и столбцам измеренной поверхности

$$z(x, y) = z'(x, y) - \left(\sum \sum z'(x - n_1 y - n_2) s(n_1 s(n_2)) \right).$$

В настоящее время разработан международный стандарт для ареального гауссового фильтра [4], который широко используется практически во всех современных промышленных приборах. Более того, в течение последнего десятилетия его легко экстраполировать из линейного профильного стандартного гауссова фильтра производителям приборов, что позволяет пользователям при измерениях поверхности разделять шероховатость и волнистость.

Результаты определения шероховатости поверхностей, изготовленных с использованием различных технологий, обладают разной степенью прецизионности, поскольку содержат отличающиеся друг от друга отсчеты и даже выбросы. В этом случае для подавления влияния выбросов следует применять робастный гауссов фильтр, основанный на максимально вероятной оценке. Он может быть также обнаружен в большинстве придаваемых прибору программ обработки данных. Следует заметить, что гауссов фильтр не применяется для всех без исключения функциональных предназначений поверхности. Например, для контактного режима, при котором целесообразно использовать верхнюю огибающую поверхность, была стандартизована структура, базирующаяся на математическом обосновании фильтрации, содержащая также набор различных фильтров:

линейные. К этому классу относятся усредняющие линейные фильтры (*M*-системы), включающие гауссов, коротковолновый и сплайн-фильтры;

морфологические – фильтры *E*-системы, содержащие запирающие и отпирающие фильтры, с применением либо диска, либо горизонтальной линии;

робастные, т. е. фильтры, устойчивые по отношению к специфическим признакам поверхности: пикам, царапинам, ступенькам. Они состоят из робастных гауссовых и сплайн-фильтров;

сегментирующие, т. е. фильтры, разделяющие профиль на участки в соответствии со специфическими правилами.

В любом случае пользователь должен помнить, что при необходимости сравнения результатов измерений параметров текстуры двух поверхностей важно использовать идентичные методики фильтрации и гнездовые индексы (или же необходима надлежащая коррекция). В таблице приведены согласованные гнездовые индексы, согласно [3]. Пользователю необходимо придерживаться последней версии этого документа.

**Соотношения между значениями различных гнездовых индексов,
выборочными длинами и радиусами сферы**

Гнездовые индексы		Максимальная выборочная длина, мкм	Максимальный радиус сферы, мкм
<i>F</i> -оператор/ <i>L</i> -фильтр, мм	<i>S</i> -фильтр, мкм		
0,1	1,0	0,3	0,8
0,2	2,0	0,6	1,5
0,25	2,5	0,8	2,0
0,5	5,0	1,5	4,0
0,8	8,0	2,5	6,0
1,0	10	3,0	8,0
2,0	20	6,0	15
2,5	25	8,0	20
5,0	50	15	40
8,0	80	25	60
10	100	30	80
20	200	60	150
25	250	80	200
50	500	150	400
80	800	250	600
100	1000	300	800

Ареальные спецификационные стандарты находятся на разных этапах разработки. Все они входят в стандарт [4], который имеет общее название Geometrical product specification (GPS) – текстура поверхности: ареал. Спецификационные стандарты, часть из которых относится к ареальному анализу (преимущественно базирующемуся на фрактальных методах), выпускает также NIST (США).

Унифицированная система координат для текстуры и формы поверхности. Нерегулярности поверхности традиционно разделены на три группы, независимо базирующиеся на масштабе: шероховатость, волнистость и искажения формы. Это создает впечатление, что текстура поверхности должна быть частью взаимосвязанной (когерентной) схемы и шероховатостью в области малого масштаба (начального участка шкалы), а искажениями формы – в области крупного масштаба (конечного участка шкалы).

Первоначальное определение текстуры поверхности до сих пор базировалось на профиле [5]. Для обеспечения последовательности (постоянства) нерегулярностей вдоль измеряемого профиля направ-

ление этого профиля должно быть перпендикулярным направлению известной картины. Профиль не обязательно должен исходить из начала поверхности, в то время как искажения формы всегда должны быть расположены параллельно поверхности на всем ее протяжении. Следовательно, профильная текстура поверхности и искажения формы за счет погрешностей определения профиля имеют различные системы координат и не образуют согласованной (когерентной) спецификации.

Эта ситуация в настоящее время меняется, так как совершается переход от прежнего базирования на профилях к базированию на ареальных поверхностях. Также меняются и прежние требования к координатной системе, т. е. может быть установлена унифицированная система координат для измерения как текстуры, так и формы поверхности [3]. Текстура поверхности отныне является истинной частью согласованной (когерентной) схемы и относится к начальной (маломасштабной) части шкалы.

Ареальные параметры. Существуют два основных класса ареальных параметров: зонные, определяющиеся по совокупности всех точек поверхности ограниченных размеров, и топологические, вычисляемые из подмножества предопределяемых топологических признаков (особенностей), характеризующих поверхность ограниченных размеров.

Еще один класс ареальных параметров основан на использовании результатов фрактального анализа. Фрактальные параметры по существу являются зонными параметрами, но обладают рядом отличительных свойств.

Рассмотрим подробно зонные параметры. Множество зонных или S - и V -параметров разделены на высотные, интервальные, гибридные, функциональные и связанные с ними параметры. Многие аспекты, относящиеся к описанным ранее профильным параметрам, непосредственно относятся к их ареальным эквивалентам. Следовательно, впервые описывая ареальные параметры, целесообразно ознакомиться с их профильными эквивалентами.

Высотные параметры. Среднее квадратическое значение ординаты S_q характеризуется средним квадратическим отклонением неровностей $z(x, y)$ в пределах выборочного участка (зоны) поверхности:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy},$$

где A – выборочная зона (поверхность) в координатах x, y ; данное уравнение справедливо для непрерывной функции $z(x, y)$.

Арифметическое среднее абсолютного значения высоты S_a характеризуется средним арифметическим значений высоты в пределах выборочного участка поверхности

$$S_a = \frac{1}{A} \int_A |z(x, y)| dx dy .$$

Параметр S_a наиболее близок к параметру R_a , однако они фундаментально различны и при их сравнении следует быть очень внимательным. Для ареальных (или S -) параметров используют ареальные фильтры, в то время как для профильных (или R -) параметров – профильные.

Скошенность Ssk топографически распределенных высот представляет собой отношение среднего кубического значения высот в пределах выборочной зоны к S_q в третьей степени

$$Ssk = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \int_A \int_A z^3(x, y) dx dy \right] ,$$

а их куртозис Sku – отношение усредненных высот в пределах выборочной зоны в четвертой степени к S_q

$$Sku = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \int_A \int_A z^4(x, y) dx dy \right] .$$

Максимальная высота Sp пика (вершины) на поверхности определяет высоту наивысшего пика (вершины), глубина ямы (выемки) на поверхности Sv – наибольшую глубину ямы (выемки), а высота поверхности Sz – сумму высоты наибольшей вершины и глубины наиболее глубокой ямы или впадины на выборочном участке поверхности.

Зонные интервальные параметры описывают пространственные свойства поверхностей. Они созданы для оценки плотности пиков и прочности текстуры и полезны при установлении различий между сильно текстурированной и стохастически структурированной поверхностями.

Автокорреляционная длина Sal . Для получения этого параметра сначала необходимо определить автокорреляционную функцию (АКФ) в виде корреляции данной поверхности и АКФ, смещенную на tx, ty :

$$AK\Phi(tx, ty) = \frac{\iint_A z(x, y)z(x - tx, y - ty)dydy}{\iint_A z(x, y)z(x, y)dx dy},$$

тогда Sal определяется как расстояние по горизонтали $AK\Phi(tx, ty)$, на котором происходит ее наиболее быстрый спад до значения $0 \leq \varepsilon \leq 1$, указанного в специфицированных стандартах, т. е.

$$Sal = \min \sqrt{tx^2 + ty^2}.$$

Практически всегда, даже для относительно гладких поверхностей, $Sal = 2$ [4], хотя могут быть использованы другие значения, регламентируемые ареальными спецификационными стандартами. У анизотропной поверхности Sal вычисляется в направлении, перпендикулярном направлению обработки изделия. Большое значение Sal указывает на то, что на поверхности преобладают компоненты с низкими пространственными частотами, в то время как малое значение свидетельствует о противоположном случае. Параметр Sal – количественная мера расстояния вдоль поверхности, на котором расположена текстура, статистически отличная от той, где расположено начало отсчета длины.

Формат изображения текстуры поверхности Str используется при идентификации прочности поверхности, т. е. однородности ее формы, определяется как отношение самых быстрого и медленного спадов до уровня корреляционной длины 0,2 $AK\Phi$ поверхности и описывается выражением

$$Str = \frac{\min \sqrt{tx^2 + ty^2}}{\max \sqrt{tx^2 + ty^2}}.$$

В принципе значение Str находится в пределах 0 – 1. Если $Str > 0,5$, то это говорит об однородности поверхности во всех направлениях, т. е. отсутствует заметное направление обработки изделия. Меньшие значения указывают на чрезмерно сильную направленную структуру или направление обработки. Вполне возможно, что наиболее медленное спадание $AK\Phi$ для некоторых анизотропных поверхностей никогда не достигает значения 0,2 в пределах выборочного участка (зоны). В этом случае значение Str неправильно.

Данный параметр полезен при определении наличия следов обработки в любом из направлений. В случаях многопроцессорной обработки

он необходим при обнаружении присутствия подповерхностных модификаций.

Гибридными зонными параметрами называются параметры, основанные на амплитудной и пространственной информации. С их помощью численно определяются гибридные топографические свойства (наклон поверхности, кривизна выбросов и пограничные (интерфейсные) зоны), которые могут оказывать влияние любые изменения амплитуды или интервала. Их применение особенно уместно при изучении поведения механизмов с контактирующими поверхностями (трение, износ).

Средний квадратический градиент ограниченного участка поверхности определяется по формуле

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$$

и характеризует наклоны поверхности, также может быть использован при определении различий между поверхностями с идентичными значениями Sa . Он полезен при оценке уплотняющих поверхностей, а также для контроля поверхностей в косметической промышленности.

Математическое описание *отношения межфазовых участков поверхности ограниченных размеров* Sdr является отношением инкремента межфазовой зоны поверхности ограниченных размеров внутри определяемой зоны и описывается как

$$Sdr = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right].$$

Этот параметр позволяет различать поверхности с одинаковыми амплитудой и усредненной шероховатостью. Обычно Sdr увеличивается по мере усложнения пространственной структуры текстуры поверхности независимо от Sa . Он нужен при оценке покрытий поверхности и ее адгезионных свойств, а также в случаях применения смазок и жидкостей. Более того, с его помощью можно оценить степень рассеяния света, падающего на поверхность.

Функции зонной характеристики текстуры поверхности и связанные с ними параметры являются распространением в ареал профильных кривых и параметров [1].

Ареальное материальное отношение ограниченной в размерах поверхности представляет собой функцию, отображающую зависимость отношения ограниченной в размерах поверхности от высоты. Относящиеся к этой характеристике параметры вычисляются аппроксимацией упомянутой функции совокупностью прямых линий. Параметры, получаемые из трех частей функции являются пиками над средним плато, множеством самих плато и впадинами между ними.

Ареальное материальное отношение $Smc(c)$ – это отношение материала специфицированной высотой c к оцениваемой площади, выраженной в процентах. Высоты отсчитываются от референтной плоскости.

Обратное ареальное материальное отношение $Sdc(mr)$ имеет вид высоты c , при которой удовлетворяется ареальное материальное отношение mr , причем отсчитываемое от референтной плоскости.

Ареальные параметры для функциональных поверхностей с ограниченными размерами определены спецификационными стандартами [6, 7].

Пористость $Vv(mr)$. Количество пор на единицу поверхности для данного материального отношения вычисляется по формуле, основанной на кривой этого отношения:

$$Vv(mr) = \frac{K}{100} \int_{mr}^{100} [Sdc(mr) - Sdc(q)] dq,$$

где K – константа, мм/м².

Объем пустот при материальном отношении p равен $Vvv = Vv(p)$, а сущность («истинность») пористости материала (разность пористостей при материальных отношениях p и q) – $Vvc = Vv(p) - Vv(q)$, где согласованные значения для p и q равны соответственно 10 и 80 % [4].

Материальный объем $Vm(mr)$ – это объем материала, приходящийся на единицу площади при данном материальном отношении, вычисляемый по кривой ареального материального отношения

$$Vm(mr) = \frac{K}{100} \int_0^{mr} [Sdc(q) - Sdc(mr)] dq.$$

Пиковое значение материального объема при данном значении p равно $Vmp = Vm(p)$, а сущность («истинность») материального объема – $Vmc = Vm(p) - Vm(q)$.

Экстремальная высота пика Sxp представляет собой разность высот при значениях p и q на кривой материального отношения

$$Sxp - Smr(p) - Smr(q),$$

где p и q равны, соответственно 97,5 и 50 % [4].

Функция градиента плотности вычисляется по данным поверхности ограниченных размеров и связывает относительные пространственные частоты с углом $\alpha(x, y)$ и направлением $\beta(x, y)$ ступенчатых градиентов при отсчете от оси x против часовой стрелки

$$\alpha(x, y) = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\partial z^2}{\partial y} + \frac{\partial z^2}{\partial x}};$$

$$\beta(x, y) = \operatorname{tg}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial z}{\partial y} \\ \frac{\partial z}{\partial x} \end{bmatrix}.$$

Важным параметром характеристики является *направленность текстуры*, ограниченной размерами поверхности Std , представляющая собой угол θ относительно специфицированного направления максимального абсолютного значения углового спектра мощности, который для ареальной поверхности выглядит как 3D-график, на котором x, y – оси, отображающие различные пространственные частоты в данном направлении. Амплитуда углового спектра мощности (отложенная по оси z) имеет вид синусоиды при определенном направлении пространственной частоты. Угловой спектр мощности вычисляется интегрированием амплитуд каждой компоненты синусоидальной волны в функции от угла. Этот параметр полезен при определении направленности поверхности относительно начала путем надлежащего расположения образца в измерительном приборе. Он также необходим при детектировании наличия предварительного процесса модификации поверхности (например, обточки), последствия которого могут быть устранены последующей ее обработкой (например, шлифованием).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.552.11.7056) с применением оборудования Центра коллективного пользования ВНИИОФИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Leach R. K.** Fundamental Principles of Engineering Nanometrology //Elsevier Science & Technology. 2010. P. 315.
2. **Нанотехнологии**, метрология, стандартизация и сертификация в терминах и определениях /Под ред. М. В.Ковальчука, П. А.Тодуа. М.: Техносфера, 2009.
3. **ISO/DIS 25178:2007.** Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal – Pt. 71: Software measurement standards.
4. **ISO/DIS 25178:2008.** Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal. Pt. 6: Classification of methods for measuring surface texture.
5. **ISO 4287:2000.** Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters.

Дата принятия 10.01.2013 г.