

## МЕТОДОЛОГИЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА 3D-ПОВЕРХНОСТИ ПО ЕЕ ПРОФИЛЬНЫМ И ТОПОГРАФИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

**С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ\*, С. А. КОНОНОВ\*, В. Г. ЛЫСЕНКО\*,  
Н. А. ТАБАЧНИКОВА\*, Г. Г. ЛЕВИН\*\***

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

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

*Приведен аналитический обзор материалов, посвященных вопросам обеспечения единства измерений параметров и характеристик рельефа и шероховатости поверхности в микро- и нанометровом диапазонах. Выявлены существенные различия в топографической и профильной оценках вероятностных характеристик параметров рельефа поверхности. Проведено сравнение необходимого числа измерений для получения заданной точности и степени достоверности микрофотографических и профильных параметров.*

**Ключевые слова:** обеспечение единства измерений, профилометрия, шероховатость, текстура поверхности, микрофотографические параметры.

*The analytical survey of materials on the uniformity of measurements assurance and on the surface relief and roughness characteristics in micro- and nanometer ranges is carried out. The significant distinctions in topographic and profile estimations of probability characteristics of surface relief parameters were revealed. The comparison of the number of measurements necessary for achieving the given accuracy with the credibility value of microphotographic and profile parameters is carried out.*

**Key words:** ensuring unity of measurements, profilometriya, roughness, surface texture, microtopographical parameters.

Упреждающее развитие методов и средств измерений (СИ), опирающихся на достижения в метрологии, является неотъемлемым компонентом любых инновационных процессов (в том числе в сфере нанотехнологий), для которых характерны геометрические формы и размеры объектов до 100 нм. Значительный интерес при этом представляют поверхностные, приповерхностные (окисиды, загрязнения, покрытия

тия и пр.) и подповерхностные явления и эффекты, характерные для наноструктурированных материалов. Поэтому на первый план выходит проблема унифицированной и стандартизированной характеристики нанообъектов и наноструктур по параметрам (величинам), отображающим их геометрические свойства в плоскости и объеме (2D- и 3D-метрии).

Под характеристикой принято понимать процедуру, обеспечивающую количественную оценку с гарантированной неопределенностью одного или совокупности параметров (или величин), отображающих свойства нанообъекта (наноструктуры). Ее выполнение требует наличия или разработки методики выполнения измерений или испытаний нанообъекта (наноструктуры), соответствующего СИ или их совокупности, прослеживаемых к первичным эталонам единиц величин, алгоритмов и программного обеспечения обработки и отображения получаемой измерительной информации с учетом необходимости оценки неопределенности получаемых результатов. При этом следует соблюдать требования международных стандартов и других нормативных документов.

Как и в любом другом виде измерений, в данном случае предпринимаются попытки унификации терминов и определений [1 – 6]. Согласно [5, 6], обобщающим термином при измерениях геометрических параметров поверхности в нанометровом диапазоне является ее топография, определяемая как совокупность следующих характеристик поверхности объекта:

- структуры, т. е. всех характерных ее признаков в непрерывном диапазоне длин волн;

- формы (плоской, цилиндрической, сферической и пр.);

- текстуры (главным образом ее шероховатости после механической или другой обработки).

Однако в 2D- и 3D-метриях значительно чаще используют термин «рельеф поверхности», который следует считать синонимом понятия огибающей формы поверхности или ее топографической карты, в то время как текстура характеризует свойства всех слоев.

Современные методы и средства 3D-метрии текстуры поверхности должны обладать высокими разрешающей способностью при выполнении линейно-угловых измерений объектов и (или) измерении их наноразмерных перемещений, точностью и прослеживаемостью СИ к первичным эталонам единиц измеряемых величин и параметров, а

также методической и аппаратной возможностью выполнения как профильного (от точки к точке), так и топографического («площадочного», т. е. по площади ограниченных лишь полем зрения СИ размеров) сбора и последующей обработки измерительной информации.

Линейно-угловые измерения объектов и измерения наноразмерных перемещений базируются на методах и средствах:

- контактной и оптической профилометрии;
- сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ);
- прецизионной интерферометрии и интерференционной микроскопии.

Методы и средства контактной и оптической профилометрии, а также сканирующей зондовой микроскопии предпочтительны для выполнения «поточечных» измерений текстуры поверхности, а также при измерениях перемещений (т. е., по существу, расстояний между точками). С их помощью можно выполнять и «покадровые» измерения путем профилирования поверхности поочередно во многих направлениях, но при этом следует считаться с невысокими скоростями сбора данных. В то же время методы и средства интерференционной микроскопии, а в особенности прецизионной интерферометрии, обладают относительно высоким быстродействием и позволяют оперативно «покадрово» получить изображение топографической карты поверхности с деталями рельефа.

Следует отметить, что фирмы VEECO и ZYGO (США), несомненные мировые лидеры в области интерференционной микроскопии, серийно выпускают интерференционные профилометры с субнанометровым разрешением по глубине, обладающие высоким быстродействием и широкоугольностью объективов, что позволяет использовать метод профилирования для «покадровой» съемки. Что касается измерений перемещений в пределах нанометрового диапазона их траекторий, то здесь применимыми оказываются лишь методы и средства интерферометрии, базирующиеся, в основном, на бесконтактных наноинтерферометрах с оптическими схемами Линника, Физо, Майкельсона, Тваймана–Грина, Маха–Цендера, Фабри–Перо.

Следует учитывать, что даже близкая к идеальной оптическая поверхность в нанометровом диапазоне размеров оказывается не зеркально отражающей, а диффузно рассеивающей, что предъявляет ряд специфических требований к оптическим схемам интерферометров и интерференционных микроскопов, используемых при измерениях 3D-параметров рельефа и перемещений в нанометровом диапазоне.

Таким образом, для обеспечения единства измерений в области измерений текстуры (шероховатости и рельефа) поверхности и перемещений в нанометровом диапазоне необходима разработка научных, технических и нормативно-методических составляющих этой системы, опирающейся на прослеживаемость рабочих СИ к первичным эталонам единиц величин и параметров, обеспечивающим возможность выполнения линейно-угловых измерений. В частности, необходимо создание комплекса эталонов и построение системы поверочных схем, обеспечивающих воспроизведение, хранение и передачу единиц геометрических величин в области метрологического обеспечения нанотехнологий.

Во многих зарубежных метрологических центрах, таких как РТВ (Германия), NIST (США) созданы системы обеспечения единства измерений геометрических величин в нанометровом диапазоне. В состав систем входит ряд компьютерных сканирующих зондовых микроскопов, интерферометров, дифрактометров, а также комплекс национальных нормативных документов, что служит основой для всех систем измерений, связанных с текстурой поверхности в нанометровом диапазоне. В связи с этим возникает необходимость участия российских метрологических институтов в международных сличениях, например, в области прецизионных измерений шероховатости и рельефа поверхности с целью подтверждения измерительных и калибровочных возможностей в нанометровом диапазоне. Однако решение столь сложной проблемы требует разработки концепции построения системы обеспечения единства измерений, первым этапом которой является анализ способов характеристики объектов измерений, специфики измерительных задач и факторов, определяющих формирование неопределенности результатов измерений и разрешающую способность измерительной аппаратуры.

Методология характеристики текстуры 3D-поверхности по ее профильным и топографическим параметрам в нанометровом диапазоне совершенствуется, начиная с последнего десятилетия XX в. Поэтому необходимо ознакомиться с первоначальными подходами к решению этой проблемы, а затем рассмотреть ее современное состояние.

Еще во второй половине XX в. Ю. В. Линником и А. П. Хусу была разработана математико-статистическая модель профиля нерегулярной шероховатости поверхности в виде реализации нормального однородного изотропного и простейшего анизотропного полей с экспонен-

циальной корреляционной функцией [7, 8]. Высота шероховатостей поверхности рассматривалась как случайная функция двух независимых переменных – декартовых координат на некоторой поверхности, от которой велся отсчет высот. На ее основе были получены аналитические выражения вероятностных характеристик микротопографических параметров шероховатости. Для микротопографического параметра  $R_{as}$  – среднего арифметического отклонения точек поля  $h(x, y)$  от плоскости  $(x, y)$  – получено выражение

$$R_{as} = \frac{1}{L^2} \int_0^L \int_0^L |h(x, y)| dx dy,$$

где  $L$  – сторона квадрата, на котором исследуется шероховатость поверхности.

Математическое ожидание параметра

$$E\{R_{as}\} = \sqrt{2/\pi} K(0,0), \quad (1)$$

где  $K(0,0)$  – дисперсия шероховатости поля.

Математическое ожидание оценки профильного параметра отличается от (1) лишь тем, что вместо  $K(0,0)$  берется дисперсия профиля  $K(0)$ . При  $K(0) = K(0, 0)$  математические ожидания профильной и топографической оценок параметра  $R_{as}$  совпадают. Оценка статистической точности микротопографического параметра  $R_{as}$  определяется его дисперсией [9]

$$D\{R_{as}\} = \frac{4}{L^4} K(0,0) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{(2v)!} [\Phi_0^{2(v-1)}]^2 \int_0^L \int_0^L \int_0^L \int_0^L \rho^{2v}(r) dx_1 dx_2 dy_1 dy_2, \quad (2)$$

а соответствующая дисперсия профильной оценки параметра  $R_a$  равна

$$D\{R_a\} = \frac{4}{L^2} K(0) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{(2v)!} [\Phi_0^{2(v-1)}]^2 \int_0^L \int_0^L \rho^{2v}(r) dt_1 dt_2. \quad (3)$$

Здесь  $\Phi^{(v)}(0)$  – производная в нуле интеграла вероятности (табулированная функция);  $\rho(r)$  – нормированная корреляционная функция.

Также были получены оценки зависимости числа измерений микротопографического  $R_{as}$  и профильного  $R_a$  параметров от их вероятностных характеристик.

Для поверхности с корреляционной функцией  $\rho(r) = e^{-(a_1 r_1^2 + a_2 r_2^2)}$  число измерений микротопографического параметра  $R_a$  на площади  $LXL$ , обеспечивающих заданную относительную погрешность  $\epsilon$  при доверительной вероятности  $\beta$  и будет для  $a_1 = a_2 = a$

$$n_{R_{ax}} = \pi t_\beta^2 / (4\epsilon^2 a L^2).$$

Число измерений по профилю длиной  $L$ , обеспечивающих заданную относительную погрешность измерения  $\epsilon$  при доверительной вероятности  $\beta$ , будет

$$n_{R_a} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \frac{t_\beta^2}{L\epsilon^2}.$$

Анализ показывает, что если для оценки профильного параметра  $R_a$  необходима трасса, состоящая из восьми базовых длин, то при той же точности оценки  $R_a$  по участку изотропной поверхности достаточно одного измерения, проведенного в квадратной площадке со стороной, равной одной базовой длине.

Рассмотренные вероятностные характеристики определены для нерегулярной эргодической модели шероховатой поверхности [8]. Однако на практике реальные поверхности с нерегулярным рельефом могут быть неэргодическими в направлениях, определяемых как механической обработкой, так и направлениями трения для изношенных поверхностей. Это приводит к появлению зависимости профильных оценок параметров шероховатости  $R_a$  и  $t_p$  от направления измерения. При этом топографические методы измерений дают значительно большую стабильность и почти не зависят от направления измерения.

Сравнение необходимого числа измерений топографической и профильной оценок параметра, обеспечивающих заданную точность (определяемую относительной погрешностью) и степень достоверности, также указывает на преимущество топографического подхода. Это в полной мере относится к характеристикам максимумов на профилограмме и на поверхности, а также к зависящим от них характеристикам. Необходимо различать максимумы на профилограмме и на поверхности. Профилограмма чаще проходит по склону выступа на поверхности, нежели по вершине, однако на ней такой участок будет выглядеть как пик, хотя и меньшей высоты. Поэтому она указывает на наличие гораздо меньшего числа высоких выступов на поверхности. Следует отметить, что и математические условия существования мак-

симумов и минимумов для поверхности и ее профиля различны. Например, точка является максимумом на профиле, однако она может оказаться точкой перегиба на поверхности. Средние значения градиента поверхности и наклона профиля также различны.

Следует отметить, что опубликованные к настоящему времени модели математического описания характеристик шероховатых поверхностей позволяют получать аналитические зависимости для оценки таких топографических параметров, как радиусы закругления, углы наклона боковых сторон к линии выступов, количество выступов, приходящихся на заданную площадь.

Кроме нерегулярной и регулярной существует ряд моделей, представляющих шероховатую поверхность в виде набора сфер, конусов, цилиндров, клиньев, стержней, пирамид. Они используются для решения частных задач и поэтому здесь не рассматриваются. Существует большой класс шероховатых поверхностей представляющих собой композиционные поверхности в виде суммы детерминированной низкочастотной и случайной высокочастотной составляющих. Низкочастотная составляющая оказывает большое влияние на ряд показателей эксплуатационных свойств поверхности, например фактическую площадь контакта. Однако до настоящего времени не разработаны пространственные дискретные математические модели композиционной поверхности.

Рассмотренные выше работы, основанные на аналоговых математических моделях нерегулярной и регулярной шероховатой поверхности, носят теоретический характер. Так как прямые аналоговые измерения микротопографических параметров невозможны, важное их преимущество – малость по сравнению с профильными оценками дисперсии аналоговых оценок микротопографических параметров – не реализуемо на практике. Известные разработки косвенных методов измерений микротопографических параметров для частных моделей нерегулярной шероховатости ограничены рамками адекватности моделей. Вопросам прямой количественной оценки микротопографических параметров посвящены работы И. В. Дунина–Барковского [например, 10], в которых отмечается, что критерием точности и достоверности оценки микротопографических параметров служит в конечном счете опыт, под которым следует понимать исследование поверхности, ее микрорельефа или топографической карты рельефа, построенной так, чтобы по ней с достаточной точностью могли быть непосредственно определены требующиеся параметры. Микротопографические карты необходимы для следующих процессов:

развития идей математического описания поверхностей;  
оценок степени применимости моделей шероховатой поверхности (нерегулярной, регулярной, стержневой, цилиндрической, конической, сферической и др.);

прямой количественной оценки микротопографических параметров и показателей эксплуатационных свойств поверхностей (планиметрированием опорных площадей, оценкой распределения неровностей по высоте и т. д.);

оценки точности и достоверности приближенных профильных методов определения параметров неровностей поверхности.

При анализе одной из причин сдерживания широкого практического применения микротопографических параметров, вызванной отсутствием серийно выпускаемого оборудования для их измерений, найдено решение вопроса путем перспективной опережающей стандартизации микротопографических параметров. Опережающий стандарт должен определить микротопографические и профильные параметры и методы оценки близости вторых к первым.

Таким образом, не выявлено существенного различия в топографической и профильной оценках вероятностных характеристик параметров шероховатости. Сравнение необходимого числа измерений для получения заданной точности и степени достоверности микротопографических и профильных параметров показало, что первые параметры при тех же точностных требованиях нуждаются в гораздо меньшем числе измерений. Статистическая устойчивость микротопографических параметров объясняется тем, что базовая площадка шероховатой поверхности содержит гораздо больше информации, чем сечение поверхности с длиной, равной базовой. Это говорит о важности пространственных оценок поверхности и о перспективности развития СИ, позволяющих ускорять процесс определения микротопографических параметров с помощью сканирования поверхности.

Известные математические модели процедуры топографической оценки параметров нерегулярной шероховатости поверхности имеют ряд ограничений. Они предназначены либо для изотропных поверхностей, либо для частного случая анизотропных поверхностей, обладающих экспоненциальной корреляционной функцией. При других условиях в оценку параметров вносится погрешность. Аналитические выражения для математических ожиданий ряда параметров слишком приближенные или чрезвычайно громоздкие, они непригодны для аналитических расчетов зависимости. Рассмотренные математические модели считаются корректными при условии, что шероховатость

идеально выделена из общей совокупности неровностей без учета реальной процедуры измерения параметров фильтрации и связанных с ней погрешностей. Все существующие до настоящего времени пространственные модели шероховатой поверхности являются аналоговыми и не учитывают влияния дискретизации (неизбежной при прямых измерениях) систематической и случайной погрешностей на оценку вероятностных характеристик микротопографических параметров шероховатости.

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. **Арутюнов П. А. и др.** Феноменологические характеристики для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии // Методы и техника измерений. 1999. № 6. С. 89 – 93.
2. **Белов В. К.** Параметры шероховатости поверхностей и их контроль: Учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во МГМИ, 1990.
3. **ГОСТ Р 8.629–2007.** Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов. Методика проверки.
4. **Ковальчук М. В., Тодуа П. А.** Нанотехнологии, метрология, стандартизация и сертификация в терминах и определениях. М.: Техносфера, 2009.
5. **Метрологическое** обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии: Уч. пособие / Под ред. В. Н. Крутикова. М.: Логос, 2011.
6. **Leach R.** Fundamental Principles of Engineering Nanometrology Elsevier Inc., 2010.
7. **Линник В. П.** Прибор для интерференционного исследования микропрофиля поверхности – «микропрофилометр» // ДАН СССР. 1945. Т. 47. № 9. С. 656 – 657.
8. **Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А.** Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975.
9. **Бараш В. Я., Резников А. Л.** Применение образцовых вибраторов для метрологической аттестации контактных средств измерений шероховатости поверхности // Измерительная техника. 1983. № 8. С. 43 – 45.
10. **Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н.** Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М: Машиностроение, 1978.

*Дата принятия 10.01.2013 г.*