

## МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, С. Д. ВАСИЛЬКОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vm57med@yandex.ru*

Представлен анализ стандартных методов оценивания микрогеометрии поверхностей деталей изделий. Рассмотрен и обоснован метод, определенный как непараметрический подход (метод проф. В. А. Валетова), суть которого заключается в использовании графических изображений различных функций в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхности. Эффективность данной оценки микрогеометрии поверхностей подтверждается исследованиями, приведены результаты экспериментов, выполненных с использованием непараметрических критериев.

*Ключевые слова:* микрогеометрия поверхности, непараметрические критерии оценки, изображения графиков плотности и функции распределения ординат

Качество узлов изделий во многом зависит именно от качества поверхностей сопряженных в них деталей, поэтому в технических устройствах значительное внимание уделяется трению и износостойкости. Как известно из практики, трение и износ деталей обусловлены в основном микрогеометрией их поверхностей, в этой связи оценка микрогеометрии и анализ влияния этого фактора на функциональные свойства изделий представляются особо важными [1, 2].

В настоящей статье рассматривается графический непараметрический подход к оценке микрогеометрии при заданных функциональных свойствах поверхности.

Существует несколько мировых стандартов, которые регламентируют методы оценивания микрогеометрии поверхностного слоя. Это стандарты Международной организации по стандартизации (ISO), а также разработанные на их базе региональные и национальные стандарты: например, для профильной оценки — ISO 4287, 11562, 12085, 12179, 1302, 13565, 3274, 4288, 5436, 8785, а для анализа трехмерной текстуры поверхности — ISO 25178. Свой набор стандартов есть также и в России, однако они достаточно давно не редактировались и нуждаются в существенной доработке (например, ГОСТ 2789-73). Также наблюдается недостаток регламента трехмерной оценки топографии поверхности [3]. Одной из лабораторий Тихоокеанского государственного университета (Хабаровск) с 2013 г. ведутся работы по переходу на трехмерную оценку шероховатости поверхности и созданию специального программного обеспечения.

Наиболее полным, из вышеперечисленных, вариантом оценки микрогеометрии поверхности является стандарт ISO 25178, на основе которого выделяются 5 групп параметров [4]:

— высотные параметры (height parameters), определяемые на основе статистического распределения значений по высоте;

— пространственные параметры (spatial parameters), содержащие данные о пространственной периодичности (текстуре), в частности о ее направлении;

- гибридные параметры (hybrid parameters), относящиеся к пространственной форме;
- функциональные параметры (functional parameters), рассчитываемые на основе соотношений количества материала к заданным высотам профиля;
- параметры сегментации (segmentation parameters), получаемые путем сегментации поверхности по впадинам и вершинам.

Указанные параметры крайне важны при описании поверхностей свободной формы, например для микро-нано-электромеханических систем, зеркал телескопов и микролинз, к которым предъявляются высокие требования по отклонению формы поверхности и ее качеству [5].

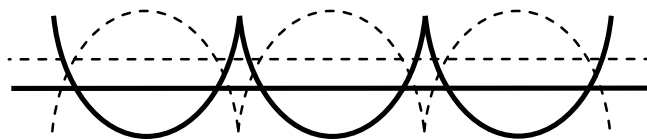
Однако некоторые поверхности не могут быть полностью описаны с помощью перечисленных параметров. Например, в работе [6] указывается, что отдельные параметры шероховатости, например, отвечающие за объем материала в разных зонах, взаимосвязаны с трибологическими эксплуатационными характеристиками поверхности подшипника. В работе [7] описаны исследования по поиску корреляции между коэффициентом трения и параметрами шероховатости  $R_{pk}$ ,  $R_k$  и  $R_{vk}$  для процесса трения между хонингованной поверхностью цилиндра двигателя и кольцами поршня. В результате корреляция составила 0,65—0,67, что следует считать недостаточно высоким показателем.

Для более полного описания микрогеометрии поверхности рассматривают также корреляцию между несколькими параметрами шероховатости: так, в работе [8] определена линейная корреляция между высотным параметром  $S_a$  и тринадцатью другими, в том числе текстурными, параметрами при исследовании стерильных поверхностей, а также при замене стали на другие материалы.

Подробно описать микрогеометрию поверхности удастся при рассмотрении 3D-топографии, как, например, это показано в работе [9] по исследованию поверхности, обработанной при точении деталей высокой твердости инструментом типа PCBN. Сложность текстуры поверхностей была описана пятью различными параметрами, что позволило выделить смешанные анизотропные текстуры для различных видов металлорежущего инструмента.

В настоящее время в отечественной инженерной практике наиболее распространенный метод оценивания микрогеометрии поверхности основан все же на так называемом параметрическом подходе. Параметрический метод описания микрогеометрии сводится к использованию различных параметров профиля поверхности, к примеру, таких как  $R_a$  и  $R_z$ . При этом на практике технологическое обеспечение функциональных свойств поверхности заключается в достижении значения параметра шероховатости, указанного в чертеже. Преимуществом данного метода является простота, однако такое упрощение приводит к потере информации о микрорельефе, который обладает конкретными функциональными свойствами в определенных условиях эксплуатации. Поэтому применение параметрического метода оценивания и контроля микрогеометрии во многом исключает возможность ее оптимизации для конкретного функционального свойства поверхностей, так как не позволяет точно описать требуемую микрогеометрию при ее нормировании на чертежах деталей механизмов и устройств.

Наглядно вышеизложенное можно представить схемой (см. рисунок), где изображены два профиля микрорельефа поверхности с общепринятыми одинаковыми параметрами, к примеру, по  $R_a$ . Однако характерные свойства и структура этих поверхностей различны.



Различие функциональных свойств данных поверхностей во многом очевидно, а стандартные параметры при этом одинаковы [10]. Если иметь в виду, что на большинстве чертежей деталей шероховатость каждой отдельной поверхности нормируется только параметрами

$R_a$  или  $R_z$ , то оптимизировать микрогеометрию по конкретным функциональным свойствам поверхности не представляется возможным. Таким образом, при нормировании любым стандартным параметром не может быть определена структура рельефа поверхности, а следовательно, ее функциональные свойства.

В частном случае для оптимизации микрогеометрии поверхности с целью поиска наилучшей характеристики функционального свойства целесообразно применить так называемый „непараметрический подход“, предложенный проф. В. А. Валетовым [11]. Суть подхода заключается в использовании изображений графиков различных функций в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхности, в частности изображения графиков плотности распределения ординат и плотности распределения тангенсов углов наклона профиля, которые показывают вероятность появления определенной высоты для данного профиля. Графический вид необходим вследствие сложности описания кривой математическими зависимостями.

При экспериментальном определении наилучшего из возможных микрорельефов для конкретного функционального свойства поверхности следует фиксировать этот микрорельеф и определить технологию его получения. Нормировать необходимо конкретные функциональные свойства поверхностей, присвоив им постоянные номера, и далее фиксировать эти номера в чертежах. Во многих случаях контроль микрогеометрии при серийном производстве целесообразно осуществлять наложением графического изображения функции контролируемой поверхности на эталонное изображение этой функции. При этом могут быть использованы как контактно-щуповые, так и оптические методы [12, 13].

Эффективность оценки микрогеометрии поверхностей по методу В. А. Валетова доказывается рядом работ, которые проводились его учениками (Ю. С. Андреевым, В. В. Медунецким, Е. А. Филимоновой, С. Д. Третьяковым, О. С. Юльметовой, Д. Б. Леоновым) [1, 12, 14, 15].

Выявлено в частности, что в период установившейся (равновесной) шероховатости трущихся поверхностей изменяются их функциональные свойства [1]. В этой работе приведено описание эксперимента по исследованию трущихся поверхностей на машине трения с использованием непараметрических критериев. Суть эксперимента заключалась в том, что испытанию подвергались изготовленные образцы с различной исходной микрогеометрией поверхности, представляющие собой пластины из стали размером 170×105×13 мм, и стержневые инденторы (также из стали) диаметром 11 мм и длиной 60 мм. После каждого испытания на машине трения образцы подвергались измерениям на профилометре, в результате которых были определены стандартные параметрические критерии оценки шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  исходных рабочих поверхностей образцов, а также построены графики плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля (непараметрические критерии) [1, с. 33, рис. 3]. В результате установлено, что после периода приработки поверхностей, в период так называемой установившейся шероховатости, характеризуемой постоянством параметров  $R_a$  и  $R_z$  (изменение только в пределах погрешности измерения), микрорельеф поверхностей изменяется.

Целесообразно отметить, что в настоящее время во многих областях техники происходит значительное усложнение геометрических форм изделий, что приводит к активному развитию технологий получения формообразующих матриц, используемых для литья или штамповки деталей. При этом к качеству изготавливаемых матриц предъявляются определенные требования, к которым относятся не только высокая твердость материала и его износостойкость, но и характер шероховатости поверхности матрицы, непосредственно влияющей на качество поверхности получаемой детали. Поэтому для изготовления формообразующих матриц активно используют электроэрозионное оборудование и, прежде всего, электроэрозионные

прошивные станки. Одной из важнейших особенностей электроэрозионного способа получения металлических поверхностей является характер их микрогеометрии [16].

Как было показано, использование параметрического подхода к оценке шероховатости поверхностей не дает объективной картины о микрогеометрии исследуемого профиля, поэтому на электроэрозионном оборудовании был проведен ряд экспериментов, а оценка микрогеометрии осуществлялась, в том числе, и по методу В. А. Валетова.

В ходе исследований, описанных в работе [10], на электроэрозионном прошивном станке Form-20 фирмы “Agie Charmilles” (Швейцария) было изготовлено пять опытных образцов с одинаковой шероховатостью поверхности  $R_a = 1,6$  мкм. Образцы представляют собой пластины из стали, а их обрабатываемая поверхность выделена в пределах  $10 \times 10$  мм с глубиной обработки 0,05 мм в режиме полирования. Конкретные режимы обработки исследуемых поверхностей изделий (технологические таблицы режимов обработки) рассчитаны с использованием программного продукта фирмы “Agie Charmilles”.

Измерение профилей поверхностей образцов производилось на профилометре “Hommel Tester”. Были получены около 50 000 высотных значений шероховатости для каждого изменяемого профиля. В среде MatLab была выполнена обработка численных значений микрорельефов и построены графические изображения исследуемых профилей. В результате установлено, что при одинаковом параметре  $R_a = 1,6$  мкм плотности распределения ординат существенно отличаются от одного образца к другому. Это также доказывает, что параметр  $R_a$  не может служить объективной оценкой шероховатости при электроэрозионной обработке.

Также в ходе исследований [10] был проведен другой эксперимент, суть которого заключалась в том, чтобы доказать влияние микрогеометрии поверхности на различные аспекты процесса электроэрозионной обработки. Были рассчитаны и изготовлены два электрода с различной шероховатостью рабочих поверхностей: у первого электрода  $R_a = 0,4$  мкм, у второго  $R_a = 2,7$  мкм, также микрорельеф поверхностей фиксировался с помощью непараметрических критериев. Все остальные параметры электродов одинаковы. Данными электродами были отполированы одинаковые поверхности размером  $10 \times 10$  мм на плите, изготовленной из стали ХВГ при одном и том же режиме обработки.

В результате этого эксперимента получены две эквивалентные поверхности с параметром  $R_a = 0,1$  мкм, но при этом вторая поверхность (обработанная электродом с шероховатостью  $R_a = 2,7$  мкм) была получена, при равных прочих условиях, на 40 минут быстрее, чем первая поверхность (при продолжительности электроэрозионного процесса в 150 минут в первом варианте). С учетом того, что основным недостатком электроэрозионной обработки является низкая производительность, данный эксперимент выявил возможность уменьшения времени обработки поверхностей за счет оптимизации шероховатости поверхности электрода-инструмента, которая была зафиксирована с помощью непараметрических критериев.

Приведен еще один пример, демонстрирующий использование непараметрических критериев для оценки микрорельефа поверхностей. В работе [12] представлены результаты исследований по влиянию амплитуды осцилляции инструмента на микрогеометрию поверхности при импульсном фрезеровании плоских титановых образцов при следующих параметрах обработки: подача — 0,2 мм/об, частота вращения — 1850 об/мин, глубина резания — 0,5 мм; амплитуда осцилляции инструмента изменялась от 5 до 25 мкм с шагом 5 мкм, при постоянном расстоянии между импульсами 10 мкм.

Следующий пример [14] — измерения микрогеометрии поверхностей трения проводились с одинаковыми временными интервалами при неизменных режимах работы пар трения. В результате этих исследований после завершения процесса приработки наблюдалась следующая картина: параметрические характеристики микрогеометрии поверхности оставались на одном уровне, тогда как характер микрогеометрии, зафиксированный с высокой точностью с помощью непараметрических критериев, постоянно изменялся. По изображениям гра-

фигов функций плотности распределения ординат профиля поверхности (микрорельеф которой исследовался после каждых 10 минут работы образцов на трение) сделан вывод, что пикообразный „всплеск“, демонстрирующий наиболее характерный для данной поверхности уровень впадин (вершин), циклически смещается то в область впадин, то в область вершин.

Таким образом, представленные примеры показывают, что предложенный проф. В. А. Валетовым непараметрический подход к оценке микрогеометрии поверхностей изделий является достаточно объективным и позволяет во многих случаях на практике решать конкретные конструкторско-технологические задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Ю. С., Медунецкий В. В. Исследования изменения микрорельефа поверхностей в процессе их трения скольжения // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 9. С. 30—34.
2. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 344 с.
3. Давыдов В. М., Заев В. В., Паночевный П. Н., Козаченко Ю. А., Прохорец О. В. Анализ международной практики профильной и трехмерной оценки шероховатости поверхности // Электронное науч. издание „Ученые заметки ТОГУ“. 2013. Т. 4, № 4. С. 1061—1074 [Электронный ресурс]: <[http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2013/TGU\\_4\\_199.pdf](http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2013/TGU_4_199.pdf)>, 14.12.2015.
4. Torims T., Vilcans J., Zarins M., Strazdina I., Ratkus A. Implications of the new ISO surface roughness standards on production enterprises // Annals of DAAAM & Proc. 2010. Vol. 21, N 1. P. 835—836.
5. Jiang X., Scott P. J., Whitehouse D. J., Blunt L. Paradigm shifts in surface metrology. P. II. The current shift // Proc. R. Soc. A. 2007. Vol. 463. P. 2071—2099. DOI: 10.1098/rspa.2007.1873.
6. Franco L. A., Sinatoro A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of  $S_{pk}$  and its relationship to  $V_{mp}$  // Precision Engineering. 2015, N 40. P. 106—111.
7. Sabeur M., Ibrahim D., Mohame E.-M., Hassan Z. Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack system // Tribology International. 2013. N 59. P. 240—247. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.01.015.
8. Bergman M., Rosen B.-G., Eriksson L., Anderberg C. Surface design methodology — challenge the steel // Proc. of the 14th Intern. Conf. on Metrology and Properties of Engineering Surfaces: Journal of Physics: Conf. Ser. 2014. N 483. DOI: 10.1088/1742-6596/483/1/012013.
9. Zawada-Tomkiewicz A. Analysis of surface roughness parameters achieved by hard turning with the use of PCBN tools // Estonian Journal of Engineering. 2011. Vol. 17, N 1. P. 88—99. DOI: 10.3176/eng.2011.1.09.
10. Валетов В. А., Медунецкий В. В. Экспериментальные исследования получения микрогеометрии функциональных поверхностей деталей методом электроэрозионной обработки // Металлообработка. 2012. № 3(69). С. 19—23.
11. Валетов В. А. Возможные критерии оценки шероховатости обработанных поверхностей // Труды ЛКИ. 1976. Вып. 108. С. 135—140.
12. Валетов В. А., Филлимонова Е. А. Применение непараметрических критериев для оценки микрогеометрии при импульсном фрезеровании // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 52—54.
13. Melikyan S. R. Nonlinear optical laser surface profilometer // Measurement Techniques. 2015. Vol. 57, N 12.
14. Третьяков С. Д., Юльметова О. С. О проблемах оптимизации микрогеометрии поверхностного слоя деталей приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 8. С. 12—15.
15. Ivanov A. Y., Leonov D. B. Methodology for optimization, evaluation and control of products surface roughness // Fundamental Sciences and Applications: Journal of the Techn. Univ. Sofia (Plovdiv branch), Bulgaria. 2012. Vol. 17. P. 19—23.
16. Валетов В. А., Медунецкий В. В. Обеспечение качества поверхностей деталей на электроэрозионном оборудовании // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2(78). С. 113—117.

**Сведения об авторах**

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Сергей Дмитриевич Васильков** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: sergey.vasilkov@corp.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
16.11.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Медунецкий В. М., Васильков С. Д. Методы оценивания микрогеометрии поверхностей деталей изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 231—236.

**ASSESSMENT METHODS FOR WORKPIECE SURFACE MICROGEOMETRY**

**V. M. Medunetskiy, S. D. Vasilkov**

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*  
*E-mail: vm57med@yandex.ru*

An analysis of standard methods of parts surface microgeometry assessment is carried out. Consideration is given to a new method defined as a nonparametric approach (prof. V. A. Valetov method) based on the use of graphic images of various functions as standards for estimation and control of surface microgeometry. Effectiveness of this approach is confirmed by presented results of experimental studies performed with the use of nonparametric estimation criteria.

**Keywords:** surface microgeometry, nonparametric estimation criteria, function graph image, ordinates distribution function

**Data on authors**

- Victor M. Medunetskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Sergey D. Vasilkov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: sergey.vasilkov@corp.ifmo.ru

**For citation:** Medunetskiy V.M., Vasilkov S.D. Assessment methods for workpiece surface microgeometry // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 3. P. 231—236 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-231-236