

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ^{1*}, С. В. СОЛК², Л. А. ГЛУЩЕНКО²¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*vm57med@yandex.ru

²Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Ленинградская обл., Сосновый Бор, Россия

Аннотация. Экспериментально обоснована необходимость введения среднеквадратической шероховатости R_q в нормативные и конструкторские документы для оптических поверхностей, так как именно эта величина позволяет оценить энергетические потери, связанные с рассеянием излучения. Приведены результаты сравнения R_q и среднеарифметического отклонения профиля R_a оптических поверхностей, которые сформированы полированием и алмазным микрооточением. Показано отсутствие однозначной связи между этими характеристиками. Отмечается целесообразность перехода от двумерных измерений к трехмерным при нормировании и измерении шероховатости, в частности, это актуально в случае отсутствия симметрии в топографии шероховатости.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, оптический элемент, алмазное микрооточение, рассеяние света

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Солк С. В., Глущенко Л. А. Особенности оценивания шероховатости оптических поверхностей // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 524—527. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-524-527.

FEATURES OF ROUGHNESS EVALUATION OF OPTICAL SURFACES

V. M. Medunetsky¹, S. V. Solk², L. A. Glushchenko²¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

vm57med@yandex.ru

²Research Institute of Optoelectronic Instrumentation,
Leningrad region, Sosnovy Bor, Russia

Abstract. The need to introduce the root-mean-square roughness R_q into regulatory and design documents for optical surfaces is substantiated experimentally. It is noted that this parameter value makes it possible to estimate the energy losses associated with radiation scattering. The results of comparison of R_q and the arithmetic mean deviation of the profile R_a of optical surfaces, which are formed by polishing and diamond micro-turning, are presented. The absence of an unambiguous relationship between these characteristics is shown. The expediency of transition from 2D-metry to 3D-metry when normalizing and measuring roughness is observed; in particular, this is relevant in the case of a lack of symmetry in the roughness topography.

Keywords: roughness of surface, optical element, diamond micro-turning, light scattering

For citation: Medunetsky V. M., Solk S. V., Glushchenko L. A. Features of roughness evaluation of optical surfaces. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 6. P. 524—527 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-524-527.

Качество рабочих поверхностей оптических элементов (ОЭ) во многом определяется их шероховатостью. В Российской Федерации шероховатость регламентируется: ГОСТ 2789-73 (Параметры и характеристики), ГОСТ 25142-82 (Термины и определения), ГОСТ Р 70117-2022 (Рекомендации по выбору). ГОСТ 2789-73 задает шесть параметров: R_a — среднеарифметическое отклонение профиля, R_z — наибольшая высота профиля, R_{max} — полная высота профиля, S_m — средний шаг неровностей, t_p — относительная опорная длина профиля. Отмечается, что параметр R_a является предпочтительным и направление сечения не оговаривается,

но на практике подразумевается, что оно соответствует наибольшим значениям высот. ГОСТ 25142-82 устанавливает применяемые в науке, технике и производстве термины и определения, относящиеся к шероховатости поверхностей. Здесь уже появляется много дополнительных терминов и определений, в частности среднеквадратическое отклонение профиля R_q .

На практике, в чертежах ОЭ, шероховатость рабочих поверхностей задается по R_z (обычно $R_z = 0,05$), что не всегда обоснованно. По нашему мнению, для оптических поверхностей более подходящим является параметр R_q .

Это обусловлено тем, что шероховатость оптической поверхности определяет рассеяние оптического излучения, что приводит к энергетическим потерям на оптических элементах системы. Для оценки качества оптических поверхностей геометрические характеристики микротопографии поверхностей должны быть связаны с характеристиками рассеянного излучения. Скалярная теория рассеяния [1] дает связь между коэффициентом зеркального отражения r_S , полным коэффициентом отражения поверхности r_0 , среднеквадратическим отклонением профиля R_q и длиной волны λ :

$$r_S / r_0 = \exp \left[- \left(4\pi R_q \cos \theta / \lambda \right)^2 \right].$$

Здесь θ — угол падения излучения на поверхность.

Из формулы видно, что для оценки потерь за счет рассеяния необходимо знание величины R_q .

В ряде работ даются оценочные соотношения между значениями R_a и R_q . Так, в [2] указано $R_q/R_a \approx 1,25$. В работе [3] для регулярной шероховатости, профиль которой близок к синусоиде, теоретическое значение $R_q/R_a \approx 1,11$. Для нормального „случайно“ выбранного профиля теоретическое значение $R_q/R_a \approx 1,25$. Для микрошероховатости типичными значениями являются $R_q/R_a \approx 1,20—1,35$, однако для некоторых поверхностей соотношение составляет 1,45.

Нами была измерена шероховатость поверхностей после алмазного микроточения (АМТ) [4] образца из бескислородной меди марки МОб. Технология АМТ была выбрана благодаря скорости формообразования и возможности оперативного получения различных значений шероховатости путем изменения подачи и глубины резания. Обработка велась на станке АМТ фрезерного типа [5] модели МО 600ПЛ [6]. Результаты измерений приведены в таблице.

Параметр	№ образца					
	1	2	3	4	5	6
$R_a, \text{Å}$	105	124	162	166	272	449
$R_q, \text{Å}$	132	158	192	200	319	546
R_q/R_a	1,26	1,27	1,18	1,2	1,17	1,21

Также были проведены измерения образца из монокристаллического германия после формообразования на станке АМТ. Результаты измерений показали, что $R_a = 31 \text{ Å}$, $R_q = 38 \text{ Å}$, $R_q/R_a = 1,22$. Во всех случаях измерения проводились на атомно-силовом микроскопе AFM-S-AE-004 (Швейцария).

Ранее нами измерялась шероховатость ОЭ из алюминиевых сплавов 1201 и АМг-6. Их среднеквадратическая шероховатость находилась в диапазоне 40—100 Å. Соотношение R_q/R_a попадало в диапазон 1,2—1,34. Измерения проводились контактным способом на профилометре (профилографе) фирмы Talister (Великобритания) контактным методом.

В работе [7] приведены результаты измерений шероховатости плоских зеркал, изготовленных из алюминиевого сплава Б95 на станке модели МО1045. Получены значения $R_a = 120 \text{ Å}$, $R_q = 205 \text{ Å}$, $R_q/R_a = 1,7$. Оценка шероховатости проводилась при помощи оптического 3D-профилометра Contour GTK0 фирмы Zeiss (Германия).

В работе [8] приведены результаты измерений шероховатости сверхгладких поверхностей из ситалла на интерферометрах белого света СС1-2000 (фирмы Taylor – Hobson) и

NV-6200 (фирмы Zygo). Соотношение R_q/R_a составило 1,26—1,32. Проведенные нами измерения рабочих поверхностей ОЭ из оптического стекла, монокристаллических кремния и германия, медных и алюминиевых сплавов показали, что соотношение R_q/R_a составляет 1,21—1,4.

Таким образом, непосредственные измерения шероховатости рабочих поверхностей ОЭ, а также анализ литературных источников показали, что соотношение R_q/R_a может находиться в пределах 1,18—1,7, разброс значений составляет примерно 30 % от максимального значения.

В последние годы изменяются методы и средства измерения шероховатости поверхностей, постепенно происходит переход от двумерных измерений к трехмерным. Трехмерные оценки позволяют получать более достоверные и информационно емкие результаты. Особенно это важно для поверхностей, формирование которых осуществлялось с использованием технологии АМТ. Такие поверхности имеют регулярную структуру и, как следствие, различную шероховатость поверхностей и различные оптические свойства для различных сечений поверхности. Переход к трехмерным оценкам рекомендован стандартом ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, который введен в РФ, но из-за сложности необходимого оборудования и программного обеспечения не нашел широкого применения на приборостроительных предприятиях.

Следует отметить, что на сегодняшний день существуют и другие взгляды на оценку шероховатости поверхностей. Так, в работе [9] рассмотрен графический непараметрический подход к оценке микрогеометрии поверхности.

Измерение шероховатости рабочих поверхностей крупногабаритных ОЭ, а также с высокими геометрическими апертурами представляет собой сложную техническую задачу. В ряде вариантов представляется целесообразным отказаться от требований к шероховатости рабочих поверхностей ОЭ и перейти к другим требованиям, например к рассеянию. Так, например, в работе [10] рассмотрена возможность использования планшетного сканера для измерения интенсивности рассеянного излучения.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы:

1) среднеквадратическое отклонение профиля (R_q), при задании шероховатости рабочих поверхностей ОЭ, более предпочтительно, чем среднеарифметическое (R_a), так как R_q непосредственно связано с величиной рассеяния оптического излучения;

2) не удалось выявить соотношения R_q/R_a для поверхностей, образованных АМТ и полированием. Считаем целесообразным параметр R_q указывать на чертежах ОЭ;

3) в ряде вариантов целесообразно на чертежах ОЭ указывать не только требования к шероховатости, но и другие требования, например к рассеиванию излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беннет Д. М., Маттсон Л. Шероховатость поверхности и рассеяние / Пер. с англ. Н. В. Васильченко. Вашингтон: Оптическое общество Америки, 1993. 119 с.
2. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
3. Измайлов В. В., Новосёлова М. В. О параметрах нанощероховатости и некоторых корреляционных соотношениях // Тр. XII междунар. науч.-техн. конф. „Трибология — машиностроению“, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. 2018. С. 210—213.
4. Медунецкий В. М., Солк С. В. Опыт применения и перспективы технологии алмазного микроточения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. Т. 89, № 1. С. 165—170.
5. Solk S., Shevtsov S., Iakovlev A. Designing of optical elements manufactured by diamond turning // SPIE. 2000. Vol. 4231. P. 181—188.

6. Справочник технолога-оптика / Под ред. М. А. Окатова. СПб: Политехника, 2004. 679 с.
7. Бурькин В. В., Найдено А. Г. Шероховатость поверхностного слоя оптических изделий после алмазного микрооточения // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. Т. 89, № 11(72). С. 26—31.
8. Азарова В. В., Цветкова Т. В. Анализ шероховатости прецизионных оптических поверхностей с использованием метода интерференционной микроскопии. // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 6. С. 82—87.
9. Медунецкий В. М., Васильков С. Д. Методы оценивания микрогеометрии поверхностей деталей изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 231—235.
10. Железняк А. Г., Сидоров В. Г. Планшетный сканер как прибор для физических исследований // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2015. Т. 218, № 2. С. 49—60.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО;
E-mail: vm57med@yandex.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — д-р техн. наук; Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения; заместитель начальника отдела;
E-mail: solk@sbor.net
- Лариса Александровна Глущенко** — канд. физ.-мат. наук; Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения; E-mail: GlushhenkoLA@nioep.ru

Поступила в редакцию 16.02.2023; одобрена после рецензирования 27.02.2023; принята к публикации 27.04.2023.

REFERENCES

1. Bennett J.M., Mattsson L. *Introduction to Surface Roughness and Scattering*, Optical Society of America, 1989, 110 p.
2. Dunin-Barkovsky I.V., Kartashova A.N. *Izmereniye i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti* (Measurement and Analysis of Surface Roughness, Waviness and Non-circularity), Moscow, 1978, 232 p. (in Russ.)
3. Izmailov V.V., Novosyolova M.V. *Tribologiya – mashinostroyeniye* (Tribology – Mechanical Engineering), Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference dedicated to the 80th anniversary of IMASH RAS, 2018, pp. 210–213. (in Russ.)
4. Medunetsky V.M., Solk S.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1(89), pp. 165–170. (in Russ.)
5. Solk S., Shevtsov S., Iakovlev A. *SPIE*, 2000, vol. 4231, pp. 181–188.
6. Okatov M.A., ed., *Spravochnik tekhnologa-optika* (Reference Technologist-Optics) St. Petersburg, 2004, 679 p. (in Russ.)
7. Burykin V.V., Naydenko A.G. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 11(89), pp. 26–31. (in Russ.)
8. Azarova V.V., Tsvetkova T.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 6(57), pp. 82–87. (in Russ.)
9. Medunetsky V.M., Vasilkov S.D. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 3(59), pp. 231–235. (in Russ.)
10. Zheleznyak A.G., Sidorov V.G. *St. Petersburg Polytechnic University Journal - Physics and Mathematics*, 2015, no. 2(218), pp. 49–60. (in Russ.)

Data on authors

- Viktor M. Medunetskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Sergey V. Solk** — Dr. Sci.; JSC “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering”, Deputy Head of Department; E-mail: solk@sbor.net
- Larisa A. Gluschenko** — PhD; JSC “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering”; E-mail: GlushhenkoLA@nioep.ru

Received 16.02.2023; approved after reviewing 27.02.2023; accepted for publication 27.04.2023.