

## Разработка виртуальных образцов шероховатости

С.Р. Абульханов<sup>1,2</sup>, С.Д. Полетаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** Контроль шероховатой поверхности проводят визуально или контактным методом профилирования. В обоих случаях используют физические эталоны шероховатости с заданными параметрами шероховатости  $Ra$ . Эталонную поверхность получают различными технологическими воздействиями. Технологические процессы подвержены влиянию случайных факторов, поэтому эталонная поверхность имеет отклонения параметра  $Ra$  от заявленной величины. Мы предлагаем осуществлять контроль шероховатости по её изображению. В этом случае недостаточно информации для определения нормативных параметров шероховатости. Мы вводим параметр шероховатой поверхности  $\zeta$ , который использует нормативные параметры  $Ra$  и  $Rz$ .

Исследования пяти изображений эталонов шероховатой поверхности, выполненных на стекле, мы проводили с помощью интерферометра белого света New View 7300. Мы определили номинальную величину параметра шероховатости  $\zeta$  для каждого эталона шероховатости. Для каждой строки изображений шероховатой поверхности 5-ти эталонов мы определили параметр шероховатости  $\zeta$ . Изображение поверхности эталонов шероховатости мы рассматривали, как косвенное измерение высот микрорельефа. Синтез эталонной шероховатой поверхности мы провели на основе изображения физической поверхности эталона шероховатости. Для выявления наиболее характерных фрагментов шероховатой поверхности эталона использовался коэффициент корреляции Спирмена, с помощью которого мы оценивали связь строк изображения.

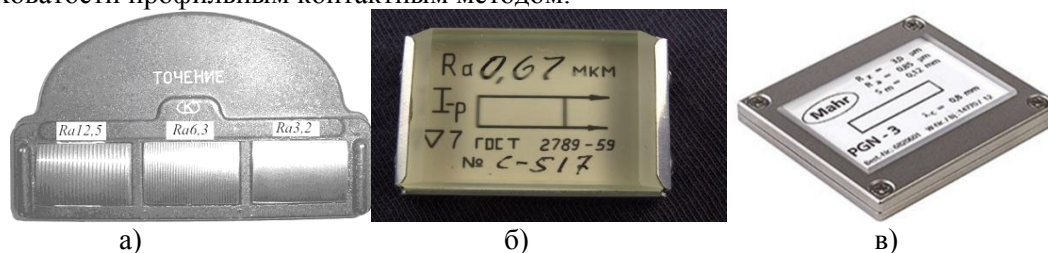
Созданный нами виртуальный эталон шероховатой поверхности позволяет повысить объективность визуального контроля шероховатых поверхностей и численно измерять близость контролируемой и эталонной шероховатых поверхностей.

### 1. Введение

Визуальный (рисунок 1а) и контактный методы контроля шероховатой поверхности наиболее широко используются для контроля поверхностей различной природы. Устройства профильного контроля шероховатости требуют регулярной настройки тарировки с помощью физического эталона шероховатости (рисунок 1б, с) [1-7].

Анализ изображения эталонной шероховатой поверхности (рисунок 2) показал: что одноименные пиксели различных строк растрового изображения имеют различную яркость. Это означает: одноименные микронеровности продольных сечений шероховатой поверхности имеют различные высоты. По аналогичной причине высоты микронеровностей также не совпадают для различных продольных сечений шероховатой поверхности. По этим причинам эталонная шероховатая поверхность на рисунке 2 может локально соответствовать заявленному

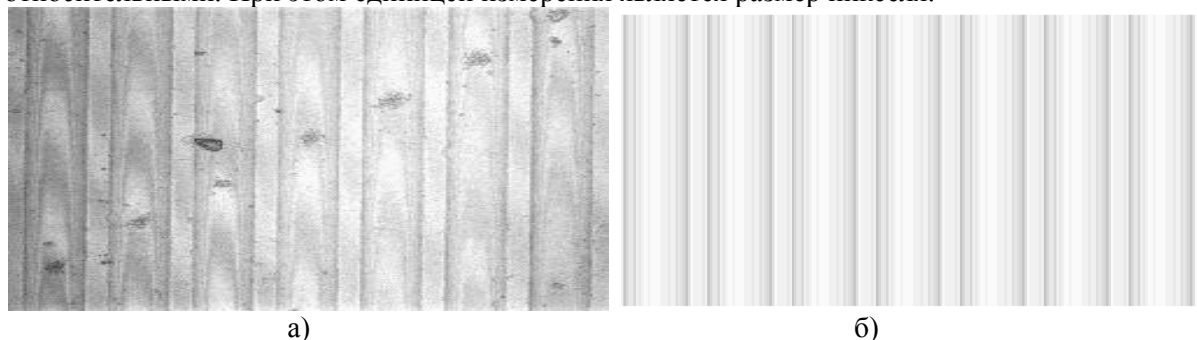
в техническом паспорте параметру Ra (ГОСТ 2789-73 *Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения*). Это обстоятельство снижает точность контроля шероховатости профильным контактным методом.



**Рисунок 1.** Эталоны шероховатой поверхности: *a* – эталон шероховатости, сформированной точением, для визуального контроля (ГОСТ 9378-93); *b* – эталон шероховатой поверхности для тарировки устройств профильного контроля шероховатости (ГОСТ 2789-59); *c* – эталон шероховатой поверхности для тарировки устройств профильного контроля шероховатости (производитель Mahr, Inc., Germany).

В российском руководящем документе РТМ–1.4.120-80. «*Методы контроля шероховатости поверхности*» указывается: при визуальном сравнении шероховатых поверхностей детали и образца (эталона, рисунок 1 *a*) относительная погрешность контроля может превосходить 70 %. Мы считаем, что в качестве эталонной шероховатой поверхности (рисунок 1 *a*) следует использовать изображение шероховатости, синтезированное на компьютере. В этом случае на синтезированном изображении будет отсутствовать погрешности, которые формируют случайные факторы на поверхности физического эталона (рисунок 1 *a*). Для проведения контроля путем сравнения необходимо иметь изображение исследуемой шероховатой поверхности. Синтезированное изображение эталона и изображение контролируемой поверхности должны быть получены при равных условиях: освещенность, пространственное положение камеры, размеры изображения, цветовая палитра и др.

На растровом изображении шероховатой поверхности отсутствует информации об абсолютных размерах микронеровностей. Любые измерения на изображении могут быть только относительными. При этом единицей измерения является размер пикселя.



**Рисунок 2.** Изображение эталонной шероховатой поверхности: *a* – физический эталон с  $Ra = 0,16 \text{ мкм}$  (увеличение  $\times 1000$ ); *b* – синтезированный виртуальный эталон.

Для количественной оценки «близости» контролируемой и эталонной шероховатых поверхностей необходимо определить параметр (далее  $\zeta$ ), который удовлетворяет следующим условиям:

- параметр шероховатой поверхности  $\zeta$  определяются по её изображению;
- параметр  $\zeta$  рассчитывается с использованием существующих нормативных параметров шероховатости (ГОСТ 2789-73). Это необходимо для преемственности с данными справочной технической литературы;
- параметр  $\zeta$  должен быть безразмерным и нормированным для возможности сравнения различных изображений шероховатой поверхности.

На изображении синтезированной эталонной шероховатой поверхности параметр  $\zeta$  может быть различным для различных строк и столбцов. Это возможно, когда контролируемая шероховатая поверхность имеет, например, несколько рисок (выступов).

Если изображение эталонной шероховатой поверхности получено с помощью камеры, то необходимо использовать рассеянное освещение, которое не создает теней. В этом случае на изображении не будет искажений микрорельефа, которые могут формироваться зонами затенения.

## 2. Постановка задачи

Эталонная шероховатость нанесена на поверхности из стекла (рисунок 1 *b, c*). Изображение микронеровностей мы получили с помощью интерферометра белого света модель ZYGO New View 7300 (Zygo Corporation, USA. Mailing address: 21 Laurel Brook Rd, Middlefield, CT 06455). Увеличение изображения микронеровностей составляло  $\times 1000$ . Все изображения шероховатой поверхности имели размеры  $239 \times 258$  пикселей, а также были черно-белыми с 256 градациями серого цвета.

В ходе исследования мы проанализировали пять изображений эталонов шероховатой поверхности (ГОСТ 9378-93 «*Roughness comparison specimens. General specifications*»), у которых был параметр шероховатости  $R_a$ , соответственно: 0,16; 0,17; 0,25; 0,32; 0,67 (мкм).

Для определения нового параметра шероховатости  $\zeta$  мы использовали параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ , нормированные стандартом ГОСТ 2789 – 73. Наш выбор был обусловлен тем, что параметры  $R_a$  и  $R_z$  являются высотными параметрами.

Мы определили параметр шероховатости  $\zeta$  следующим образом:

$$\zeta = 2 \sqrt{\log_{10}(R_a + 1) \log_{10}(R_z + 1) / (\log_{10}(R_a + 1) + \log_{10}(R_z + 1) + 1)} \quad (1)$$

Для абсолютно гладкой поверхности, когда  $R_a = R_z = 0$ ,  $\zeta = 0$ . Для абсолютно неровной поверхности, когда  $R_a \gg 0$  и  $R_z \gg 0$ ,  $\zeta \rightarrow 1$ .

В ГОСТ 2789-73 приведены соотношения между значениями параметров  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  и базовой длины. Это обстоятельство позволяет определить границы изменений параметра  $\zeta$  для разных базовых длин (или используя терминологию ГОСТ 2789-59 для разных классов шероховатости). В ГОСТ 2789 - 73 не предусмотрена обязательная привязка базовых длин к определенным числовым значениям параметров шероховатости. По этой причине параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  мы определяли воль строк и столбцов изображения. При вычислении параметров  $R_a$  и  $R_z$  в качестве значений высот микронеровностей мы использовали величину яркости пикселя.

В таблице 1 приведено соответствие между величинами параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ , различными базовыми длинами, классами шероховатости и параметром  $\zeta$ . При вычислении параметра  $\zeta$  нормативные величины  $R_a$  и  $R_z$  измерялись в мм.

**Таблица 1.** Соответствие между величинами параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ , базовыми длинами, классами шероховатости и параметром  $\zeta$ .

$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	Базовая длина, мкм	Класс шероховатости	$\zeta$
20-80	80-320	8000	1-3	0,7510-0,8078
5-10	20-40	2500	4-5	0,6543-0,7093
0,63-2,5	3,2-10	800	6-8	0,3963-0,5823
0,04-0,32	0,2-1,6	250	9-12	0,067-0,2913
0,01-0,02	0,05-0,1	80	13-14	0,0187-0,0359

Выбор вида новой метрики шероховатой поверхности  $\zeta$  мы объясняем следующими причинами:

- в условиях производства или медицинской практики использование интерферометра белого света для контроля шероховатости связано со значительными трудностями (техническими, финансовыми и др.);

- изображение шероховатой поверхности, полученное иным методом, например, с помощью фотокамеры, не содержит информации об абсолютных величинах геометрии микронеровностей, поэтому невозможно использовать нормативные параметры шероховатости;

- в случае синтезирования изображения эталонной шероховатой поверхности различной природы необходимо иметь параметр шероховатости, который мог количественно определить различие между эталонной и контролируемой поверхностями.

Виртуальный эталон шероховатой поверхности мы синтезировали на основании изображения на рисунке 1. Изображение будем рассматривать, как матрицу  $I = [a_{i,j}]_{m,n}$ . Здесь  $a_{i,j}$  – яркость (градация серого цвета величиной от 0 до 255) пикселя с координатами  $i$  и  $j$ ,  $m$  и  $n$  – количество соответственно строк и столбцов изображения  $I$ . Распределение яркости пикселей вдоль строк и столбцов изображения  $I$  отлично от нормального распределения, поэтому для установления связи между строками изображения  $I$  мы использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена ( $\rho$ ) [8-9]. Мы синтезировали эталон шероховатости для двух уровней статистической значимости  $\alpha = 0,01$  и  $0,05$ . Расчёт параметра  $\zeta$  мы осуществляли только для строк синтезированного изображения. На рисунке 1  $b$  стрелками показано направление измерения шероховатости на эталоне, которое соответствовало на рис. 2  $a$  направлению строк изображения.

Формирование изображения эталонной поверхности мы осуществили следующим образом:

- определялись строки изображения  $S_i = \{a_{ij} : j = \overline{1, n}\}$ , для которых  $\rho_{i,j} \geq 0,7$  при этом  $i \neq j$ ;

- для каждой из выбранных строк  $\{S_k, S_l, S_p, \dots, S_t\}_q$  определяли последовательности пикселей  $\{s_r, s_{r+1}, s_{r+2}, \dots, s_{r+f_r}\}_f$  для  $f = \{k, l, p, \dots, t\}_q$ , которые наиболее часто встречаются в строке; - к последовательности пикселей  $\Omega$  добавляем последовательность  $\Omega$  до тех пор, пока общая длина последовательности пикселей не будет минимально отличаться от длины строк изображения  $I$ . К полученной таким образом строке присоединяют снизу эту же строку до тех пор, пока сформированная матрица не будет иметь столько строк, сколько у растрового изображения  $I$ .

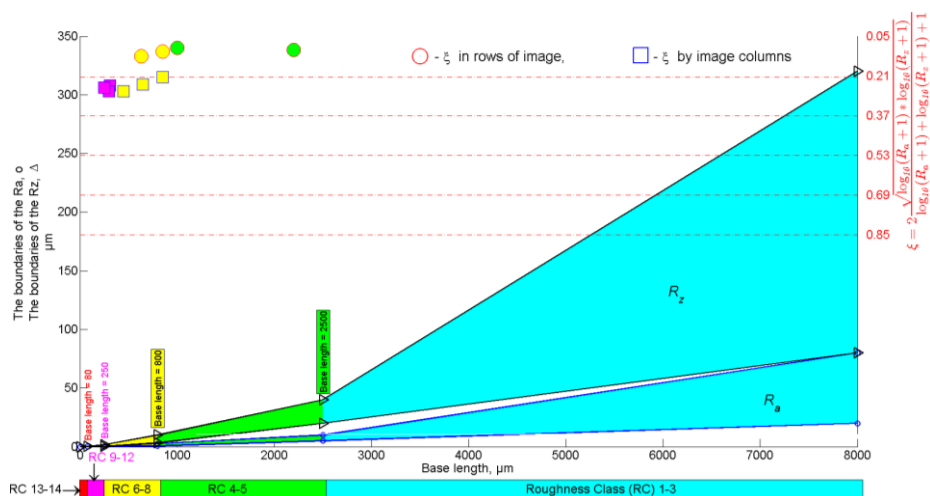
### 3. Результаты исследований

1. Анализ величин  $\zeta$  для строк и столбцов эталонной шероховатой поверхности на рисунке 2  $a$  показал следующее:

- значения параметра  $\zeta$  принимают величины, соответствующие различным базовым длинам или, что одно и то же, различным классам шероховатости (рисунок 3);
- значения параметра  $\zeta$  принимают величины, соответствующие различным базовым длинам от 250 до 2500 мкм или, что одно и то же, различным классам от 4 до 10 класса (рисунок 3);
- наиболее часто значения параметра  $\zeta$  соответствуют базовой длине 250 мкм (6-8 класс шероховатости). В 66 % случаев значения  $\zeta$  соответствуют 5-6 классу шероховатости. Следует отметить, что паспортные данные эталонной поверхности на рис. 2  $a$  соответствуют 9 классу шероховатости;
- Величина значений  $\zeta$ , вычисленных для столбцов, имеет более однородное распределение.

2. Аналогичное несоответствие параметров  $R_a$ ,  $R_z$ , базовых длин и параметра шероховатости мы наблюдали для ещё 4-х эталонных шероховатых поверхностей с  $R_a$ , равными 0,17; 0,25; 0,32; 0,67 мкм:

- параметр шероховатости  $\zeta$  для каждой строки изображения на рисунке 2  $b$  равен 0,146 (уровень статистической значимости  $\alpha = 0,01$ );
- параметр шероховатости  $\zeta$  для каждой строки равен 0,1461 (уровень статистической значимости  $\alpha = 0,05$ ).



**Рисунок 3.** Распределение значений параметра  $\zeta$  по строкам и столбцам изображения эталонной шероховатой поверхности.

#### 4. Заключение

Использование разработанной методики позволит повысить объективность контроля шероховатости по образцу.

Использование параметра  $\zeta$  позволяет установить количественно «близость» изображений эталонной и контролируемой шероховатых поверхностей.

Синтезированное изображение шероховатой поверхности и величина соответствующего параметра  $\zeta$  не зависят от уровня статистической значимости  $\alpha$ , равного 0,01 и 0,05.

Вычисление границ изменения параметра  $\zeta$  для диапазонов соответствия нормативных параметров  $R_a$  и  $R_z$  (ГОСТ 2789-73) приводит к тому, что появляются интервалы  $\zeta$ , которые не соответствуют ни одному из нормативных диапазонов изменения  $R_a$  и  $R_z$ . Мы предполагаем, что зависимость  $R_a$  и  $R_z$  для разных базовых длин может быть нелинейной. Поэтому необходимо изменить границы соответствия параметров  $R_a$  и  $R_z$ , предусмотренные стандартом. Исследования в этом направлении мы собираемся продолжить и полученные результаты опубликовать в следующей статье.

Рассмотренная методика может быть использована для контроля шероховатых поверхностей различной природы, например, биологических. Для синтеза эталона шероховатой поверхности биологического объекта (например, костной ткани на рентгенограмме) необходим алгоритм, который выявляет наиболее характерные особенности рельефа не по строкам, а по фрагментам изображения. В этом случае для каждого фрагмента должно определяться распределение градаций серого цвета, а также особенности его структуры (например, наличие протяжённых впадин или выступов). Важную роль разработанная методика может послужить при контроле шероховатости дифракционных микрорельефов, получаемых электронными, плазменными, лазерными, механическими и другими методами [10-23].

#### 5. Литература

- [1] Казанский, Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2006. – № 29. – С. 58-77.
- [2] Бородин, С.А. Устройство для анализа нанощероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 42-47.
- [3] Kazanskiy, N.L. Machine vision system for singularity detection in monitoring the long process / N.L. Kazanskiy, S.V. Popov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2010. – Vol. 19(1). – P. 23-30.
- [4] Kazanskiy, N.L. Interaction of dielectric substrates in the course of tribometric assessment of the surface cleanliness / N.L. Kazanskiy, S.V. Karpeev, V.A. Kolpakov, S.V. Krichevsky, N.A.

- Ivliev // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2008. – Vol. 17(1). – P. 37-42.
- [5] Полещук, А.Г. Методы оперативного контроля характеристик дифракционных оптических элементов в процессе изготовления / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, Р.К. Насыров, В.Н. Хомутов, А.С. Конченко // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 818-829. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-818-829.
- [6] Ивлиев, Н.А. Определение концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния методом трибометрии / Н.А. Ивлиев, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский, Н.Л. Казанский // *Измерительная техника*. – 2017. – № 9. – С. 12-15.
- [7] Подлипов, В.В. Исследование фотоиндуцированного формирования микроструктур на поверхности карбазолсодержащего азополимера в зависимости от плотности мощности освещающего пучка / В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев, С.Н. Хонина, Д.В. Нестеренко, В.С. Васильев, Е.А. Акимова // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 779-785. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-779-785.
- [8] Abul'hanov, S.R. Correlation image analysis of surface roughness / S.R. Abul'hanov, D.L. Skuratov, A.I. Khaimovich // *Key Engineering Materials*. – 2017 – Vol. 746 KEM. – P. 296-304.
- [9] Abul'khanov, S.R. Information Pattern in Imaging of a Rough Surface / S.R. Abul'khanov, N.L. Kazanskiy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018 – Vol. 302. – P. 012068. DOI:10.1088/1757-899X/302/1/012068.
- [10] Волков, А.В. Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // *Компьютерная оптика*. – 1998. – № 18. – С. 127-130.
- [11] Волков, А.В. Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // *Компьютерная оптика*. – 1998. – № 18. – С. 130-133.
- [12] Volkov, A.V. A Method for the diffractive microrelief formation using the layered photoresist growth / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.J. Moiseev, V.A. Soifer // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1998. – Vol. 29(4-5). – P. 281-288. DOI: 10.1016/s0143-8166(97)00116-4.
- [13] Казанский, Н.Л. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков // *Микроэлектроника*. – 2004. – Т. 33, № 3. – С. 209-224.
- [14] Казанский, Н.Л. Формирование оптического микро рельефа во внеэлектродной плазме газового разряда / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков. – М.: Радио и связь, 2009. – 220 с.
- [15] Казанский, Н.Л. Эффект объемной модификации полимеров в направленном потоке низкотемпературной плазмы / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков // *Журнал технической физики*. – 2009. – Т. 79, № 9. – С. 41-46.
- [16] Bezus, E.A. Interference pattern formation in evanescent electromagnetic waves using waveguide diffraction gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Quantum Electronics*. – 2011. – Vol. 41(8). – P. 759-764.
- [17] Abul'khanov, S.R. Manufacture of diffractive optical elements by cutting on numerically controlled machine tools / S.R. Abul'khanov, N.L. Kazanskiy, L.L. Doskolovich, O.Y. Kazakova // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31(12). – P. 1268-1272.
- [18] Kazanskiy, N.L. Gas discharge devices generating the directed fluxes of off-electrode plasma / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, V.V. Podlipnov // *Vacuum*. – 2014. – Vol. 101. – P. 291-297.
- [19] Казанский, Н.Л. Формирование микро рельефа методом термического окисления пленок молибдена / Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // *Письма в Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 42, № 3. – С. 106-110.
- [20] Завьялова, М.А. Поверхностная модификация кварцевого стекла импульсами пикосекундного лазера / М.А. Завьялова // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 863-870. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-863-870.
- [21] Казанский, Н.Л. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров / Н.Л. Казанский, И.С. Степаненко, А.И. Хаймович, С.В.

- Кравченко, Е.В. Бызов, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 203-214. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214.
- [22] Kazanskiy, N.L. Optical materials: Microstructuring surfaces with off-electrode plasma / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. – 212 p.
- [23] Тукмаков, К.Н. Изготовление методом лазерной абляции и исследование кремниевого фокусатора излучения терагерцового диапазона с непрерывным дифракционным микрорельефом / К.Н. Тукмаков, М.С. Комленок, В.С. Павельев, Т.В. Кононенко, В.И. Конов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 941-946. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-941-946.

### Благодарности

Теоретические исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 16-29-09528, экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

## Development of virtual roughness samples

S.R. Abulkhanov<sup>1,2</sup>, S.D. Poletaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

<sup>2</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** Control of a rough surface is carried out visually or by contact profiling methods. In both cases the use of physical measurement standards roughness with the specified parameters of roughness Ra. The reference surface is obtained by various technological influences. Technological processes are affected by random factors, so the reference surface has a deviation of the Ra parameter from the declared value. We propose to control the roughness of its image. In this case, there is not enough information to determine the normative roughness parameters. We introduce a rough surface parameter  $\zeta$ , which uses the normative parameters Ra and Rz.

We studied five images of rough surface standards made on glass using a white light interferometer model. We have determined the nominal value of the roughness parameter  $\zeta$  for each roughness standard. For each row of images of the rough surface of 5 standards, we determined the roughness parameter  $\zeta$ . The image of the surface roughness of the standards, we reviewed the indirect measurement of heights of the surface. The synthesis of the reference rough surface was carried out on the basis of the image of the physical surface of the roughness standard. To identify the most characteristic fragments of the rough surface of the standard, we used Spearman correlation coefficient, with which we estimated the relationship of the image lines.

The virtual standard of rough surface created by us allows to increase objectivity of visual control of rough surfaces and to measure numerically proximity of the controlled and standard rough surfaces.