

УДК 620.179.118.2:539.211

Оригинальная статья

О профильных характеристиках технических поверхностей применительно к наношероховатости

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Тверь, набережная Афанасия Никитина, 22

iz2v2@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.643

Аннотация. Рассмотрены параметры структуры технической поверхности на наномасштабном уровне, определяемые профильным методом. Показана возможность применения параметров, определяемых в соответствии с отечественными и международными стандартами для профиля шероховатости (микромасштабный уровень), к характеристике поверхности на наномасштабном уровне, выходящем за рамки стандартов. Такую возможность предоставляет лежащая в основе современных стандартов модель профиля технической поверхности как реализации широкополосного случайного нормального процесса. Проведена экспериментальная проверка нормальности процесса сравнением экспериментальных значений интегральной функции распределения вероятности ординат профиля с теоретическими значениями, подчиняющимися нормальному распределению. Приведены экспериментально полученные значения девяти наиболее важных параметров, а также их соотношения, подтверждающие достоверность модели профиля поверхности как нормального случайного процесса. Применение стандартных параметров профиля поверхности позволяет избежать ошибок и недоразумений, связанных с неоднозначной трактовкой того или иного параметра.

Ключевые слова: структура поверхности, наношероховатость, профильный метод, параметры профиля, нормальный случайный процесс.

1. Введение

Различные по назначению и конструкции контактные соединения используются практически в любом современном техническом устройстве. При этом в контакте участвуют технические поверхности, свойства и характеристики которых определяют надежность и эффективность контактного соединения и в конечном счете всего изделия. Направленное изменение этих свойств и характеристик осуществляется методами инженерии поверхности, один из которых заключается в управлении ее топографией [1]. В связи с этим существует потребность в количественных характеристиках топографии технических поверхностей на различных масштабных уровнях – от макроотклонений формы до наношероховатости.

Параметры структуры поверхности, определяемые профильным методом, регламентируются в настоящее время тремя отечественными стандартами: ГОСТ Р ИСО 4287 – 2014 [2], ГОСТ 2789-73 [3] и ГОСТ 25142-82 [4]. Первый из них гармонизирован с международным стандартом ISO 4287:1997 [5], актуальные версии двух других претерпели существенные изменения по сравнению с первоначальными редакциями. В 2021 году на смену международному стандарту ISO 4287:1997 [5] пришла

серия стандартов ISO 21920, наибольший интерес из которых представляет стандарт ISO 21920-2:2021 [6]. Гармонизированного отечественного стандарта пока нет. Указанные выше стандарты распространяются на два вида отклонений поверхности от заданной формы – шероховатость и волнистость. Однако с развитием нанотехнологий и средств измерений стали использоваться параметры наношероховатости, например, для характеристики морфологии поверхности наноразмерных металлических пленок [7-9] или для оценки влияния наношероховатости на характеристики контакта твердых тел [10]. Авторы ранее рассматривали некоторые характеристики наношероховатости в сравнении с аналогичными характеристиками микрошероховатости в работе [11]. Однако в связи с появлением новых стандартов на характеристики рельефа поверхностей некоторые выводы и результаты этой работы устарели. Поэтому цель настоящей работы – проанализировать основные нормированные параметры наношероховатости в свете актуальных редакций отечественных и международных стандартов.

2. Теоретические предпосылки

В современных стандартах разделение рельефа на шероховатость и волнистость производится с помощью процедуры фильтрации. При этом профиль поверхности рассматривается как широкополосный случайный процесс, содержащий спектр гармоник различной пространственной частоты (длины волны). Параметры шероховатости и волнистости определяются по одним и тем же методикам и алгоритмам. Это дает основания использовать аналогичные параметры на уровне наношероховатости. К наношероховатости (субшероховатости) относят элементы рельефа поверхности высотой менее 25-30 нм [12]. Таковы нижние границы высот неровностей поверхностей в большинстве стандартов. Наиболее важные на наш взгляд параметры рельефа, применимые в том числе к наношероховатости, приведены ниже.

Параметры амплитуды профиля поверхности. В актуальных версиях отечественных стандартов фактически отсутствует усредненная характеристика высоты шероховатого слоя.

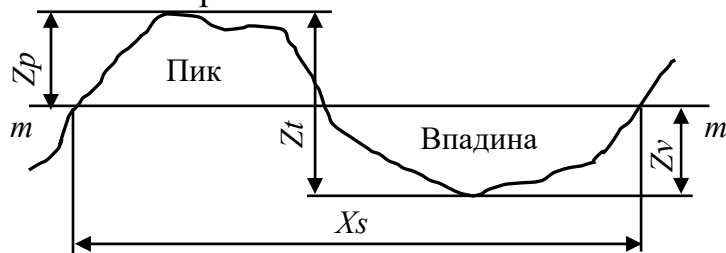


Рис. 1. Элемент профиля, mm – средняя линия профиля.

Оценкой высоты шероховатого слоя может служить параметр R_c –

средняя высота элементов профиля по [3]. Элементом профиля считается выступ и прилегающая к нему впадина (см. рис. 1). Параметр R_c рассчитывается по формуле $R_c = (1/n_e) \sum_{i=1}^{n_e} Z_{t_i}$, где n_e – число элементов профиля в пределах базовой длины. Следующие четыре параметра являются экстремальными величинами, т.е. определяются единственным значением в пределах базовой длины или длины оценки:

- R_p – максимальная высота пика профиля, равная максимальному значению Z_p в пределах базовой длины: $R_p = \max_{i=1 \dots n_e} Z_{p_i}$;
- R_v – наибольшая глубина впадины профиля, равная максимальному значению Z_v в пределах базовой длины: $R_v = \max_{i=1 \dots n_e} Z_{v_i}$;
- R_z – максимальная высота профиля: $R_z = R_p + R_v$;
- R_t – общая высота профиля, равная максимальному значению R_z в пределах длины оценки. Очевидно, что для любого профиля $R_t \geq R_z$.

Поскольку на длине оценки обычно укладывается несколько базовых длин, параметры R_p , R_v , R_z могут усредняться по числу базовых длин, что повышает их статистическую устойчивость. Очевидно, что экстремальные параметры R_z и R_t , характеризующие высоту шероховатого слоя, подвержены сильному влиянию случайных единичных аномально высоких пиков и аномально глубоких впадин.

В международный стандарт [6] включены три параметра, характеризующие усредненные амплитудные параметры профиля:

- $R5p$ – five-point peak height (высота пика по пяти точкам) – среднее арифметическое пяти наибольших высот пиков в пределах длины оценки;
- $R5v$ – five-point pit depth (глубина впадин по пяти точкам) – среднее арифметическое пяти наибольших глубин впадин в пределах длины оценки;
- $R10z$ – ten-point height (высота по десяти точкам), $R10z = R5p + R5v$.

Следующие два параметра статистически наиболее устойчивы и наиболее широко используются в метрологии поверхностей. Это арифметическое среднее отклонение оцениваемого профиля R_a и среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля R_q [3]. Рассчитываются эти параметры по стандартным методикам математической статистики для аналогичных характеристик любой случайной величины. Служить характеристикой высоты шероховатого слоя и многих других эксплуатационных свойств технической поверхности параметры R_a и R_q не могут, так как одному и тому же значению R_a или R_q могут соответствовать совершенно различные параметры размаха

высот элементов профиля Rz , Rp или Rv [13].

Опорная кривая профиля – информативная интегральная характеристика профиля технической поверхности. Фактически она представляет собой интегральную функцию распределения случайной величины – ординаты профиля $Z(x)$ – в пределах длины оценки. Опорная кривая профиля известна также как кривая Эбботта – Файрстоуна по имени авторов статьи, в которой она была предложена в 1934 году. В стандарте [3] она фигурирует как кривая коэффициента смятия профиля $Rmr(c)$ и выражает его зависимость от уровня сечения профиля c . Безразмерная величина $Rmr(c)$ равна отношению суммы длин сечений профиля линией, параллельной средней линии профиля и расположенной на расстоянии c по вертикали от вершины самого высокого выступа. Величина $c=0$ соответствует вершине самого высокого выступа, а $c=1$ – дну самой глубокой впадины на длине оценки. Типичный вид опорной кривой профиля представлен на рис. 2 в безразмерных координатах.

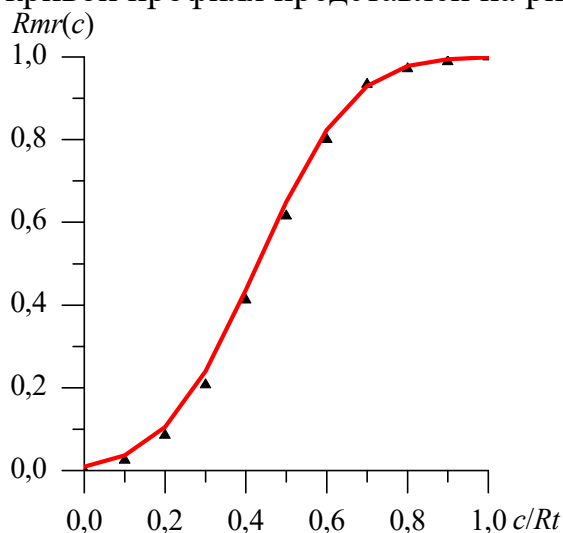


Рис. 2. Кривая коэффициента смятия профиля (кривая Эбботта – Файрстоуна). Линия – теоретическая зависимость, точки – экспериментальные значения.

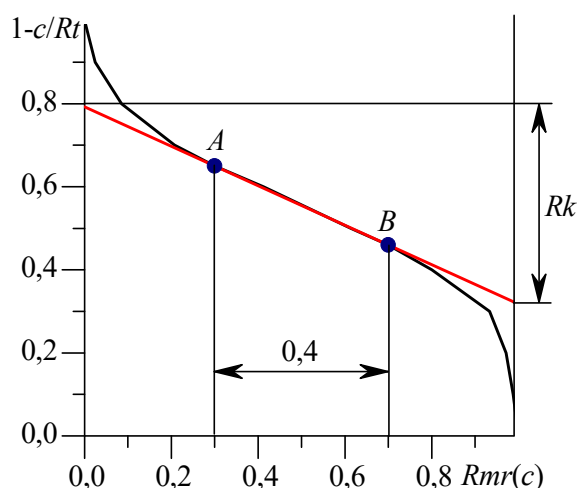


Рис. 3. Опорная кривая профиля и определение параметра Rk .

В таком виде она соответствует своему статистическому смыслу как интегральной функции распределения ординат профиля, но чаще ее изображают в другом виде (см. рис. 3), где вертикальная координата соответствует высоте шероховатого слоя, а горизонтальная – относительной доле материала на данном уровне сечения профиля.

На основании опорной кривой профиля устанавливается еще одна характеристика высоты шероховатого слоя, исключая случайные выступы и впадины – высота ядра профиля Rk . Для определения параметра Rk вдоль опорной кривой перемещается скользящая секущая AB (см. рис. 3), проекция которой на ось абсцисс должна составлять 40%

от длины оценки. В процессе перемещения находится положение секущей с наименьшим наклоном к оси абсцисс. В этом положении секущая продолжается до пересечения с вертикальными границами графика, соответствующими $Rmr(c)=0$ и $Rmr(c)=1$ (см. рис. 3). Вертикальное расстояние между точками пересечений принимается за величину Rk . Согласно экспериментальным данным, величина Rk определяет, например, износостойкость гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания [13].

3. Образцы и методика исследований

Объектом исследования в данной работе является наношероховатость поверхности высоколегированной термообработанной стали после финишной обработки (доводки). В основном параметры профиля рельефа исследуемой поверхности определялись обработкой профилограмм, полученных с помощью атомного силового микроскопа фирмы «NT-MDT», некоторые параметры определялись средствами штатного программного обеспечения микроскопа. Поскольку рекомендации соответствующих стандартов по выбору базовой длины не распространяются на наномасштабный диапазон рельефа, базовая длина выбиралась из рекомендации наличия на ней от 20 до 40 пересечений профиля средней линией [13]. Длина оценки составляла 5 базовых длин согласно рекомендациям стандартов на шероховатость.

4. Результаты экспериментов и их обсуждение

Первый результат, на который необходимо обратить внимание, это экспериментальное подтверждение применимости нормального (Гауссовского) случайного процесса в качестве модели профиля наношероховатости исследуемой поверхности (см. рис. 1). На рис. 1 сплошная линия – теоретическая интегральная функция распределения ординат профиля, соответствующая нормальному распределению с математическим ожиданием, равным Rp , и среднеквадратичным отклонением, равным Rq (см. Таблицу 1). По оси абсцисс отложена безразмерная случайная величина – относительная ордината профиля c / Rt , а по оси ординат – безразмерный параметр $Rmr(c)$, тождественный вероятности данного значения случайной величины. Точки соответствуют экспериментальным значениям параметра $Rmr(c)$, полученным обработкой профилограмм. Как видно из рис. 1, экспериментальные точки практически совпадают с теоретической кривой нормального распределения. Числовые значения профильных характеристик наношероховатости исследуемой поверхности приведены в Таблице 1. Доверительные интервалы соответствуют доверительной вероятности 95%, коэффициент вариации равен отношению среднеквадратического

отклонения к среднему значению. Параметры R_{10z} , R_k и R_t характеризуются единственным значением на длине оценки, поэтому доверительный интервал и коэффициент вариации для них не рассчитывались.

Таблица 1. Параметры шероховатости исследованной поверхности.

Характеристика	R_a	R_q	R_c	R_z	R_p	R_v	R_{10z}	R_k	R_t
Среднее значение, нм	2,5	3,2	6,0	17,0	7,4	9,6	6,6	7,8	19,6
Доверительный интервал, нм	0,24	0,23	0,50	2,25	0,75	2,00	–	–	–
Коэффициент вариации, %	7,6	6,1	6,7	10,6	8,1	16,7	–	–	–

Ожидаемо наименьшие значения коэффициентов вариации имеют параметры, усредняемые на базовой длине (R_a , R_q , R_c). Экстремальные параметры – R_z , R_p , R_v – менее стабильны (характеризуются более высокими значениями коэффициентов вариации).

В Таблице 2 приведены соотношения некоторых параметров профиля, из которых можно сделать следующие выводы.

Таблица 2. Соотношения параметров шероховатости исследованной поверхности.

Характеристика	R_q/R_a	R_z/R_q	R_z/R_a	R_z/R_c	R_z/R_{10z}	R_v/R_z	R_{10z}/R_c	R_t/R_z	R_k/R_t
Среднее значение	1,28	5,2	6,7	2,8	2,6	0,56	1,1	1,15	0,40
Доверительный интервал	0,026	0,50	0,70	0,22	0,28	0,042	–	–	–
Коэффициент вариации, %	1,7	7,7	8,4	6,4	8,5	6,1	–	–	–

Отношение параметров R_q/R_a практически совпадает с теоретическим значением 1,25 для нормального случайного процесса. Согласно известному в статистике правилу «шесть сигма» соотношение $R_z/R_q \approx 6$, что с учетом погрешности близко к экспериментальному значению из Таблицы 2. Полностью соответствует правилу «шесть сигма» соотношение $R_t/R_q = 5,98$ (с учетом последнего столбца Таблицы 2). Эти два результата еще раз подтверждают применимость модели случайного нормального процесса к профилю шероховатости. Вновь появившийся в международном стандарте [6] параметр R_{10z} численно практически совпадает с параметром R_c , при этом определение первого проще, чем последнего. Однако и тот, и другой параметры лишь косвенно характеризуют высоту шероховатого слоя, о чем говорят величины соотношений R_z/R_c и R_z/R_{10z} . Величина соотношения R_v/R_z говорит о несимметричности профиля: впадины преобладают по высоте над выступами профиля.

5. Заключение

Результаты проведенного анализа профильных характеристик технической поверхности на наномасштабном уровне свидетельствуют о возможности смещения нижней границы их применимости в область более

коротковолновых составляющих спектра рельефа, т.е. в область наношероховатости. Использование стандартных параметров для описания рельефа наношероховатости позволяет избежать неопределенностей и ошибок, связанных с неправильной трактовкой смысла того или иного параметра.

Библиографический список:

1. **Иванов, И.А.** Поверхность деталей машин и механизмов: учебное пособие для вузов / И.А. Иванов, С.В. Губенко, Д.П. Кононов. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 156 с.
2. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности: ГОСТ Р ИСО 4287-2014; введ. 01.01.2016. – М.: Стандартиформ, 2014. – 20 с.
3. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: ГОСТ 2789-73. – Взамен ГОСТ 2789-59; введ. 01.01.1975. – М.: Стандартиформ, 2018. – 7 с.
4. Шероховатость поверхности. Термины и определения: ГОСТ 25145-82; введ. 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 20 с.
5. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters: ISO 4287:1997; 1st ed. 01.04.1997. – Geneva: ISO copyright office, 1997. 36 p.
6. Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions, and surface texture parameters: ISO 21920-2:2021; 1st ed. 01.12.2021. – Geneva: ISO copyright office, 2021. 78 p.
7. **Иванов, Д.В.** Фрактальные свойства наноразмерных пленок никеля и хрома / Д.В. Иванов, А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 138-152. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.138.
8. **Антонов, А.С.** Исследование морфологии рельефа пленок меди на поверхности слюды / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов, К.Б. Подболотов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 19-26. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.019.
9. **Иванов, Д.В.** Различные схемы получения фрактального рельефа наноразмерных пленок платины / Д.В. Иванов, А.С. Антонов, Е.М. Семенова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 156-165. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.156.
10. **Измайлов, В.В.** Влияние нанотопографии поверхностей на характеристики дискретного контакта твердых тел / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – Вып. 8. – С. 139-144.
11. **Измайлов, В.В.** О параметрах нанотопографии технической поверхности и её профиля / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 313-321. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.313.
12. **Григорьев, А.Я.** Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А.Я. Григорьев. – Минск: Беларуская навука, 2016. – 247 с.
13. **Уайтхауз, Д.** Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы / Д. Уайтхауз. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 472 с.

References:

1. Ivanov I.A., Gubenko S.V., Kononov D.P. *Poverkhnost' detalei mashin i mekhanizmov : uchebnoe posobie dlya vuzov* [The surface of machine parts and mechanisms: a textbook for universities]. Sankt-Peterburg: Lan', 2021, 156 p. (In Russian).
2. GOST R ISO 4287-2014. *Geometricheskie kharakteristiki izdelij (GPS). Struktura poverkhnosti. Profil'nyj metod. Terminy, opredeleniya i parametry struktury poverkhnosti* [Russian State Standard ISO 4287-2014 Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian).
3. GOST 2789-73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 7 p. (In Russian).
4. GOST 25145-82. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniya* [Surface roughness. Terms and definitions]. Moscow, Standart Publ., 1982. 20 p. (In Russian).
5. ISO 4287:1997. *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*. Geneva, ISO copyright office, 1997. 36 p.

6. ISO 21920-2:2021. *Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions, and surface texture parameters*. Geneva, ISO copyright office, 2021. 78 p.
7. Ivanov D.V., Antonov A.S., Sdobnyakov N.YU. et. al. Fraktal'nye svoystva nanorazmernykh plenok nikelya i khroma [Fractal properties of nano-sized films of nickel and chromium] // *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 138-152. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.138. (In Russian).
8. Antonov A.S., Sdobnyakov N.YU., Ivanov D.V., Podbolotov K.B. Issledovanie morfologii rel'efa plenok medi na poverkhnosti slyudy [Research of morphology of the relief of copper films on the mica surface], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2017, issue 9, pp. 19-26. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.019. (In Russian).
9. Ivanov D.V., Antonov A.S., Semenova E.M. et. al. Razlichnye skhemy polucheniya fraktal'nogo rel'efa nanorazmernykh plenok platiny [Different schemes for obtaining fractal relief of nanosized platinum films], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 156-165. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.156. (In Russian).
10. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Vliyanie nanotopografii poverkhnostej na kharakteristiki diskretnogo kontakta tverdykh tel [The influence of surfaces nanotopography on characteristics of solids discrete contact], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2016, issue 8, pp. 139-144. (In Russian).
11. Izmailov V.V., Novoselova M.V. O parametrakh nanotopografii tekhnicheskoy poverkhnosti i eyo profilya [On nanotopographic parameters of engineering surface and its profile], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2018, issue 10, pp. 313-321. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.313. (In Russian).
12. Grigor'ev A.YA. Fizika i mikrogeometriya tekhnicheskikh poverkhnostei [Physics and microgeometry of engineering surfaces]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2016, 247 p. (In Russian).
13. Whitehouse D. Surfaces and their measurement. Oxford, Elsevier Science & Technology, 2004. 432 p.

Original paper

On the profile characteristics of technical surfaces as applied to nanoroughness

V.V. Izmailov, M.V. Novoselova

Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.643

Abstract. The parameters of the structure of a technical surface at the nanoscale level, determined by the profile method, are considered. The possibility of applying the parameters determined in accordance with domestic and international standards for the roughness profile (microscale level) to the characteristics of the surface at the nanoscale level, which goes beyond the standards, is shown. This possibility is provided by the model of the profile of a technical surface that underlies modern standards as an implementation of a broadband random normal process. An experimental verification of the normality of the process was carried out by comparing the experimental values of the integral probability distribution function of the profile ordinates with theoretical values that obey the normal distribution. The experimentally obtained values of the nine most important parameters, as well as their some relationships between them, are presented, confirming the reliability of the surface profile model as a normal random process. The use of standard surface profile parameters ensures to avoid errors and misunderstandings associated with ambiguous interpretation of one or another parameter.

Keywords: *surface structure, nanoroughness, profile method, profile parameters, normal random process.*

Измайлов Владимир Васильевич – д.т.н., профессор кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Новоселова Марина Вячеславовна – к.т.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Vladimir V. Izmailov – Dr. Sc., Professor, Department of Applied Physics, Tver State Technical University

Marina V. Novoselova – Ph. D., Docent, Department of Applied Physics, Tver State Technical University

Поступила в редакцию/received: 08.06.2024; после рецензирования/revised: 30.06.2024; принята/accepted: 06.07.2024.