МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 620.179.118.2+539.211

ОБ ОДНОМ НЕСТАНДАРТНОМ ПАРАМЕТРЕ ПРОФИЛЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v@tvcom.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2020

Предложен безразмерный параметр профиля шероховатой технической поверхности μ, характеризующий ее эксплуатационные свойства, в том числе триботехнические. Параметр характеризует относительное расположение средней линии профиля по высоте шероховатого слоя и равен отношению наибольшей глубины впадины профиля к общей высоте профиля в пределах базовой длины. Для симметричного профиля $\mu = 0{,}5$. Значения $\mu > 0{,}5$ соответствуют поверхности с преобладающим расположением материала в верхних участках шероховатого слоя и отдельными глубокими впадинами. Такая поверхность обладает повышенной жесткостью и износостойкостью, хорошей маслоемкостью, т. е. совокупностью положительных триботехнических свойств. Достоинствами предложенного параметра являются наглядность, простота вычисления и невысокая вариабельность.

Ключевые слова: шероховатая поверхность, топография, профиль, параметры шероховатости, эксплуатационные свойства.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-5-13

ВВЕДЕНИЕ

Микротопография – важный компонент качества поверхности деталей технических устройств. Специалисты насчитывают до полутора десятков эксплуатационных параметров различных технических устройств и изделий, зависящих в той или иной степени от микротопографии поверхности [1–5]. Поэтому неудивительно, что вопросы технологического и метрологического обеспечения качества поверхности, и оптимальных параметров микротопографии в частности, остаются актуальными и являются предметом внимания специалистов широкого спектра научных специальностей.

Действующие отечественные и международные стандарты содержат различное количество параметров, характеризующих топографию поверхности на различных масштабных уровнях. При этом одним из основных источников информации о топографии поверхности остается ее профиль, несмотря на то что в настоящее время измерение трехмерных параметров не представляет проблемы. Так, ГОСТ Р ИСО 4287-2014 дает определения 16 параметров профиля поверхности. Можно привести несколько классификаций этих параметров в зависимости от основного признака, положенного в основу данной классификации. Различают, например, высотные, шаговые и гибридные параметры [2]. Можно также выделить дискретные параметры, выраженные одним числом, и параметры-функции [2], характеризующие зависимость свойств поверхности от ее микротопографии. К числу последних относится хорошо известная трибологам и

специалистам смежных специальностей опорная кривая (кривая Аббота – Файрстоуна). К таким же параметрам можно причислить статистические функции плотности вероятности высот (ординат) профиля. В то же время статистические моменты этих функций (средние значения, асимметрия, эксцесс) выступают дискретными числовыми параметрами.

Из всех параметров микротопографии поверхности высотные параметры являются единственными, оказывающими существенное влияние на все без исключения эксплуатационные характеристики поверхности (начиная от трения и изнашивания и кончая отражательной способностью и гигиеническими свойствами) [2]. В связи с вышесказанным цель данной работы – обоснование простого дискретного безразмерного высотного параметра топографии реальной поверхности, характеризующего ее с точки зрения эксплуатационных свойств (в первую очередь триботехнических).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

На рис. 1 приведены примеры профилограмм шероховатой поверхности в исходном состоянии (до приработки соответствующего узла) и после приработки.

(а) (б)

Рис. 1. Профилограммы шероховатой поверхности [2]
до приработки (а); после приработки (б)

Характерной особенностью поверхности после приработки является сглаженный профиль, т. е. отсутствие высоких пиков (выступов), которые были удалены в результате процесса изнашивания в период приработки. В процессе приработки сформировалась так называемая равновесная шероховатость, воспроизводящаяся в процессе эксплуатации узла. Она имеет повышенную несущую способность и износостойкость. С точки зрения триботехнических свойств поверхности оставшиеся от исходной шероховатости отдельные глубокие впадины играют положительную роль, так как служат своеобразными резервуарами для смазочного материала. Таким образом, с точки зрения триботехнических характеристик оптимальной является поверхность, у которой материал в основном сосредоточен в верхних слоях шероховатого слоя (см. рис. 1б) в отличие от поверхности с профилем, у которой материал в среднем равномерно распределен по высоте шероховатого слоя (рис. 1а). Профиль, аналогичный изображенному на рис. 1б, имеют, помимо приработанных, также поверхности, полученные в результате нескольких стадий обработки (как минимум двух: черновой и чистовой). При чистовой обработке отдельные высокие пики (выступы) в верхних участках шероховатого слоя удаляются, тогда как в нижних участках сохраняется исходная шероховатость с отдельными глубокими впадинами.

Несимметричность профиля на рис. 1б, в частности, приводит к тому, что средняя линия профиля в этом случае смещена ближе к линии выступов, тогда как у симметричного профиля на рис. 1а средняя линия примерно равноудалена от линии выступов и линии впадин. Все эти характерные особенности профилей, изображенных

на рис. 1, можно выразить через соотношение высотных параметров профиля *Rp, Rv, Rz* и *Rt*, которые, согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014, называются максимальная высота пика профиля, наибольшая глубина впадины профиля, максимальная высота профиля и общая высота профиля соответственно (рис. 2). Параметр *Rp* представляет собой расстояние от средней линии до линии выступов профиля, параметр *Rv* – расстояние от средней линии до линии впадин, параметры *Rz* и *Rt* имеют практически одинаковый смысл (расстояние от линии впадин до линии выступов) и отличаются тем, что первый определяется в пределах базовой длины, а второй – в пределах длины оценки, поэтому $Rz \leq Rt$. Во избежание недоразумений обратим внимание на то, что параметр *Rz* в действующих ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142-82 ранее, до внесения в них изменений в 2017 году, имел совершенно другой смысл и выражал среднюю высоту неровностей профиля по 10 точкам, а эквивалентом параметра *Rt* в указанных стандартах выступает параметр *Rmax* – полная высота профиля.

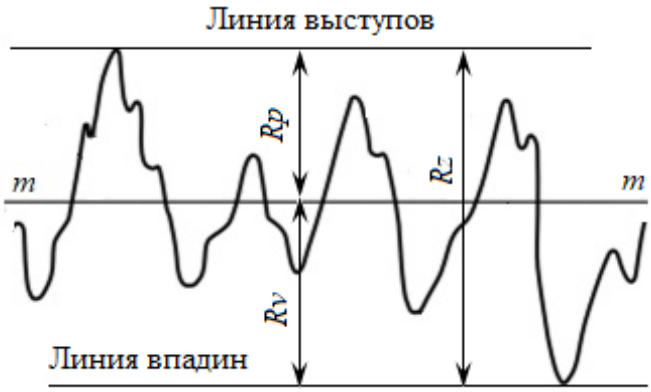


Рис. 2. Профиль шероховатой поверхности: *mm* – средняя линия

Таким образом, положение средней линии профиля шероховатой поверхности можно просто и наглядно охарактеризовать предлагаемым нами безразмерным параметром μ:

$$\mu = \frac{Rv}{Rz} = \frac{Rv}{Rv + Rp}.$$

Очевидно, что для симметричного профиля, аналогичного профилю на рис. 1а, $\mu \to 0{,}5$; для профиля, аналогичного профилю на рис. 1б, $\mu > 0{,}5$. Такие значения, в соответствии со сказанным выше, являются предпочтительными с точки зрения триботехнических свойств поверхности.

Разумеется, асимметричность профиля можно охарактеризовать нормированным параметром *Rsk* – асимметрия оцениваемого профиля (см. ГОСТ Р ИСО 4287-2014), который есть не что иное, как третий центральный момент случайной величины *Z* – ординаты профиля (расстояния от средней линии до линии профиля):

$$Rsk = \frac{1}{R_q^3}\left[\frac{1}{l_r}\int_0^{l_r} Z(x)^3 dx\right],$$

где R_q – среднеквадратичное отклонение профиля; l_r – базовая длина.

Смысл величины *Rsk* поясняется рис. 3 [2].

Однако, во-первых, наглядность параметра *Rsk* уступает наглядности предлагаемого нами параметра. Во-вторых, на величину параметра *Rsk*, как отмечается в ГОСТ Р ИСО 4287-2014, существенно влияют отдельные изолированные впадины и изолированные пики, т. е. его расчет требует определенной квалификации метролога.

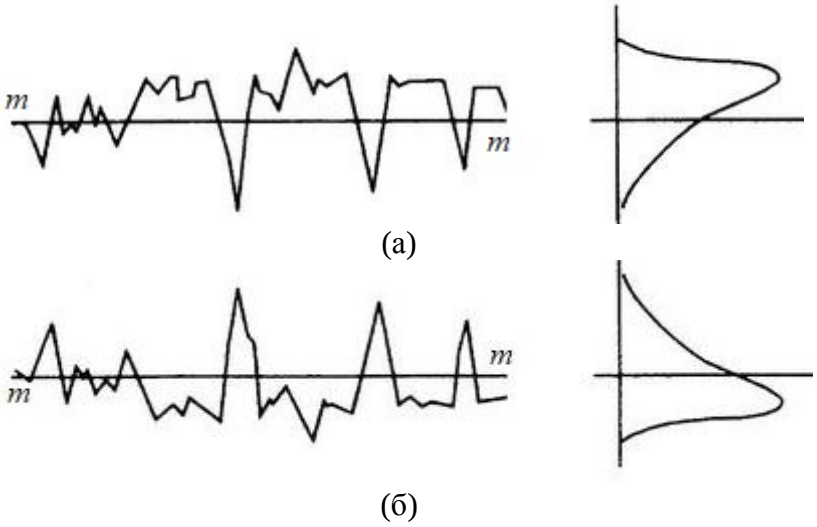


Рис. 3. Профили шероховатых поверхностей с различной асимметрией [2]:
Rsk < 0 (а); *Rsk* > 0 (б): справа – функции плотности вероятности ординат профиля;
mm – средняя линия

Другой стандартный параметр, характеризующий распределение материала в шероховатом слое, – это упомянутая выше опорная кривая (кривая коэффициента смятия профиля по терминологии ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Этот параметр, несмотря на наглядность, также не лишен недостатков. Во-первых, он не выражается конкретным числовым значением, что иногда затрудняет его применение. Во-вторых, форма опорной кривой и ее параметры чувствительны к наличию отдельных изолированных впадин и выступов, что подробно обсуждается в работе [6].

Наконец, в качестве еще одного параметра, близкого по смыслу к опорной кривой, можно упомянуть так называемый коэффициент заполнения профиля *Kp* [5], равный отношению площади материала (площади профилограммы между линией профиля и линией впадин) к площади, ограниченной линиями выступов и впадин в пределах базовой длины. Этот параметр, безусловно, обладает наглядностью, к тому же выражается конкретным числом, однако рассчитать его – задача не из простых.

Все сказанное дает основания рекомендовать предлагаемый нами параметр, наряду с другими, для характеристики топографии технических поверхностей.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовалась топография металлических поверхностей, полученных финишными методами обработки и имеющих малую микрошероховатость (*Rz* не более 0,1 мкм). Материал образцов – высоколегированная термообработанная сталь и технически чистое серебро для электрических контактов. Непосредственным объектом исследования были параметры наношероховатости, полученные с помощью атомного силового микроскопа.

В метрологии поверхностей ключевыми понятиями являются базовая длина *lr* и длина оценки *ln*, которая включает одну или несколько базовых длин. Поскольку для

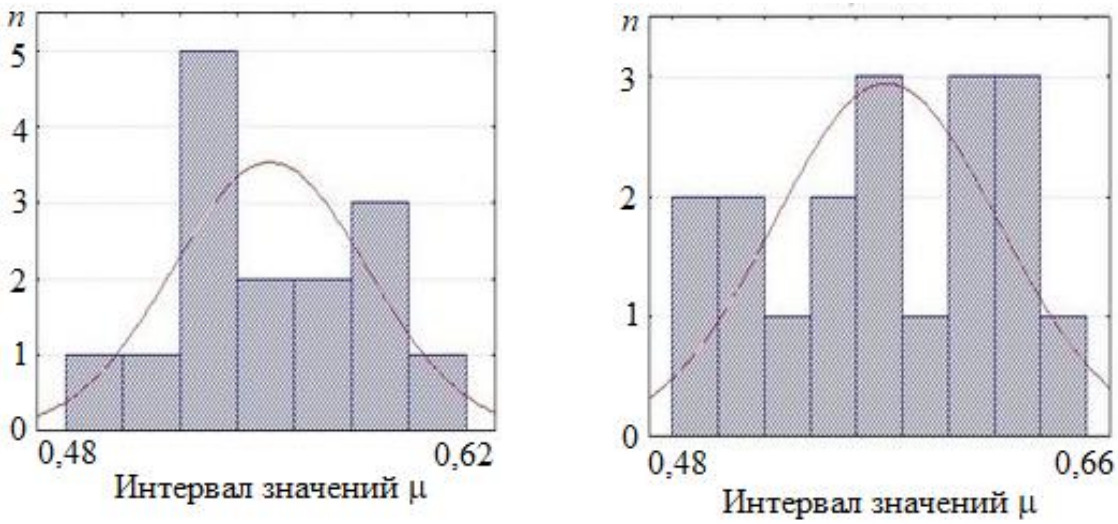
наношероховатости, в отличие от микрошероховатости, базовая длина не нормирована, в соответствии с рекомендациями [2] и возможностями АСМ базовую длину выбирали так, чтобы на ней укладывалось от 20 до 40 пересечений профилем его средней линии. Длину оценки принимали также не менее 5 базовых длин согласно рекомендациям [2, 7]. Подробнее вопрос выбора базовой длины и длины оценки обсуждается далее в соответствующем разделе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения параметров наношероховатости исследованных поверхностей и значения параметров μ с доверительными интервалами представлены в табл. 1, гистограммы значений μ – на рис. 4. Выражение «средние значения» применительно к параметрам из табл. 1 требует пояснений. По определению параметры *Rp*, *Rv* и *Rz* являются экстремальными, т. е. характеризуются единственным значением на базовой длине. Очевидно, что по своей природе эти параметры являются статистически неустойчивыми, будучи подвержены влиянию отдельных случайных выступов и впадин, в том числе царапин, загрязнений и других дефектов поверхности, не относящихся к топографии. Для повышения надежности этих параметров рекомендуется определять их не менее чем для 5 базовых длин с последующим усреднением. Такой подход позволяет, помимо всего прочего, исключить из рассмотрения случайные нетипичные выступы и впадины.

Таблица 1. Параметры наношероховатости

Материал образца	*Rp*, нм	*Rv*, нм	*Rz*, нм	μ = *Rv*/*Rz*
Сталь	7,56±0,49	9,35±0,85	16,91±1,17	0,55±0,02
Серебро	5,54±0,79	7,57±1,10	13,11±1,73	0,57±0,02



(а) (б)

Рис. 4. Гистограммы значений параметра μ для стали (а); серебра (б):
n – число значений μ в заданном интервале; линии – нормальное распределение

Параметр μ оказался статистически довольно стабильным, коэффициент вариации его равен 8,5 %. Значения параметра μ для наношероховатости

исследованных поверхностей больше 0,5, что, как отмечалось выше, благоприятно с точки зрения триботехнических свойств поверхности.

Представляет интерес сравнение значения предлагаемого параметра μ для нано- и микрошероховатости. На рис. 5 представлены величины параметра μ для микрошероховатости поверхностей, полученных различными способами механической обработки. Значения параметра μ рассчитаны нами на основании данных работы [8]. Значения параметра μ ожидаемо превышают величину 0,5 для таких видов обработки, как доводка и притирка. Вполне ожидаемо также значение μ < 0,5 для поверхности после точения, так как в этом случае шероховатость имеет значительную регулярную составляющую в виде характерных следов обработки резцом. Несколько неожиданно значение μ > 0,5 для фрезерования.

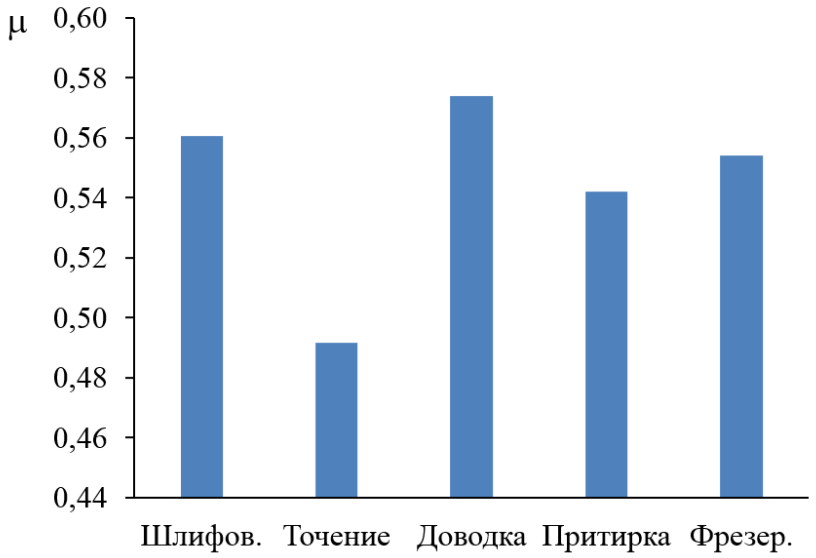


Рис. 5. Значения параметра μ для микрошероховатости поверхностей после различных способов механической обработки

Для микрошероховатости параметр μ, в отличие от наношероховатости, более изменчив: коэффициент вариации параметра μ = 0,23; 0,17; 0,20; 0,21 для шлифования, точения, доводки, притирки соответственно. Лишь для фрезерования коэффициент вариации параметра μ относительно невелик и равен 0,12.

О СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВЫСОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ

Как отмечалось выше, используемые для расчета параметра μ высотные параметры *Rp*, *Rv*, *Rz* и *Rt* статистически неустойчивы. Оценкой их изменчивости (вариабельности) может служить коэффициент вариации, равный отношению стандартного отклонения к среднему значению соответствующей величины. Значения коэффициентов вариации для перечисленных выше экстремальных высотных параметров даны в табл. 2. Действительно, величины коэффициентов вариации, приведенные в табл. 2, дают основания оценить вариативность экстремальных высотных параметров для стали как среднюю (10 % < V < 20 %), а для серебра – как значительную (V > 20 %).

Таблица 2. Значения коэффициентов вариации для параметров наношероховатости

Материал образца	Коэффициент вариации *V*, %		
	Rp	*Rv*	*Rz*
Сталь	11,8	16,4	12,5
Серебро	21,1	28,9	24,0

Два высотных параметра шероховатости – *Rz* и *Rt* – имеют близкий физический смысл и характеризуют суммарную высоту шероховатого слоя. Различие в том, что параметр *Rz* определяется на базовой длине, а параметр *Rt* – на длине оценивания, которая может составлять несколько базовых длин. Обычно увеличение длины оценивания ограничивается техническими возможностями средства измерения. Однако для профиля шероховатости, обладающей свойствами эргодичности, увеличение длины оценивания эквивалентно использованию нескольких базовых длин. В нашем случае число базовых длин составляло 15, при этом соотношения параметров *Rt* и *Rz* были следующие: для стальной поверхности $Rt = 1{,}23Rz$; для серебряной $Rt = 1{,}5Rz$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный безразмерный параметр профиля шероховатой поверхности $\mu = Rv/Rz$ обладает наглядностью и позволяет оценить шероховатую поверхность с точки зрения ее эксплуатационных свойств, в частности триботехнических. Оптимальными с точки зрения триботехнических свойств поверхности являются значения $\mu > 0{,}5$. Предложенный критерий имеет невысокую вариабельность (коэффициент вариации менее 20 %) и может, наряду с другими стандартными параметрами профиля, применяться в метрологии технических поверхностей и смежных областях науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.

2. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 472 с.

3. Лич Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 400 с.

4. Клепиков В.В., Порошин В.В., Голов В.А. Качество изделий. М.: МГИУ, 2008. 288 с.

5. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Беларуская навука, 2016. 247 с.

6. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О параметрах наношероховатости и некоторых корреляционных соотношениях // *Трибология – машиностроению: труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН.* М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. С. 210–213.

7. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 136 с.

8. Шлезингер Г. Качество поверхности. М.: Машгиз, 1947. 284 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Об одном нестандартном параметре профиля шероховатой поверхности // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 5–12.

ON THE ONE NONSTANDARD PARAMETER OF A ROUGH SURFACE PROFILE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22 Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: iz2v@tvcom.ru

A dimensionless profile parameter of a rough technical surface μ is proposed, which characterizes its operational properties, including tribotechnical ones. The parameter characterizes the relative location of the profile mean line along the height of the rough layer and is equal to the ratio of the maximum profile valley depth to the maximum height of the profile within the sampling length. For a symmetrical profile, $\mu = 0{,}5$. Values $\mu > 0{,}5$ correspond to a surface with a predominant location of the material in the upper sections of the rough layer and individual deep valleys. Such a surface has increased rigidity and wear resistance, good oil absorption, i.e. has a combination of positive tribotechnical properties. The advantages of the proposed parameter are visibility, ease of calculation and low variability.

Keywords: rough surface, topography, profile, roughness parameters, operational properties.

REFERENCES

1. Dunin-Barkovskij I.V., Kartashova A.N. Izmerenie i analiz sherohovatosti, volnistosti i nekruglosti poverhnosti [Measurement and analysis of surface roughness, waviness and non-circularity]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 232 p.

2. Whitehouse D. Metrologiya poverhnostej. Principy, promyshlennye metody i pribory [Metrology of surfaces. Principles, industrial methods and devices]. Dolgoprudnyj: Intellekt, 2009. 472 p.

3. Leach R. Inzhenernye osnovy izmerenij nanometrovoj tochnosti [Engineering fundamentals of nanometer accuracy measurements]. Dolgoprudnyj: Intellekt, 2012. 400 p.

4. Klepikov V.V., Poroshin V.V., Golov V.A. Kachestvo izdelij [Product quality]. Moscow: MGIU, 2008. 288 p.

5. Grigoriev A.Ya. Fizika i mikrogeometriya tekhnicheskih poverhnostej [Physics and microgeometry of technical surfaces]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2016. 247 p.

6. Izmailov V.V., Novoselova M.V. On the parameters of nano-roughness and some correlation relationships. *Tribology – mechanical engineering: proceedings of the XII International scientific and technical conference dedicated to the 80th anniversary of IMASH RAS.* Moscow – Izhevsk: Institut kompyuternyh issledovanij, 2018, pp. 210–213. (In Russian).

7. Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N. Sherohovatosti, volnistosti, profili. Mezhdunarodnyj opyt [Roughness, waviness, profile. International experience]. St. Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 136 p.

8. Schlesinger G. Kachestvo poverhnosti [Surface quality]. Moscow: Mashgiz, 1947. 284 p.

Поступила в редакцию/received: 22.05.2020; после рецензирования/revised: 15.07.2020;
принята/accepted 29.07.2020