

Физический коэффициент профиля и его применение для моделирования текстуры механически обработанной поверхности

© 2023

Бобровский Игорь Николаевич, доктор технических наук, научный сотрудник
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

E-mail: bobri@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9513-7936>

Поступила в редакцию 28.07.2022

Принята к публикации 14.04.2023

Аннотация: Современные тенденции развития машиностроения задают всё более жесткие требования к эксплуатационным характеристикам готовой продукции. Основными параметрами, характеризующими качество изделия в целом, являются физико-механические и геометрические показатели рабочих поверхностей составных деталей. Поверхность, полученная в результате механической обработки, в отечественной практике в основном характеризуется весьма ограниченным числом параметров (не более 6), таких как средняя высота микронеровностей, высоты микронеровностей по 10 точкам и др. Однако их применение недостаточно для производства конкурентоспособной продукции в современных условиях. Например, международные стандарты ISO/ASME/DIN включают гораздо более широкий набор параметров, необходимых для точного описания эксплуатационных свойств поверхности. В статье проанализированы подходы к формированию требований к микрогеометрии рабочих поверхностей деталей, используемых в современном машиностроении. На основе проведенного анализа предложен и математически обоснован общий подход к моделированию характеристик текстуры поверхности, который позволяет адекватно описывать поверхность с использованием нового параметра – физического коэффициента профиля, поскольку прямое сравнение технологий, разработанных в России, с иностранными аналогами с опорой на действующие стандарты практически невозможно. Сначала был определен физический коэффициент профиля на секционном уровне. Далее было выполнено его разложение на ряд Фурье для двухмерного и трехмерного случаев. Приведен анализ применимости нового параметра на примере изделия, полученного с помощью хонингования. Сделан вывод о целесообразности применения данного параметра и необходимости разработки комплексной методики оценки поверхности после механической обработки на его основе.

Ключевые слова: технология машиностроения; механическая обработка; поверхность; физический коэффициент профиля; шероховатый слой; текстура поверхности.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-00233, <https://rscf.ru/project/20-79-00233/>.

Для цитирования: Бобровский И.Н. Физический коэффициент профиля и его применение для моделирования текстуры механически обработанной поверхности // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 3. С. 9–17. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-3-65-1.

ВВЕДЕНИЕ

Характеристика и рельеф поверхностей изделий регламентируются международными стандартами, например ISO/TR 14638, а также звеньями цепочки стандартов по текстуре поверхности. К настоящему времени профиль неровностей и определяющие его параметры представляют лишь некоторую часть характеристик текстуры поверхности, которые четко нормализованы. Параметры текстуры поверхности – первичный профиль, волнистость, неровности – определяются Международным стандартом ISO 4287:1997, а также ISO 3274:1996 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Номинальные характеристики контактных (щуповых) приборов. Используемая в математическом моделировании терминология соответствует списку принятых международных стандартов:

– ISO 4288:1996 Геометрические характеристики продукции (ГПП). Структура поверхности. Профильный метод. Правила и процедуры оценки структуры поверхности;

– ISO 11562:1996 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный

метод. Метрологические характеристики фильтров с коррекцией фазы;

– ASME B46.1-2009. Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay).

Основные термины:

– фильтр профиля – согласно ISO 21920-2 и ISO 16610-21, разделяет профиль на длинноволновый и коротковолновый компоненты;

– реальная поверхность – ограничивает тело, отделяя его от окружающей среды;

– профиль поверхности – образуется в результате пересечения реальной поверхности специальной плоскостью, параллельной координатным плоскостям XOZ и YOZ ;

– первичный профиль – регламентирован ISO 3274 и служит основой для получения количественных оценочных характеристик;

– профиль поверхности – образуется из первичного профиля путем подавления длинноволнового компонента и служит основой для получения параметров профиля поверхности;

– профиль волнистости – получается подавлением длинноволнового и коротковолнового компонентов, используется для получения параметров волнистости;

– геометрические параметры групп P , R , W – рассчитываются на основании первичного профиля, профиля поверхности и профиля волнистости соответственно.

В конструкторско-технологической практике на предприятиях машиностроительного сектора применяется весьма ограниченный перечень параметров [1–3]. В основном используются параметры групп R и W [4; 5], в частности параметры Ra , Rz и т. п. При этом среди мало задействованных в практике параметров одним из перспективных является Ra .

Анализ публикаций по хонингованию показал, что при описании требований к шероховатости поверхности деталей в большинстве исследований в области машиностроения приводится только параметр Ra [6–8]. В некоторых публикациях к нему добавляется tr или tr и Rz [9]. В редких случаях к вышеупомянутым параметрам добавляются R_{max} и S_m [9]. В литературе практически отсутствуют параметры из новых стандартов или специфические параметры для описания поверхности после хонингования из менее современных стандартов DIN 1980-х годов. В последние годы активно развиваются альтернативные способы получения параметров, например новые алгоритмы корреляции параметров отраженного луча от микрорельефа [1]. Данные методы развивают для обнаружения все тех же стандартных параметров типа Ra [2].

Основная часть публикаций по хонингованию связывает решение задачи оптимизации с применением теоретико-эмпирических моделей. Наиболее распространенным методом является метод Тагучи [3]. Показатели данного метода используются в качестве критерия оптимизации [4]. Альтернативным методом для достижения той же цели является метод нейронных сетей [5]. Авторы также применяют методы анализа поверхности отклика для определения взаимосвязи режимов обработки и технологических параметров [6]. В данных публикациях в качестве базового параметра рассматривался только Ra .

Авторами [8] была исследована обработка хонингованием с помощью магнитореологической жидкости. Интересно, что при этом значение термина «хонингование» подразумевает уже не применение хона (инструмента для обработки), а в первую очередь поверхность, формируемую рассматриваемым методом. Аналогично существует процесс лазерного хонингования, не предусматривающий механического снятия припуска, а только энергетическое воздействие. Авторами заявлено, что совпадение по текстуре поверхности для классического способа и предлагаемого составило 5,88 %. При описании шероховатости поверхности авторами приведен параметр Ra . Никакие иные параметры не рассматривались, несмотря на наличие достаточного для их оценки измерительного устройства (SurfTest SJ-400, Mitutoyo).

В [9] анализировалось, как с помощью широко известного метода акустической эмиссии определить текстуру поверхности. Авторы предлагают два новых параметра: S_f (вычисляемый как отношение сигналов при подаче высоких и низких частот) и S_h (энергетический параметр). При этом данные параметры соотносятся с классическими параметрами Ra и трехмерной версией параметра Ra – параметром S_a . Работа [9] подтверждает, что интерес к иным методам определения характе-

ристик поверхности высок. Однако данный метод требует приобретения дополнительного оборудования для оценки текстуры.

В [10] приведено доказательство теории нового финишного процесса, предлагаемого как функциональная замена хонингованию. Рассматривалась поверхность только с точки зрения Ra . В статье [11], описывающей влияние изменения угла хонингования на шероховатость и трибологические свойства, приведены параметр Ra и параметры группы Rk (Rpk , Rk , Rvk). Любопытно, что авторы пришли к выводу, что параметры группы Rk больше отражают трибологические характеристики, чем Ra . Параметры группы Rk именно для этого и разрабатывались. При этом в выводах сравнение проводилось по количественным значениям не Rk , а Ra (оптимальной названа величина параметра Ra 0,85).

Авторы работы [12], связанной с оценкой трибологических свойств шероховатой хонингованной поверхности, изменяя контактное давление, оценивали формируемую платоповерхность трибологически, разделяя ее качественно на два типа: высокую и низкую. Основанием для разделения была выполненная авторами классификация по поверхности, декомпозированной по частотам с заданными (не варьируемыми) параметрами по группе Rk .

В [13] исследовано влияние радиуса хона на технологические параметры (силу резания, целостность поверхности и т. п.). В качестве оценки топографии поверхности выступил параметр Ra . В выводах рассматривался наименьший по численному значению параметр Ra как критерий наилучшей поверхности.

В статье [14] исследовалась многооткликковая оптимизация для обеспечения качества поверхности и производительности. Авторы напрямую не приводят наименования параметров, указано «наибольшая шероховатость» (вероятно, R_{max}) и «средняя шероховатость» (вероятно, Ra). В результате авторами построены 3 модели: для средней и максимальной шероховатости и для времени операции. Выявлено, что размер зерна наиболее влияет на среднее значение Ra . Данный вывод вновь, как и в источнике [13], является очевидным с учетом механики процесса. При этом авторы позиционируют представленную трехфакторную модель оптимизации (два параметра шероховатости и время операции) как наиболее полную.

В [15] представлена непрямая нейросеть для моделирования шероховатости при хонинговании. Используются параметры группы Rk . С помощью данной модели авторы смогли прогнозировать размер зерна, линейную и тангенциальную скорости, давление для получения заданных значений параметров группы Rk . В [16] используются результаты, полученные с тестовых установок для хонингования, для промышленного применения. В данной статье авторы уже дополняют параметры группы Rk параметром Rz как необходимым для промышленного применения.

В [17] проанализирована шероховатость инструмента для хонингования. Используя две теории генерации шероховатости, авторы сравнивали вычисляемый Ra с экспериментальным. Проведен обширный анализ кинематики процесса (различные углы, скорости вращения), однако кроме данного параметра иные не рассматривались.

В литературе новые параметры используются в малой степени (таблица 1). Это характерно и для иных исследований технологий механической обработки, рассматривающих шероховатость [18].

Таким образом, число применяемых на практике параметров мало (не более 6). Параметры, имеющиеся в международных стандартах, позволяют точнее определять текстуру поверхности. В данной работе продолжено развитие идей, предложенных ранее автором, по разработке новой методики определения текстуры поверхности [19]. Предлагается ввести в практику малоиспользуемый параметр – физический коэффициент профиля. Для оценки обоснованности применения такого подхода требуется провести исследования текстуры поверхности изделия по предложенной далее методике по рассматриваемому параметру – физическому коэффициенту профиля. В рамках этой концепции предлагается определять наиболее значимые параметры и далее для них находить диапазон оптимальных значений, а не исходить из заранее заданного ограниченного перечня параметров.

Предложенный параметр «физический коэффициент профиля» может обозначаться $P_{mr(c)}$, $T_{mr(c)}$, $W_{mr(c)}$ в зависимости от источника исходных данных и вычисляется в общем виде по следующей формуле:

$$P_{mr(c)}, T_{mr(c)}, W_{mr(c)} = \frac{MI(c)}{l_n}$$

Цель исследования – разработка общего подхода к применению параметра «физический коэффициент профиля» и его апробация.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика основана на оценке микропрофиля поверхности по параметру «физический коэффициент профиля».

Вначале был определен физический коэффициент профиля на секционном уровне. Далее было выполнено его разложение на ряд Фурье для двухмерного и трехмерного случаев. В результате была показана комплексность представленного параметра.

Исходя из геометрического представления о вероятности, физический коэффициент профиля представляет вероятность плотности заполнения материалом в выбранном сечении c .

Относительный физический коэффициент $P_{mr(c)}$, $T_{mr(c)}$, $W_{mr(c)}$ определяется на секционном уровне профиля $R\delta c$ относительно исходной точки C_0 :

$$P_{mr'}, T_{mr'}, W_{mr} = P_{mr'}, T_{mr'}, W_{mr}(C_1),$$

где $C_1 = C_0 - R_{\delta c}$ (или $P_{\delta c}$, или $W_{\delta c}$);

$$C_0 = (CP_{mr0}, T_{mr0}, W_{mr0})$$

Отличие относительного физического коэффициента профиля $P_{mr(c)}$, $T_{mr(c)}$, $W_{mr(c)}$ от широко известных состоит в том, что применяются не отфильтрованные данные (параметры группы R – roughness, такие как Ra , tp), а первичный профиль поверхности (отсюда и название группы параметров P – primary).

Полученный геометрически профиль рельефа поверхности в двумерном пространстве в виде профилограммы можно представить аналитически в виде тригонометрического ряда Фурье:

$$Z(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{l} + b_n \sin \frac{n\pi x}{l},$$

где

$$a_0 = \frac{1}{l} \int_{-l}^l Z(x) dx,$$

Таблица 1. Применяемые в литературе параметры текстуры
Table 1. Texture parameters applied in the literature

Нормируемые параметры текстуры				Работы, в которых применялись рассматриваемые параметры структуры
<i>Ra</i>	<i>Rmax</i>	<i>Rk</i>	<i>Sa</i>	
+	–	–	–	[6]
+	–	–	–	[15]
+	–	–	+	[8]
+	–	–	–	[10]
+	–	+	–	[11]
–	–	+	–	[12]
+	–	–	–	[13]
+	+	–	–	[14]
+	+	+	+	[9]

$$a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l Z(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx,$$

$$b_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l Z(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx.$$

$$Z(x) = \begin{cases} Z_1(x), -l \leq x \leq -l + X_{S_1} \\ Z_2(x), -l + X_{S_1} \leq x \leq -l + X_{S_1} + X_{S_2} \\ \dots \\ Z_\gamma(x), -l + \sum_{i=1}^{\gamma-1} X_{S_i} \leq x \leq -l + \sum_{i=1}^{\gamma} X_{S_i} \\ \dots \\ Z_k(x), -l + \sum_{i=1}^{k-1} X_{S_i} \leq x \leq l \end{cases}.$$

В трехмерном пространстве рельеф поверхности задается с помощью функции двух переменных $z = f(x; y)$, которую можно разложить в двойной тригонометрический ряд Фурье по системе тригонометрических функций. Эти функции представляют тригонометрическую систему для двух переменных x и y , каждая из которых периодическая с периодом 2π , как по x , так и по y .

Каждая функция системы ортогональна к любой другой в квадрате $D(-\pi \leq x \leq \pi, -\pi \leq y \leq \pi)$. Указанное свойство имеет место в любом другом квадрате вида $a \leq x \leq a + 2\pi, -b \leq y \leq b + 2\pi$. Свойство ортогональности следует из соотношений

$$C_1 = C_0 - R_{\delta c} \iint_D 1 \cdot \cos mx dx dy = \int_{-\pi}^{\pi} dy \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx dx =$$

$$= \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{1}{m} \left| \sin mx \right|_{-\pi}^{\pi} \right) dy = \frac{1}{m} \int_{-\pi}^{\pi} (\sin m\pi - \sin(-m\pi)) dy = 0$$

Подобным образом

$$\iint_D 1 \cdot \sin mx dx dy = \int_{-\pi}^{\pi} dy \int_{-\pi}^{\pi} \sin mx dx =$$

$$= \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{1}{m} \left| \cos mx \right|_{-\pi}^{\pi} \right) dy = \frac{1}{m} \int_{-\pi}^{\pi} (\cos m\pi - \cos(-m\pi)) dy =,$$

$$= -\frac{1}{m} \int_{-\pi}^{\pi} (\cos m\pi - \cos m\pi) dy = 0$$

так как функция $\cos n\pi$ четная, то $\cos(-n\pi) = \cos(n\pi)$. Соответственно,

$$\iint_D (\cos mx \cos ny)(\cos rx \cos px) dx dy =$$

$$= \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \cos rx \left(\int_{-\pi}^{\pi} \cos nx \cos py dy \right) dx =$$

$$= \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \cos rx dx \int_{-\pi}^{\pi} \cos nx \cos py dy =,$$

$$= \frac{1}{4} \int_{-\pi}^{\pi} [\cos(m+r)x + \cos(m-r)x] \times$$

$$\times \int_{-\pi}^{\pi} [\cos(n+p)y + \cos(n-p)y] dy = 0$$

где r и p – целые числа, при $m \neq r, n \neq p$.

Выше было доказано, что интеграл в симметричной области от четной функции обращается в ноль, когда $m = r$ и $n = p$, тогда исходный интеграл принимает вид

$$\int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 mx dx \cdot \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 ny dy =$$

$$= \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} (1 + \cos 2mx) dx \cdot \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} (1 + \cos 2ny) dy =$$

$$= \frac{1}{2} \left[2\pi + \frac{1}{2} \left| \sin 2mx \right|_{-\pi}^{\pi} \right] \cdot \frac{1}{2} \left[2\pi + \frac{1}{2} \left| \sin 2ny \right|_{-\pi}^{\pi} \right] =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot 4\pi^2 = \pi^2$$

Здесь $\sin 2mx_{-\pi}^{\pi} = \sin 2m\pi - \sin(-2m\pi) = 0$, так как $\sin m\pi = 0$.

Аналогично доказывается ортогональность любой пары различных функций исходной тригонометрической системы.

Определим нормы элементов представленной тригонометрической системы:

$$\|1\| = \sqrt{\iint_D dx dy} = \sqrt{4\pi^2} = 2\pi,$$

$$\|\cos mx\| = \|\sin mx\| = \|\cos ny\| = \|\sin ny\| = \sqrt{2}\pi,$$

$$\|\cos mx\| = \sqrt{\iint_D \cos^2 mx dx dy} = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} dy \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 mx dx} =$$

$$= \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} (1 + \cos 2mx) dy} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot 2\pi} = \sqrt{2}\pi$$

$$\|\cos mx \cdot \cos ny\| = \|\sin mx \cdot \cos ny\| =$$

$$= \|\cos my \cdot \sin ny\| = \|\sin nx \cdot \sin ny\| = \pi$$

$$\|\cos mx \cdot \cos ny\| = \sqrt{\int_D \cos^2 mx \cdot \cos^2 ny \cdot dx dy} =$$

$$= \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 mx dx \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 ny dy} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{\pi^2}{4}} = \pi$$

Как и в случае функции одной переменной $z = f(x)$, коэффициенты Фурье для функции двух переменных $z = f(x; y)$, заданной в области D , находят из соотношений [3]:

$$A_{00} = \frac{\iint_D f(x; y) dx dy}{\|1\|^2} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_D f(x; y) dx dy,$$

$$A_{m0} = \frac{\iint_D [f(x; y) \cos mx] dx dy}{\|\cos mx\|^2} =$$

$$= \frac{1}{2\pi^2} \iint_D [f(x; y) \cos mx] dx dy, m = 1, 2, \dots, \infty$$

$$A_{0n} = \frac{\iint_D [f(x; y) \cos ny] dx dy}{\|\cos ny\|^2} =$$

$$= \frac{1}{2\pi^2} \iint_D [f(x; y) \cos ny] dx dy, n = 1, 2, \dots, \infty,$$

$$B_{m0} = \frac{\iint_D [f(x; y) \sin mx] dx dy}{\|\sin mx\|^2} =$$

$$= \frac{1}{2\pi^2} \iint_D [f(x; y) \sin mx] dx dy, m = 1, 2, \dots, \infty$$

$$B_{0n} = \frac{\iint_D [f(x; y) \sin ny] dx dy}{\|\sin ny\|^2} =$$

$$= \frac{1}{2\pi^2} \iint_D [f(x; y) \sin ny] dx dy, n = 1, 2, \dots, \infty$$

Если m и n принимают одновременно значения $m = 1, 2, \dots, \infty, n = 1, 2, \dots, \infty$, то:

$$a_{m,n} = \frac{1}{\pi^2} \iint_D [f(x; y) \cos mx \cdot \cos ny] dx dy;$$

$$b_{m,n} = \frac{1}{\pi^2} \iint_D [f(x; y) \sin mx \cdot \cos ny] dx dy;$$

$$c_{m,n} = \frac{1}{\pi^2} \iint_D [f(x; y) \cos mx \cdot \sin ny] dx dy;$$

$$d_{m,n} = \frac{1}{\pi^2} \iint_D [f(x; y) \sin mx \cdot \sin ny] dx dy.$$

В практических задачах целесообразно вместо A_{00} обозначить $\frac{a_{00}}{4}$, где a_{00} находят из $a_{m,n}$ при $m = 0$ и $n = 0$. Аналогично вместо $A_{m,0}, A_{0,n}, B_{m,0}, B_{0,n}$ записывают $\frac{a_{m,0}}{2}, \frac{a_{0,n}}{2}, \frac{b_{m,0}}{2}, \frac{b_{0,n}}{2}$, которые вычисляются из выражений $a_{m,n}, b_{m,n}, c_{m,n}, d_{m,n}$ при задании $m = 1, 2, \dots, \infty, n = 0$ или $n = 1, 2, \dots, \infty, m = 0$. В результате двойной тригонометрический ряд записывается в виде:

$$z = f(x; y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \begin{bmatrix} a_{m,n} \cos mx \cdot \cos ny + \\ + b_{m,n} \sin mx \cdot \cos ny + \\ + c_{m,n} \cos mx \cdot \sin ny + \\ + d_{m,n} \sin mx \cdot \sin ny \end{bmatrix},$$

здесь

$$\lambda = \begin{cases} \frac{1}{4}, & \text{при } m = n = 0 \\ 1, & \text{при } m > 0, n > 0 \\ \frac{1}{2}, & \text{при } m > 0, n = 0 \text{ или } m = 0, n > 0 \end{cases},$$

при этом m и n являются целыми положительными числами.

В том случае, когда область D_{Ξ} представлена прямоугольником, отвечающим условиям $D_{\Xi} (-lx < x < lx, -ly < y < ly)$ (рис. 1), двойной ряд Фурье принимает вид:

$$z = f(x; y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \begin{bmatrix} a_{m,n} \cos m \frac{\pi}{l_x} x \cdot \cos n \frac{\pi}{l_y} y + \\ + b_{m,n} \sin \frac{\pi}{l_x} mx \cdot \cos n \frac{\pi}{l_y} y + \\ + c_{m,n} \cos m \frac{\pi}{l_x} x \cdot \sin n \frac{\pi}{l_y} y + \\ + d_{m,n} \sin m \frac{\pi}{l_x} x \cdot \sin n \frac{\pi}{l_y} y \end{bmatrix}.$$

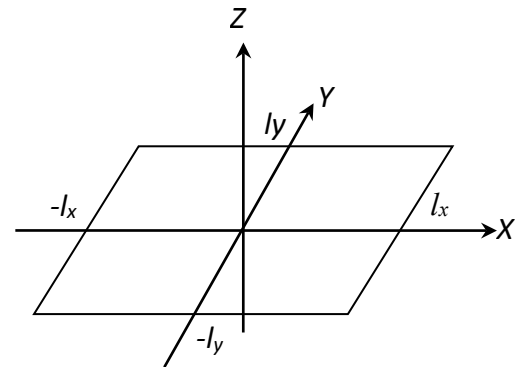


Рис. 1. Прямоугольная область D_{Ξ} в плоскости XOY
Fig. 1. Rectangular area D_{Ξ} in the XOY plane

Параметр λ_{mn} находят согласно записанным выше соотношениям, а коэффициенты $a_{m,n}, b_{m,n}, c_{m,n}, d_{m,n}$ вычисляют по формулам:

$$a_{m,n} = \frac{1}{l_x l_y} \iint_{D_{\Xi}} \left[f(x; y) \cos m \frac{\pi}{l_x} x \cdot \cos n \frac{\pi}{l_y} y \right] dx dy;$$

$$b_{m,n} = \frac{1}{l_x l_y} \iint_D \left[f(x; y) \sin m \frac{\pi}{l_x} x \cdot \cos n \frac{\pi}{l_y} y \right] dx dy;$$

$$c_{m,n} = \frac{1}{l_x l_y} \iint_D \left[f(x; y) \cos m \frac{\pi}{l_x} x \cdot \sin n \frac{\pi}{l_y} y \right] dx dy;$$

$$d_{m,n} = \frac{1}{l_x l_y} \iint_D \left[f(x; y) \sin m \frac{\pi}{l_x} x \cdot \sin n \frac{\pi}{l_y} y \right] dx dy.$$

В частном случае, когда $lx = ly = \pi$, из записанных выражений получаются предыдущие выражения для квадратной области D_{Ξ} . В том случае, когда функция $z(x; y)$ задается как кусочно-гладкая в областях $D_i, i = 1, 2, \dots, n$:

$$z(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y), \text{ при } (x, y) \in D_1 \\ f_2(x, y), \text{ при } (x, y) \in D_2 \\ \dots \\ f_k(x, y), \text{ при } (x, y) \in D_k \end{cases}$$

двойной тригонометрический ряд будет аналогичен ряду Фурье подобных функций одной переменной.

Характеристики текстуры поверхности преимущественно геометрические. Однако при обработке и эксплуатации деталей машин и механизмов используют физические показатели, такие как съем материала при различных технологиях, износ, трение, упругость и пластические деформации шероховатого слоя, обусловленные наличием в нем материала.

Комплексным параметром оценки указанных явлений выступает рассмотренный физический коэффициент профиля, регламентированный международным стандартом и представляющий вероятность плотности заполнения материалом в сечении z , т. е. $P(V_{Mc})$, согласно геометрическому представлению о вероятности.

Вероятность содержания материала в шероховатом слое шириной c определяется по формуле

$$P(V_{Mc}) = \int_0^c P_{mr}(z) dz .$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотренный метод можно апробировать на профилограмме поверхности детали, обработанной хонингованием.

Если для шероховатого слоя получена профилограмма, где $c = zk$, измеряемая от оси OX , то физический коэффициент профиля из геометрических построений определяется по формуле

$$P_{mr}(z_k) = \frac{\sum_{i=1}^{k_c} Mli}{\sum_{j=1}^{k_c} Mlj}$$

где k_c – число участков материала в сечении c .

Конкретно для рассматриваемого случая $Rz = 74$ мм разбивается на $k = 10$ частей, $l_n = 155$ мм. Результаты измерений и расчета сведены в таблицу 2 и представлены графически на рис. 2. Вероятность наполнения материалом шероховатого слоя

$$P(V_m) = \frac{S_m}{R_k \cdot l_n}$$

где S_m – площадь фигуры, ограниченной кривой ML_{zk} .

Таблица 2. Расчет вероятности плотности заполнения материалом шероховатого слоя по сечениям z_i
Table 2. Calculation of the probability of the density of filling the rough layer with the material along the z_i sections

z_i	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}
	0	7,4	14,8	22,2	29,6	37	44,4	51,8	59,2	66,6	74
S_{z_i}	155	153,6	151,2	141,1	128,1	83,6	71,2	51,9	34,2	5,5	0
$P(S_{z_i})$	1	0,991	0,975	0,910	0,826	0,539	0,459	0,335	0,221	0,035	0

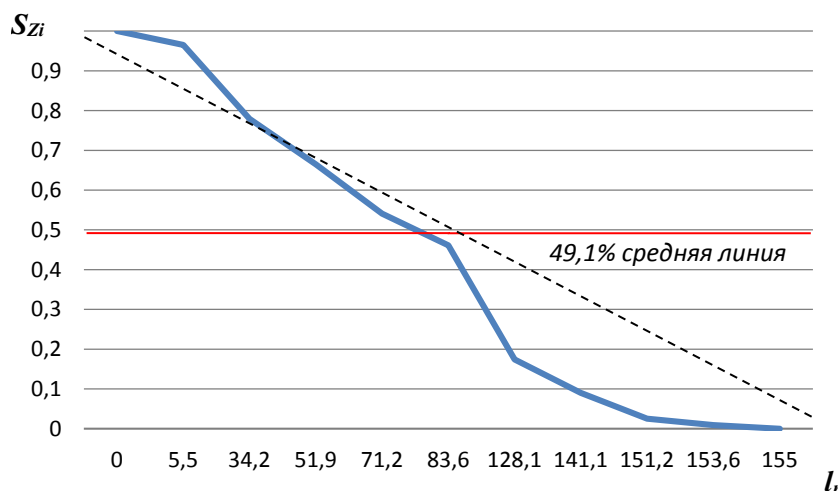


Рис. 2. Кривая вероятности заполнения материалом шероховатого слоя по сечениям, соответствующая реальной профилограмме
Fig. 2. The curve of the probability of filling the rough layer with the material along the sections corresponding to the actual profilogram

Отыщем величину S_m :

$$S_m = \frac{R_Z}{6m} \left(\frac{Ml_0}{2} + 2 \sum_{i=1}^{2m-2} Ml_{2i} + 4 \sum_{i=1}^{2m-1} Ml_{2i-1} \right), m = 51,$$

$$S_m = \frac{R_Z}{6 \cdot 51} \left[748 + 2(151,2 + 128,1 + 71,2 + 34,8) + 4(153,6 + 141,8 + 83,6 + 51,9 + 5,5) \right] =$$

$$= R_Z \cdot 86,23$$

$$P(V_m) = \frac{R_Z \cdot 86,23}{l_n} = \frac{1}{l_n} 86,23 = 0,5563.$$

Из расчета следует, что для шероховатого слоя с заданной профилограммой вероятность заполнения его материалом составляет 0,5563, т. е. заданный шероховатый слой содержит 55,63 % материала. Характеристикой пустот в рассматриваемом слое является коэффициент пористости λ :

$$\lambda = \frac{S_{сл} - S_h}{S_{сл}} = 1 - \frac{S_m}{S_{сл}} = 1 - P(V_m),$$

где $S_{сл}$ – общая площадь шероховатого слоя на длине l_n , $S_{сл} = R_Z \cdot l_n$.

Таким образом, $\lambda = 1 - P(V_m)$, маслосъемкость составляет 44,37 %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время применяемые на практике параметры текстуры поверхности, представленные в публикациях и в производстве, недостаточны. Требуется применение комплексных параметров, отражающих эксплуатационные характеристики изделий. В рамках выполненной работы было обосновано применение параметра «физический коэффициент профиля» для оценки текстуры поверхности по новой методике. Использование физического коэффициента профиля позволяет обеспечить возрастающие требования к условиям работы поверхностей деталей, особенно работающих в условиях трения. Знание свойств предложенных моделей позволит рекомендовать технологии и способы обработки поверхностей взаимодействующих деталей машин и механизмов.

Проведена апробация параметра для поверхности, обработанной хонингованием, и показана сходимость при анализе заполнения материалом шероховатого слоя по сечениям, соответствующая реальной профилограмме.

По разработанной методике разложение в ряд Фурье функции профиля модели микронеровности, заданной в промежутке $(-l; l)$, дает возможность строить весь спектр моделей на линии выборочной длины, по которой воспроизводится профилограмма. Важным при этом является то, что при общей оценке микроразмеров рабочей поверхности возможен комплексный учет отклонений от заданной геометрической формы детали, как регулярных, так и случайных.

Вероятностная оценка наполнения материалом слоя от теоретической опорной линии или поверхности до

теоретической эквидистантной линии реального профиля необходима при разработке программного обеспечения для технологического оборудования, работающего в автоматическом регулировании режимов резания, шлифования, хонингования и пластичного деформирования в процессе формирования текстуры рабочей поверхности готовых деталей.

В дальнейшем разработанный метод расчетно-графического исследования текстуры поверхности может быть применен для анализа и оценки текстуры поверхностей, обработанных различными технологиями, в том числе для оценки поверхности после постобработки деталей, полученных аддитивно.

Эффект от применения предложенного метода оценки текстуры поверхности может быть увеличен при его комбинировании с новыми способами и методами обработки, способствующими формированию заданной текстуры поверхности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Обосновано применение параметра «физический коэффициент профиля» для задания требований к микрогеометрии рабочих поверхностей деталей.

Путем анализа полученных количественных параметров, найденных на основе профилограмм, доказано, что оценка материалоемкости шероховатого слоя наиболее полно и комплексно, по сравнению с общеизвестным и широко используемым параметром Ra , характеризует геометрию микронеровностей, их форму, плосковершинность, остроконечность, рельеф, работоспособность, износостойкость, маслосъемкость пустот и, соответственно, позволяет по-новому подойти к оценке смешанного трения реальных поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abramov A., Bobrovskij N.M., Nosov N.V., Tabakov V., Galyalieva K. Quasi-optimal correlation algorithm for measuring the parameters of surface microrelief // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 822. P. 725–730. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.822.725](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.725).
2. Abramov A., Bobrovskij S.M., Nosov N.V., Tabakov V., Lopatina F. Method for determining texture parameters of processed precision surfaces by correlation // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 822. P. 731–736. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.822.731](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.731).
3. Singh R.V., Raghav A.K. Experimental study and modelling of the effect of process parameters on surface roughness during honing process // Journal of the Institution of Engineers (India). Part PR: Production Engineering Division. 2010. Vol. 90. P. 3–7.
4. Neagu C., Dumitrescu A. Neural networks modelling of process parameters in honing of thermal engines' cylinders // Metalurgia International. 2008. Vol. 13. № 5. P. 66–78.
5. Feng C.-X.J., Yu Z.-G.S., Kingi U., Pervaiz B.M. Threefold vs. fivefold cross validation in one-hidden-layer and two-hidden-layer predictive neural network modeling of machining surface roughness data // Journal of Manufacturing Systems. 2005. Vol. 24. № 2. P. 93–107. DOI: [10.1016/S0278-6125\(05\)80010-X](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(05)80010-X).

6. Silva S.P., Brandao L.C., Pimenta P.R.F. Evaluation of quality of steering systems using the honing process and surface response methodology // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 223. P. 821–825. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.223.821](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.821).
7. Tripathi B.N., Singh N.K., Vates U.K. Surface roughness influencing process parameters & modeling techniques for four stroke motor bike cylinder liners during honing: Review // *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2015. Vol. 15. № 1. P. 106–112.
8. Paswan S.K., Bedi T.S., Singh A.K. Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological fluid based honing process // *Wear*. 2017. Vol. 376–377. P. 1207–1221. DOI: [10.1016/j.wear.2016.11.025](https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.025).
9. Buj-Corral I., Álvarez-Flórez J., Domínguez-Fernández A. Acoustic emission analysis for the detection of appropriate cutting operations in honing processes // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 99. P. 873–885. DOI: [10.1016/j.ymsp.2017.06.039](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.06.039).
10. Span J., Koshy P., Klocke F., Müller S., Coelho R. Dynamic jamming in dense suspensions: Surface finishing and edge honing applications // *CIRP Annals*. 2017. Vol. 66. № 1. P. 321–324. DOI: [10.1016/j.cirp.2017.04.082](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.082).
11. Ma S., Liu Y., Wang Z., Wang Zh., Huang R., Xu J. The Effect of Honing Angle and Roughness Height on the Tribological Performance of CuNiCr Iron Liner // *Metals*. 2019. Vol. 9. № 5. Article number 487. DOI: [10.3390/met9050487](https://doi.org/10.3390/met9050487).
12. Hu Y., Meng X., Xie Y., Fan J. Mutual influence of plateau roughness and groove texture of honed surface on frictional performance of piston ring-liner system // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2017. Vol. 231. № 7. P. 838–859. DOI: [10.1177/1350650116682161](https://doi.org/10.1177/1350650116682161).
13. Li B., Zhang S., Yan Z., Jiang D. Influence of edge hone radius on cutting forces, surface integrity, and surface oxidation in hard milling of AISI H13 steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 95. P. 1153–1164. DOI: [10.1007/s00170-017-1292-z](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1292-z).
14. Nguyen T.-T., Vu T.-C., Duong Q.-D. Multi-responses optimization of finishing honing process for surface quality and production rate // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 42. Article number 604. DOI: [10.1007/s40430-020-02690-y](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02690-y).
15. Arantes L.J., Fernandes K.A., Schramm C.R., Leal J.E.S., Piratelli-Filho A., Franco S.D., Arencibia R.V. The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 93. P. 635–649. DOI: [10.1007/s00170-017-0544-2](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0544-2).
16. Buj-Corral I., Rodero-De-Lamo L., Marco-Almagro L. Use of results from honing test machines to determine roughness in industrial honing machines // *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 28. P. 60–69. DOI: [10.1016/j.jmapro.2017.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.016).
17. Yuan B., Han J., Wang D., Zhu Y., Xia L. Modeling and analysis of tooth surface roughness for internal gearing power honing gear // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017. Vol. 39. P. 3607–3620. DOI: [10.1007/s40430-017-0791-z](https://doi.org/10.1007/s40430-017-0791-z).
18. Kuznetsov V.P., Voropaev V.V., Skorobogatov A.S. Finishing and hardening of a flat surface ring area of a workpiece by rotary burnishing // *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 743. P. 245–247. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.743.245](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.743.245).
19. Bobrovskii I.N. How to Select the most Relevant Roughness Parameters of a Surface: Methodology Research Strategy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 302. Article number 012066. DOI: [10.1088/1757-899X/302/1/012066](https://doi.org/10.1088/1757-899X/302/1/012066).

REFERENCES

1. Abramov A., Bobrovskij N.M., Nosov N.V., Tabakov V., Galyalieva K. Quasi-optimal correlation algorithm for measuring the parameters of surface microrelief. *Key Engineering Materials*, 2019, vol. 822, pp. 725–730. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.822.725](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.725).
2. Abramov A., Bobrovskij S.M., Nosov N.V., Tabakov V., Lopatina F. Method for determining texture parameters of processed precision surfaces by correlation. *Key Engineering Materials*, 2019, vol. 822, pp. 731–736. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.822.731](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.731).
3. Singh R.V., Raghav A.K. Experimental study and modelling of the effect of process parameters on surface roughness during honing process. *Journal of the Institution of Engineers (India). Part PR: Production Engineering Division*, 2010, vol. 90, pp. 3–7.
4. Neagu C., Dumitrescu A. Neural networks modelling of process parameters in honing of thermal engines' cylinders. *Metalurgia International*, 2008, vol. 13, no. 5, pp. 66–78.
5. Feng C.-X.J., Yu Z.-G.S., Kingi U., Pervaiz B.M. Threefold vs. fivefold cross validation in one-hidden-layer and two-hidden-layer predictive neural network modeling of machining surface roughness data. *Journal of Manufacturing Systems*, 2005, vol. 24, no. 2, pp. 93–107. DOI: [10.1016/S0278-6125\(05\)80010-X](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(05)80010-X).
6. Silva S.P., Brandao L.C., Pimenta P.R.F. Evaluation of quality of steering systems using the honing process and surface response methodology. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 223, pp. 821–825. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.223.821](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.821).
7. Tripathi B.N., Singh N.K., Vates U.K. Surface roughness influencing process parameters & modeling techniques for four stroke motor bike cylinder liners during honing: Review. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 106–112.
8. Paswan S.K., Bedi T.S., Singh A.K. Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological fluid based honing process. *Wear*, 2017, vol. 376–377, pp. 1207–1221. DOI: [10.1016/j.wear.2016.11.025](https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.025).
9. Buj-Corral I., Álvarez-Flórez J., Domínguez-Fernández A. Acoustic emission analysis for the detection of appropriate cutting operations in honing processes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 99, pp. 873–885. DOI: [10.1016/j.ymsp.2017.06.039](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.06.039).

10. Span J., Koshy P., Klocke F., Müller S., Coelho R. Dynamic jamming in dense suspensions: Surface finishing and edge honing applications. *CIRP Annals*, 2017, vol. 66, no. 1, pp. 321–324. DOI: [10.1016/j.cirp.2017.04.082](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.082).
11. Ma S., Liu Y., Wang Z., Wang Zh., Huang R., Xu J. The Effect of Honing Angle and Roughness Height on the Tribological Performance of CuNiCr Iron Liner. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 5, article number 487. DOI: [10.3390/met9050487](https://doi.org/10.3390/met9050487).
12. Hu Y., Meng X., Xie Y., Fan J. Mutual influence of plateau roughness and groove texture of honed surface on frictional performance of piston ring-liner system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2017, vol. 231, no. 7, pp. 838–859. DOI: [10.1177/1350650116682161](https://doi.org/10.1177/1350650116682161).
13. Li B., Zhang S., Yan Z., Jiang D. Influence of edge hone radius on cutting forces, surface integrity, and surface oxidation in hard milling of AISI H13 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, pp. 1153–1164. DOI: [10.1007/s00170-017-1292-z](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1292-z).
14. Nguyen T.-T., Vu T.-C., Duong Q.-D. Multi-responses optimization of finishing honing process for surface quality and production rate. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, vol. 42, article number 604. DOI: [10.1007/s40430-020-02690-y](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02690-y).
15. Arantes L.J., Fernandes K.A., Schramm C.R., Leal J.E.S., Piratelli-Filho A., Franco S.D., Arencibia R.V. The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 93, pp. 635–649. DOI: [10.1007/s00170-017-0544-2](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0544-2).
16. Buj-Corral I., Rodero-De-Lamo L., Marco-Almagro L. Use of results from honing test machines to determine roughness in industrial honing machines. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 28, pp. 60–69. DOI: [10.1016/j.jmapro.2017.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.016).
17. Yuan B., Han J., Wang D., Zhu Y., Xia L. Modeling and analysis of tooth surface roughness for internal gearing power honing gear. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017, vol. 39, pp. 3607–3620. DOI: [10.1007/s40430-017-0791-z](https://doi.org/10.1007/s40430-017-0791-z).
18. Kuznetsov V.P., Voropaev V.V., Skorobogatov A.S. Finishing and hardening of a flat surface ring area of a workpiece by rotary burnishing. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 743, pp. 245–247. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.743.245](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.743.245).
19. Bobrovskii I.N. How to Select the most Relevant Roughness Parameters of a Surface: Methodology Research Strategy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 302, article number 012066. DOI: [10.1088/1757-899X/302/1/012066](https://doi.org/10.1088/1757-899X/302/1/012066).

The profile physical coefficient and its application for modelling the machined surface texture

© 2023

Igor N. Bobrovskij, Doctor of Sciences (Engineering), researcher
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

E-mail: bobri@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9513-7936>

Received 28.07.2022

Accepted 14.04.2023

Abstract: Current trends in the development of mechanical engineering impose increasingly stringent requirements for the performance characteristics of manufactured goods. The main parameters characterizing the quality of a product as a whole are the physical, mechanical, and geometric indicators of the working surfaces of the compound units. In domestic practice, a machined surface is mainly characterized by a rather limited number of parameters (no more than 6), such as the average microroughness height, the microroughness height at 10 points, etc. However, their use is not enough to manufacture competitive products in the modern conditions. For example, international ISO/ASME/DIN standards include a much broader set of parameters required to accurately describe the performance properties of a surface. The paper analyzes the approaches to the formation of requirements for the microgeometry of the working surfaces of parts used in modern mechanical engineering. Based on the analysis, the author proposed and mathematically substantiated a general approach to modelling surface texture characteristics, which allows describing adequately the surface using a new parameter – the profile physical coefficient, since it is virtually impossible to directly compare the technologies developed in Russia with foreign analogues based on the current standards. First, the profile physical coefficient was determined at the section level. Next, it was decomposed into a Fourier series for the two-dimensional and three-dimensional cases. The paper presents the analysis of the new parameter applicability on the example of a product obtained by honing. The author concluded about the applicability of this parameter and the necessity to develop a comprehensive methodology based on it for evaluating the surface after machining.

Keywords: mechanical engineering technology; machining; surface; profile physical coefficient; rough layer; surface texture.

Acknowledgements: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 20-79-00233 <https://rscf.ru/project/20-79-00233/>).

For citation: Bobrovskij I.N. The profile physical coefficient and its application for modelling the machined surface texture. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 3, pp. 9–17. DOI: [10.18323/2782-4039-2023-3-65-1](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-1).