

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.2.082.18
doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-33-43

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Виктор Петрович Тихомиров¹, Михаил Александрович Измеров^{2✉}, Дмитрий Яковлевич Антипин³

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ dm-bgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7269-8175>

² m.izmerov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4170-6184>

³ antipindy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8246-6271>

Аннотация

Рассмотрена процедура определения параметров контактного взаимодействия шероховатых поверхностей. При малых нагрузках имеет место дискретный контакт, при котором отсутствует взаимное влияние нагруженных соседних неровностей. Фрактальный подход оказывается наиболее эффективным для количественной оценки параметров контактного взаимодействия шероховатых поверхностей.

Цель исследования: оценка влияния шероховатости поверхности на функциональные свойства контакта.

Задача, решению которой посвящена статья: оценка фактической площади контакта шероховатых поверхностей.

Методы исследования: компьютерное моделирование шероховатых поверхностей и их контакта.

Новизна работы: найдена фрактальная размерность D_{xy} , характеризующая размерное распределение площадей среза неровностей

Результаты исследования: представляется возможным оценка параметров контактного взаимодействия шероховатых поверхностей в условиях пластического и упругого состояния нагруженных неровностей.

Выводы: корректная оценка ФПК требует учета ряда параметров, определяющих как шероховатость, так и особенности фрактальной структуры поверхности.

Ключевые слова: размерность, распределение, площадь, срез, неровность, контакт, шероховатость, поверхность.

Ссылка для цитирования:

Тихомиров В.П. Численное моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, Д.Я. Антипин // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 1. – С. 33-43. doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-33-43.

Original article
Open Access Article

NUMERICAL SIMULATION OF CONTACT INTERACTION OF ROUGH SURFACES

Viktor Petrovich Tikhomirov¹, Mikhail Aleksandrovich Izmerov^{2✉}, Dmitry Yakovlevich Antipin³

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ dm-bgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7269-8175>

² m.izmerov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4170-6184>

³ antipindy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8246-6271>

Abstract

The procedure for determining the parameters of the contact interaction of rough surfaces is considered. At low loads, there is a discrete contact in which there is no mutual influence of loaded neighboring ir-

regularities. The fractal approach proves to be the most effective for quantifying the contact interaction parameters of rough surfaces.

The study objective: to evaluate the effect of surface roughness on the functional properties of the contact.

The task to which the paper is devoted: to estimate the actual contact area of rough surfaces.

Research methods: computer simulation of rough surfaces and their contact.

The novelty of the work: the fractal dimension D_{XY} is found, characterizing the dimensional distribution of the cut-off areas of irregularities.

Reference for citing:

Tikhomirov VP, Izmerov MA, Antipin DYa. Numerical simulation of contact interaction of rough surfaces. Transport Engineering. 2026;1:33-43. doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-33-43.

Введение

Контакт между макроскопическими поверхностями происходит на неровностях, а взаимодействие локальных нано- и микро-масштабных неровностей определяет макроскопические трибологические характеристики. Трибологические явления, такие как трение и износ, сильно зависят от масштаба. Измерения трения, проводимые в диапазоне микро/милли-ньютонных нагрузок, приобретают все большее значение в трибологических исследованиях, поскольку они сокращают разрыв между классическими макромасштабными испытаниями и высокоточными наноразмерными экспериментами.

В зависимости от того, какие функциональные свойства соединения шероховатых поверхностей требуется выявить, модели контактного взаимодействия могут содержать разные наборы параметров, характеризующие статистические и фрак-

Research results: it is possible to estimate the parameters of the contact interaction of rough surfaces under the conditions of plastic and elastic state of load-ed irregularities.

Conclusions: correct assessment of FPC requires consideration of a number of parameters that determine both the roughness and the features of the fractal structure of the surface.

Keywords: dimension, distribution, area, cut, irregularity, contact, roughness, surface.

тальные свойства рассматриваемых поверхностей. При описании поверхности обычно используют математическую модель, выражаемую уравнением Вейерштрасса-Мандельброта. Физическая модель поверхности представляется в виде набора сферических сегментов, высоты которых и кривизны верхней части выступов имеют определенные вероятностные распределения. Процедура оценки параметров контактного взаимодействия, например фактической площади контакта и ее зависимости от нормальной нагрузки или контактной жесткости, содержит следующие этапы: описание поверхности и нахождение ее показателей; установление как состояния отдельного нагруженного выступа, так и зависимости нагрузка-деформация; рассмотрения множественного контакта на основе знания о распределении площадей пятен контакта.

Моделирование шероховатых поверхностей

Описание поверхности и определение ее параметров. Учитывая фрактальную размерность поверхности D_S и параметр

$$z(x, y) = L \left(\frac{G}{L}\right)^{D_S-2} \left(\frac{\ln \gamma}{M}\right)^{1/2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=n_1}^N \gamma^{(D_S-3)n} \times \left\{ \cos \phi_a - \cos \left[\frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{1/2}}{L} \cos \left(\arctg \left(\frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} \right) + \phi_a \right] \right\}$$

Здесь $z(x, y)$ – ординаты и координаты профиля поверхности; параметр M определяет число неровностей в конструкции поверхности; $2 < D_S < 3$; L – базовая длина; ϕ_a – случайная величина, равномерно

фрактальной шероховатости G , уравнение, описывающее шероховатую поверхность в 3D, запишем в виде [1].

распределенной в диапазоне от 0 до 2π ; $\gamma = 1,5$.

Рассмотрим контакт двух одинаковых поверхностей. В качестве примера рассмотрим шлифованную и практически изотропную поверхность (рис. 1).

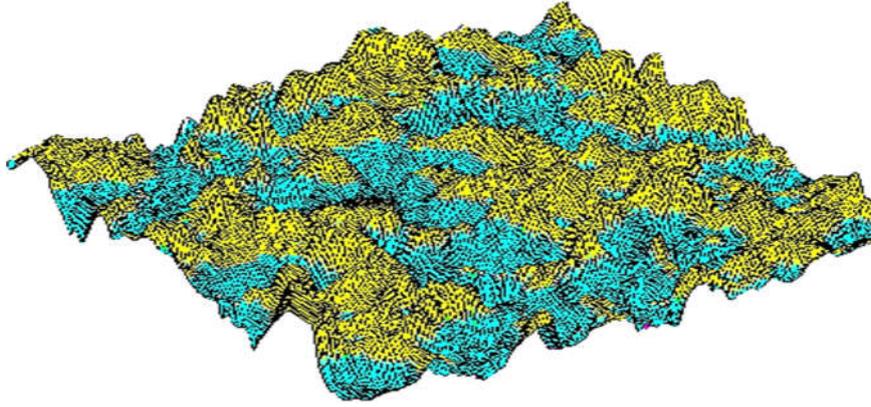


Рис. 1. Модель поверхности ($R_a = 3,87$ мкм; $R_q = 4,80$ мкм; $R_p = 10,70$ мкм; $R_{\max} = 39,55$ мкм)
 Fig. 1. Surface model ($R_a = 3.87$ mcm; $R_q = 4.80$ mcm; $R_p = 10.70$ mcm s; $R_{\max} = 39.55$ mcm)

Профиль рассматриваемой поверхности представлен на рис. 2.



Рис. 2. Профиль поверхности (трасса 10 из 161)
 Fig. 2. Surface profile (Route 10 of 161)

Для рассматриваемой поверхности найдем с помощью метода «периметр-площадь» (рис. 3) фрактальную размерность поверхности ($D_{SI} = 2,33$) и, соответственно, профиля ($D_1 = D_{SI} - 1 = 1,33$).

При оценке параметров контактного взаимодействия используем замену кон-

такта двух шероховатых поверхностей (с фрактальными размерностями D_1 и D_2) на контакт гладкой поверхности с эквивалентной шероховатой, которая имеет фрактальную размерность D , определяемую с помощью следующей зависимости [2]:

$$D = D_1 - \left(1 - \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2}\right) (2 - D_2) (D_1 - 1).$$

При $D_1 = D_2 = D$ фрактальная размерность поверхности (профиля) равна $D_{eq} = 1,256$. Параметр фрактальной шероховатости найдем по формуле

$$G_1 = \left\{ \frac{2R_{q1} [(2 - D) \ln \gamma]^{1/2}}{L_m^{2-D}} \right\}^{1/(D-1)}.$$

При $R_{q1} = R_{q2}$, $\gamma = 1,5$, $L_m = 800$ мкм, имеем

$$G = \sqrt{G_1^2 + G_2^2} = G_1 \sqrt{2} = \left\{ \frac{2 \cdot 4,8 [(2 - 1,256) \ln \gamma]^{1/2}}{800^{2-1,256}} \right\}^{1/(1,256-1)} \cdot \sqrt{2} = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ мкм}$$

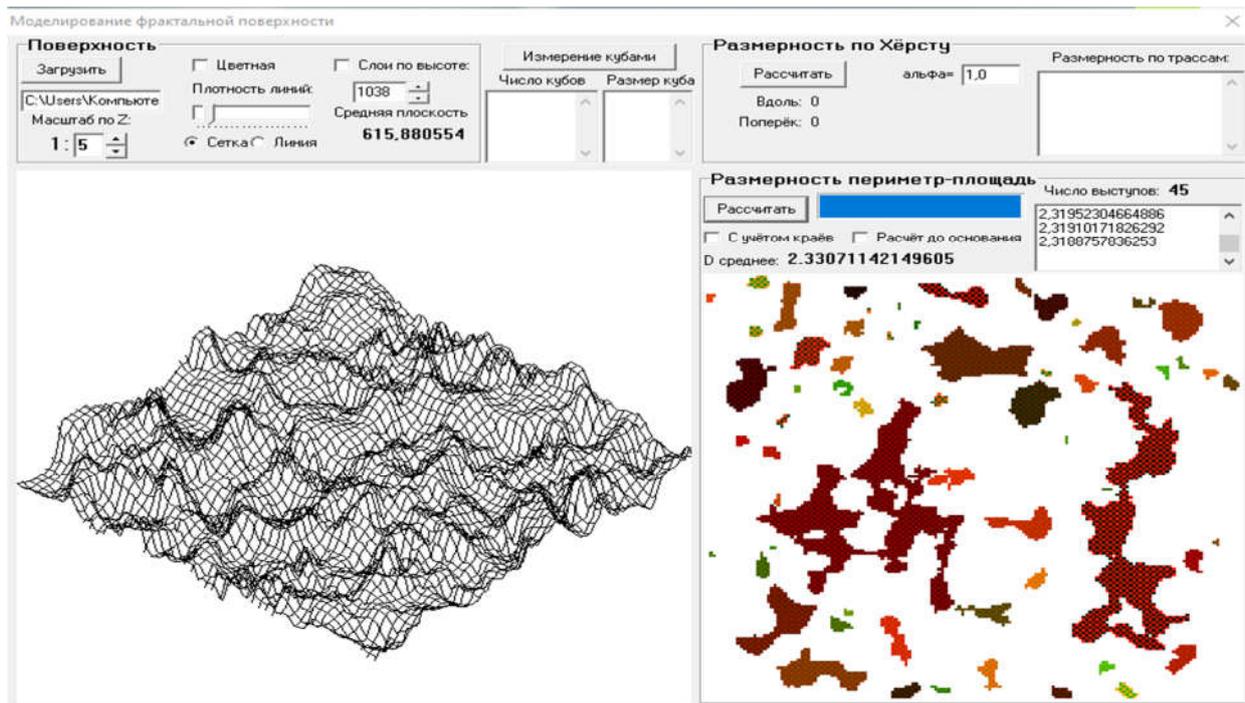


Рис. 3. Результаты оценки фрактальной размерности поверхности
 Fig. 3. The results of the assessment of the fractal dimension of the surface

Параметры выступа. Выступ реальной поверхности с учетом фрактальных свойств моделируется в виде сферического

сегмента (рис. 4), имеющего радиус закругления r , величина которого зависит от фрактальных показателей [3].

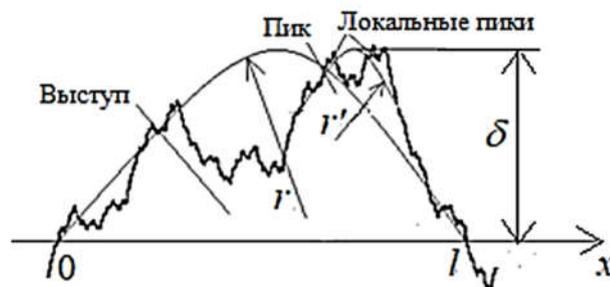


Рис. 4. Выступ и его модель
 Fig. 4. The ledge and its model

$$r = \frac{(a')^{D/2}}{2^{4-D} \pi^{D/2} G^{D-1} (\ln \gamma)^{1/2}}, \quad 1 < D < 2, \quad \gamma = 1,5,$$

где a' – площадь среза неровности на уровне δ .

При нагружении выступа вначале деформируются локальные пики (нанонеровности). Их деформация носит пластический характер ввиду их малых размеров. По мере роста нагрузки на выступ происходит увеличение пятна контакта и пере-

ход от пластического состояния к упругому.

Критерий перехода от пластического состояния, характеризуемого деформацией субмикронеровностей, к упругому, найдем, приравняв нагрузки на пятно контакта для обоих случаев [4]:

$$F_p = H a' = F_e = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} E G^{D-1} (a'/2)^{(3-D)/2}.$$

Здесь a' - площадь среза выступа.

Решая приведенное соотношение относительно $a' = a'_{c1}$, получим

$$a'_{c1} = \left(\frac{2^{(D+1)/2} \sqrt{\pi E}}{3H} \right)^{2/(D-1)} \cdot G^2.$$

Связь между нагрузкой на выступ и площадью среза (площадью пятна контакта) выражается как:

$$F_{Ne}^0 = \frac{4}{3} E' r^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} = \frac{2^{(9-2D)/2} E'}{3} \pi^{(D-3)/2} (\ln \gamma)^{1/2} G^{D-1} (a')^{(3-D)/2}$$

Здесь $\frac{1}{E} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$; E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Множественный контакт. Число пятен среза неровностей, имеющих площадь, превышающую a' , определяется зависимостью

$$N(A > a') = \left(\frac{a'_L}{a'} \right)^{\frac{D_{XY}}{2}},$$

где a'_L – максимальная площадь.

Численное моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей позволяет как визуализировать пятна контакта, так и найти площади отдельных пятен касания в стыке (рис. 5).

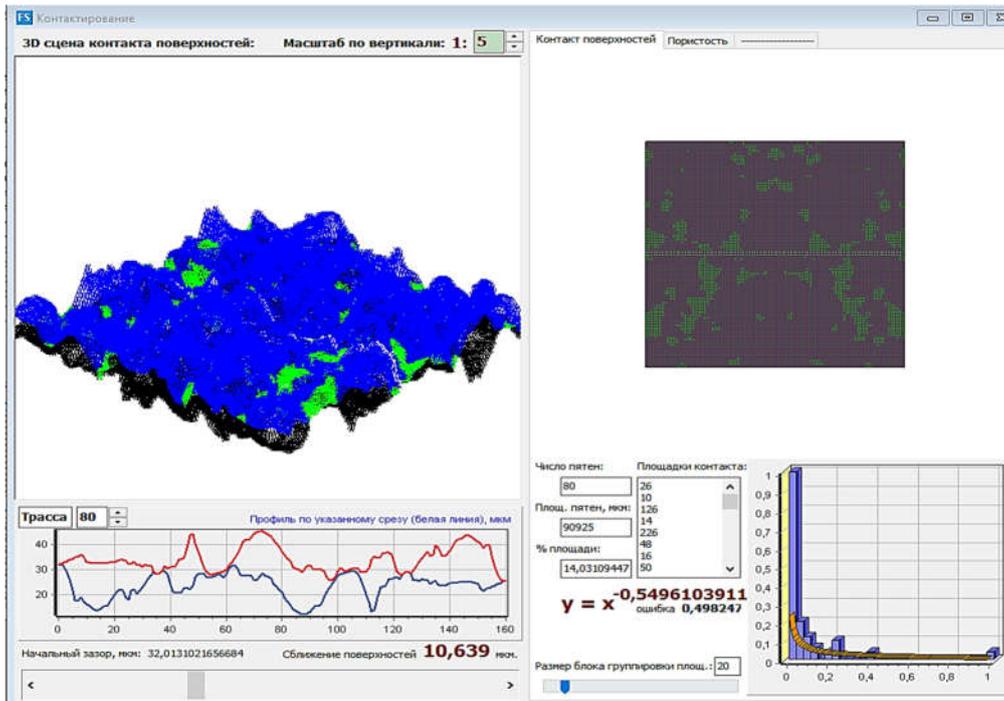


Рис. 5. Оценка пятен контакта и их площадей
Fig. 5. Assessment of contact spots and their areas

Учитывая отличие площади среза от площади упругого контакта, запишем

$$n(a') = -\frac{dN}{da'} = \frac{D_{XY}}{2} a'_L \left(\frac{D_{XY}}{2} \right) \psi^{-\left(1-\frac{D_{XY}}{2}\right)} a' \left[-\left(\frac{D_{XY}+2}{2} \right) \right]$$

Здесь ψ – коэффициент расширения, учитывающий наличие нанонеровностей и их влияние на распределение площадей

размерное распределение площадей пятен контакта по формуле

среза выступов, и определяемый выражением

$$\frac{\psi^{\frac{2-D_{XY}}{2}} - (1 + \psi^{-D_{XY}/2})^{\frac{-(2-D_{XY})}{D_{XY}}}}{\frac{2 - D_{XY}}{D_{XY}}} = 1.$$

Анализ результатов численного моделирования контактного взаимодействия рассматриваемых поверхностей позволил установить, что из 80 пятен контакта, имеющих для данного сближения поверхностей, $N(A > a') = 73$, а площадь максимального пятна (в условных единицах от

1-й точки до $160 \times 160 = 25\,600$ точек, площадь одной точки равна 25 мкм^2) составит $a'_L = 580$, а минимального – $a' = 1$.

Тогда фрактальную размерность D_{XY} множества, представляющего собой площади пятен контакта, найдем из выражения

$$D_{XY} = 2 \frac{\ln N}{\ln \left(\frac{a'_L}{a'} \right)} = 2 \frac{\ln 73}{\ln \left(\frac{580}{1} \right)} = 1,349.$$

Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. Рассматривается контактное взаимодействие гладкой поверхности с эквивалентной шероховатой. Нормальная нагрузка складывается из следующих составляющих:

$$F_n = F_{np} + F_{ne}.$$

Нагрузка, воспринимаемая пластически деформируемыми субмикронеровностями F_{np} и выступами в упругом состоянии F_{ne} определяется выражением

$$F = \int_0^{a'_{c1}} H a' n(a') da' + \int_{a'_{c1}}^{a'_L} \frac{4}{3\sqrt{2\pi}} E G^{D-1} (a')^{(3-D)/2} n(a') da', \quad a'_{c1} < a'_L \leq a'_{c2}.$$

Запишем нормальную нагрузку после интегрирования в виде

$$F = \frac{H D_{XY}}{(2 - D_{XY})} (a'_L)^{D_{XY}/2} \psi^{1-D_{XY}/2} (a'_c)^{(2-D_{XY})/2} + \frac{4}{3\sqrt{2\pi}} E G^{D-1} \frac{D_{XY}}{(3 - D - D_{XY})} \psi^{1-D_{XY}/2} \cdot \left[(a'_L)^{(3-D-D_{XY})/2} - (a'_c)^{\frac{(3-D-D_{XY})}{2}} \right]; \quad D + D_{XY} \neq 3$$

При $D + D_{XY} = 3$ нормальная нагрузка определяется выражением [5]

$$F = 3H \psi^{1/4} a'_L{}^{3/4} a'_{c1}{}^{1/4} + \frac{\sqrt[4]{2}}{\sqrt{\pi}} E \sqrt{G} \psi^{1/4} a'_L{}^{3/4} \ln \frac{a_L}{a_{c1}}$$

Здесь $a_L = a'_L/2$; $a_{c1} = a'_{c1}/2$.

Площадь среза выступа эквивалентной шероховатой поверхности, соответствующая переходу от упругого состояния к упругопластическому, определяется известным соотношением [6], [7]:

$$\delta_{c2} = 2,4r \left(\frac{H}{E} \right)^2.$$

Учитывая, что $a'_{c2} = 2\pi \delta_{c2} r$, после некоторых преобразований с учетом зависимости для радиуса выступа, получим

$$a'_{c2} = \left[\frac{0,3 \cdot 2^{2(D-2)} (H/E)^2}{\pi^{D-1} G^{2(D-1)} \ln \gamma} \right]^{\frac{1}{1-D}}.$$

Результаты моделирования

Параметры контактного взаимодействия рассматриваемых сопряженных поверхностей (при $D = 1,256$; $D_{XY} = 1,349$; $G = 3,4 \cdot 10^{-9}$ мм; $\psi = 2,1$; $H = 3000$ МПа; $E = 1,099 \cdot 10^5$ МПа; $a'_{c1} = 1,417 \cdot 10^{-4}$ мм²; $a'_{c2} =$

$1,099 \cdot 10^{-2}$ мм²) приведены в табл. 1. Зависимость между фактической площадью контакта и нормальной нагрузкой носит линейный характер.

Для случая упругого состояния

нагруженных неровностей параметры контакта сведены в табл. 2.

На рис. 6 показана зависимость

относительной площади контакта от нагрузки, которая носит линейный характер.

Таблица 1
Параметры контактного взаимодействия при пластическом деформировании микронеровностей

Table 1

Parameters of contact interaction during plastic deformation of micro irregularities

Площадь среза максимального выступа, мм ²	Нагрузка F_{np} , Н	Фактическая площадь контакта, мм ²
10^{-6}	0,256	$8,5 \cdot 10^{-5}$
10^{-5}	0,524	$1,7 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-5}$	0,862	$2,8 \cdot 10^{-4}$
$1,141 \cdot 10^{-4}$	1,114	$3,7 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2
Параметры контактного взаимодействия при упругом деформировании неровностей

Table 2

Parameters of contact interaction during elastic deformation of irregularities

Площадь среза максимального выступа a'_L , мм ²	Нагрузка F_{np} , Н	Относительная площадь контакта A_r/A_a
$2 \cdot 10^{-4}$	24	0,016
$4 \cdot 10^{-4}$	78	0,018
$6 \cdot 10^{-4}$	113	0,019
$8 \cdot 10^{-4}$	140	0,020
10^{-3}	161	0,021

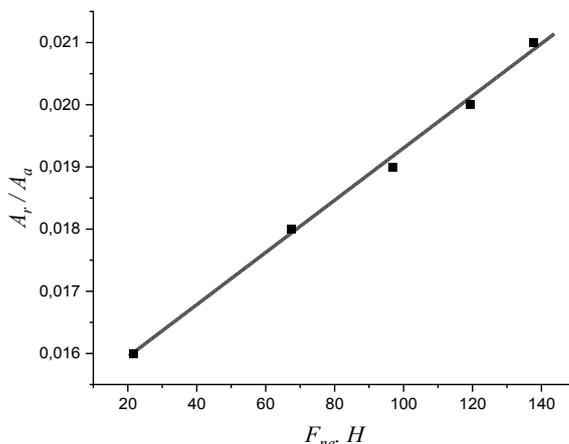


Рис. 6. Зависимость относительной площади контакта от нормальной нагрузки
Fig. 6. Dependence of the relative contact area on the normal load

Относительную площадь контакта найдем, используя следующее соотношение [4]

$$\frac{A_r}{A_a} = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{d}{R_q \sqrt{2}} \right), \quad (1)$$

где d – промежуток между гладкой по-

верхностью и средней линией эквивалентной шероховатой.

Произведем оценку величины промежутка с учетом фрактальных особенностей структуры поверхности:

$$d = R_p - (a'_L)^{1-\frac{D}{2}} \frac{2^{4-D}}{\pi^{1-\frac{D}{2}}} G^{D-1} (\ln 1,5)^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь R_p – высота сглаживания.

С другой стороны, для оценки фактической площади контакта (или отноше-

ния A_r/A_a при $A_a = 1$) используем на основе модели Маджумдара-Бхушана [8] следующее соотношение:

$$A_r \text{ (или } A_r/A_a) = \frac{D_{XY}}{2-D_{XY}} \psi^{1-\frac{D_{XY}}{2}} a'_L. \quad (2)$$

На рис. 7 представлено сравнение относительной площади контакта, полученной по формулам 1 и 2.

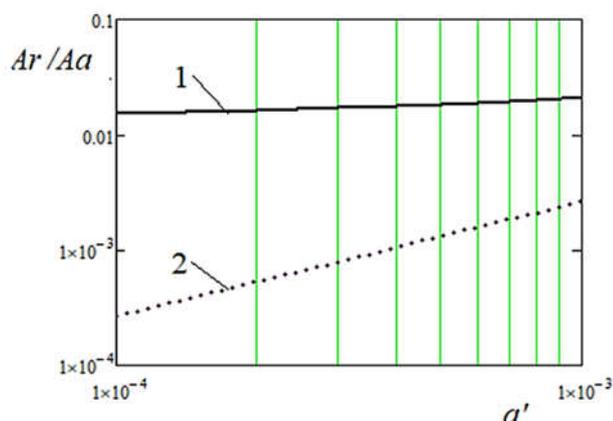


Рис. 7. Относительные площади контакта
Fig. 7. Relative contact areas

Сравнительный анализ приведенных зависимостей (1, 2) показал, что более корректную зависимость представляет соотношение 1, которое учитывает такие дополнительные параметры, характеризующие особенности рассматриваемой поверхности, как высота выступа и среднее квадратическое отклонение ординат профиля.

Таким образом, при оценке функциональных свойств поверхности требуется, кроме фрактальной размерности, использовать дополнительные параметры R_a, R_q, R_p и др.

Технология производства заданной поверхности

В качестве исходных данных, задаваемых конструктором, специалист по технологии в области машиностроения обладает информацией о проектируемой поверхности в виде опорной кривой (рис. 8), а также параметрами, характеризующими шероховатую фрактальную поверхность.

Считается, что модель поверхности и создаваемая реальная поверхность являются адекватными, если их опорные кривые совпадают.

На рис. 8 представлена опорная кривая [9] рассматриваемой поверхности соединения.

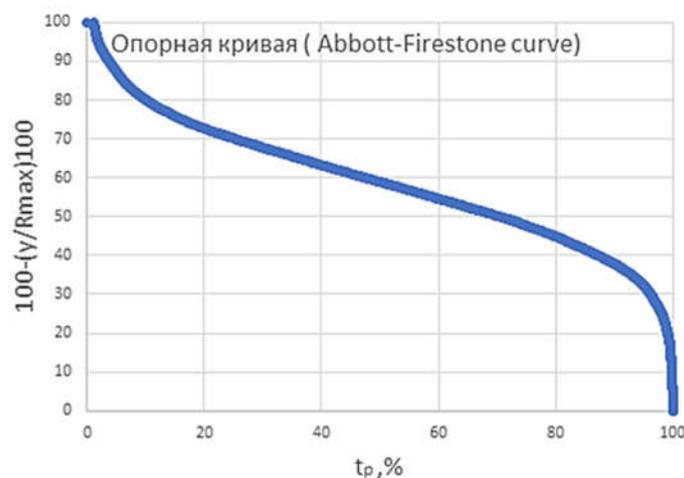


Рис. 8. Опорная кривая поверхности, представленной на рис. 1
Fig. 8. The reference curve of the surface shown in Fig. 1

В отечественном стандарте (ГОСТ Р ИСО 4287-2014) [10] включены параметры, оценивающие шероховатость поверхности. Среди важных параметров шероховатости выделим опорную кривую Аббота-Файрстоуна (*Abbott-Firestone curve*), с

помощью которой можно оценить профиль поверхности и прогнозировать результат технологии и режимов обработки на опытных образцах, приводящий к требуемой картине опорной кривой. В работе [11] проведено исследование влияния техноло-

гических параметров на профиль шероховатой поверхности и, соответственно, на вид опорной поверхности.

Изменяя режимы обработки поверхности (подачу инструмента, глубину резания и др.) на образцах и построив для каждого случая опорную кривую, можно определить, применяя современные эф-

Заключение

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Представлены результаты моделирования контактного взаимодействия шероховатых поверхностей в условиях пластического и упругого состояния нагруженных неровностей. Модель предусматривает определение фрактальной размерности D_{xy} , характеризующую размерное распределение площадей среза неровностей.

2. Процедура моделирования контактного взаимодействия шероховатых поверхностей основана на приведении сопряжения двух шероховатых поверхностей к контактному взаимодействию гладкой поверхности с эквивалентной шерохова-

фективные методы проведения экспериментов, требуемый режим обработки, реализация которого дает такую же опорную кривую, как и на модели, с помощью которой определены те или иные функциональные свойства исследуемой поверхности.

Приведены зависимости, позволяющие оценить параметры поверхности с эквивалентной шероховатостью.

3. Приведен сравнительный анализ известных зависимостей, определяющих величину фактической площади контакта (ФПК) шероховатых поверхностей. Показано, что корректная оценка ФПК требует учета ряда параметров, определяющих как шероховатость, так и особенности фрактальной структуры поверхности.

4. Для реализации технологии подготовки поверхности, обеспечивающей такие же функциональные свойства, как и при численном моделировании контактного взаимодействия, предлагается использовать профильный принцип и, в частности, опорную кривую.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Li J. Study on the optical performance of thin-film light-emitting diodes using fractal micro-roughness surface model \ J. Li, Y. Tang, Z. Li, X. Ding \ Applied Surface Science. 2017. V. 140. P. 60-69.
2. Zheng W. Interface leakage theory of mechanical seals considering microscopic forces \ Zheng W., Sun J., Ma Yu \ Coatings. 2023. P. 1-19 (<https://www.mdpi.com/Journal/Coatings>)
3. Zhao Y. Stiffness and damping model of bolted joints with uneven surface contact pressure distribution \ Zhao Y., Yang C \ Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering. 2016. V. 62. P. 665-677.
4. Majumdar A. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces \ Majumdar A., Bhushan, B. \ Trans. ASME: J. Tribology. 1990. V. 112. P. 205-216.
5. Zhang X. Tangential Damping and its Dissipation Factor Models of Joint Interfaces Based on Fractal Theory with Simulations \ Zhang X., Wang N., Lan G., Wen S., Chen Y \ Journal of Tribology. 2014. V. 136. P. 1-10.
6. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ \ Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. \ М.: Машиностроение. 1977. 525 с.
7. Чичинадзе А.В. Основы трибологии. Трение, износ, смазка: Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ, и доп. \ А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. 2001. 664 с.
8. Majumdar A. Fractal model of elastic-plastic contact of rough surfaces \ A. Majumdar, B. Bhushan \ Modern mechanical engineering. Ser. B. 1991. No. 6. pp.11-23.
9. Abbott E.J. Specifying surface quality \ Abbott E.J, Firestone F.A. \ Mech Eng. 1933. 572 PP.
10. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры.
11. Мусохранов М.И. Численный метод расчета параметров кривой Эбботта-Файрстоуна \ Мусохранов М.И., Марочкин В.В \ Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». 2022. №4. С. 2499-2509.

REFERENCES

1. Li J, Tang Y, Li Z, Ding X. Study on the optical performance of thin-film light-emitting diodes using fractal micro-roughness surface model. *Applied Surface Science*. 2017;140:60-69.
2. Zheng W, Sun J, Ma Yu. Interface leakage theory of mechanical seals considering microscopic forces. *Coatings* [Internet]. 2023;1-19. Available from: <https://www.mdpi.com/Journal/Coatings>
3. Zhao Y, Yang C. Stiffness and damping model of bolted joints with uneven surface contact pressure distribution. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 2016;62:665-677.
4. Majumdar A, Bhushan B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces. *Trans. ASME: J. Tribology*. 1990;112:205-216.
5. Zhang X, Wang N, Lan G, Wen S, Chen Y. Tangential Damping and its Dissipation Factor Models of Joint Interfaces Based on Fractal Theory with Simulations. *Journal of Tribology*. 2014;136:1-10.
6. Kragelsky IV, Dobychin MN, Kombatov BC. *Fundamentals of calculations for friction and wear*. Moscow: Mashinostroenie; 1977.
7. Chichinadze AV, Brown ED, Boucher NA. *Fundamentals of tribology. Friction, wear, lubrication: textbook for technical universities*. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie; 2001.
8. Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact of rough surfaces. *Modern Mechanical Engineering*. 1991;6:11-23.
9. Abbott EJ, Firestone FA. Specifying surface quality. *Mech Eng*. 1933:572.
10. GOST R ISO 4287-2014. Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters. Moscow: Standartinform; 2019.
11. Musokhranov MI, Marochkin VV. Numerical method for calculating the parameters of Abbott-Firestone curve. *StudNet*. 2022;4:2499-2509.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихомиров, В.П. Фрактальные модели инженерных поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, П.В. Тихомиров / Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 3. - С. 72-80.
2. Tikhomirov, V.P. Fractal model of contact interaction of nominally flat surfaces / V.P. Tikhomirov, M.A. Izmerov // AIP Conference Proceedings: Proceedings International Conference “Problems of Applied Mechanics”, 2021. – Volume 2340. - P. 060004 (1-6).
3. Измеров, М.А. Имитационное моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей / М.А. Измеров // «Трибология – Машиностроению» - труды XIII Международной научно – технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 295-300. (0,34 / 0,17 п.л.).

BIBLIOGRAPHIC LIST

1. Tikhomirov VP, Izmerov MA, Tikhomirov PV. Fractal models of engineering surfaces. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2014;3:72-80.
2. Tikhomirov VP, Izmerov MA. Fractal model of contact interaction of nominally flat surfaces. *Proceedings of International Conference, 2021: Problems of Applied Mechanics; 2021;2340:060004 (1-6).*
3. Izmerov MA. Simulation of contact interaction of rough surfaces. *Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference, 2020: Tribology to Machine Engineering*. Moscow: IMASH RAS; 2020.p. 295-300.

Информация об авторах:

Тихомиров Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Дизайн и проектирование в машиностроении», тел. 8 (4832) 58-83-09.

Измеров Михаил Александрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Дизайн и проектирование в машиностроении», тел. 8-

Tikhomirov Viktor Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Design in Mechanical Engineering, phone: 8 (4832) 58-83-09.

Izmerov Mikhail Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the De-

partment of Design in Mechanical Engineering, phone: 8-961-002-72-92.

Антипин Дмитрий Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, директор «УНИТ», директор инжинирингового центра в области высокотехнологического машиностроения "HIGH-TECH ENGINEERING", тел. 8 (4832) 56-04-66.

Antipin Dmitry Yakovlevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of ESIT, Director of the Engineering Center HIGH-TECH ENGINEERING, phone: 8 (4832) 56-04-66.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 02.12.2025; одобрена после рецензирования 05.12.2025; принята к публикации 29.12.2025. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 02.12.2025; approved after review on 05.12.2025; accepted for publication on 29.12.2025. The reviewer is Shalygin M.G., Doctor of Technical Sciences, Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.



***Продолжается подписка на научно-технический журнал
«Транспортное машиностроение» на 2026 год***

Подписку на журнал можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Подписные индексы по интернет-каталогу «Пресса по подписке» – Э80859 – https://www.akc.ru/itm/vestnik-bry_anskogo-gosudarstvennogo-tehnic_heskogo-universiteta/ и Объединенному каталогу «Пресса России» – 80859.

Стоимость подписки на минимальный срок – от 4846 руб.

Информация об опубликованных статьях регулярно направляется в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) – <https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=79505>.

Сайт электронной редакции журнала: <https://bstu.editorum.ru/ru/nauka/journal/169/view>
E-mail: trans-eng@tu-bryansk.ru.

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (категория К2) по группам научных специальностей:

2.5. Машиностроение (2.5.2; 2.5.3; 2.5.5; 2.5.6; 2.5.8),

2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия (2.6.1; 2.6.17),

2.9. Транспортные системы (2.9.1; 2.9.3; 2.9.5).