

Ежов, А.Д. Расчетная оценка изменения фактической площади контакта при циклическом нагружении контактных пар изотропных материалов на основе моделирования параметров микрорельефа поверхности / А.Д. Ежов, Л.В. Быков, Ю.А. Крылова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 4. – С. 163–169. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.14

Ezhov A.D., Bykov L.V., Krylova Yu.A. Determination of the contact area under cyclic loading of contact pairs of isotropic materials on the basis of 3d surface microrelief modelling. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 4, pp. 163-169. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.14



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2022

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.14

УДК 539.3

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ КОНТАКТНЫХ ПАР ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

А.Д. Ежов, Л.В. Быков, Ю.А. Крылова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 19 октября 2022 г.
Одобрена: 08 декабря 2022 г.
Принята к публикации:
12 декабря 2022 г.

Ключевые слова:

шероховатость поверхности, микрорельеф поверхности, цифровой двойник поверхности, циклическое нагружение, моделирование контактного взаимодействия, микротопография, площадь фактического контакта, пятно контакта, сближение поверхностей.

АННОТАЦИЯ

Параметры микрорельефа поверхности являются первостепенными в задачах фрикционного взаимодействия деталей, течения жидкости и газа в каналах, обеспечения требуемых тепловых режимов и напряженно-деформированного состояния конструкции. Решение задачи обеспечения оптимального теплового режима значительной номенклатуры технических изделий зачастую становится определяющим при проектировании изделий, функционирующих в условиях протекания высокоинтенсивных тепловых потоков. Транзитные тепловые потоки, протекающие через изделие, а также тепловые потоки от собственных источников теплоты обязательно должны быть либо аккумулированы, либо отведены во внешнее пространство. При этом направления векторов тепловых потоков определяются конструктивными особенностями изделий, и в том числе через различные контактные соединения. Очевидно, что достоверное определение параметров контактного взаимодействия деталей изделия является основой для достоверного анализа напряженно-деформированного и теплового состояния широкого круга конструкций, функционирующих в условиях протекания высокоинтенсивных тепловых потоков.

Эксплуатационные характеристики контактирующих деталей конструкции напрямую определяются свойствами контакта сопряженных поверхностей. При решении многих задач теплового, механического и электрического контактного взаимодействия шероховатость поверхности является ключевым фактором. Процессы трения и изнашивания происходят именно на фактической площади контакта и зависят не только от свойств материала, но и от межконтактного давления на этой площади, поскольку величина фактического давления определяет разрушение поверхностных пленок и возникновение адгезионных связей в контакте.

В представленной работе рассматривается изменение фактической площади контакта при циклическом нагружении контактных пар материалов на базе цифровых двойников контактирующих поверхностей в широком диапазоне сжимающих давлений.

© ПНИПУ

© Ежов Алексей Дмитриевич – к.т.н., доц., e-mail: ezhhov@gmail.com, [ID](#): 0000-0002-4769-1326.

Быков Леонид Владимирович – к.т.н., доц., [ID](#): 0000-0002-2741-5957.

Крылова Юлия Алексеевна – студентка, e-mail: jkrlv@yandex.ru.

Aleksey D. Ezhov – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ezhhov@gmail.com, [ID](#): 0000-0002-4769-1326.

Leonid V. Bykov – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, [ID](#): 0000-0002-2741-5957.

Yulia A. Krylova – Student, e-mail: jkrlv@yandex.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

DETERMINATION OF THE CONTACT AREA UNDER CYCLIC LOADING OF CONTACT PAIRS OF ISOTROPIC MATERIALS ON THE BASIS OF 3D SURFACE MICRORELIEF MODELLING

A.D. Ezhov, L.V. Bykov, Yu.A. Krylova

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

ARTICLE INFO

Received: 19 October 2022
Approved: 08 December 2022
Accepted for publication:
12 December 2022

Keywords:

surface roughness, surface microrelief, digital surface twin, cyclic loading, contact interaction modeling, microtopography, actual contact area, contact patch, surface convergence.

ABSTRACT

The parameters of the surface microrelief are paramount in the problems of frictional interaction of parts, the flow of liquid and gas in channels, ensuring the required thermal conditions and the stress-strain state of the structure. The solution of the problem of ensuring the optimal thermal regime for a significant range of technical products often becomes decisive in the design of products operating under conditions of high-intensity heat flows. Transit heat fluxes flowing through the product, as well as heat fluxes from own heat sources, must be either accumulated or removed to the external space. In this case, the directions of the heat flux vectors are determined by the design features of the products, including through various contact connections. Obviously, a reliable determination of the parameters of the contact interaction of product parts is the basis for a reliable analysis of the stress-strain and thermal state of a wide range of structures operating under conditions of high-intensity heat flows.

The operational characteristics of the contacting parts of the structure are directly determined by the properties of the contact of the mating surfaces. When solving many problems of thermal, mechanical and electrical contact interaction, surface roughness is a major factor. The processes of friction and wear occur precisely on the actual contact area and depend not only on the properties of the material, but also on the intercontact pressure on this area, since the magnitude of the actual pressure determines the destruction of surface films and the appearance of adhesive bonds in the contact.

In the presented work, the change in the actual contact area under cyclic loading of contact pairs of materials based on digital twins of contact surfaces in a wide range of compressive pressures is considered.

© PNRPU

Введение

Эксплуатационные характеристики контактирующих деталей конструкции напрямую определяются свойствами контакта сопряженных поверхностей. При решении многих задач теплового, механического и электрического контактного взаимодействия шероховатость поверхности является ключевым фактором [1–6]. Процессы трения и изнашивания происходят именно на фактической площади контакта и зависят не только от свойств материала, но и от межконтактного давления на этой площади, поскольку величина фактического давления определяет разрушение поверхностных пленок и возникновение адгезионных связей в контакте.

Характеристиками, определяющими контактную прочность, жесткость, термо- и электросопротивление, от которых зависят силы трения и износа, являются параметры сближения поверхностей (перемещение одной поверхности касания относительно другой) и, как следствие, изменение фактической площади контакта. Именно на поверхностях фактического контакта происходят процессы адгезионного и фрикционного взаимодействий; локальное разрушение поверхностей, перенос электрических зарядов и тепловой энергии. Экспериментальные исследования с целью определения площади фактического контакта и величины сближения контактирующих поверхностей достаточно трудоемки и не

дают ясного представления о реальной величине сближения поверхностей, проникаемости контакта и объеме межконтактных зазоров.

Одним из способов численного моделирования контакта является разбиение реального профиля на отдельные участки, в результате чего он формализуется и представляется как набор стержней с элементарной площадью основания и соответствующей высотой. Числовая матрица с числом элементов, равным фиксированному количеству элементарных площадок, расположенных на сопрягаемых поверхностях, является математическим аналогом такого геометрического представления [7]. При этом силы трения между смоделированными поверхностями не учитываются.

В последнее время для моделирования контакта шероховатых поверхностей используется фрактальная геометрия [8; 9]. Преимущество такого подхода заключается в том, что фрактальные параметры остаются постоянными на всех масштабах измерения шероховатости и не зависят от длины выборки.

Взаимодействие твердых тел с реальной топографией поверхности можно правильно оценить только с учетом микротопографии поверхности, которая далека от идеальной [7]. В настоящее время микрорельеф поверхности контакта определяется в основном по характеристикам профиля [10]. В общем случае характеристики микрорельефа шероховатой поверхности не совпадают

с характеристиками профиля этой поверхности [11; 12]. Осуществление анализа микрорельефа поверхностей при таком подходе представляет существенные трудности. Одним из выходов из этой ситуации является создание трехмерной модели шероховатой поверхности, наиболее близкой к реальной, с использованием ее для дальнейших расчетов характеристик контакта [13–15].

Во многих известных работах для описания шероховатости поверхности используются волновые функции [17; 18], что, безусловно, сказывается на характере результатов расчета. Анализ профилограмм контактных поверхностей показывает, что профиль шероховатости поверхности носит случайный характер, который невозможно описать повторяющейся функцией. Поэтому поверхности микронеровностей, смоделированные методом с использованием волновых функций, некорректно отображают микрорельеф поверхности и, как следствие, фактическую площадь контакта между поверхностями.

Как правило, при расчетах характеристик контактного взаимодействия микрорельефа поверхностей широко используются различные аналитические методы [19; 20], позволяющие достаточно быстро определить основные характеристики контактного взаимодействия при однократном нагружении. При этом большинство из этих методов используют ряд допущений, связанных со специфическими условиями области их применения, для которых эти допущения носили оправданный характер. Учет реального распределения выступов по высоте обычно решается с использованием кривой опорной поверхности [21] или с использованием статистических функций распределения [22–24], воспользоваться которыми в реальных задачах из-за ряда эмпирических коэффициентов достаточно затруднительно.

Если рассматривать решения задач контактного взаимодействия при циклическом нагружении, то в литературе по данному вопросу отсутствуют адекватные аналитические модели, применимые для инженерных расчетов, а представлены лишь экспериментальные данные о изменении параметров контакта. При этом стоит отметить, что неполнота приведенных экспериментальных данных, а также отсутствие описания профиля шероховатости поверхности не позволяют использовать эти данные для последующего сравнения.

От части таких допущений можно избавиться при использовании современных информационных технологий [25], позволяющих выполнять обработку значительных объемов статистической информации о параметрах рассматриваемых контактирующих поверхностей.

Современные программные и аппаратные средства цифровой обработки различных видов информации позволяют создавать цифровые двойники микрорельефа поверхности для контактных задач [26–29]. С их помощью можно создавать цифровые модели контактной пары на основе параметров рельефа поверхности, полностью учитывающие микрорельеф и повторяющиеся интегральные характеристики исходных данных.

1. Моделирование взаимодействия

Цель данной работы состояла в апробации методики применения цифровых двойников микрорельефа поверхности для моделирования изменения параметров контактного взаимодействия при циклическом нагружении и определении предела качественного изменения площади реального контакта в зависимости от цикла нагружения. Далее будет рассмотрен пример использования данной методики для задач контактного взаимодействия при циклическом нагружении материалов с изотропными физическими свойствами.

В работе проанализирована модель контакта двух поверхностей с шероховатостью поверхности с $Ra = 0,82$ мкм и $Ra = 2,07$ мкм (рис. 1, 2).

После получения информации о параметрах шероховатости поверхности производится построение твердотельной модели контакта методом сплайновой интерполяции облака точек (рис. 3).

Для численного анализа контактного взаимодействия создана расчетная сеточная модель контакта, содержащая 164 952 элемента и 500 312 узлов (рис. 4).

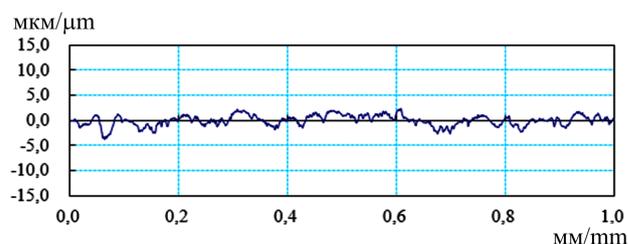


Рис. 1. Профилограмма поверхности с $Ra = 0,82$ мкм

Fig. 1. Profilogram of the surface with $Ra = 0,82$ μm

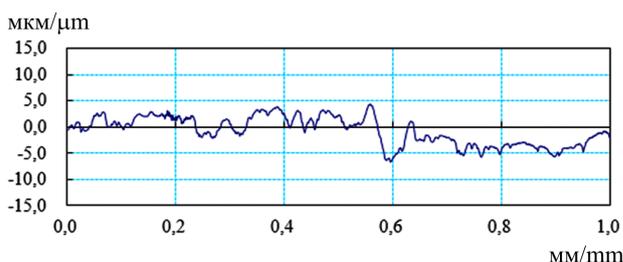


Рис. 2. Профилограмма поверхности с $Ra = 2,07$ мкм

Fig. 2. Profilogram of the surface with $Ra = 2,07$ μm

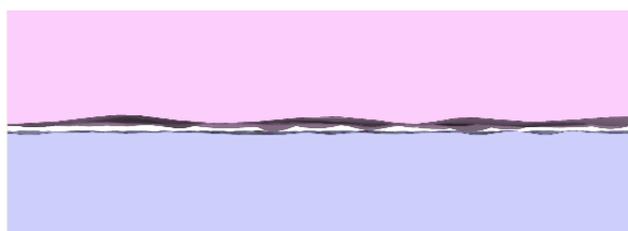


Рис. 3. Модельные контактные поверхности (верх – $Ra = 2,07$ мкм, низ – $Ra = 0,82$ мкм)

Fig. 3. Model contact surfaces (top – $Ra = 2.07$ μm , bottom – $Ra = 0.82$ μm)

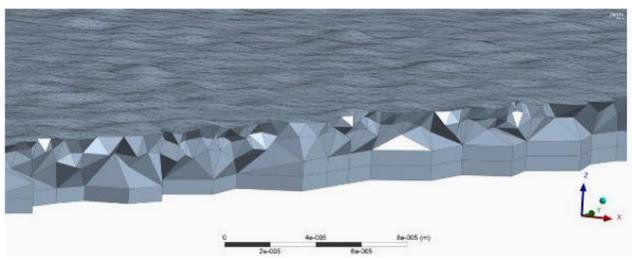


Рис. 4. Сеточная модель микрорельефа поверхности

Fig. 4. Grid model of the surface microrelief

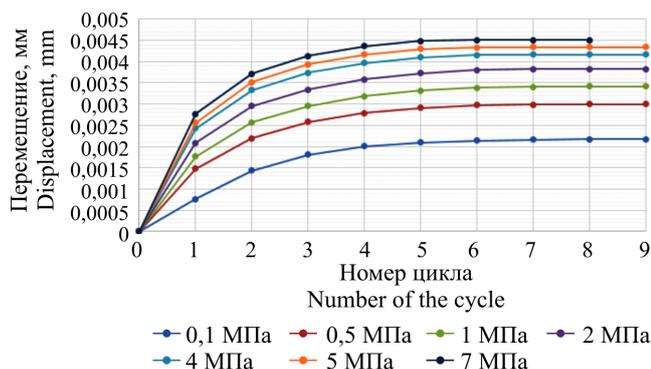


Рис. 5. Сводная диаграмма перемещений верхнего образца

Fig. 5. Summary diagram of displacements of the upper sample

Определение фактической площади контакта производилось по следующему алгоритму:

- задание граничных условий;
- определение величины перемещения верхнего, незафиксированного образца;

– модификация исходной геометрии по данным расчета;

– определение перемещения верхнего, незафиксированного образца и т.д.

Данный алгоритм повторялся до тех пор, пока разница в координате исследуемого образца в трех соседних расчетах становилась минимальной. Результаты величины перемещений представлены на рис. 5.

2. Результаты

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что перемещение исследуемого образца стабилизируется, начиная с 6-го цикла, что также иллюстрируется изменением фактической площади контакта (табл. 1, 2).

Фактическая площадь контактов, образующихся при первоначальном нагружении при разных начальных сжимающих давлениях, а также при последующих циклах, представлена на рис. 6 и 7 соответственно. Сравнение полученных изображений с результатами исследований микрорельефа поверхности с помощью оптической и растровой электронной микроскопии авторами [30; 31] наглядно свидетельствует, что картина формирования пятен контакта цифрового двойника контакта двух поверхностей, а также характер их распределения по поверхности близки к реальной картине.

Проведенные исследования циклического нагружения пар изотропных материалов на основе моделирования

Таблица 1/Table 1

Фактическая площадь контакта при циклической нагрузке, мм²

Actual contact area under cyclic load, mm²

Сжимающая нагрузка/ Contact pressure, МПа	№ цикла/Number of the cycle								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,1	0,0002	0,0005	0,0010	0,0012	0,0014	0,0015	0,0016	0,0017	0,0017
0,5	0,0005	0,0018	0,0030	0,0042	0,0051	0,0054	0,0056	0,0057	0,0057
1	0,0009	0,0030	0,0053	0,0076	0,0092	0,0102	0,0107	0,0107	0,0107
2	0,0015	0,0055	0,0099	0,0136	0,0172	0,0188	0,0204	0,0204	0,0204
4	0,0025	0,0096	0,0177	0,0245	0,0289	0,0320	0,0325	0,0325	0,0325
5	0,0031	0,0125	0,0234	0,0325	0,0384	0,0407	0,0413	0,0413	0,0413
7	0,0041	0,0170	0,0308	0,0425	0,0504	0,0526	0,0526	0,0526	0,0526

Таблица 2/Table 2

Процентная доля фактической площади контакта от номинальной при циклической нагрузке

Percentage of actual contact area from nominal area under cyclic load

Сжимающая нагрузка/ Contact pressure,	№ цикла/Number of the cycle								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,1	0,005	0,013	0,027	0,035	0,040	0,043	0,045	0,048	0,048
0,5	0,014	0,049	0,084	0,118	0,143	0,151	0,156	0,159	0,159
1	0,025	0,085	0,148	0,211	0,257	0,284	0,298	0,298	0,298
2	0,041	0,154	0,274	0,377	0,480	0,524	0,567	0,567	0,567
4	0,068	0,268	0,492	0,681	0,804	0,889	0,903	0,903	0,903
5	0,085	0,348	0,652	0,903	1,068	1,131	1,150	1,150	1,150
7	0,115	0,472	0,855	1,181	1,401	1,464	1,464	1,464	1,464

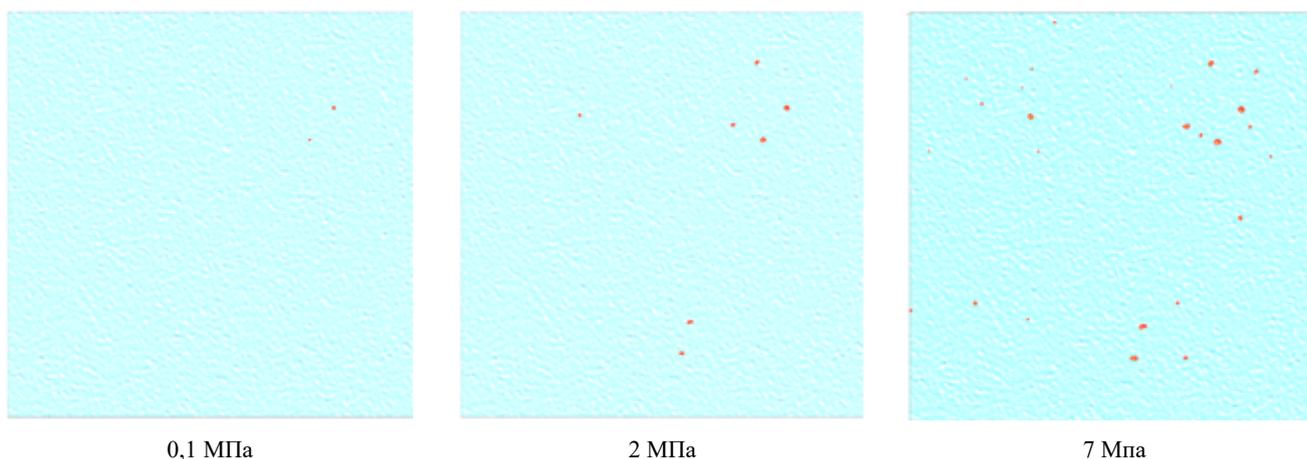


Рис. 6. Динамика изменения фактической площади контакта на поверхности с шероховатостью $Ra = 0,82 \mu\text{m}$ при первоначальном нагружении 0,1 – 2 – 7 МПа

Fig. 6. Dynamics of change of the actual contact area on the surface with roughness $Ra = 0.82 \mu\text{m}$ at the first loading of 0.1 – 2 – 7 MPa

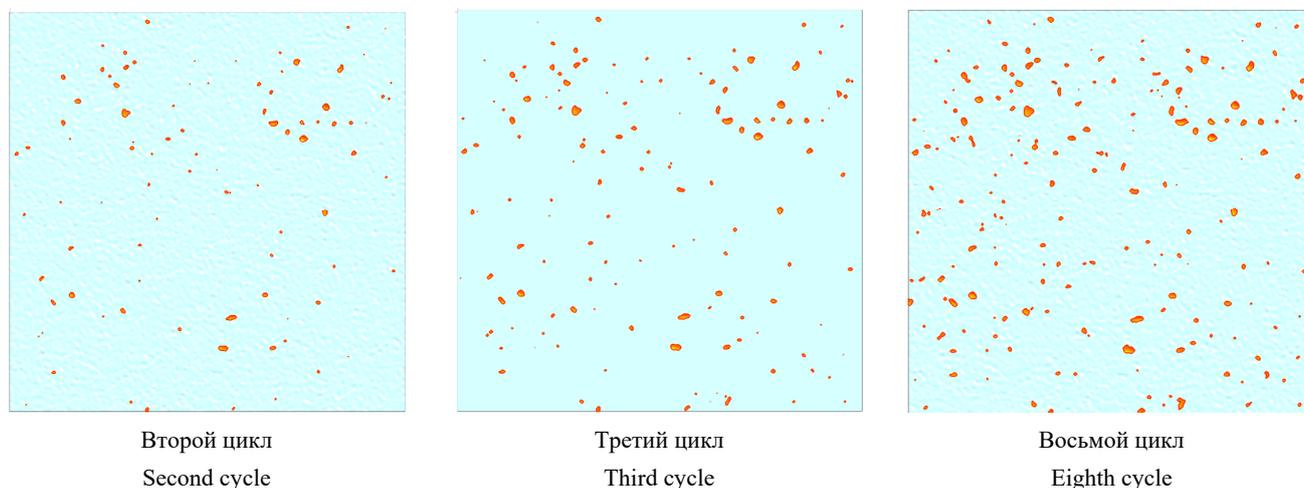


Рис. 7. Расположение площадей фактического контакта на поверхности с шероховатостью $Ra = 0,82 \mu\text{m}$ при 2-м, 3-м и 8-м цикле нагружения при сжимающей нагрузке 7 МПа

Fig. 7. Location of actual contact areas on the surface with roughness $Ra = 0.82 \mu\text{m}$ at the 2nd, 3rd and 8th cycles of loading at a contact pressure of 7 MPa

параметров рельефа поверхности показывают, что деформация микровыступов прекращается в среднем на пятом цикле нагружения, и относительные перемещения модельного образца сводятся к нулю. Можно также утверждать, что поскольку задача контактного взаимо-

действия двух поверхностей решалась с помощью конечно-элементного анализа, в котором решается матричное уравнение жёсткости элемента, то разработанная методика может быть распространена на широкий круг контактирующих материалов.

Библиографический список

1. Mathematical modeling of heat transfer processes in a wall with a regular pseudo-pore structure / P. Starikov, A.V. Ionov, S. Seliverstov, I.N. Borovik, A.A. Matushkin // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 549. – P. 155–168.
2. Tengfei C., Qiang L., Yimin X. Characterization and application of engineered regular rough surfaces in thermal contact resistance // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 71, № 1. – P. 400–409.
3. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 228 с.
4. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
5. Thermal Analysis of a Composite Centrifugal Compressor Impeller / L.V. Bykov, A.D. Ezhov, L.A. Martynyuk, D.B. Afanas'ev, M.A. Mezentsev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol. 95, № 3. – P. 625–635.
6. Доработка и оптимизация элементов конструкции с учетом тепловых деформаций / А.Д. Ежов, Л.В. Быков, С.Ю. Меснянкин, Е.А. Богачев, А.С. Разина // Тепловые процессы в технике. – 2015. – № 11. – С. 510–516.

7. Тарасов В.В., Сивцев Н.С. Численное моделирование контакта шероховатых поверхностей // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2007. – № 1. – С. 160–165.
8. Majumdar A., Bhushan B. Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces // ASME J. of Tribology. – 1990. – Vol. 112. – P. 205–216.
9. Yan W., Komvopoulos K. Contact analysis of elastic-plastic surfaces // J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 84, № 7. – P. 3617–3624.
10. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 20 с.
11. Izmailov V.V. Correlation between surface topography and profile statistical parameters. // Wear. – 1980. – Vol. 59. – P. 409–420.
12. Мемнонов В.П., Морозов А.О. Экспериментальная оценка статистических характеристик шероховатой поверхности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2009. – № 2.
13. Демкин Н.Б. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 1. – С. 7–15.
14. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
15. Bhushan B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact // Tribology Letters. – 1998. – Vol. 4. – P. 1–35.
16. Болотов А.Н., Сулягин О.В., Рачишкин А.А. Компьютерное моделирование топографии шероховатых поверхностей // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2014. – № 7. – С. 29–41.
17. Грязев В.М. Моделирование реальной поверхности детали // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 192–200.
18. Войнов К.Н., Ходаковский В.А., Шварц М.А. Математическое моделирование шероховатых поверхностей // Трение, износ, смазка. – 2009. – № 41. – С. 1–9.
19. Mesnyankin S.Yu., Vikulov A.G., Vikulov D.G. Solid-solid thermal contact problems: current understanding // Physics-Uspeski. – 2009. – Vol. 52, № 9. – P. 891–914.
20. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. Proc. Roy. Soc., ser. A. – 1966. – Vol. 295, № 1442. – P. 300–319.
21. Витенберг Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. – Л.: Судостроение, 1971. – 108 с.
22. Найак П.Р. Применение модели случайного поля для исследования шероховатости поверхности // Труды американского общества инженеров-механиков. – 1971. – № 3. – С. 305–333.
23. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 6. – С. 1010–1020.
24. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей, теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1971. – 340 с.
25. Рачишкин А.А., Болотов А.Н., Сулягин О.В. Компьютерное моделирование физических взаимодействий технических поверхностей на микроуровне // Software & Systems. – 2019. – Т. 32, № 1. – С. 109–114.
26. Ezhov A.D., Bykov L.V., Mesnyankin S, Yu. Numerical Method for Determining the Real Contact Area of Contacting Bodies // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12, № 5. – P. 914–917.
27. Bykov L.V., Ezhov A.D. Three-dimensional of modeling microgeometry of contact pairs in technical systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709. – № 1. – 5 p.
28. Меснянкин С.Ю., Ежов А.Д., Басов А.А. Определение контактного термического сопротивления на базе трехмерного моделирования соприкасающихся поверхностей // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – № 5. – С. 65–74.
29. Murashov M.V., Panin S.D., Numerical modelling of contact heat transfer problem with work hardened rough surfaces // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Vol. 90. – P. 72–80.
30. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Минаев В.А. Количественная оценка адсорбционного слоя комбинированного диэтилдитиокарбамата на халькопирите и арсенопирите методом измерения параметров рельефа поверхности // Цветные металлы. – 2018. – № 7. – С. 27–32.
31. Fractal characterization and mechanical behavior of pile-soil interface subjected to sulfuric acid / Jie Xiao, Wenjun Qu, Haibo Jiang, Li Long, Juan Huang, Lin Chen // Fractals. – 2021. – Vol. 29, № 2. – 16 p.

References

1. Starikov, P., Ionov, A., Seliverstov, S., Borovik, I., Matushkin, A. Mathematical Modeling of Heat Transfer Processes in a Wall with a Regular Pseudo-pore Structure, 2019, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 549, pp. 155-168, doi: 10.1007/978-981-13-6061-9_10
2. Tengfei C., Qiang L., Yimin X. Characterization and application of engineered regular rough surfaces in thermal contact resistance, 2014, *Applied Thermal Engineering*, 71 (1), pp. 400-409, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.020
3. Demkin N.B. Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostei [Contacting rough surfaces]. *Moscow, Nauka*, 1970, 228 p.
4. Demkin N.B., Ryzhov E.V. Kachestvo poverkhnosti i kontakt detalei mashin [Surface quality and contact of machine parts]. *Moscow, Mashinostroenie*, 1981, 224 p.
5. Bykov L.V., Ezhov A D., Martynyuk L A., Afanas'ev D.B., Mezentsev M.A. Thermal Analysis of a Composite Centrifugal Compressor Impeller, 2022, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 95 (3), pp. 625-635 DOI: 10.1007/s10891-022-02518-7
6. Ezhov A.D., Bykov L.V., Mesnyankin S.Iu., Bogachev E.A., Razina A.S. Dorabotka i optimizatsiia elementov konstruktssii s uchetom teplovykh deformatsii [Refinement and optimization of structural elements, taking into account thermal deformations]. *Teplovye protsessy v tekhnike - Thermal Processes in Engineering*, 2015, no. 11, pp. 510-516.
7. Tarasov V.V., Sivtsev N.S. Chislennoe modelirovanie kontakta sherokhovatykh poverkhnostei [Numerical simulation of the contact of rough surfaces]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova - ISTU Bulletin*, 2007, no. 1, pp. 160-165.
8. Majumdar A., Bhushan B. Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces, 1990, *ASME J. of Tribology*, 112, pp. 205-216. DOI: 10.1115/1.2920243
9. Yan W., Komvopoulos K. Contact analysis of elastic-plastic surfaces, 1998, *J. Appl. Phys.*, 84 (7), pp. 3617- 3624. DOI: 10.1063/1.368536
10. GOST 25142-82. Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniia [Surface roughness. Terms and Definitions]. *Moscow, Izdatel'stvo standartov*, 1982, 20 p.

11. Izmailov, V.V. Correlation between surface topography and profile statistical parameters, 1980, *Wear*, 59, pp. 409-420. DOI: 10.1016/0043-1648(80)90200-8
12. Memnonov V.P., Morozov A.O. Eksperimental'naia otsenka statisticheskikh kharakteristik sherokhovatoi poverkhnosti [Experimental evaluation of the statistical characteristics of a rough surface]. *Vestnik SPbGY. Matematika. Mekhanika. Astronomiia. - Bulletin of SPbSU. Maths. Mechanics. Astronomy*, 2009, no. 2 (<https://math-mech-astr-journal.spbu.ru/>)
13. Demkin, N.B. Zavisimost' ekspluatatsionnykh svoystv friktsionnogo kontakta ot mikrogeometrii kontaktiruiushchikh poverkhnostei [Dependence of operational properties of friction contact on microgeometry of contacting surfaces]. *Trenie i iznos - Friction & Wear*, 2010, no. 31 (1), pp. 7-15.
14. Goriacheva I.G. Mekhanika friktsionnogo vzaimodeistviia [Mechanics of frictional interaction]. *Moscow, Nauka*, 2001, 478 p.
15. Bhushan B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact, 1998, *Tribology Letters*, vol. 4, pp. 1-35., DOI: 10.1023/A: 1019186601445
16. Bolotov A.N., Sutiagin O.V., Rachishkin A.A. Komp'uternoe modelirovanie topografii sherokhovatykh poverkhnostei. [Computer modeling of the topography of rough surfaces]. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalei tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniia - Mechanics and physics of processes on the surface and in contact with solids, parts of technological and power equipment*, 2014, no. 7, pp. 29-41.
17. Griazev V.M. Modelirovanie real'noi poverkhnosti detail [Modeling the real surface of the part] *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskoe nauki – TulGU Bulletin. Technical science*, 2013, no. 1, pp. 192-200
18. Voinov K.N., Khodakovskii V.A., Shvarts M.A. Matematicheskoe modelirovanie sherokhovatykh poverkhnostei [Mathematical modeling of rough surfaces] *Trenie, iznos, smazka - Friction, wear, lubrication*, 2009, no. 41, pp. 1-9
19. Mesnyankin S.Yu., Vikulov A.G., Vikulov D.G. Solid-solid thermal contact problems: current understanding, 2009, *Physics-Uspeski*, vol. 52, no. 9, pp. 891–914
20. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces, 1966, *Proc. Roy. Soc., ser. A.*, vol. 295, no. 1442, pp. 300–319.
21. Vitenberg Iu. R. Sherokhovatost' poverkhnosti i metody ee otsenki [Surface roughness and methods for its evaluation]. *Petersburg, Sudostroenie*, 1971, 108 p.
22. Naiak P.R. Primenenie modeli sluchainogo polia dlia issledovaniia sherokhovatosti poverkhnosti [Application of a random field model to study surface roughness] *Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov - Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers*, 1971, no. 3. pp. 305-333.
23. Semeniuk N.F. Sirenko G.A. Opisanie topografii anizotropnykh sherokhovatykh poverkhnostei treniia s pomoshch'iu modeli sluchainogo polia [Description of the topography of anisotropic rough friction surfaces using a random field model] *Trenie i iznos - Friction & Wear*, 1980, vol. 1, no. 6, pp. 1010–1020.
24. Khusu A.P., Vitenberg Iu.R., Pal'mov V.A. Sherokhovatost' poverkhnostei, teoretiko-veroiatnostnyi podkhod [Surface roughness, probabilistic approach]. *Moscow, Nauka*, 1971, 340 p.
25. Rachishkin A.A., Bolotov A.N., Sutiagin O.V. Komp'uternoe modelirovanie fizicheskikh vzaimodeistvii tekhnicheskikh poverkhnostei na mikrourovne [Computer modeling of physical interactions of technical surfaces at the microlevel] *Software & Systems*, 2019, vol. 32, no. 1, pp. 109–114
26. Ezhov A.D., Bykov L.V., Mesnyankin S, Yu. Numerical Method for Determining the Real Contact Area of Contacting Bodies, 2018, *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. 12, no. 5, pp. 914–917, DOI: 10.1134/S1027451018050130
27. Bykov L.V., Ezhov A.D. Three-dimensional of modeling microgeometry of contact pairs in technical systems, 2020, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 709, no. 1, 5 p., DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022057
28. Mesnyankin S.Iu., Ezhov A.D., Basov A.A. Opredelenie kontaktnogo termicheskogo soprotivleniia na baze trekhmernogo modelirovaniia soprikasaiushchikhsia poverkhnostei [Determination of contact thermal resistance based on three-dimensional modeling of contact surfaces] *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*, 2014, no. 5, pp. 65-74.
29. Murashov M.V., Panin S.D., Numerical modelling of contact heat transfer problem with work hardened rough surfaces, 2015, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 90, pp. 72-80, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.024
30. Matveeva T.N., Gromova N.K., Minaev V.A. Kolichestvennaia otsenka adsorbtsionnogo sloia kombinirovannogo dietilditiokarbamata na khal'kopirite i arsenopirite metodom izmereniia parametrov rel'efa poverkhnosti [Quantitative evaluation of the adsorption layer of the combined diethyldithiocarbamate on chalcopyrite and arsenopyrite by measuring the surface relief parameters] *Tsvetnye metally*, 2018, no. 7, pp. 27–32.
31. Xiao, Jie & Qu, Wenjun & Jiang, Haibo & Long, Li & Huang, Juan & Chen, Lin. Fractal characterization and mechanical behavior of pile-soil interface subjected to sulfuric acid, 2021, *Fractals*, vol. 29, no. 2, 16 P. DOI: 10.1142/S0218348X21400107

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2020-0014.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSFF-2020-0014).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.