

УДК 539.25

Оригинальная статья

Проблемы количественной оценки площади контакта пар трения

В.О. Белавин, Ю.В. Брылкин, С.В. Залетаев, А.Л. Кусов, В.В. Павликов, А.А. Потапов,
В.А. Царькова

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

141070, Россия, Московская обл., Королёв, ул. Пионерская, 4

kusoval@tsniimash.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.327

Аннотация: Приводятся результаты исследования поверхности стальных дисков до и после трения. Рассматриваются проблемы оценки площади контакта пар трения и приводятся результаты поиска универсального критерия количественной оценки поверхности изучаемых пар трения. С использованием оптической и сканирующей туннельной микроскопии проводится изучение рельефа поверхности на микро- и наноуровне. В работе предложен подход к определению площади контакта между телами на основе теории фракталов. Такой подход позволяет описывать теплопередачу между телами (кондуктивный теплообмен на контакте и лучистый в порах) определить зависимость силы трения от приложенной внешней силы. Предлагаемая методика количественной оценки структуры поверхности на микро- и наноуровне с помощью теории фракталов позволит повысить точность расчёта тепловых режимов космических аппаратов, а также параметров узлов трения в них, что, в свою очередь положительно скажется на надёжности и долговечности разрабатываемых космических аппаратов. Дальнейшим продолжением работы станет совершенствование методов и средств изучения трибологических свойств робототехнических изделий, работающих в условиях факторов космического пространства, а также валидация численного моделирования трения и теплообмена между подвижными узлами по результатам экспериментов.

Ключевые слова: трибология, тепловые режимы, робототехника, поверхность стали, микроскопия, фрактальный анализ, пара трения.

1. Введение

Одним из перспективных направлений РКТ является космическая робототехника. Условия космического пространства кардинально отличаются от наземных, из-за чего возникает множество проблем с функционированием робототехнических изделий в космосе. В первую очередь это триботехнические характеристики подвижных узлов и тепловые режимы космических аппаратов. Для разработки и прогнозирования поведения робототехнических изделий недостаточно проведение только экспериментальной отработки, необходимо также создание экспериментально валидированных математических моделей, которые должны применяться при тепловом проектировании и выборе средств обеспечения тепловых режимов робототехнических изделий. Данные математические модели позволят анализировать процесс теплообмена в узлах трения робототехнических систем с учетом воздействия факторов космического пространства (ФКП), таких как внешняя лучистая нагрузка, «черный холодный» космос, напланетные условия и др.

2. Постановка задачи

Процессы теплообмена и трения в подвижных узлах связывает общее физическое явление – наличие контакта между двумя движущимися относительно друг друга поверхностями и зависимость физических процессов от площади контакта. Реальные поверхности имеют развитую шероховатую структуру с выступами и впадинами, поэтому контакт получается не идеальным. В общем случае область контакта деталей не является плоской поверхностью, тем не менее, в работе изучается сечение контакта плоской поверхностью. Отсутствие контакта означает наличие дыр на такой плоскости. При изучении теплообмена обычно ставится условие идеального контакта без наличия дыр. При описании трения определяется коэффициент трения между материалами, зависящий от степени их обработки (гладкости). Но фактически имеет место зависимость площади поверхности контакта от геометрии (см. рис. 1) [3].

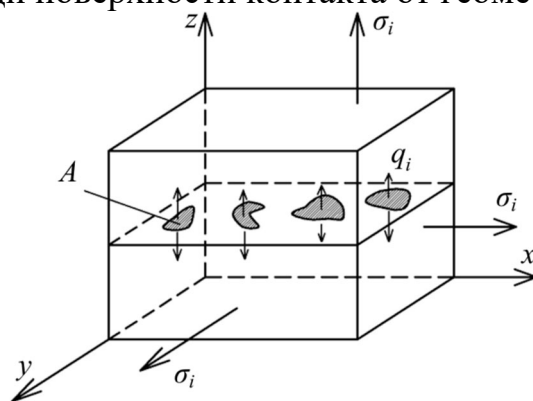


Рис. 1. Схема общей постановки задачи теплопроводности при трении (q_i – источник теплоты, σ_i – коэффициент внешней теплоотдачи, A_c – контурная площадь).

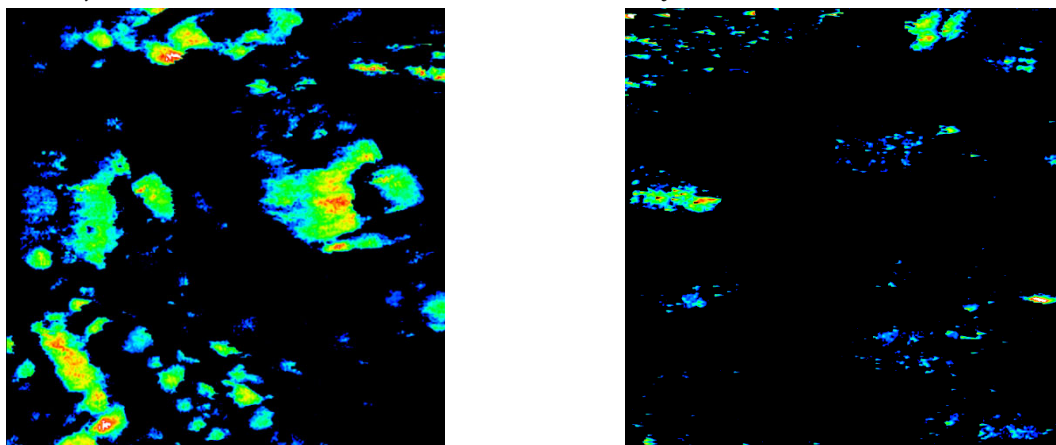


Рис. 2. Схематическое изображение зоны контакта двух материалов в виде фрактальных поверхностей.

Традиционно, для оценки параметров шероховатости поверхности используют ГОСТ 2789-73 [1]. Критерия же оценки для площади контакта фактически не существует.

Для оценки геометрии на микро- и наноуровне и, в том числе, площадей пятен контакта подходит теория фракталов. Так на рис. 2 показаны примеры контакта плоскости с поверхностями разной фрактальной размерности D . Изображение контакта получится при перемещении плоскости $z = \text{const}$ по нормали к поверхности.

У каждой из двух соприкасающихся поверхностей изначально могут быть разные фрактальные размерности. При их контакте получится область со своей фрактальной размерностью, отличающейся от фрактальных размерностей поверхностей. Площадь поверхности S в теории фракталов определяется:

$$S/S_0 = (a/a_0)^{D_s}, \quad (1)$$

где S_0 – площадь плоской поверхности, a_0 – размер, при котором поверхность можно считать плоской, a – текущий масштаб измерения расстояний. Так как поверхность вложена в трёхмерное пространство, фрактальная размерность $D_s > 2$.

Можно ввести фрактальную размерность длины границы зоны контакта между материалами:

$$L/L_0 = (a/a'_0)^{D_L}, \quad (2)$$

где L – длина контура, ограничивающего контакт, a'_0 – характерный размер пятна контакта, L_0 – длина контура при $a = a'_0$, фрактальная размерность $D_L > 1$.

Для зависимости площади контакта или площади кластеров контакта можно ввести формулу

$$S/S'_0 = (a/a''_0)^{D_c}, \quad (3)$$

где a – текущий масштаб измерения расстояний, S'_0 – площадь идеального контакта без учёта дыр, a''_0 – в данной ситуации масштабный множитель, который порядка размера всей площади контакта. Если контакт идеальный, т.е. отсутствуют полости, то $D_c = 2$ (площадь пропорциональна квадрату длины), для реальных контактов $D_c < 2$, т.е. площадь контакта может расти с увеличением размера изделия медленнее второй степени размера. Формально площадь контакта стремится к нулю при увеличении a . Уменьшение размера a ограничено, во всяком случае, атомными размерами.

В настоящее время проведено множество исследований по применению теории фракталов к задачам теплообмена и трения [4-6]. Исследование поверхностей трения отработавших пар показывает, что пары трения имеют неоднородную морфологию поверхности.

Шероховатость поверхностей контактирующих элементов

конструкции оказывает влияние на величину теплопередачи между ними. В точках контакта поверхностей происходит кондуктивный теплообмен, коэффициент кондуктивного теплообмена пропорционален площади контакта. В зазорах, образованных неровностями поверхностей, могут происходить конвективный и лучистый теплообмен, вопрос вклада которых в тепловой баланс требует дополнительного изучения. В данной работе вопросы лучистого теплообмена не рассматриваются. В принципе, наличие лучистого теплообмена снижает эффект уменьшения теплопередачи за счёт уменьшения площади контакта. Если для узлов конструкций автоматических и пилотируемых космических аппаратов, функционирующих в диапазонах температур от минус 40 до плюс 50°C, лучистым теплопереносом в зазорах можно пренебречь, то для теплонапряженных элементов конструкций космических энергетических установок с тепловыделениями от нескольких до десятков мегаватт, лучистый теплообмен вносит существенный вклад, поэтому при высоких тепловых нагрузках вопрос о площади контакта не столь актуален.

Целью данной работы является поиск универсального критерия количественной оценки площади контакта поверхностей для его последующего применения при создании математических моделей, который бы точно охарактеризовал развитость поверхности контакта на микро- и наноуровне и был бы достаточно прост для расчёта в наиболее интересном диапазоне высоты выступов (размера пор).

3. Результаты

Для исследования влияния регулярного микрорельефа на коэффициент трения и износостойкость проводились фрикционные испытания на установке АВТО-20М (см. рис. 3). Основные параметры стенда: давление – до 10^{-4} Па; температура – $\pm 100^\circ\text{C}$; частота вращения образцов – до 1000 об/мин; осевая нагрузка – до 300 Н.

В качестве образцов была выбрана пара трения диск (12X18H10T) – диск (12X18H10T), за счёт самых жестких условий эксперимента (при механической нагрузке происходит перемешивание поверхностных слоёв и «закусывание») с одной стороны, и отсутствие окислов на поверхности с другой стороны, что позволяет наиболее корректно оценить испытываемую пару трения.

Наиболее распространённый эксперимент – запись момента трения, возникающего при вращении подвижного образца относительно неподвижного с помощью тензодатчиков и точных регистрирующих приборов. В свою очередь, в данном эксперименте было сделано отступление и принято, что испытание проходило на стационарном режиме при атмосферном давлении, усилии 100 Н в течение 10 минут.

С помощью оптического микроскопа ММУ-3 были получены фотографии поверхности стали 12Х18Н10Т до эксперимента и после (см. рис. 4). Результаты анализа шероховатости стали 12Х18Н10Т по ГОСТ 2789-73 [1] сведены в Таблице 1.

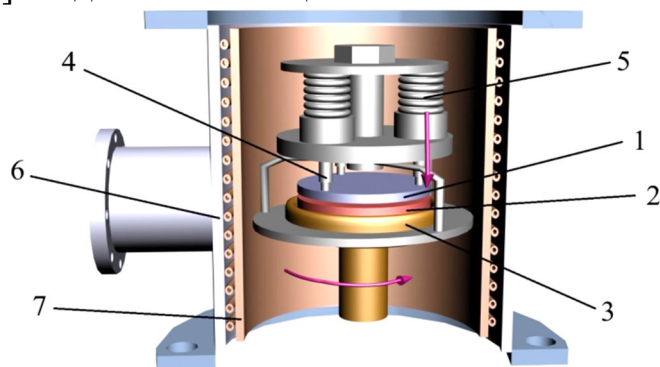


Рис. 3. Принципиальная схема приспособления для испытания на трение и износ по торцевой схеме на установке АВТО-20М: 1 – неподвижный образец, 2 – подвижный контробразец, 3 – подвижная державка образца, 4 – инденторы, 5 – нагрузочная пружина, 6 – сверхвысоковакуумная камера, 7 – азотный криоэкран.

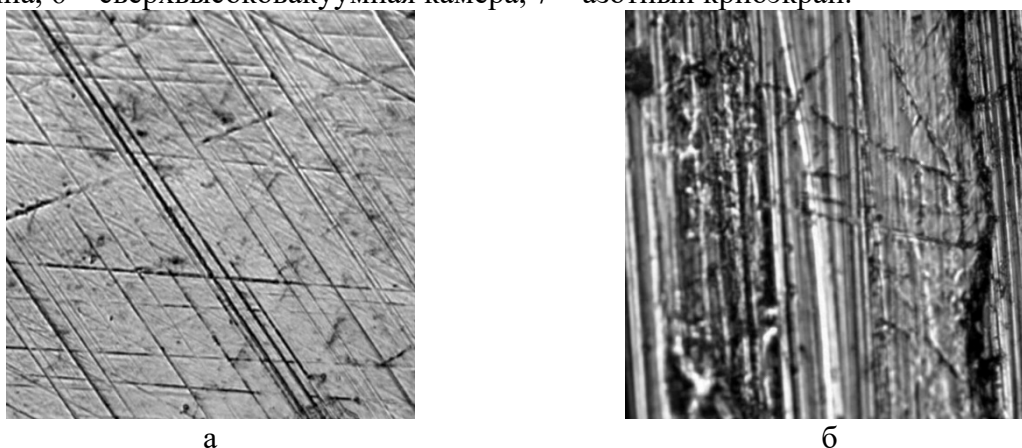


Рис. 4. Снимки поверхности стали 12Х18Н10Т до эксперимента (а) и после (б), полученные с помощью оптического микроскопа ММУ-3 (поле съёмки 180×180 мкм).

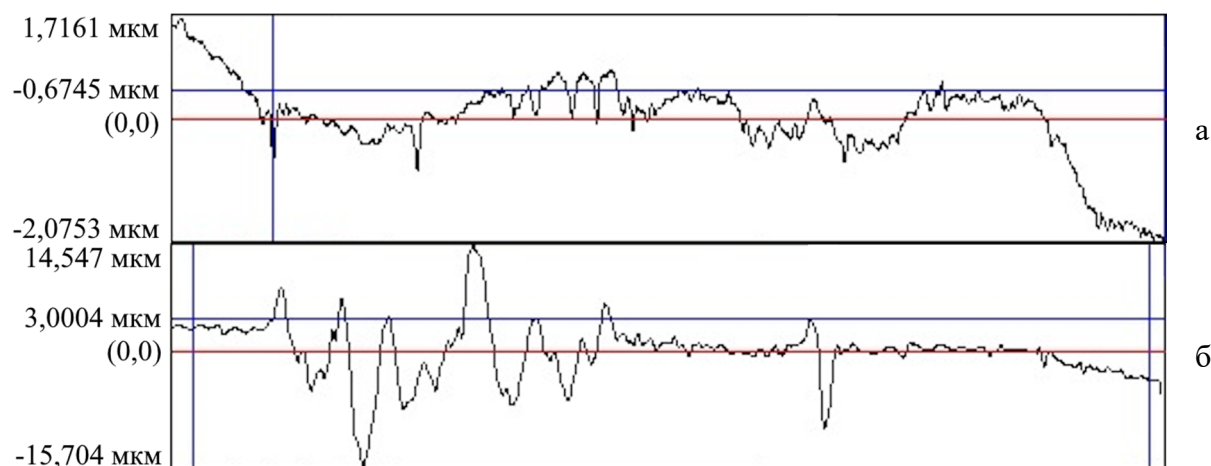


Рис. 5. Профилограммы поверхности стали 12Х18Н10Т : а – до эксперимента, б – после эксперимента. Длина трассы – 4,679 мм.

Таблица 1. Измеренные значения шероховатости стали 12Х18Н10Т.

Параметры шероховатости	до эксперимента	после эксперимента
Класс шероховатости по ГОСТ 2789	10б	5б
R_a (среднеарифметическое отклонение), мкм	$0,145 \pm 27\%$	$4,2 \pm 33\%$
$R_{\max}$ (наибольшая высота неровностей), мкм	$0,94 \pm 23\%$	$33 \pm 31\%$
R_z (высота неровностей), мкм	$0,41 \pm 34\%$	$15,1 \pm 28\%$
S_m (средний шаг неровности), мкм	$26 \pm 15\%$	$239 \pm 20\%$
S (ср. шаг местных выступов), мкм	$13,34 \pm 2,5\%$	$41,3 \pm 8,7\%$
R_q (среднеквадратичное отклонение), мкм	$0,188 \pm 25\%$	$6,1 \pm 37\%$
R_{pk} (высота выступов поверхности), мкм	$1,6 \pm 90\%$	7,6
R_{vk} (глубина впадин поверхности), мкм	$3,9 \pm 78\%$	6,81
t_{p1} (верх опорной поверхности), %	$10,4 \pm 16\%$	14,5
R_k (толщина опорной поверхности), мкм	$0,41 \pm 26\%$	22,8
t_{p2} (низ опорной поверхности), %	$88,5 \pm 1,7\%$	87,4
R_v (глубина максимальной впадины), мкм	$0,42 \pm 31\%$	$19,3 \pm 46\%$
R_p (высота максимального. выступа), мкм	$0,52 \pm 20\%$	$13,7 \pm 15\%$
Δa (среднеарифметический наклон профиля), град	$1,96 \pm 21\%$	$4,22 \pm 17\%$

На снимках оптического микроскопа в микрометровом диапазоне наглядно видно отличие структуры поверхности стали до эксперимента и после. Фотографии сделаны в одном масштабе, на снимке после эксперимента видны более глубокие борозды, высота шероховатости увеличилась, борозд стало больше. Недостатком оптического микроскопа ММУ-3 является трудоёмкость и погрешность восстановления трёхмерной структуры из чёрно-белых микрофотографий с помощью геометрического моделирования. Поэтому для количественной оценки развитости структуры также были получены профилограммы поверхности (см. рис. 5) с помощью измерительного комплекса ПКМ-3.

Для получения детального представления о развитости структуры в микро- и нанометровом диапазоне были получены данные с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Результаты объёмной компьютерной визуализации данных СТМ представлены на рис. 6 и 7.

Для обобщения полученных количественных данных на микро- и наноуровне применим теорию фракталов. Величина фрактальной размерности D тесно связана с геометрией рельефа, как показано в работах [8]. Фрактальная (Хаусдорфа-Безиковича) размерность D , в отличие от топологической (целой) размерности D_k , в общем случае является дробной, т.е. $D > D_k$.

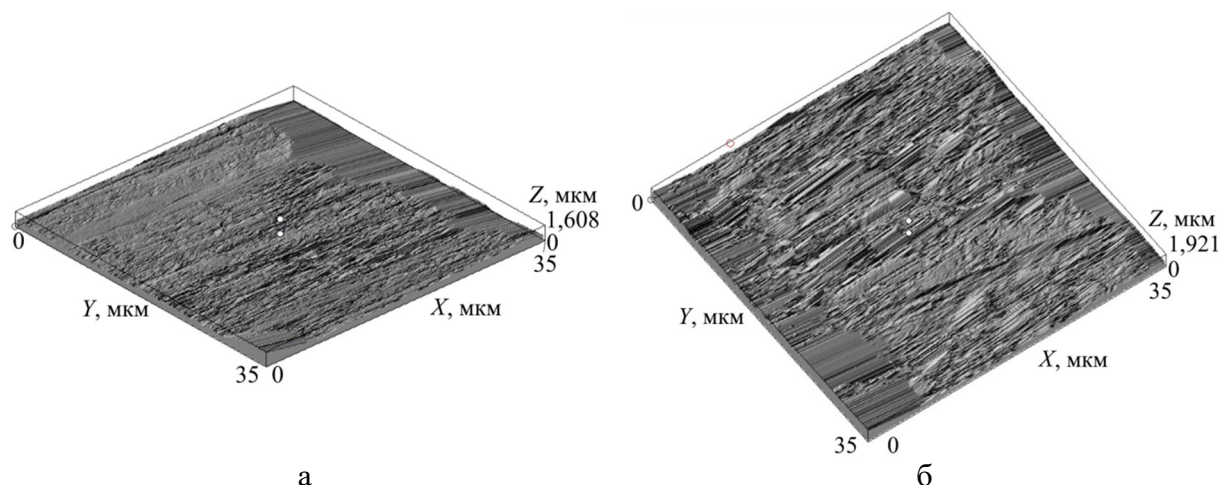


Рис. 6. 3D визуализация снимков поверхности стали 12X18H10T до эксперимента (а) и после (б), полученные с помощью измерительного комплекса ПКМ-3 (поле сканирования 35×35 мкм).

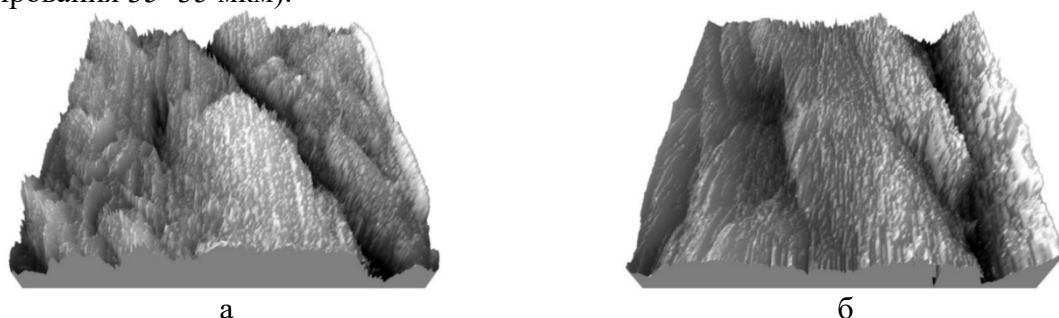


Рис. 7. 3D визуализация снимков поверхности стали 12X18H10T до эксперимента (а) и после (б), полученные с помощью сканирующего туннельного микроскопа УМКА-02-Е (поле сканирования 980,1×980,1 нм).

Вычисление фрактальной размерности проводилось с использованием метода сетки, т.е. построением эталонных квадратов, покрывающих кривую профилограммы, или кубов, охватывающих изучаемый отсек поверхности, что описано в многочисленных работах [2, 9, 10], посвященных реализации процедуры Е. Федерера [11], т.е. подсчетом количества квадратов, покрывающих профилограмму. В результате получаем размерность профилей, показанных на рис. 3, равными $D_C = 1,54$ и $D_C = 1,61$. Хотя строгого доказательства соотношения фрактальной размерности профиля D_C и фрактальной размерности поверхности D нет, принято считать, что $D = D_C + 1$ [12-14]. Поэтому, применительно ко всей поверхности в микрометровом диапазоне, принимаем фрактальные размерности, равные 2,54 и 2,61, соответственно, для стали 12X18H10T до эксперимента и после. Результаты расчёта размерностей отсеков поверхности в нанометровом диапазоне дают $D_1 = 2,56 \pm 12\%$ и $D_2 = 2,62 \pm 12\%$, соответственно, для стали 12X18H10T до эксперимента и после. Значение $D_s = 2,5$ в формуле (2) соответствует случайной

броуновской поверхности. Считается, что такая поверхность является максимально развитой для поверхностей без внутренних пор. Поэтому можно сделать вывод о том, что после трения поверхность становится максимально развитой. Развитость поверхности до воздействия трения на наноуровне объясняется отсутствием полировки до экспериментов, в связи с чем, для узлов трения предлагается модель с фрактальной размерностью $D_s = 2,5$. Относительно размерности D_c кластеров контакта, нужны дополнительные исследования как в отношении методического подхода, так и в отношении определения погрешностей. Ясно, что для численных исследований можно использовать броуновские поверхности.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для оценки площади контакта между поверхностями при трении и теплопередаче удобно использовать фрактальную теорию.

2. Показано, что поверхность обычной стали, подвергавшейся механическому воздействию на наноуровне близка к броуновской поверхности с фрактальной размерностью $D_s = 2,5$.

4. Заключение

Фрактальная размерность как мера развитости поверхностной структуры может служить количественной характеристикой поверхности при изучении эксплуатационных пар трения и теплопередаче на контакте различных материалов. В дальнейшем, предполагается:

- разработка математической модели с учётом уноса массы (наиболее критичного параметра при трении материалов);
- исследование зависимости площади контакта между поверхностями от фрактальной (кластерной) размерности;
- создание модуля расчёта площади контакта пар трения.

Результаты численного моделирования трения и теплообмена между подвижными узлами, планируется валидировать по результатам экспериментов для оценки погрешности.

Библиографический список:

1. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: ГОСТ 2789-73; введ. 01.01.1975. – М.: Государственный комитет стандартов Совета Министров, 1973. – 14 с.
2. **Иванов, Г.С.** Фрактальная геометрическая модель микроповерхности / Г.С. Иванов, Ю.В. Брылкин // Геометрия и графика. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 4-11. DOI: 10.12737/18053.
3. **Чичинадзе, А.В.** Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
4. **Jourani, A.** Effect of 3D fractal dimension on contact area and asperity interactions in elastoplastic contact / A. Jourani // AIP Advances. – 2016. – V. 6. – I. 5. – P. 055309-1-055309-10. DOI: 10.1063/1.4949564.
5. **Pan, W.** Influence of surface topography on three-dimensional fractal model of sliding friction / W. Pan, X. Li, L. Wang, J. Mu, Z. Yang // AIP Advances. – 2017. – V. 7. – I. 9. – P. 095321-1-095321-12 DOI: 10.1063/1.4999036.
6. **Frank, M.** Heat transfer across a fractal surface / M. Frank, M. Papanikolaou, D. Drikakis, K. Salonitis // The Journal of Chemical Physics. – 2019. – V. 151. – I. 13. – P. 134705-1-134705-10. DOI: 10.1063/1.5115585.

7. Материалы металлические и неметаллические. Метод определения коэффициента трения и износа в вакууме. ОСТ 92-1296-82. – Королёв: Изд-во ЦНИИмаш, 1982. – 41 с.
8. **Mandelbrot, B.B.** The fractal geometry of nature / B.B. Mandelbrot. – 3rd ed. – New York: Henry Holt and Company, 1983. – 468 p.
9. **Брылкин, Ю.В.** Моделирование структуры рельефа реальных поверхностей на основе фракталов в аэродинамике разреженных газов / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – № 3(76). С. 22-28.
10. **Брылкин, Ю.В.** Исследование микро- и наноструктуры поверхности медного сплава с использованием теории фракталов / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов // Космонавтика и ракетостроение. – 2016. – № 5(90). – С. 89-95.
11. **Feder, J.** Fractals / J. Feder // In series: Physics of Solids and Liquids. – New York: Springer, 1988. – XXVI + 284 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2124-6.
12. **Торхов, Н.А.** Фрактальная геометрия поверхностного потенциала электрохимически осажденных пленок платины и палладия / Н.А. Торхов, В.А. Новиков // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – Вып. 8. – С. 1109-1116.
13. **Сдобняков, Н.Ю.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.В. Иванов. – Тверь: ТвГУ, 2019. – 168 с.
14. **Иванов, Д.В.** Получение наноразмерных пленок платины, обладающих фрактальными свойствами / Д.В. Иванов, А.С. Антонов, Е.М. Семенова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 73-88. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.073.

References:

1. GOST 2789-73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, USSR National Committee on Standards at the Cabinet of Ministers, 1973, 14 p. (In Russian).
2. Ivanov G.S., Brylkin Yu.V. Fraktal'naya geometricheskaya model' mikropoverkhnosti [Fractal geometric model of microsurface], *Geometriya i grafika* [Geometry & Graphics], 2016, vol. 4, no. 1, pp. 4-11. DOI: 10.12737/18053. (In Russian).
3. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. et al. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)* [Basics of tribology (friction, wear, lubrication)], ed. by. A.V. Chichinadze. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001, 664 p. (In Russian).
4. Jourani A. Effect of 3D fractal dimension on contact area and asperity interactions in elastoplastic contact, *AIP Advances*, 2016, vol. 6, issue 5, pp. 055309-1-055309-10. DOI: 10.1063/1.4949564.
5. Pan W., Li X., Wang L., Mu J., Yang Z. Influence of surface topography on three-dimensional fractal model of sliding friction, *AIP Advances*, 2017, vol. 7, issue 9, pp. 095321-1-095321-12 DOI: 10.1063/1.4999036.
6. Frank M., Papanikolaou M., Drikakis D., Salonitis K. Heat transfer across a fractal surface, *The Journal of Chemical Physics*, 2019, vol. 151, issue 13, pp. 134705-1-134705-10. DOI: 10.1063/1.5115585.
7. OST 92-1296-82. Материалы металлические и нематаллические. Метод определения коэффициента трения и износа в вакууме [Metallic and non-metallic materials. Vacuum friction ratio and wear assessment method]. Korolev, TSNIIMASH Publ., 1982, 41 p. (In Russian).
8. Mandelbrot B.B. *The fractal geometry of nature*, 3rd ed. New York, Henry Holt and Company, 1983, 468 p.
9. Brylkin Yu.V., Kusov A.L. Modelirovanie struktury rel'efa real'nykh poverkhnostey na osnove fraktalov v aerodinamike razrezhenykh gazov [Modeling of the real relief surfaces structure, based on fractals in the aerodynamics of rarefied gases], *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2014, no. 3 (76), pp. 22-28. (In Russian).
10. Brylkin Yu.V., Kusov A.L. Issledovanie mikro- i nanostrukturny poverkhnosti mednogo splava s ispol'zovaniem teorii fraktalov [Analysis of microand nanostructure of copper alloy surface by using the fractal theory], *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2016, no. 5 (90), pp. 89-95. (In Russian).
11. Feder J. *Fractals*, Physics of Solids and Liquids. New York, Springer, 1988, XXVI + 284 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2124-6.
12. Torkhov N.A., Novikov V.A. Fractal geometry of the surface potential in electrochemically deposited platinum and palladium films, *Semiconductors*, 2009, vol. 43, issue 8, pp. 1071-1077. DOI: 10.1134/S106378260908020X.
13. Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S., Ivanov D.V. *Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyy analiz metallicheskih plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya* [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric substrates: monography], Tver, Tver State University Publ., 2019, 168 p. (In Russian).

14. Ivanov D.V., Antonov A.S., Semenova E.M. et al. Poluchenie nanorazmernykh plenok platiny, obladayushchikh fraktal'nymi svoystvami [Obtaining nanosized platinum films with fractal properties], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2020, issue 12, pp. 73-88. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.073. (In Russian).

Original paper

Problems of quantitative assessment of the friction couple contact area

V.O. Belavin, Yu.V. Brylkin, S.V. Zaletaev, A.L. Kusov, V.V. Pavlikov, A.A. Potapov,
V.A. Tsarkova

Central Institute of Machine Building, Korolev, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.327

Abstract: The results of our research of the surface of steel disks before and after friction are presented. Problems of the friction couple contact area estimation were under consideration. The results of searching a universal criterion of the friction couple contact area quantitative estimation are discussed. Using optical and scanning tunneling microscopy allows studying the surface profile at the micro- and nanoscales. An approach for determination of the contact area between bodies is proposed on the basis of the fractals theory. Such an approach allows to describe the heat transfer between bodies (conductive at contacts and radiant in pores heat exchange), to define the dependence of the friction force on the applied external force. The offered technique for the quantitative estimation of the surface structure at the micro- and nanoscales by means of the fractal theory will allow improving the accuracy of the spacecrafts thermal modes calculation as well as parameters of the knots of friction in them. This, in turn, will positively affect reliability and durability of the future spacecrafts. Improvement of methods in our further work will be aimed at studying tribological properties of the robotic products under the influence of the space factors and validation of the numerical modeling of the friction and heat exchange between mobile knots using results of experiments.

Keywords: tribology, thermal modes, robotics, steel surface, microscopy, fractal analysis, friction couple.

Белавин Владимир Олегович – заместитель начальника Комплекса теплообмена и аэрогазодинамики по экспериментальной базе, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Брылкин Юрий Владимирович – к.т.н., заместитель начальника Центра прикладных исследований – начальник Комплекса теплообмена и аэрогазодинамики, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Залетаев Сергей Васильевич – к.т.н., заместитель начальника отдела, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Кусов Андрей Леонидович – к.ф.-м.н., начальник лаборатории, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Павликов Владимир Викторович – главный специалист, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Потапов Александр Александрович – заместитель начальника отдела, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Царькова Виктория Алексеевна – начальник сектора, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Vladimir O. Belavin – Deputy head of heat exchange and aerogasdynamic complex, Central Institute of Machine Building

Yuriy V. Brylkin – Ph. D., Head of heat exchange and aerogasdynamic complex, Central Institute of Machine Building

Sergey V. Zaletaev – Ph. D., Deputy head of department, Central Institute of Machine Building

Andrey L. Kusov – Ph. D., Head of laboratory, Central Institute of Machine Building

Vladimir V. Pavlikov – Chief specialist, Central Institute of Machine Building

Alexander A. Potapov – Deputy chief of department, Central Institute of Machine Building

Victoria A. Tsarkova – Head of sector, Central Institute of Machine Building

Поступила в редакцию/received: 10.01.2024; после рецензирования/revised: 12.02.2024; принята/accepted: 15.03.2024.