
Качество поверхностного слоя, контактное взаимодействие, трение и износ деталей машин

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №3 (129). С. 40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №3 (129). P. 40-48.

Научная статья
УДК 621.2.082.18
doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-40-48

Трение металл-металлических поверхностей

Виктор Петрович Тихомиров¹, д.т.н., Михаил Александрович Измеров², к.т.н.,
Сергей Викторович Кузнецов³, к.х.н., Анна Георгиевна Горностаева⁴, аспирант
^{1,2,4}Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

³Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, г. Брянск, Россия

¹ dm-bgtu@yandex.ru,

² m.izmerov@yandex.ru,

³ passivoxid@mail.ru,

⁴ a_droshneva1@mail.ru

Аннотация. Установлено, что при сравнительно малых нагрузках неровности фрактальной шероховатости вначале деформируются пластически, пока пятна контакта, увеличиваясь в размере, не приобретут упругое состояние, перестав быть фрактальными. При упругом контакте коэффициент трения при росте нагрузки снижается, а для фрактальной модели коэффициент трения с ростом нагрузки растёт, причем для поверхностей с большим значением фрактальной размерности рост коэффициента трения снижается.

Ключевые слова: фрактал, коэффициент трения, фрактальная размерность, контактная нагрузка

Для цитирования: Тихомиров В.П., Измеров М.А., Кузнецов С.В., Горностаева А.Г. Трение металл-металлических поверхностей // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №3 (129). – С. 40-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-40-48.

Original article

Friction of mtl-metal surfaces

Viktor P. Tikhomirov¹, Dr. Sc. Tech., Mikhail A. Izmerov², Can. Sc. Tech.,
Sergey V. Kuznetsov³, Can. Sc. Chemistry, Anna G. Gornostaeva⁴, Post graduate student
^{1, 2, 4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

³Bryansk State University named after I.G.Petrovsky, Bryansk, Russia

¹ dm-bgtu@yandex.ru,

² m.izmerov@yandex.ru,

³ passivoxid@mail.ru,

⁴ a_droshneva1@mail.ru

Abstract. It is elucidated that under relatively light loads, irregularities of fractal roughness are initially flow until contact marks, increasing in size, move into elastic state, breaking free of fractality. Upon elastic contact, the friction ratio decreases with increasing load, and in case of fractal model, the friction ratio is on the increase with increasing load, while surfaces with a large value of fractal dimension have a decrease in friction ratio growth.

Keywords: fractal, friction ratio, fractal dimension, contact load

For citation: Tikhomirov V.P., Izmerov M.A., Kuznetsov S.V., Gornostaeva A.G. Friction of mtl-metal surfaces. / Science intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.3 (129), pp. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-40-48.

Контактное взаимодействие волнистых поверхностей. Функциональную связь между относительной площадью контакта и безразмерными параметрами, определяющими нагрузку и волнистость, представим в виде:

$$\frac{A_c}{A_a} = C \left(\frac{r_w}{H_w} \right)^\alpha \left(\frac{F_N}{A_a E} \right)^\beta.$$

Диапазон изменения переменных (радиуса волны; высоты волны; номинального давления):

$$1000 \leq r_w \leq 5000 \text{ мкм};$$

$$5 \leq H_w \leq 20 \text{ мкм}; \quad 2 \leq \frac{F_N}{A_a} = p \leq 20 \text{ МПа}.$$

Прологарифмировав функциональное уравнение, получим:

$$\lg \left(\frac{A_c}{A_a} \right) = \lg C + \alpha \lg \left(\frac{r_w}{H_w} \right) + \beta \lg \left(\frac{p}{E} \right).$$

Неизвестные C , α и β найдем с помощью разработанной нами программы «Waviness» (рис. 1).

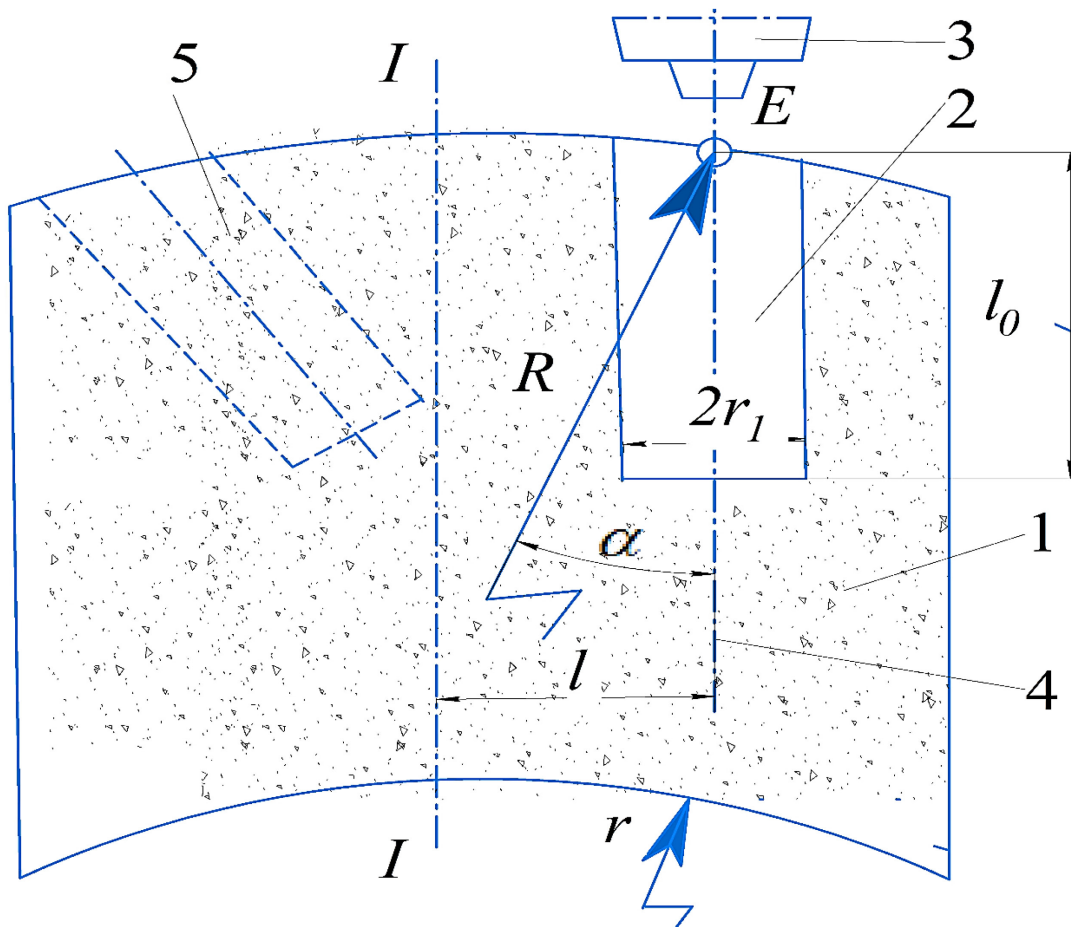


Рис. 1. Фрагмент программы «Waviness»

Произведя потенцирование, окончательно запишем:

$$A_c = 21,478 \left(\frac{r_w}{H_w} \right)^{-0,065} \left(\frac{F_N}{A_a E} \right)^{0,649}.$$

На рис. 2 представлена зависимость относительной площади контакта от нагрузки и параметров волнистости.

Зависимость отношения фактической площади касания к номинальной для шероховатой поверхности качественно не отличается от

контактного взаимодействия волнистой поверхности. Связь между фактической площадью контакта и нагрузкой имеет вид:

$$A_r \propto F_N^n, n < 1.$$

Фрактальная поверхность. При малых нагрузках контакт гладкого сферического тела

с шероховатой поверхностью дискретен. Картина контакта характеризуется наличием от-

дельных пятен, и при росте нагрузки их количество увеличивается.

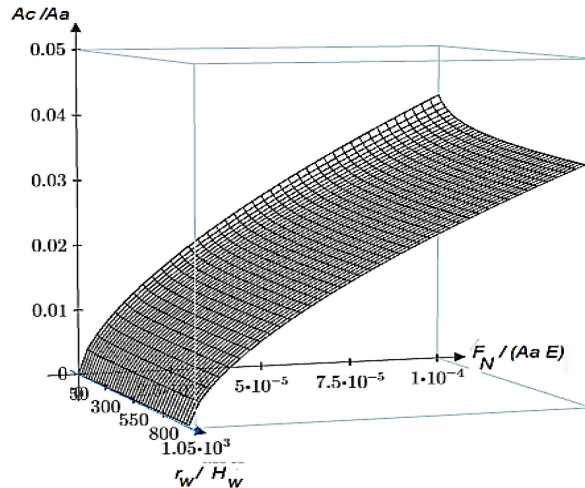


Рис. 2. Зависимость относительной площади контакта от нагрузки и параметров волнистости

Фактическое давление равно:

$$p_r = \frac{F_N}{A_r},$$

где A_r – фактическая площадь контакта, равная [2]:

$$A_r = \frac{D}{2-D} a_L,$$

где D – фрактальная размерность ($1 < D < 2$).

При увеличении сжимающей нагрузки F_N в начале происходит смятие субмикронеровностей, находящихся в первичной поверхности и не фиксируемых при фильтрации профиля (за счет конечной величины радиуса щупа). При достижении определенного уровня пятно контакта переходит в упругое состояние. В этом случае нагрузка определяется выражением:

$$F_N = \int_{a_{cr}}^{a_L} \frac{4}{3} E \cdot r^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a}{\pi r} \right)^{\frac{3}{2}} n(a) da.$$

Размерное распределение площадей пятен контакта запишем в виде:

$$F_N = \frac{4\sqrt{\pi}}{3(3-2D)} E \cdot D G^{D-1} \left(\frac{2-D}{D} \right)^{(3-D)/2} A_r^{(3-D)/2}, D < 1,5.$$

Тогда фактическая площадь контакта (ФПК) в зависимости от нагрузки выражается следующим соотношением:

$$A_r = \left[\frac{3(3-2D)}{4\sqrt{\pi} E \cdot D G^{D-1}} \right]^{2/(3-D)} \left(\frac{D}{2-D} \right) F_N^{2/(3-D)}.$$

$$n(a) = \frac{D}{2} a_L^{D/2} a^{-[(D+2)/2]}.$$

Для фрактальной поверхности связь между радиусом верхней части неровности и ее площадью контакта имеет вид:

$$r = \frac{a^{B/2}}{\pi^2 G^{D-1}},$$

где G – параметр фрактальной шероховатости.

Нормальную нагрузку после интегрирования запишем в виде:

$$F_N = \frac{4\sqrt{\pi}}{3(3-2D)} E \cdot D G^{D-1} a_L^{D/2} a^{(3-2D)/2} \Big|_{a_{cr}}^{a_L}.$$

Приняв $a_{cr} \rightarrow 0$, окончательно запишем:

$$F_N = \frac{4\sqrt{\pi}}{3(3-2D)} E \cdot D G^{D-1} a_L^{(3-D)/2}, D \neq 1,5.$$

Учитывая связь между фактической площадью контакта и площадью максимального пятна, найдем:

В табл. 1 приведем зависимости фактической площади контакта от нагрузки.

График зависимости ФПК от нагрузки при разных значениях фрактальной размерности представлен на рис. 3.

1. Зависимости ФПК от нагрузки

Среднее квадратическое отклонение профиля R_q , мкм	Фрактальная размерность D	Параметр фрактальной шероховатости G , мм	Радиус верхней части выступа r после перехода от пластического состояния неровностей субшероховатости к упругому	Зависимость ФПК (мкм ²) от нагрузки (Н)
2,5	1,491	1,011E-6	67	$A_r = 1,143F_N^{2/(3-1,491)}$
3,2	1,476	1,212E-6	104	$A_r = 3,298F_N^{2/(3-1,476)}$
6,3	1,435	2,180E-6	406	$A_r = 6,210F_N^{2/(3-1,435)}$

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает ярко выраженную нелинейность соотношений. При одной и той же нагрузке фактическая площадь имеет большее значение при уменьшении (в рассматриваемом диапазоне) фрактальной размерности.

Рост фактической площади контакта связан с ростом нагрузки $A_r \propto F_N^n, n > 1$. Обращает на себя внимание принципиальное отличие зависимости фактической площади контакта от нагрузки для волнистой (шероховатой) поверхности и фрактальной.

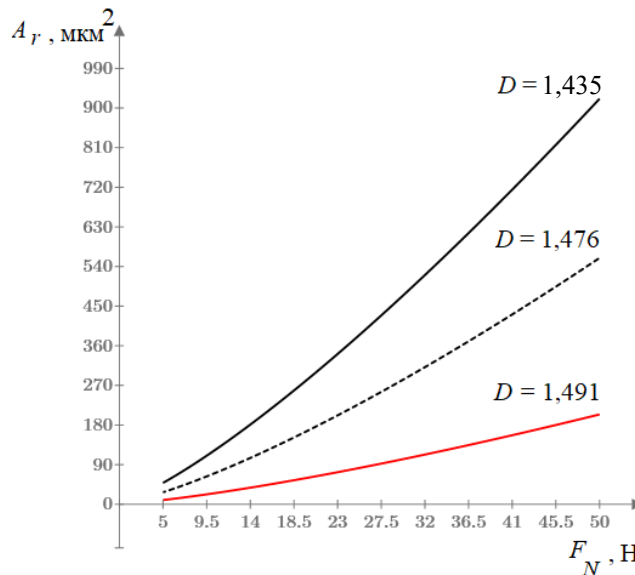


Рис. 3. Зависимость фактической площади контакта от нагрузки при разных значениях D

Теории трения металл-металлических поверхностей. В соответствии с адгезионно-деформационной теорией трения Боудена-Тейбора сила трения определяется выражением:

$$F_f = F_a + F_d.$$

Адгезионная составляющая коэффициента трения равна:

$$F_a = \tau A_r,$$

где τ – удельное сопротивление срезам адгезионных связей; A_r – фактическая площадь контакта.

Молекулярная составляющая коэффициента трения определяется выражением:

$$f_a = \frac{\tau A_r}{F_N}.$$

Учитывая, что при упругом контакте:

$$A_r \propto F_N^{\frac{2}{3}},$$

получим

$$f_a \propto F_N^{-\frac{1}{3}}.$$

При росте нагрузки молекулярная состав-

ляющая коэффициента трения уменьшается, этот факт подтверждается многочисленными экспериментами для малых нагрузок. Деформационная составляющая коэффициента трения зависит от угла наклона неровностей к срединной плоскости θ :

$$f_d = \frac{\frac{\pi\theta}{180} - \sin \theta}{\pi \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}.$$

Угол θ для типичных шероховатых поверхностей, сформированных после разных видов обработки (шлифование, фрезерование и др.), обычно не превышает 10° . Расчет дает оценку деформационной составляющей, равной $f_d = 0,037$, что примерно на порядок меньше адгезионной составляющей коэффициента трения. Таким образом, для упругого контакта адгезионная составляющая коэффициента трения определяет сопротивление относительно смещению элементов сопряжения. Коэффициент трения в этом случае можно определить с помощью зависимости:

$$f = f_a = \frac{\tau A_r}{F_N}.$$

Расчет параметров контактного взаимодействия показывает (см. рис. 2), что фактическая площадь растет медленнее, чем приложенная нормальная нагрузка. Тогда зависимость коэффициента трения от нагрузки носит падающий характер, что соответствует экспериментальным данным, проведенным разными исследователями.

Пластический контакт. Для пластического контакта адгезионная составляющая равна:

$$f_a = \frac{\tau}{H},$$

где H – твердость более мягкого материала сопряженной пары.

Обращает на себя внимание тот факт, что f_a не зависит от шероховатости поверхности, в отличие от влияния параметров шероховатости в условиях упругого контакта. При упругом контакте наблюдается уменьшение коэффициента трения с увеличением шероховатости. В состоянии пластического контакта для умеренного диапазона шероховатостей коэффициент трения практически не зависит от шероховатости.

Расчет адгезионной составляющей коэффи-

циента трения требует знания удельного сопротивления срезу «мостиков сварки». В предельном случае прочность контактных связей пары трения на сдвиг τ не может существенно превышать объемную прочность на сдвиг, характеризуемую как предел текучести при сдвиге более мягких контактирующих материалов для пластических контактов.

Экспериментально подтвержденный рост коэффициента трения при пластическом контакте, адгезионно-деформационная теория трения объясняет увеличением площади контакта под воздействием комбинированных нормальных и тангенциальных напряжений, а это влияет на трение. При этом деформационная составляющая коэффициента трения остается незначительной. Неровности более мягкого материала деформируются пластически, что приводит к сближению поверхностей и к участию в контакте всё большего количества неровностей. Этот процесс продолжается до тех пор, пока растущая площадь отдельного пятна контакта не перейдет в упругое состояние и станет достаточной для того, чтобы нести прилагаемую нагрузку.

Относительный рост площади контакта, приводящий к увеличению силы трения под действием сдвигающей нагрузки, определяется соотношением:

$$\frac{A_r}{A_{r0}} = \sqrt{1 + \alpha \left(\frac{F}{F_N}\right)^2}, \quad F \leq F_f,$$

где α – константа, определяемая эмпирически, со значением около 9; A_{r0} – фактическая площадь контакта при отсутствии сдвига.

Молекулярно-механическая теория трения позволяет вычислить коэффициент трения в условиях пластического и упругого состояния контактного взаимодействия шероховатых поверхностей по следующим зависимостям:

$$f_{пл} = \frac{\tau_0}{H} + \beta + k_{пл} \sqrt{\frac{h}{r}};$$

$$f_{упр} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + k_{упр} \sqrt{h/r},$$

где τ_0 – удельное сопротивление срезу молекулярных связей при отсутствии контактного давления; H – твердость более мягкого материала элементов сопряжения; p_r – фактическое давление; $k_{пл}$, $k_{упр}$ – коэффициенты, зависящие от состояния пятен контакта; h – глу-

бина внедрения; r – радиус закругления верхней части выступа (глубина внедрения и радиус определяют по И.В. Крагельскому характер фрикционной связи).

При упругом контакте снижение коэффициента трения связывают с ростом фактического давления, а некоторое увеличение коэффициента трения при пластическом контакте (при $\tau_0/H = \text{const}$) в отличие от модели Бюудена-Тейбора с ростом механической составляющей.

Трение фрактальных поверхностей. Молекулярная составляющая коэффициента трения определяется выражением:

$$f_{\text{мол}} = \frac{\tau_{\text{п}}}{p_r} = \frac{\tau_0 A_r}{p_a A_a} + \beta,$$

где p_a – номинальное давление.

В качестве примера рассмотрим зависимость молекулярной составляющей коэффи-

циента трения (на рис. 4 молекулярная составляющая обозначена через f) от номинального давления при разных величинах фрактальной размерности.

Приняты следующие исходные данные: A_a – номинальная площадь контакта ($A_a = 312 \text{ мм}^2$); схема трибометра pin-on-disk (палец и диск изготовлены из стали 45); фрикционные параметры были приняты равными $\tau_0 = 98 \text{ МПа}$ и $\beta = 0,004$.

Анализ зависимости молекулярной составляющей коэффициента трения показал, что для модели Герца коэффициент трения падает с ростом нагрузки, а для фрактальной модели – растет, причем с ростом фрактальной размерности величина коэффициента трения увеличивается более интенсивно. Трение фрактальных поверхностей зависит, кроме молекулярного взаимодействия, от особенности структуры и параметров этих поверхностей.

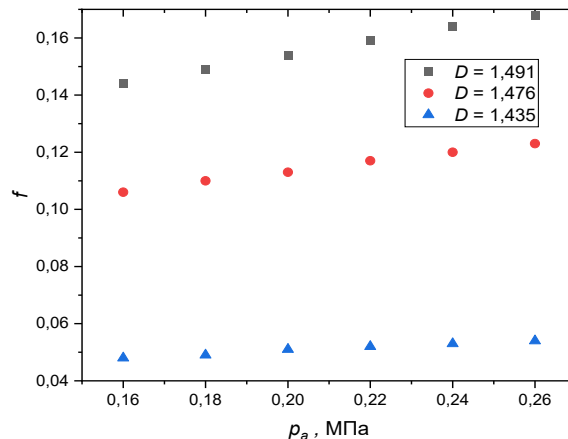


Рис. 4. Зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения от номинального давления

Параметры фрактальной поверхности. Используем понятие первичная поверхность (primary surface), т.е. поверхность, не подверженная фильтрации и не зафиксированная в виде профилограммы ($2D$ образ) или в $3D$ представлении. Математически первичная поверхность описывается уравнением Вейерштрасса-Мандельброта [3]. Используя двухпараметрическую функцию Вейерштрасса-Мандельброта, представляется возможным смоделировать трёхмерную карту шероховатой поверхности с практически любой геометрической характеристикой. Данная функция содержит в себе как случайную структуру, так и детерминированную составляющую, отра-

жая особенности разных инженерных поверхностей. Учесть важные особенности структуры поверхности можно с помощью коэффициентов, входящих в функцию Вейерштрасса-Мандельброта.

Фрактальная размерность профиля ($D = D_s - 1$) и параметр фрактальной шероховатости (G) для шлифованных поверхностей можно определить по формулам [8]:

$$D = \frac{1,548}{R_q^{0,041}},$$

$$R_q^2 = \frac{G^{2(D-1)} L_m^{2(2-D)}}{\sin[\pi(2D-3)/2] \Gamma(2D-3)},$$

где L_m – длина профиля шероховатой поверхности (в расчетах принимают $L_m = 800$ мкм); $\Gamma(\dots)$ – гамма функция Эйлера; R_q – среднее квадратичное отклонение профиля.

В работе [4] представлена структура и взаимодействие фрактальных поверхностей.

На рис. 5 показана модель элементарного взаимодействия микронеровностей.

Силловые взаимоотношения определяются

следующими соотношениями:

$$\frac{F_t}{F_n} = f = \frac{\operatorname{tg}\theta + \operatorname{tg}\rho}{1 - \operatorname{tg}\theta \cdot \operatorname{tg}\rho}$$

где θ – угол наклона неровностей; ρ – угол трения (имеется виду молекулярная составляющая трения).

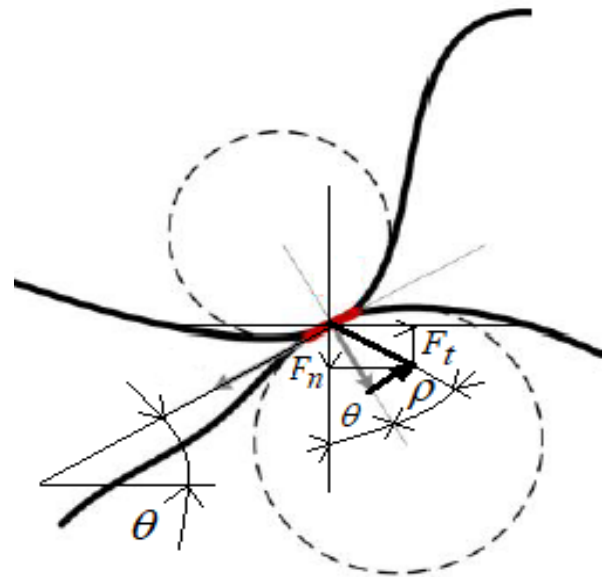
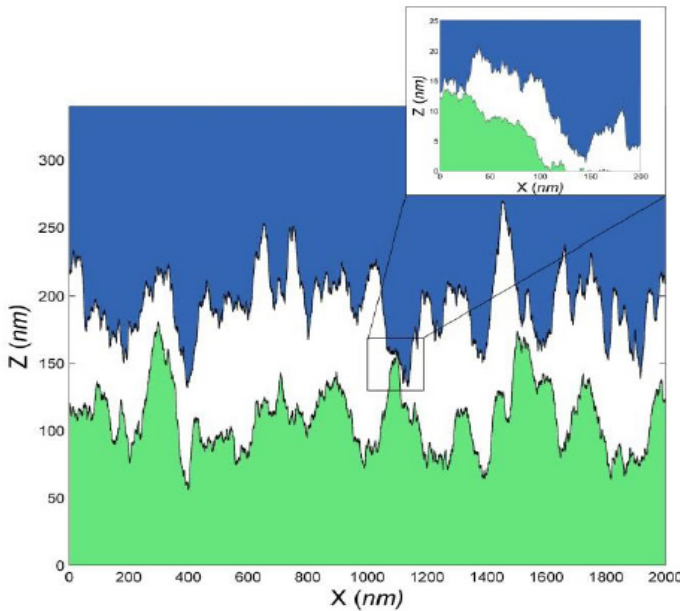


Рис. 5. Взаимодействие субмикронеровностей фрактальных поверхностей

Молекулярную составляющую коэффициента трения можно принять в качестве константы и определить как:

$$f_a = \operatorname{tg}\rho = \frac{\tau a_i}{H a_i}$$

где τ – удельное сопротивление срезу молекулярных связей между взаимодействующими поверхностями. В расчетах приближенно можно принять $\tau = 0,1H$ [5]. Тогда $\operatorname{tg}\rho = 0,1$.

Таким образом, коэффициент трения зависит от наклона неровностей и молекулярной составляющей коэффициента трения, а также от размера площади пятна контакта.

Рассматривая отдельный контакт неровностей, запишем коэффициент трения в виде:

$$f_i = \frac{\sum_{i=1}^n F_{ni} \frac{\operatorname{tg}\theta_i + \operatorname{tg}\rho}{1 - \operatorname{tg}\theta_i \cdot \operatorname{tg}\rho}}{\sum_{i=1}^n F_{ni}} = \frac{\operatorname{tg}\theta_i + \operatorname{tg}\rho}{1 - \operatorname{tg}\theta_i \cdot \operatorname{tg}\rho}$$

Зависимость коэффициента трения от фрактальной размерности. Профиль отдельной неровности можно описать следующим выражением [2]:

$$z(x) = G^{D-1} l^{2-D} \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right),$$

$$-\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2}, \quad 1 < D < 2.$$

Наклон неровности можно найти так:

$$\theta = \left. \frac{dz}{dx} \right|_{x=-l/2} = \pi G^{D-1} l^{1-D}.$$

Полагая, что $l \cong a^2$, окончательно запишем:

$$\theta = \pi G^{D-1} a^{(1-D)/2}.$$

Зависимость угла наклона неровности от фрактальной размерности представлена на рис. 6, а при следующих данных: $G = 10^{-4}$ мкм; $a = 50$ мкм².

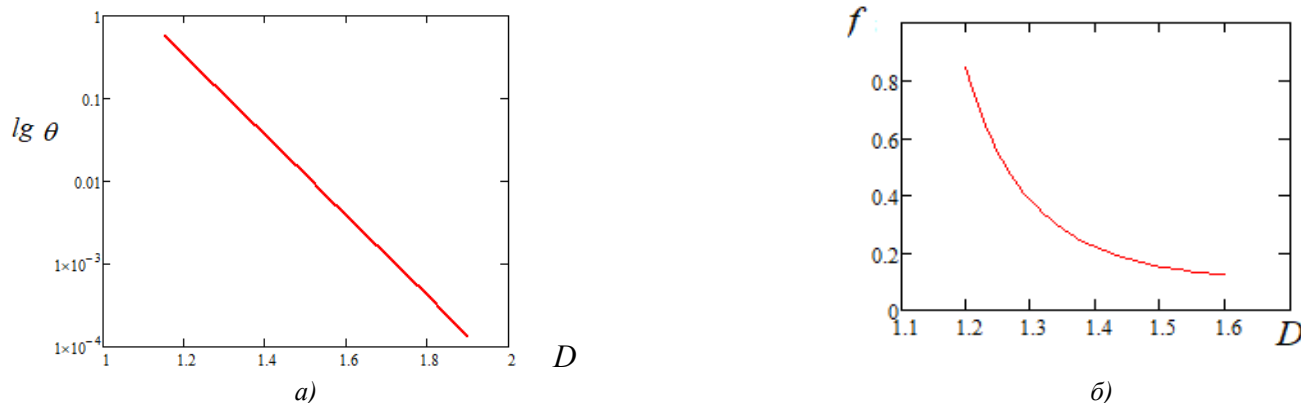


Рис. 6. Зависимость угла наклона неровности (а) и коэффициента трения (б) от фрактальной размерности

Учитывая зависимость угла наклона от фрактальной размерности, перепишем выражение для коэффициента трения:

$$f_i = \frac{\operatorname{tg} \left[\pi G^{D-1} a_i^{(1-D)/2} \right] + f_a}{1 - \operatorname{tg} \left[\pi G^{D-1} a_i^{(1-D)/2} \right] f_a}.$$

При $f_a = 0,1$, $G = 10^{-3}$ мкм; $a = 15$ мкм² зависимость коэффициента трения от фрактальной размерности также представлена на рис. 6, б.

Таким образом, рост фрактальной размерности приводит к снижению коэффициента трения. Причем резкое снижение коэффициента трения наблюдается для принятых в качестве примера исходных данных до $D = 1,4$.

В работах [6, 7] приведены зависимости коэффициента трения от нагрузки. Обращает на себя внимание тот факт, что при малых нагрузках коэффициент трения растет аналогично предлагаемому подходу к оценке трения фрактальных поверхностей. Анализ данных показал, что при всех скоростях относительного скольжения коэффициент трения оказался меньше для более гладкой поверхности. Учитывая, что с уменьшением среднего арифметического отклонения ординат профиля поверхности растет фрактальная размерность, можно подтвердить ранее полученный вывод о том, что рост фрактальной размерности приводит к снижению коэффициента трения. Причем с увеличением шероховатости поверхности трения (уменьшением фрактальной размерности) экстремум смещается в зону меньших нагрузок. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований позволила авторам (А.Н. Шелковой и др.) установить, что нагрузка, соответствующая максимальному значению коэффициента трения,

на 49 % коррелирована с шероховатостью поверхности трения и на 30 % со скоростью скольжения.

Выводы

1. Фрактальная поверхность относится к первичной поверхности, не искаженной приемами фильтрации. Описание фрактальной поверхности производится, в частности с помощью уравнения Вейерштрасса-Мандельброта.

2. Трение фрактальных поверхностей реализуется на уровне фрактальной шероховатости при сравнительно малых нагрузках и определяется особенностями структуры поверхности.

3. Природа трения фрактальных поверхностей – молекулярно-механическая, поэтому коэффициент трения, определяющий сопротивление относительному смещению элементов пары трения, является аддитивной величиной, состоящей из молекулярной и механической составляющих.

4. Для фрактальных поверхностей рост фактической площади контакта превышает рост нормальной нагрузки и, вследствие этого, наблюдается увеличение коэффициента трения с ростом нагрузки.

5. Расчеты показывают, что с ростом фрактальной размерности общий коэффициент трения снижается. Так, при изменении фрактальной размерности с 1,25 до 1,55 коэффициент трения снижается примерно в 2 – 3 раза.

СПИСОКИСТОЧНИКОВ

1. Weber, В.А. Sliding friction: From microscopic contacts to Amontons' law / UvA-DARE is a service provided by the library of the University of Amsterdam. – 2017. – 145 P.
2. Маджумдар, А., Бхушан, Б. Фрактальная модель

упругопластического контакта шероховатых поверхностей // Современное машиностроение. – Сер. Б. – 1991. – №6. – С. 11-23.

3. Kuo, X., Yuan, Y., Jianjiang, C. The effects of size distribution functions on contact between fractal rough surfaces // AIP Advances 8. – 2018. – 075317. <https://doi.org/10.1063/1.5027424>. P. 1-14.

4. Hanaor, D.A., Gan, Y., Einav, I. Static friction at fractal interfaces // Tribology International. – 2016. – №93. – P. 229-238.

5. Михин, Н.М. Внешнее трение твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 221 с.

6. Шелковой, А.Н., Мироненко, Е.В., Ключко, А.А. Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающие заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2013 г. – Вип. 8. – С. 185-200.

7. **Фундаментальные** основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2022. – 552 с.

REFERENCES

1. Weber, B.A. Sliding friction: From microscopic contacts to Amontons' law / UvA-DARE is a service provided by the library of the University of Amsterdam, 2017, 145 p.

2. Majumdar, A., Bhushan, B. Fractal model of elastic-plastic contact of rough surfaces. /Modern mechanical engineering, iss. B, 1991, no. 6, pp. 11-23.

3. Kuo, X., Yuan, Y., Jianjiang, C. The effects of size distribution functions on contact between fractal rough surfaces. / AIP Advances 8, 2018. – 075317. <https://doi.org/10.1063/1.5027424>. P. 1-14

4. Hanaor, D.A., Gan, Y., Einav, I. Static friction at fractal interfaces. / Tribology International, 2016, no.93, pp. 229-238.

5. Mikhin, N.M. External friction of solids. Moscow: Nauka, 1977, 221 p.

6. Shelkovoy, A.N., Mironenko, E.V., Klochko, A.A. Criteria for the formation of structures and parameters of processing systems, providing specified operational properties of hardened coarse pitch gears. /Suchasni tehnologii v mashinobuduvannii, 2013, iss. 8, pp. 185-200.

7. Fundamentals of technological support and reliability improvement of mechanical engineering products / under the editorship of A.G. Suslov, Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022, 552 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.11.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 29.11.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Редактор Д.А. Петраченко. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 17.03.2022. Выход в свет 30.03.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+