

УДК 621.891

DOI: 10.30987/article_5c0f8089a49ae4.92243541

В.П. Тихомиров, В.В. Гриб

РАЗВИТИЕ ТРИБОЛОГИИ

Представлена информация о состоянии вопроса оценки контактного взаимодействия инженерных шероховатых поверхностей и их износа с учётом тенденции развития современной науки о

трении – трибологии.

Ключевые слова: фрактальная размерность, фрактальные поверхности, коэффициент износа, контактная жесткость.

V.P. Tikhomirov, V.V. Grib

TRIBOLOGY DEVELOPMENT

The paper reports the information on the state of the matter of a contact correlation assessment in engineering rough surfaces and their wear taking into account the trend in tribology development - modern science on friction.

The existing methods for modeling contact correlation and wear are based on the simplified models of micro-irregularities and do not take into account some significant factors or geometrical peculiarities of the structure of actual friction surfaces. The computer

techniques application in contact correlation modeling based on a fractal approach to the formation of a surface layer micro-geometry allows increasing considerably the accuracy of contact parameter assessment and predicting forecasting the resource of a friction (tribological) couple designed and automating a design process and making it more vivid and comprehensible.

Key words: fractal dimensionality, fractal surfaces, wear factor, contact rigidity.

Трибология – наука о трении, изнашивании и смазочном действии. Триботехнические показатели (совместимость, износостойкость, антифрикционность и др.) являются показателями, характеризующими поведение всей трибологической системы, а не отдельных элементов системы. Поэтому не представляется возможным установить связи между приведенными выше показателями и геометрическими и физико-механико-химическими свойствами элементов пары трения. Повышение надежности множества технических систем невозможно без углубленного изучения процессов, протекающих на поверхностях трения, установления физических представлений о трении и изнашивании, применения современных методов исследования и их развития, использования компьютерных технологий. Приведем примеры. Повышение живучести стволов крупнокалиберных артиллерийских орудий, оцениваемое несколькими десятками секунд, требует комплексного подхода и использования достижений в области материаловедения, прочности, трибологии и других наук [1]. По зарубежным данным, потеря работоспособного состояния машин происходит вследствие следующих причин: усталостных повреждений (15 %),

аварий (15 %) и износа материалов (70 %). Решение проблемы повышения долговечности машин во многом связано с грамотным использованием трибологических знаний и развитием представлений о процессах трения и изнашивания [2].

Одним из направлений является применение методологических принципов, основанных на фрактальном описании инженерных поверхностей. В основу положены работы Б. Мандельброта (Mandelbrot) [3], Е. Федер (Feder) [4] и др.

Какие преимущества дают фрактальные представления о контакте инженерных поверхностей? Рассмотрим широко известную модель Гринвуда - Вильямсона (Г-В-модель) [5], которая применима для упругого контакта номинально плоских поверхностей. Модель поверхности представляет собой набор сферических сегментов, имеющих одинаковый радиус закругления верхней части выступов и расположенных на средней плоскости шероховатой поверхности. Модель основана на достаточно четких физических положениях о контактом взаимодействии шероховатых поверхностей при упругом состоянии фрикционных пятен контакта. Принятие постоянного радиуса верхней части выступов упрощает моделирование процесса

контактного взаимодействия, при этом точность расчетов снижается. Более того, при малых нагрузках, когда существенную роль при определении параметров контакта играет субшероховатость, применение модели Г-В требует серьезной доработки.

Устранить недостатки, присущие модели Г-В, удалось А. Маджумдару (Majumdar) [6]. Фрактальная модель предполагает, что поверхность обладает самоподобием (часть поверхности отражает весь объект) и скейлингом (часть повторяет свои структурные особенности при разном масштабе измерения). Инженерные поверхности являются мультифрактальными. Под фракталом понимается изломанный объект с дробной размерностью, всегда большей, чем топологическая размерность.

Фрактальная размерность. Фрактальный объект (профиль поверхности) обладает свойством самоподобия: любой участок кривой имеет ту же фрактальную размерность, что и вся кривая. Длина фрактальной кривой (по Б. Мандельброту [1]) определяется по формуле

$$L = \lambda(\delta)^{1-D}.$$

Фрактальная размерность профиля ($1 < D < 2$) определяется многими способами [7]. Фрактальная размерность поверхности (по Б. Мандельброту) определяется выражением $D_s = D + 1$. Заметим, что приведенное выражение не имеет пока научного

обоснования.

Фрактальные модели поверхности.

Профиль инженерной поверхности может быть описан уравнением Вейерштрасса - Мандельброта [8]:

$$z(x) = (G)^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} (\cos 2\pi\gamma^n x / \gamma^{(2-D)n}).$$

Здесь G – фрактальный параметр шероховатости; D – фрактальная размерность профиля; γ – масштабный параметр ($\gamma > 1$), γ^n определяет частотный спектр профиля шероховатой поверхности. Масштабный параметр γ связан с длиной выборки L (расстояние между двумя кроссоверами) соотношением

$$\gamma^{n_1} = 1/L.$$

К параметрам, характеризующим профиль шероховатой поверхности, следует отнести G , D и n . По мнению А. Маджумдара, подходящим значением для описания профиля является величина $\gamma = 1,5$. Нижний предел суммирования в уравнении Вейерштрасса - Мандельброта равен

$$n_1 = \ln(1/L) / \ln\gamma.$$

На рис. 1 представлены профили поверхностей при разной фрактальной размерности, полученные с помощью функции Вейерштрасса - Мандельброта.

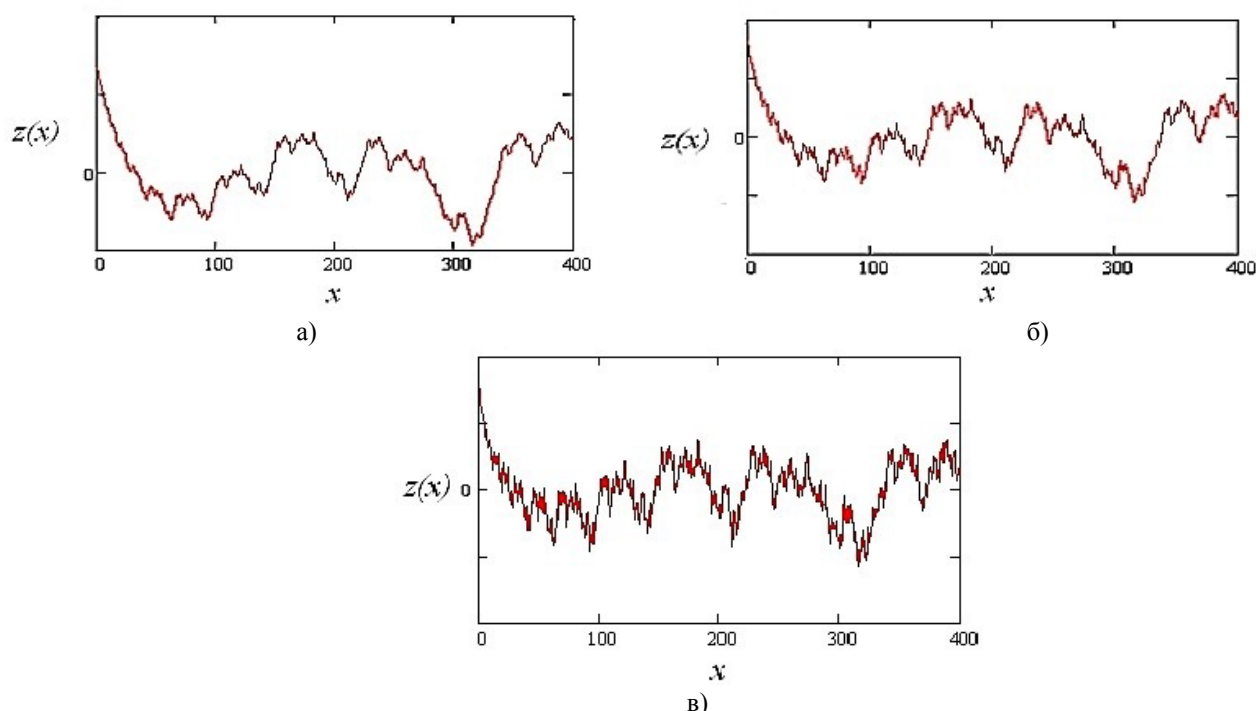


Рис. 1. Профили поверхностей при фрактальной размерности:
а - $D=1,2$; б - $D=1,4$; в - $D=1,6$

Моделирование фрактальных поверхностей. Моделирование поверхности возможно при установлении связи фрактальной размерности с параметрами шероховатости. В ряде случаев требуется использовать данные о поверхностях и их параметрах. Поэтому определение фрактальной размерности типичных поверхностей необходимо для решения, например, задач герметичности металл-металлических соединений. К параметрам фрактальной поверхности, не зависящим от шкалы измерения, относят ее размерность и фрактальный параметр шероховатости.

Мощность спектральной функции Вейерштрасса - Мандельброта для профиля поверхности определяется выражением

$$S(\omega) = \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln y} \omega^{2D-5}.$$

Для поверхности эта функция имеет вид

$$P(\omega_x, \omega_y) = \frac{C^{2D_S-4}}{\omega_{\text{вк}}^{8-2D_S}}.$$

Здесь ω – частота, мкм⁻¹, эквивалентное значение частоты определяется частотами во взаимно перпендикулярных направлениях:

$$\omega_{\text{вк}} = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}.$$

Параметры G и C определяются из

$$Z(x, y) = c_z \sum_{n=0}^{N-1} q^{(D_S-3)n} \sum_{m=1}^M \sin \left\{ K q^n \left[x \cos \left(\frac{2\pi m}{M} \right) + y \sin \left(\frac{2\pi m}{M} \right) \right] + \theta_{nm} \right\}.$$

На рис. 2 представлена модель поверхности, построенная при следующих данных: $q=2,7$; $K=1$; $N=M=3$; $\theta_{n,m} \sim \text{Rav}[0, \pi]$ – случайное число, равномерно распределенное на отрезке от 0 до π ; $D_S=2,17$.

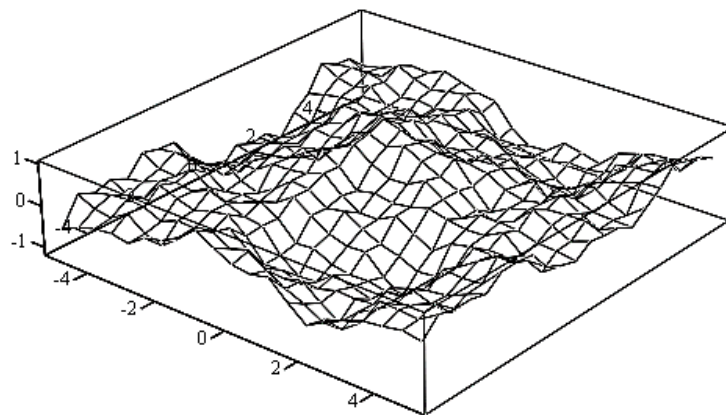


Рис. 2. Модель поверхности

уравнений

$$\begin{aligned} \lg S(\omega) &= \lg \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln y} - (5 - 2D) \lg \omega; \\ \lg P(\omega_x, \omega_y) &= \lg C^{2D_S-4} - (8 - 2D_S) \lg \omega_{\text{вк}}; \\ 1 \leq D \leq 2; \quad 2 \leq D_S \leq 3. \end{aligned}$$

Для профиля и самой поверхности фрактальная размерность определяется своими угловыми коэффициентами K и K' (наклоном прямой, построенной в координатах $\lg S - \lg \omega$ и $\lg P - \lg \omega$). Тогда фрактальная размерность для изотропной поверхности, параметры шероховатости которой можно определить по одной профилеграмме, равна

$$D = \frac{5 - K}{2}.$$

Для поверхности, имеющей разные параметры шероховатости в двух взаимно перпендикулярных направлениях, фрактальная размерность определяется соотношением

$$D_S = \frac{8 - K'}{2}.$$

В работе [9] отмечается существенная разница в оценке параметров шероховатости при использовании фрактального и статистического методов. Модель фрактальной поверхности может быть представлена следующим выражением [10]:

Моделирование выступа. Процедура построения выступа приведена на рис. 3. Набор выступов, расположенных на срединной плоскости, представляет собой модель фрактальной поверхности. При этом

каждому выступу изначально соответствует свой треугольник, что соответствует описанию шероховатой поверхности в виде случайного поля.

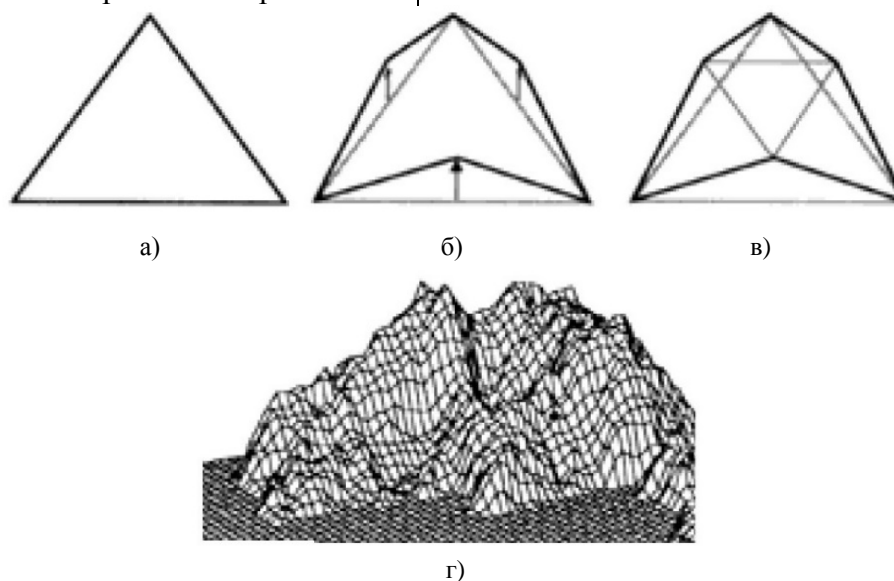


Рис. 3. Построение выступа микронеровности поверхности:
а, б, в – этапы построения, г - результат

Построение поверхности (отдельного выступа) методом случайного смещения средней точки стороны треугольника происходит по следующему алгоритму: в исходном треугольнике (рис. 3а) происходит смещение средних точек боковых сторон вверх или вниз от плоскости, после соединения с вершинами формируются четыре треугольника (рис. 3б), к которым применяется такая же процедура (рис. 3в).

Функция распределения вероятности определяет величину смещения средней точки и степень изрезанности поверхности. В результате указанных процедур получается модель выступа шероховатой поверхности (рис. 3г).

На рис. 4 приведены поверхности (реальные и модели) элементов пары трения после разных видов обработки.

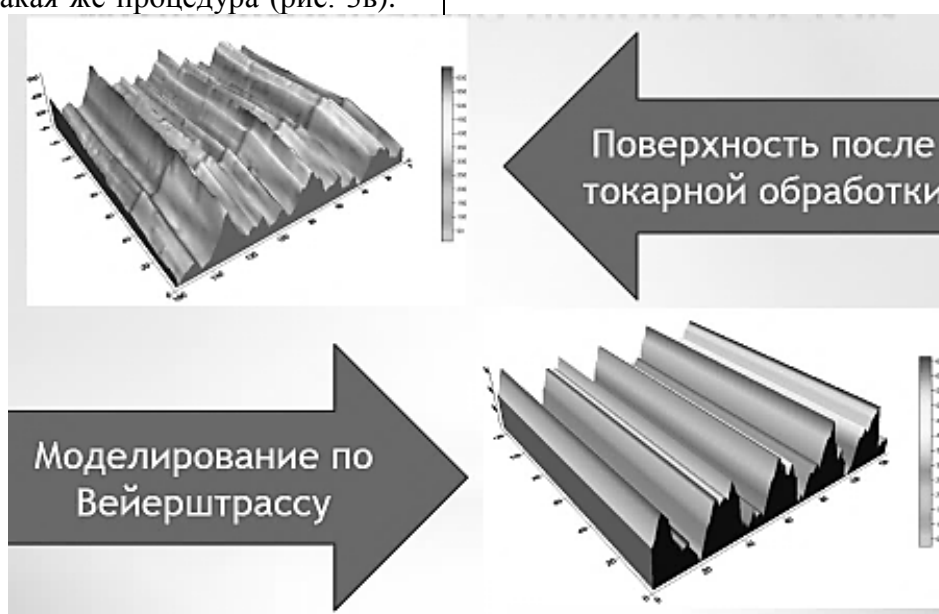


Рис. 4. Реальные поверхности и их модели

Наличие базы данных о поверхностях позволяет существенно сократить подбор поверхностей для соединений, к которым предъявляются требования по контактной жесткости, площадям контакта, электро-

проводности и т.п. В таблице показано качественное влияние параметров поверхности на трибологические показатели системы.

Таблица

Влияние параметров поверхности на трибологические показатели

Узел трения и процесс	Амплитудные параметры S_a, S_z	Форма распределения S_{sk}, S_{ku}	Шаговые параметры S_{ds}	Гибридные параметры $S_{\Delta q}, S_{sc}$
Подшипники	•	•	•	•
Уплотнения	•	•	•	•
Контактная жесткость	•	•	•	•
Изнашивание	•	•	•	•
Контактная выносливость	•	•	•	○
Электроконтакты	•	•	•	•

Примечание. • – сильное влияние, • – среднее, ○ – слабое.

Приведем примеры решения задач с использованием фрактальных моделей.

Пример 1. Для имеющихся инженерных поверхностей требуется оценить нормальную контактную жесткость.

Контакт фрактальных поверхностей состоит из отдельных пятен. Рассматривая контакт гладкой поверхности с эквивалентной, полагаем существование функциональной связи между площадью пятна контакта и радиусом верхней части деформируемого выступа [4]:

$$R = \frac{2^D a^{D/2}}{\pi^{(4+D)/2} G^{D-1}}.$$

Здесь a – площадь рассматриваемого сечения выступа; G – фрактальный параметр, определяемый по формуле

$$G = \left\{ \frac{0,9R_q}{\left[\frac{1}{2D-4} (\omega_h^{2D-4} - \omega_l^{2D-4}) \right]^{1/2}} \right\}^{\frac{1}{D-1}},$$

где R_q – оценка среднего квадратического отклонения ординат профиля; ω_h, ω_l – наивысшая и низшая частоты профиля как случайного процесса.

Взаимодействия отдельной сферической неровности с жестким штампом. Модель Маджумдара [4] предполагает, что все малые пятна, определяемые субшероховатостью, вначале деформиру-

ются пластически, а затем по мере увеличения нагрузки соседние пятна, сливаясь друг с другом, создают такую площадь выступа, которая деформируется упруго. Рассматривая модель выступа с радиусом в верхней части R , найдем критическую площадь, достижение которой характеризует переход от упругого состояния пятна контакта к упругопластическому:

$$a_c = \pi R \delta_c,$$

где δ_c – критическая деформация [11; 12],

$$\delta_c = \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 R.$$

Здесь

$$k = 0,454 + 0,41\mu; \quad 1/E = (1 + \mu_1^2)/E_1 +;$$

E, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона; H – твердость деформируемого тела. Выразим критерий перехода от упругого состояния контакта к упругопластическому в виде

$$\delta_c = \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 \frac{a_c^{D/2}}{\pi^{(4+D)/2} G^{D-1} 2^{-D}}.$$

С учетом критической деформации и соотношения для радиуса запишем:

$$a_c = \pi \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 R^2 = \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 \frac{a_c^D}{\pi^{3+D} G^{2(D-1)} 2^{-2D}}.$$

После преобразования получим:

$$a_c = \frac{\pi \left(\frac{3+D}{D-1}\right) G^2}{2 \left(\frac{2D}{D-1}\right) \left(\frac{\pi kH}{2E}\right)^{\frac{2}{D-1}}}.$$

Основные соотношения между нагрузкой и деформацией. Связь между на-

$$F^0_{\varepsilon} = \frac{4}{3} ER^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}}, \quad a_{\varepsilon} = \pi R \delta, \quad \delta \leq \delta_c.$$

$$F^0_{\varepsilon} = \frac{4}{3} ER^{\frac{1}{2}} \delta_c^{\frac{3}{2}} \delta^{*3/2}, \quad F^0_{\varepsilon} = F_c \delta^{*3/2}, \quad \delta^* = \frac{\delta}{\delta_c} \leq 1.$$

Принимая во внимание зависимость между площадью пятна контакта и радиусом закругления верхней части выступа, найдем критическую силу:

$$F_c = \frac{4}{3} ER^{\frac{1}{2}} \delta_c^{\frac{3}{2}} = \frac{2^{(2D+2)} E}{3\pi^{4+D} G^{2(D-1)}} a_c^D \left(\frac{\pi kH}{2E}\right)^3.$$

$$F^0_{\varepsilon} = F_c \left(\frac{a}{a_c}\right)^{3/2}, \quad \frac{a}{a_c} \leq 1.$$

Площадь пятна контакта равна номинальной.

Жесткость сферической неровности:

$$k_{Ns}^0 = \frac{dF}{A_{\alpha} d\delta} = \frac{2E}{A_{\alpha}} R^{1/2} \delta_c^{1/2} \delta^{*1/2}, \quad \delta^* \leq 1,$$

или

$$k_{Ns}^0 = \frac{2Ea}{A_{\alpha} \sqrt{\pi a_c}}, \quad a \leq a_c.$$

Здесь A_{α} - площадь контакта.

Множественный контакт. Число пятен контакта относительно максимального пятна определяется законом Корчака

$$F_{\varepsilon} = F_c \int_0^{a_L} \left(\frac{a'}{a_c}\right)^{3/2} \frac{D}{2} \frac{D}{a_L^{\frac{D}{2}}} a'^{-\left(\frac{D+2}{2}\right)} da' = F_c \frac{D}{3-D} \frac{D-3}{a_c^{\frac{D-3}{2}}} \frac{3-D}{a^{\frac{D-3}{2}}} \Big|_0^{a_L}, \quad a \leq a_L = a_c.$$

Для случая, когда $a = a_c$, запишем:

$$F_{\varepsilon} = F_c \frac{D}{3-D}.$$

При $a = a_c$ и $D=1,5$ полученное выражение соответствует значению критической силы. При другом значении фрактальной размерности критическая сила отличается на величину $D/(3-D)$. Это связано с тем, что модель фрактальной поверхно-

$$A_{rs} = \int_0^{a_L} a'^{\frac{D}{2}} \frac{D}{a_L^{\frac{D}{2}}} a'^{-\left(\frac{D+2}{2}\right)} da' = \frac{D}{2-D} a_L, \quad a_L \leq a_c.$$

При $a_L = a_c$ получим $A_{rs} = \frac{D}{2-D} a_c$.

грузкой и деформацией, а также площадь пятна контакта в условиях упругого состояния отдельной неровности в виде сферы с жестким штампом определяются следующими выражениями:

[4]:

$$N(A \geq a) = \left(\frac{a_L}{a}\right)^{\frac{D}{2}}.$$

Размерное распределение площадей пятен (по модулю) определяется выражением

$$n(a) = \frac{dN(A \geq a)}{da} = \frac{D}{2} \frac{D}{a_L^{\frac{D}{2}}} a^{-\left(\frac{D+2}{2}\right)}.$$

Найдем силу, приложенную к сопряжению:

$$F = \int_0^{a_c} F_{\varepsilon}^0(a') n(a') da'.$$

Фактическая площадь контакта равна

$$A_r = \int_0^{a_c} a' n(a') da'.$$

Упругое контактное взаимодействие фрактальных поверхностей. В том случае, когда максимальная площадь пятна контакта $a_L = a_c$, имеем:

сти отличается от известных моделей поверхности в виде набора сферических сегментов, высота которых подчиняется определенному закону распределения, а радиус верхней части выступов постоянен для всех неровностей.

Площадь фактического преимущественно упругого контакта оценивается соотношением

Фактическое давление в зависимости от сближения равно

$$p_r = \frac{F_c \frac{D}{3-D} a_c^{\frac{D-3}{2}} a_L^{\frac{3-D}{2}}}{\frac{D}{2-D} a_c^{\frac{D}{2}} a_L^{\frac{2-D}{2}}} = \left(\frac{2-D}{3-D} \right) \frac{F_c a_L^{\frac{1}{2}}}{a_c^{\frac{3}{2}}}$$

Предельное значение давления при упругом контакте равно

$$K_N = \int_0^{a_L} k_{Ns}^0(a') n(a') da' = \frac{4E}{A_a \sqrt{\pi} (D-1)} a_c^{(D-1)/2} a^{(2-D)/2} \Big|_0^{a_L}$$

При $a_L = a_c$ получим

$$K_N = \frac{4E}{A_a \sqrt{\pi} (D-1)} a_c^{1/2}$$

Для расчета контактной жесткости в качестве исходных данных примем сред-

$$p_r = \left(\frac{2-D}{3-D} \right) \frac{F_c}{a_c}$$

Контактная жесткость фрактальных поверхностей. Контактная жесткость фрактальных поверхностей выражается зависимостью

нее квадратическое отклонение ординат профиля $Rq=0,0015$ мм и фрактальную размерность $D = 1,5$. Найдем параметр фрактальной шероховатости:

$$G = 0,0015^{\frac{1}{0,5-1}} \left[\frac{4(1,5-2) \ln(1,5)}{\left(\frac{1}{0,004} \right)^{2(1,5-1)} \left(\frac{1}{2} \right)^{2(1,5-1)}} \right]^{\frac{1}{2(1,5-1)}} = 9,47 \cdot 10^{-11} \text{ мм,}$$

где $\omega_{max} = \frac{1}{0,004} \text{ мм}^{-1}$; $\omega_{min} = \frac{1}{2} \text{ мм}^{-1}$.

Критическая площадь контакта, соответствующая предельному упругому состоянию:

$$a_c = \frac{\pi^{\frac{3+1,5}{1,5-1}} G^2}{2^{\frac{2-1,5}{1,5-1}} \left(\frac{\pi \cdot 0,577 \cdot 3000}{2 \cdot 10^5} \right)^{\frac{2}{1,5-1}}} = 7,12 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2.$$

Здесь $H=3000$ МПа – твердость деформируемой поверхности; $E=10^5$ МПа – приведенный модуль упругости.

Номинальная площадь равна

$$Aa = (1/\omega_{min})^2 = 4 \text{ мм}^2.$$

Контактная жесткость фрактальной поверхности равна

$$K_N = \frac{4 \cdot 10^5}{4\sqrt{\pi}} \left(\frac{1,5}{1,5-1} \right) \sqrt{7,12 \cdot 10^{-4}} = 3,44 \cdot 10^{-3} \text{ МПа/мм} = 3,44 \text{ МПа/мкм.}$$

Пример 2. Изнашивание фрактальных поверхностей. Рассматривается подвижное торцовое уплотнение.

Проектирование подвижных торцовых уплотнительных устройств требует знания таких триботехнических показателей, как коэффициент трения и износ. Проектирование предполагает выбор материалов пары трения, назначение параметров качества поверхностного слоя, знание условий эксплуатации и закономерностей процессов трения и изнашивания, протекающих на скользящем контакте.

Полагаем, что оценка объема изношенного материала производится на основе закона Арчарда [13]:

$$w(t) = k_w \frac{F}{H} L(t),$$

где w – объемный износ; k_w – коэффициент износа; F – нормальная нагрузка; H – твердость изнашиваемого (менее твердого) тела; L – путь трения.

Приведенный закон описывает процесс адгезионного изнашивания. Оценка объема изношенного материала требует знания коэффициента износа, который определяется с помощью соответствующего эксперимента. При этом процессы трения и изнашивания при модельном испытании должны быть идентичны работе натурального узла трения, т.е. критерии подобия должны быть одними и теми же. Одним из таких критериев является коэффициент трения.

Однако в уравнение Арчарда коэффициент трения не входит в явном виде. Введем в уравнение силу трения (по Амонтону)

$$F_f = fF_n$$

где f — коэффициент трения.

Если подставить в закон Арчарда вместо нормальной нагрузки силу трения, то коэффициент трения окажется в знаменателе. Тогда увеличение коэффициента трения приводит к снижению износа, что противоречит многим экспериментальным данным. Полагая, что фактор трения играет существенную роль при оценке износа, модифицируем формулу Арчарда, заменив нормальную нагрузку силой трения и, соответственно, введя новый коэффициент износа - k_w^* . Модифицированная формула имеет вид

$$w(t) = k_w^* \frac{F_n f}{H} L(t).$$

Здесь k_w^* будем называть приведенным коэффициентом износа.

Для многих случаев интенсивность изнашивания I_h связана с коэффициентом трения степенной зависимостью:

$$I_h \propto f^n, \quad n > 1.$$

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + k \sqrt{\frac{h}{R}}.$$

Здесь τ_0 — напряжение среза фрикционной связи при нулевом контактом давлении; HB — твердость по Бринеллю; β — фактор упрочнения фрикционной связи; k — коэффициент; h — глубина внедрения неровности в полупространство; R — радиус закругления верхней части неровности.

Объем изношенного материала.

Модель Арчарда основывается на следующем допущении: объемный износ равен произведению номинальной площади на сближение поверхностей пары трения. Так, для схемы «палец - диск» номинальная площадь равна πr^2 , где r — радиус пальца; h — линейный износ. Таким образом, изношенный объем равен $w(t) = \pi r^2 h(t)$.

В действительности изнашивание происходит на фактической площади контакта, более того, на отдельных пятнах контакта. Пятна контакта находятся в уп-

ругом и/или пластическом состояниях. Полагая форму верхней части неровности в виде сферического сегмента, найдем объем износа по формуле

$$w_i(t) = \frac{1}{6} \pi h (3\rho^2 + h^2).$$

Здесь h — высота сегмента (линейный износ); ρ — радиус основания сегмента.

Ввиду того что квадрат радиуса основания сегмента существенно больше, чем высота, выражение в скобках вышеприведенного уравнения упростим, оставив первое слагаемое. Заменив $\rho^2 = a_i/\pi$, где a_i — площадь пятна контакта, перепишем уравнение в виде

$$w_i(t) = \frac{1}{2} h_i a_i.$$

Высота h износа в соответствии с представлением профиля как фрактальной кривой определяется выражением

$$h_i = G^{D-1} \left(\frac{a_i}{\pi} \right)^{(2-D)/2}.$$

Тогда объем изношенного материала на отдельном выступе оценивается соотношением

$$w_i = \frac{1}{2\pi^{(2-D)/2}} G^{D-1} a_i^{(4-D)/2},$$

где G — параметр фрактальной шероховатости; D — фрактальная размерность ($1 < D < 2$).

Уравнение суммарного износа материала имеет вид

$$w(t) = \frac{1}{2\pi^{(2-D)/2}} G^{D-1} \sum_{i=1}^{n_r} a_i^{(4-D)/2}.$$

Здесь n_r — число пятен контакта, определяемое по фундаментальному закону Корчака относительно максимальной площади пятна a_L , т.е.

$$n_r = \left(\frac{a_L}{a} \right)^{D/2};$$

D — фрактальная размерность ($1 < D < 2$); G — фрактальная шероховатость.

Приведенный коэффициент износа имеет вид

$$k_w^* = \frac{G^{D-1}}{2\pi^{(2-D)/2}} \left[\sum_{i=1}^{n_r} a_i^{(4-D)/2} \right] \frac{H}{p_a f A_a L}.$$

Перепишем полученное выражение, введя площадь максимального пятна кон-

такта и учитывая, что $a_i^* = a_i/a_L$:

$$k_w^* = \frac{G^{D-1} a_L^{(4-D)/2}}{2\pi^{(2-D)/2}} \left[\sum_{i=1}^{n_r} a_i^{*(4-D)/2} \right] \frac{H}{p_a f A_a L}$$

Сумму вычислим с помощью имитационного моделирования случайных чисел, распределенных по закону $F(a^*) = a^{*b}$. Для данной площади a_L найдем целое число пятен контакта $\text{mod } n_r$. Тогда случайное число в соответствии с приведенным законом найдем из соотношения $x_{a^*} = x_R^{1/b}$, где x_R – случайное число, равномерно распределенное на отрезке $[0, 1]$. В этом случае имеем:

$$\sum_{i=1}^{n_r} a_i^{*(4-D)/2} = x_{a_1^*}^{(4-D)/2b} + \dots + x_{a_{\text{mod } n_r}^*}^{(4-D)/2b}$$

Зависимость износа от пути трения (кривая изнашивания) выражается соотношением

$$h = k_w^* \frac{p_a f L}{HB}$$

Используя приведенные выше зависимости, представляется возможным при известном значении предельного износа прогнозировать ресурс трибосистемы.

Развитие молекулярно-механической теории трения. В работах ученых Брянской школы трибологов получила дальнейшее развитие молекулярно-механическая теория трения. Было установлено, что в процессе трения и изнашивания деталей машин увеличение фактической площади контакта и уменьшение напряжений на площадках контакта влечет за собой постепенное уменьшение интенсивности изнашивания и наклона кривой износа [14]. Характер кривых износа реаль-

ных пар трения в значительной степени отличается от классической кривой износа образцов. Исследования процессов трения и изнашивания перешли на новый уровень контактного взаимодействия поверхностей, который получил название «субшероховатость поверхности трения». Впервые была предложена молекулярно-механическая теория изнашивания субшероховатости поверхностей трения [15]. Установлена взаимосвязь субшероховатости поверхности с фазовым составом и структурой материала, которая показывает, что основной вклад в формирование субшероховатости вносится не технологией обработки поверхности детали, а ее материалом. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что в процессе приработки происходит изнашивание выступов шероховатости, в результате чего в контакт вступает субшероховатость, при установившемся износе происходят ее упругие и пластические деформации и, как следствие, износ. Снятие субшероховатости поверхности приводит к разрушению пленок окислов и образованию ювенильных поверхностей трущихся материалов. Износ субшероховатости поверхности трения осуществляется как в результате действия механических сил – деформаций, так и в результате действия молекулярных сил – адгезии. Исследование процессов трения и изнашивания на уровне субшероховатости поверхностей трения способствует развитию такого направления, как нанотрибология.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карюкин, С. Подход к обеспечению живучести стволов артиллерийских орудий / С. Карюкин, О. Митрохин // Военная мысль. - 2012. - № 1. - С. 72-78.
2. Сулов, А.Г. Инженерия поверхности деталей: монография / под ред. А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 2008. - 320 с.
3. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. - М.: Ин-т компьютер. иссл., 2002. - 656 с.
4. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер. - М.: Мир, 1991. - 248 с.
5. Greenwood, J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. - 1966. - V. 295. - P. 300-319.
6. Majumdar, A. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces / A. Majumdar, B. Bhushan // Trans. ASME: Journal of Tribology. - 1990. - № 112. - P. 205-216.
7. Klinkenberg, B. A Review of Methods Used to Determine the Fractal Dimension of Linear Features / B. Klinkenberg // Mathematical Geology. - 1994. - Vol. 26. - № 1. - P. 23-46.
8. Wang, S. A fractal theory of the interfacial tem-

- perature distribution in the slow sliding regime. Part I. Elastic contact and heat transfer analysis / S. Wang, K. Komvopoulos // *Trans. ASME: Journal of Tribology*. - 1994. - № 116. - P. 812-823.
9. Pavelescu, D. On the roughness fractal character, the tribological parameters and the error factors / D. Pavelescu, A. Tudor // *Proceedings of the Romanian Academy. Ser. A*. - 2004. - Vol. 5. - № 2.
 10. Потапов, А.А. Теория рассеяния волн фрактальной анизотропной поверхностью / А.А. Потапов, А.В. Лактунькин // *Нелинейный мир*. - 2008. - Т. 6. - № 1. - С. 3-36.
 11. Kogut, L. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat / L. Kogut, I. Etsion // *Journal of Applied Mechanics*. - 2002. - Vol. 69. - № 5. - P. 657-662.
 12. Chang, W.R. An Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces / W.R. Chang, I. Etsion, D.B. Bogy // *ASME J. Tribol.* - 1987. - № 109. - P. 257-263.
 13. Archard, J.F. Wear theory and mechanisms / J.F. Archard; M.B. Peterson, W.O. Winer (eds.) // *Wear Control Handbook*. ASME. - 1980.
 14. Суслов, А.Г. К вопросу трения и изнашивания деталей машин / А.Г. Суслов // *Трение и износ*. - 1990. - № 5. - С. 801-807.
 15. Шалыгин, М.Г. Изнашивание субшероховатости поверхностей трения в водородсодержащей среде: монография / М.Г. Шалыгин. - М.: Инновационное машиностроение, 2018. - 92 с.
1. Karyukin, S. Approach to support barrel life / S. Karyukin, O. Mitrokhin // *Military Thought*. 2012. - No.1. - pp. 72-78.
 2. Suslov, A.G. *Parts Surface Engineering*: monograph / under the editorship of A.G. Suslov. - M.: Mechanical Engineering, 2008. - pp. 320.
 3. Mandelbot, B. *Fractal Geometry of Nature* / B. Mandelbrot. - M.: Institute of Computer Investigations, 2002. - pp. 656.
 4. Feder, E. *Fractals* / E. Feder. - M.: Mir, 1991. - pp. 248.
 5. Greenwood, J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A*. - 1966. - V. 295. - P. 300-319.
 6. Majumdar, A. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces / A. Majumdar, B. Bhushan // *Trans. ASME: Journal of Tribology*. - 1990. - № 112. - P. 205-216.
 7. Klinkenberg, B. A Review of Methods Used to Determine the Fractal Dimension of Linear Features / B. Klinkenberg // *Mathematical Geology*. - 1994. - Vol. 26. - № 1. - P. 23-46.
 8. Wang, S. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime. Part I. Elastic contact and heat transfer analysis / S. Wang, K. Komvopoulos // *Trans. ASME: Journal of Tribology*. - 1994. - № 116. - P. 812-823.
 9. Pavelescu, D. On the roughness fractal character, the tribological parameters and the error factors / D. Pavelescu, A. Tudor // *Proceedings of the Romanian Academy. Ser. A*. - 2004. - Vol. 5. - № 2.
 10. Potapov, A.A. Theory of wave scattering by fractal anisotropic surface / A.A. Potapov, A.V. Lakyunkin // *Non-Linear World*. - 2008. - Vol.6. - No.1. - pp. 3-36.
 11. Kogut, L. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat / L. Kogut, I. Etsion // *Journal of Applied Mechanics*. - 2002. - Vol. 69. - № 5. - P. 657-662.
 12. Chang, W.R. An Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces / W.R. Chang, I. Etsion, D.B. Bogy // *ASME J. Tribol.* - 1987. - № 109. - P. 257-263.
 13. Archard, J.F. Wear theory and mechanisms / J.F. Archard; M.B. Peterson, W.O. Winer (eds.) // *Wear Control Handbook*. ASME. - 1980.
 14. Suslov, A.G. To the problem of friction and wear of machinery / A.G. Suslov // *Friction and Wear*. - 1990. - No.5. - pp. 801-807.
 15. Shalygin, M.G. Sub-roughness wear of friction surfaces in hydrogen environment: monograph / M.G. Shalygin. - M.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2018. - pp. 92.

Статья поступила в редакцию 03.10.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Горленко А.О.

Статья принята к публикации 12.11.18.

Сведения об авторах

Тихомиров Виктор Петрович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел. 8 (4832) 58-82-12, e-mail: dm-bgtu@yandex.ru.

Tikhomirov Victor Petrovich, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. "Machinery", Bryansk State Technical University, e-mail: dm-bgtu@yandex.ru.

Grib Vladimir Vasilievich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the

Гриб Владимир Васильевич, д.т.н., профессор кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» Московского автомобильно-дорожного института, тел.: 8 (499) 155-08-95.

Dep. "Production and Repair of Motor Cars and Road Machines", Moscow Auto-Road Institute, phone: 8 (499) 155-08-95.