

УДК 539.211: 620.179

## ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

О. С. КИСЕЛЕВСКИЙ<sup>+</sup>, В. П. КАЗАЧЕНКО

В работе установлено, что морфологические поверхностные структуры алмазоподобных покрытий являются самоподобными в пределах масштабного диапазона 50 нм ÷ 100 мкм. Фрактальная размерность алмазоподобных покрытий составляет  $2,48 \pm 0,01$ . Обнаружена асимптотическая зависимость фрактальной размерности поверхности и коэффициента трения покрытия от числа циклов истирания, что является следствием образования в зоне трения неравновесных морфологических структур.

**Ключевые слова:** трение, морфология поверхности, алмазоподобные покрытия, фрактальная размерность.

**Введение.** Общепринятыми характеристиками топографии поверхности являются такие параметры шероховатости как  $R_a$  и  $R_z$ . Морфологическая структура поверхностей трения оказывает существенное влияние на их триботехнические характеристики.

При трении могут образовываться фрактальные морфологические структуры [1–3]. Наряду с параметрами шероховатости, для описания влияния топографии самоподобных поверхностей на трение используются фрактальные характеристики. Влияние фрактального параметра топографии поверхности на фактическую площадь контакта и коэффициент трения показано путем математического моделирования контакта и трения самоподобных поверхностей [4].

**Цель работы** — исследование взаимосвязи коэффициента трения с фрактальными свойствами топографии поверхности алмазоподобных покрытий (АПП) с помощью анализа изображений атомно-силовой микроскопии (АСМ) и Фурье-спектров мощности профиля шероховатости поверхности.

**Методика эксперимента.** Исследовались безводородные АПП, сформированные из плазмы импульсного катодно-дугового разряда [5]. Триботехнические испытания включали две серии экспериментов. В первой серии осуществлялось возвратно-поступательное движение индентора по схеме шарик — плоскость. В качестве индентора использовался шарик радиусом 3 мм из стали ШХ15. Подложка была выполнена из ситалла. Нагрузка на индентор составляла 2,5 Н, число циклов изменялось до 12000. Во второй серии трение осуществлялось по схеме цилиндр — плоскость при возвратно-поступательном скольжении индентора. Индентор представлял собой стеклянный цилиндр, трущийся боковой поверхностью. Подложка была выполнена из монокристалла кремния. Диаметр цилиндра составлял 6, длина — 8 мм, нагрузка на индентор — 3 Н, число циклов испытаний — до 6000.

В обоих случаях алмазоподобные покрытия наносились как на подложку, так и на индентор. Толщина покрытий в первой серии экспериментов составляла 1,5 мкм, а во второй — 0,4 мкм. Скорость скольжения составляла 30 мм/с, длина хода индентора — 13 мм, начальное контактное давление — 600...800 МПа (в обеих сериях одинаковы). Испытания осуществлялись при относительной влажности воздуха 55...60% и температуре 20...22 °С без смазочного материала.

Белорусский государственный университет транспорта. Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 34.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

Морфология дорожек трения после различного числа циклов исследовалась методом АСМ на микроскопе НАНОТОП-203. По АСМ-изображениям вычислялась мультифрактальная размерность поверхности методом горизонтальных сечений (площадь—периметр) [6]. Алгоритм расчета фрактальной размерности был протестирован на симулированных изображениях фрактальных структур с известной размерностью [7]. При вычислении фрактальной размерности учитывалось систематическое отклонение, характерное для метода горизонтальных сечений [8]. Параметр шероховатости поверхностей  $R_a$  вычислялся при помощи программного обеспечения микроскопа.

Применение схемы трения цилиндр — плоскость позволило увеличить ширину дорожки трения до 8 мм. Такой ширины достаточно для достоверного снятия профилограмм дорожки трения с помощью профилометра “Калибр” с компьютерной регистрацией данных. Профилограммы записывались в направлении трения, перпендикулярно ему и под углом  $45^\circ$ . В этом случае для вычисления фрактальной размерности применялся метод Фурье-анализа профиля [9]. Этот метод был протестирован симулированными фрактальными структурами с известной размерностью.

Поскольку геометрические методы расчета фрактальной размерности позволяют определять фрактальные свойства поверхности в масштабных пределах, ограниченных, с одной стороны, размером анализируемого участка, а с другой — пространственным разрешением метода, то использование двух методов фрактального анализа объектов по АСМ-изображениям и по профилограммам поверхности позволило расширить пределы исследуемого масштабного диапазона. В нашем случае этот диапазон был равен 50 нм ... 8 мм, что составляет около пяти десятичных порядков.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На АСМ-изображении (рис. 1, *а*) топография исходного АПП представляет собой структурные образования со средним размером  $5 \times 8$  мкм и сильно развитой поверхностью. При анализе АСМ-изображений установлено, что в масштабном диапазоне, ограниченном разрешением АСМ, исходные АПП фрактальны, и их фрактальная размерность  $D = 2,49 \pm 0,01$ .

АСМ-изображения поверхностей трения для испытаний в обеих сериях при одинаковом пути трения практически идентичны. В ходе экспериментов обнаружено изменение морфологии поверхности трения. Например, на рис. 1, *б* видно, что после  $2 \cdot 10^3$  циклов трения наблюдается повышение плотности структурных образований размером  $1 \dots 3$  мкм. При этом изменение фрактальной размерности АПП имеет асимптотический характер (рис. 2, кривая 1). После  $2 \cdot 10^3$  циклов истирания фрактальная размерность для указанного масштабного диапазона составляет  $2,56 \pm 0,05$ , а после  $10^4$  циклов  $D$  асимптотически приближается к значению  $2,59 \pm 0,05$ .

Отметим, что в процессе трения сильно изменяется  $R_a$ . При продолжительности истирания до  $6 \cdot 10^3$  циклов  $R_a$  возрастает от 150 до 200 нм. Однако при изменении числа циклов от  $6 \cdot 10^3$  до  $8 \cdot 10^3$  происходит резкое снижение  $R_a$  до 100 нм (рис. 2, кривая 3), что на АСМ-изображениях выглядит как сглаживание поверхности (рис. 1, *в*).

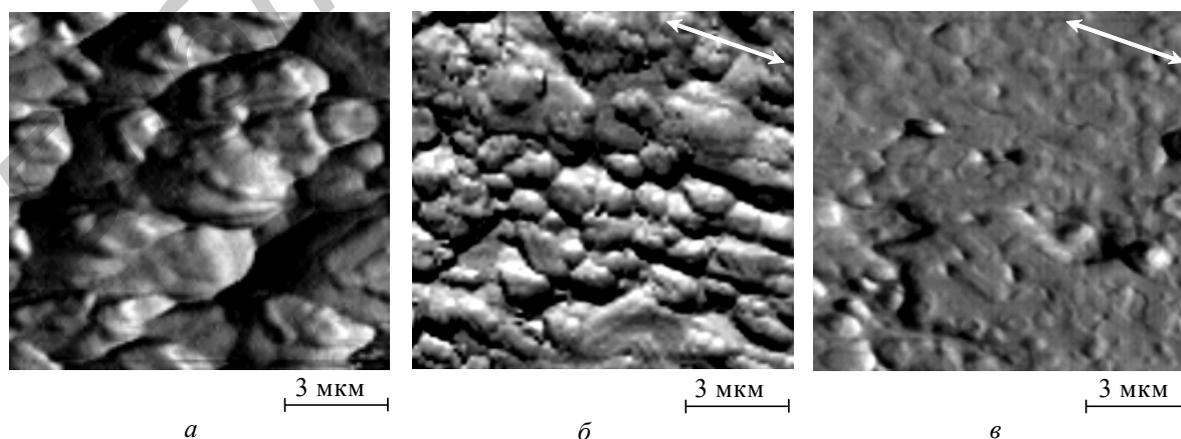


Рис. 1. АСМ-изображения поверхностей АПП. Стрелками обозначено направление скольжения индентора: *а* — исходные АПП; *б* — после  $2 \cdot 10^3$  циклов истирания; *в* — после  $12 \cdot 10^3$  циклов истирания

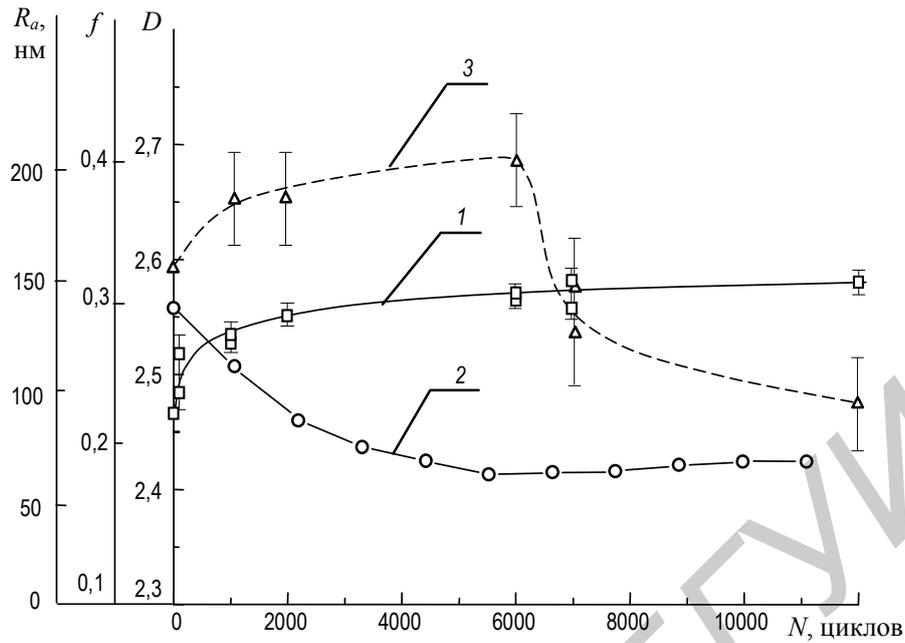


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности  $D$  поверхности АПП в масштабном диапазоне 50 нм...12,5 мкм (1), коэффициента трения  $f$  (2) и параметра шероховатости  $R_a$  (3) от числа циклов истирания  $N$

Зависимость коэффициента трения  $f$  от числа циклов, также как и зависимость фрактальной размерности, стремится к постоянному значению. В начальный момент коэффициент трения  $f = 0,3$ , а после  $4 \cdot 10^3$  циклов  $0,18$ , и в дальнейшем мало изменяется (рис. 2, кривая 2).

Таким образом, характер изменения коэффициента трения и фрактальной размерности носит асимптотический характер. Коэффициент трения с увеличением числа циклов истирания уменьшается, а фрактальная размерность увеличивается и становится равной  $2,59 \pm 0,05$ . Такой характер изменения фрактальной размерности, по нашему мнению, свидетельствует о протекании в зоне трения неравновесных трибохимических превращений, приводящих к формированию морфологических фрактальных структур, в значительной степени определяющих коэффициент трения. Такими структурами могут являться графизированные области, образующиеся на пятнах фактического контакта [5].

По сложному характеру изменения  $R_a$  поверхности АПП от количества циклов истирания  $N$  (рис. 2, кривая 3) трудно установить зависимость между этим параметром и коэффициентом трения. Таким образом, можно предположить, что при трении самоподобных поверхностей основное влияние на коэффициент трения оказывают их фрактальные свойства. Подобная гипотеза, основанная на теоретических моделях, была предложена в работе [4].

При изучении профилограмм исходного покрытия и дорожек трения методом Фурье-анализа установлено, что поверхность является фрактальной только в ограниченном масштабном диапазоне. На графике Фурье-спектра мощности шероховатости профиля исходного АПП (рис. 3, а) имеется характерный перелом линейной зависимости логарифма мощности шероховатости  $s(k)$  от логарифма пространственной частоты  $k$  при значениях периода шероховатости  $\lambda \approx 100$  мкм. Коэффициент наклона правой ветви графика  $H = 0,88 \pm 0,12$ , что соответствует фрактальной размерности  $D = 2,47 \pm 0,05$ . Коэффициент наклона левой ветви графика  $H = 2,73 \pm 0,1$ , что соответствует размерности  $D = 2,02 \pm 0,05$ . Таким образом, в масштабном диапазоне от 100 мкм и более поверхность является нефрактальной.

С учетом результатов исследования фрактальных свойств АСМ-изображений АПП можно утверждать, что размерность исходных АПП составляет  $D = 2,47...2,49$  в масштабном диапазоне от 50 до 100 мкм.

Анализ Фурье-спектра мощности шероховатости профилей дорожки трения (рис. 3, б) показал, что поверхность трения в масштабном диапазоне от 30...50 мкм и выше является нефрактальной.

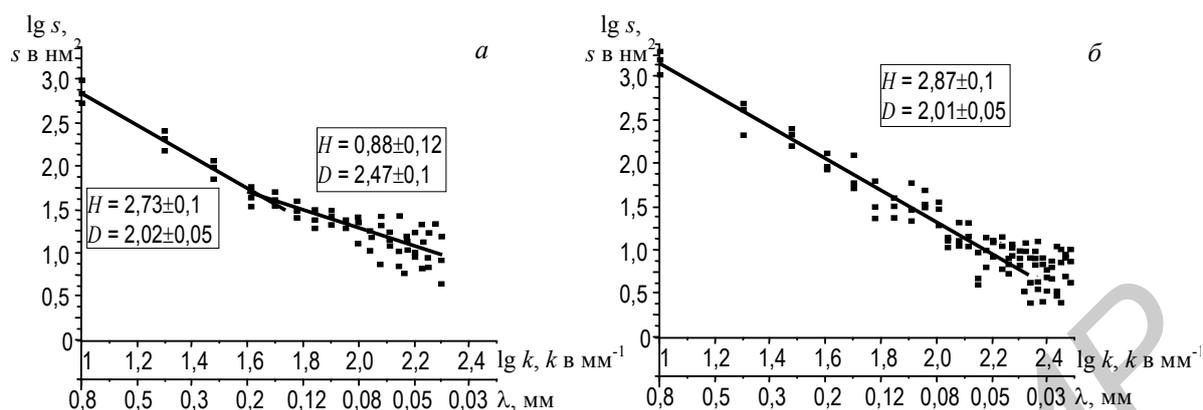


Рис. 3. Усредненные по различным направлениям Фурье-спектры мощности шероховатости профилей: а — исходного АПП; б — дорожки трения АПП после  $6 \cdot 10^3$  циклов испытаний

Такой характер морфологии поверхности трения в микромасштабном диапазоне является одинаковым по всем измеренным направлениям: вдоль, поперек, под углом  $45^\circ$  к направлению трения.

По данным АСМ, профилографирования и оптической микроскопии при использованных условиях триботехнических испытаний для АПП значительных процессов массопереноса и механического разрушения покрытия не обнаружено. Можно утверждать, что причиной формирования самоподобных структур с размерностью  $D = 2,59$  на поверхности АПП в процессе трения являются трибохимические превращения в зоне контакта [5].

**Заключение.** Неравновесные условия нанесения АПП из плазмы импульсного катодно-дугового разряда приводит к формированию покрытий, топография поверхности которых обладает фрактальными свойствами в масштабном диапазоне от 50 нм до 100 мкм. Их фрактальная размерность  $D = 2,48 \pm 0,01$ .

Фрактальность поверхности оказывает существенное влияние на процессы трения, даже в случае трения без смазочного материала, когда влияние адсорбции, в частности смазочного материала, на неупорядоченной поверхности является минимальным.

Фрактальный подход к параметризации топографии позволяет количественно описать неоднородность АПП и протекающие при трении процессы, в отличие от подхода, основанного на усредненных топографических характеристиках, таких как  $R_a$ . Фрактальная топография поверхности трения АПП определяется протекающими в зоне контакта неравновесными трибохимическими превращениями и на стадии установившегося режима трения характеризуется фрактальной размерностью  $D = 2,59$ .

### Обозначения

$D$  — фрактальная размерность;  $f$  — коэффициент трения;  $H$  — коэффициент наклона функции спектра мощности в логарифмических координатах (параметр Херста);  $k$  — пространственная частота шероховатости;  $N$  — количество циклов трения;  $R_a$  — среднее арифметическое отклонение профиля;  $s(k)$  — спектр мощности шероховатости;  $\lambda$  — период шероховатости.

### Литература

1. Кульков С. Н. Применение фрактального подхода для триботехнического анализа // Трение и износ. — 1997 (18), № 6, 761—764
2. Ge Shirong, Chen Guoan, Zhang Xiaoyun. Fractal characterization of wear particle accumulation in the wear process // Wear. — 2001 (251), 1227—1233
3. Беркович И. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. — Самара: СГТУ. — 2000

4. **Бородич Ф. М., Онищенко Д. А.** Фрактальная шероховатость в задачах контакта и трения (простейшие модели) // Трение и износ. — 1993 (14), № 3, 452—460
5. **Ahn H.-S., Chizhik S. A., Dubravin A. M., Kazachenko V. P., Popov A. N.** Application of phase contrast imaging atomic force microscopy to tribofilms on DLC coatings // Wear. — 2001 (249), 617—625
6. **Федер Е.** Фракталы. — М.: Мир. — 1991
7. **Казаченко В. П., Киселевский О. С.** Исследование химической структуры и морфологии поверхности тонких полимерных двухкомпонентных покрытий, полученных электронно-лучевым диспергированием // Сб. докл. 14 Междунар. симп. “Тонкие пленки в оптике и электронике”. Харьков. — 2002, вып. 1, 94—98
8. **Almqvist N.** Fractal analysis of scanning probe microscopy images // Surface Science. — 1996 (355), 221—228
9. **Mandelbrot B. B., Passoja D. E., Pullax A. J.** Fractal character of fracture surfaces of metals // Nature. — 1984 (308), 721—722

*Поступила в редакцию 23.02.06.*

Kiselevskii O. S. and Kazachenko V. P. **Fractal analysis of friction surface of diamond-like coatings.**

It has been found that morphological surface structures of diamond-like coatings are self-similar within the scale range 50 nm ÷ 100 µm. The fractal dimension of the coatings is 2.48±0.01. An asymptotical dependence of the fractal dimension of the surface and the friction coefficient of the coatings on the number of friction cycles has been obtained. It results from the formation of non-equilibrium morphological structures in the friction zone.

**Keywords:** friction, surface morphology, diamond-like coatings, fractal dimension.