

ФРАКТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ТОПОГРАФИИ И ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ*, Д. А. НОВИКОВ*, А. С. ГУСЕВ,
В. Л. ЛЯСКОВСКИЙ****

**Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: s.zolotarevskiy@vniims.ru*

*** Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических
измерений, Москва, Россия*

Отмечены широкие возможности и полезность фрактальных методов при дискриминации измеренных профилей различных поверхностей и построении функциональных моделей взаимодействий с поверхностями. Проведен ареально-масштабный анализ при изучении адгезионных процессов: термического распыления адгезионного покрытия, бактериальной адгезии и науглероживания.

Ключевые слова: *фрактальные методы, ареально-масштабный анализ, функциональные модели взаимодействий.*

The ample opportunities of fractal methods for discrimination of the profiles measured on various surfaces and at construction of functional models of interactions with surfaces are shown. The areal-scale analysis is carried out at the study of adhesion processes: the thermal spray of adhesive coating, bacterial adhesion and carbonization.

Key words: *fractal methods, areal-scale analysis, functional models of interactions.*

Фрактальные методы доказали широкие возможности дискриминации профилей различных поверхностей, а также необходимость их применения при построении функциональных моделей взаимодействий с поверхностями. Существует много путей фрактального анализа профилей [1]. Фрактальные параметры используют информацию о высотных и интервальных характеристиках поверхности, преобразуя их в гибридные параметры, а профили и поверхности непрерывны, но нигде не дифференцируемы. Они не образуют плавных кривых, но скорее могут быть описаны как неровные (зазубренные) или нерегулярные, обладают признаками, повторяющимися в разных масштабах и самоподобными по размеру во всех диапазонах.

Можно с уверенностью утверждать, что во многих случаях геометрические характеристики и параметры профилей и поверхностей легче описываются методами фрактальной геометрии, чем эвклидовой.

Фракталы обладают геометрическими свойствами, изменяющимися по мере изменения масштаба (шкалы, размера). Радиус вершины и впадины, наклон поверхности, длина профиля и площадь поверхности – все меняется в зависимости от масштаба при наблюдениях и вычислениях. Это значит, что длина профиля зависит от масштаба. Данные методы могут быть эффективно использованы при моделировании явлений, связанных с шероховатостью и видом поверхности. Отсутствие единственности (постоянства) длины является основой линейного анализа.

Фракталы часто характеризуются фракционным (фрактальным) размером, который является мерой сложности профиля поверхности, поэтому фрактальный размер линии может быть больше единицы или равен ей и меньше двух, а фрактальный размер поверхности больше или равен двум, но меньше, чем три. Для математических фрактальных сооружений характеристика с помощью подобного размера может оказаться нечувствительной к масштабу [2]. Однако большинство интересных с инженерной точки зрения поверхностей – гладкие при существенно крупном масштабе, и фрактальный размер будет зависеть от него.

Для адаптации фрактального анализа к «инженерным» профилям и поверхностям используются два подхода. Один из них трактует профили как «самосродственные», т. е. они описываются зависящей от масштаба экспонентой [1]. При другом подходе масштабы делятся на участки. Например, большинство поверхностей являются шероховатыми (необработанными) при малых масштабах, но гладкими при больших. Поэтому гладко-шероховатый кроссоверный (SRC-) масштаб (или кроссоверная шкала) может быть использован при определении границы между шероховатостью (описываемой фрактальной геометрией) и гладкостью (описываемой эвклидовой геометрией). В необработанной (шероховатой) части поверхности фрактальный размер может быть использован для характеристики шероховатости, однако более полезными могут оказаться относительные длины и площади при определенных масштабах, применяющиеся для определения фрактального размера. Здесь SRC определяется как масштаб, в котором относительные длины или площади превышают определенный порог.

Линейные фрактальные методы. Фрактальный размер и линейно-масштабная фрактальная совокупность определяются по наклону графика в двойном логарифмическом масштабе, связывающем относительные длины и масштаб [4]. Относительные длины – рассчитываемые, вычисляемые из серии виртуальных (с мозаичным размещением окон на экране дисплея) экспериментов, разделенных номинальными длинами (рис. 1). Номинальной длиной называется длина прямой линии (длина профиля), используемая при вычислении длины, проецируемой на ее начало. В рассматриваемом эксперименте длина профиля в определенном масштабе вычисляется пошагово вдоль измеряемого профиля и отрезками линии длиной, равной масштабу. Эксперимент последовательно повторяется при прогрессивно изменяющихся длинах, в результате чего выстраивается график: по осям ординат и абсцисс – логарифмы относительной длины и соответствующего масштаба для определения относительной длины, соответственно.

С целью подтверждения состоятельности оценки длины отрезков линии между измеряемыми отрезками использована линейная интерполяция. Наклон кривой на рис. 1 определен в наиболее подходящем диапазоне изменения масштабов, видим по наклону графика, где график почти линейен. Мультиплицированный наклон –1000 представляет собой параметр линейной фрактальной сложности

$$Rlfc = -1000 (\text{slope}).$$

Единица за вычетом наклона графика, являющаяся отрицательным числом, служит фрактальным размером

$$Dls = 1 - (\text{slope}).$$

В то время как наклон графика обычно отрицателен или равен нулю, при наличии периодических структур на поверхности могут возникнуть неоднозначности (зубчатость, ступенчатость, неровности) в маломасштабных частях графика, причем с положительными

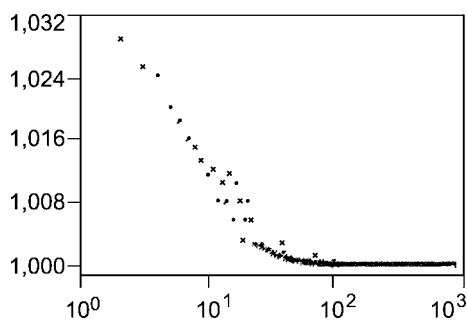


Рис. 1. Линейный отрезок профиля, полученный мозаичным размещением окон на экране дисплея. По осям ординат и абсцисс отложены относительная длина и шкала в миллиметрах, соответственно

наклонами. В этих случаях находятся локальные минимумы в относительных длинах при кратных целому числу длинах волн периодических структур [5]. Наименьший линейный масштаб при таком анализе – интервал дискретизации, а наибольший – длина измеряемого профиля.

Линейный фрактальный анализ получил меньшее распространение, чем ареальный и может быть полезен при исследовании скин-эффекта

в линиях электропередачи, а также при сличении приборов.

Относительная длина при определенных масштабах соотносится с наклоном поверхности φ при данном масштабе. Наклоны поверхности являются функцией масштаба (рис. 2). Параметр относительной длины описывается как

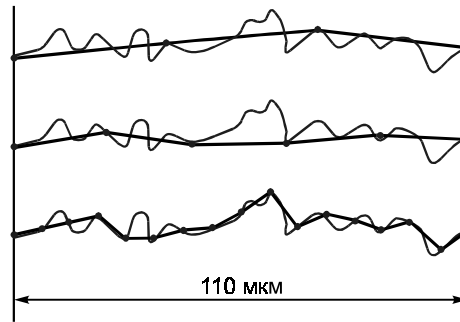


Рис. 2. Наклон профиля поверхности

$$R_{rel} = \sum_i \left(\frac{1}{\cos \varphi} \right) \left(\frac{P_i}{L} \right),$$

где L – суммарная номинальная длина профиля; P_i – номинальная или проектная длина i -ой части номинальной длины.

Относительная длина может быть индикатором части поверхности, пригодной для взаимодействия, а поверхность, полученная в результате ареального измерения, содержит больше топографической информации.

Если анализируемый профиль достаточно длинен, то наблюдается SRC. При больших масштабах относительные длины будут стремиться к минимуму средневзвешенной величины, обратной косинусу усредненного наклона анализируемого профиля. Если профиль выровнен, то должна быть одна минимальная относительная длина. В любом случае наклон при больших шкалах будет равен нулю, следовательно, фрактальный размер равен единице, т. е. минимален для профиля. При больших масштабах относительные длины существенно отклоняются от значения единицы, и достигается SRC. Порог в относительной длине может быть использован для определения наличия в масштабе кроссовера.

Также существуют другие шкалы с кроссоверами, делящими шкалы на участки с разными наклонами (на графике относительная длина – масштаб). Эта возможность является характеристикой масштабночувствительного фрактального анализа.

Ареальный фрактальный анализ. Эти методы во многом схожи с линейными. Как и при профильном анализе, существует много вариантов, которые могут быть использованы для оценки фрактального размера шероховатой (необработанной) ареальной поверхности. В [6] описаны два ареальных фрактальных метода: объемно- и ареально-масштабные.

Объемно-масштабный анализ. Этот метод, также именуемый вариационным, оценивает объем между морфологически замкнутой и разомкнутой огибающими над поверхностью. Объем оценивается с использованием номинально квадратных структурированных элементов, размер которых варьируется и регистрируется в виде изменений объема S_{vs} . Логарифм объема выглядит как график в зависимости от масштаба элементов и длины сторон квадратно-структурированных элементов. С увеличением масштаба увеличивается и объем. Фрактальный размер представляет собой наклон графика $d+2$. Можно построить график с несколькими наклонами в разных диапазонах масштаба, соответствующих масштабам кроссовера, что делает этот тип фрактального анализа масштабно-чувствительным.

Ареально-масштабный анализ. В данном случае оценивается ареал шероховатой поверхности в функции от масштаба. При этом не используются повторяющиеся виртуальные эксперименты с управлением окнами на экране дисплея измеряемой поверхности с треугольниками, площади которых отображают масштаб анализа. При этом объектом управления является размещение окон на экране в зависимости от масштаба. Эксперименты повторяются с треугольниками разных размеров до тех пор, пока не будет перекрыт весь диапазон масштабов.

Предельный диапазон ареальных масштабов, потенциально пригодных при проведении ареально-масштабного анализа измеряемой поверхности, простирается от наименьших масштабов, составляющих половину стороны квадрата интервала дискретизации, до наибольших, определяющих половину участка, измеряемого с применением больших масштабов. Это представляет собой измерение, при котором охвачен приблизительно квадрат с равными интервалами дискретизации в каждом направлении.

Для обеспечения постоянства площадей треугольников используется линейная интерполяция между измеряемыми вершинами (высотами). Относительная поверхность S_{rel} представляет собой вычисленную поверхность, деленную на номинальную или проектируемую поверхность. Следовательно, минимальная относительная поверхность равна

единице. Так же, как и относительная длина, она служит индикатором наклона поверхности.

Поверхностно-масштабный график связывает относительную поверхность с логарифмом масштаба. Наклон этого графика считается поверхностно-масштабной фрактальной сложностью

$$S_{afc} = -1000 \text{ (slope)}.$$

Диапазон масштабов, в котором может быть определен наклон, может быть также полезен при дискриминации поверхностей и понимании процесса формирования текстуры поверхности и ее влияния на поведение поверхности. Фрактальный размер определяется по формуле

$$D_{as} = 2 - 2 \text{ (slope)}.$$

Наклоны ареально-масштабных (поверхностно-масштабных) графиков при этих вычислениях оказываются отрицательными. Вычисленные фрактальные размеры больше или равны двум, но меньше трех.

Эти методы являются масштабно-чувствительными фрактального анализа, доказывающими, что реальные поверхности не могут быть охарактеризованы одиночным фрактальным размером. Когда анализируемый участок достаточно велик, мы имеем дело с SRC. При больших масштабах относительные площади стремятся к взвешенному усредненному значению, обратному косинусу углов наклона невыровненной поверхности согласно (1), а S_{rel} является одним из крупных масштабов, если измеренная поверхность достаточно велика и надлежащим образом выровнена. В любом случае наклон относительного ареально-масштабного (площадочно-масштабного) графика будет равен нулю при условии достаточно больших масштабов при наличии существенного анализируемого участка. Следовательно, фрактальный размер стремится при больших размерах к числу 2, именуемому эвклидовым размером.

Ареально-масштабный анализ во многих приложениях имеет четкую физическую интерпретацию. Многие виды взаимодействия с поверхностями зависят от размера площади (ареала), доступной для взаимодействия и находящейся под наклоном к поверхности. Относительная площадь может быть использована для характеристики поверхностей способом, непосредственно относящимся к функционированию при данных видах взаимодействия.

Например, уравнения теплового, массового обменов, а также обмена зарядами, содержат термины, относящиеся к площади участка или

плотности материала. Поскольку ареал поверхности, характеризующей шероховатостью, зависит от выбранного масштаба или методики расчета, для использования рассчитанной или измеренной площадки шероховатой поверхности при расчетах вышеуказанных обменов должен быть известен подходящий для обменного взаимодействия масштаб.

Ареально-масштабный анализ применим и к изучению адгезионных процессов: термического распыления адгезионного покрытия [7], бактериальной адгезии [8] и науглероживания [9], а также в фармацевтике и при микроизносе зубов [10]. Этот анализ может быть также полезен при демонстрации эффектов фильтрации путем сравнения относительных площадей как результатов измерений с фильтрацией при других масштабах.

Сравнение профильной и ареальной характеристик. Наибольшее различие между профильными и ареальными методами заключено в используемых способах фильтрации. Профиль, полученный на SL -или SF -поверхностях, математически неэквивалентен профилю, проанализированному в соответствии со специализированными стандартами. В последних используется профильный фильтр (ортогональный к направлению обработки), а во втором случае применяется ареальный, продуцирующий совсем другие результаты даже при идентичных фильтрах (например, гауссовом), а также отличающуюся длину волны отсечки (или гнездовой индекс).

Для минимизации различий между этими методами следует:
ориентацию прямоугольной части поверхности, подлежащей измерению, проводить по направлению укладки поверхности;
гауссов фильтр использовать при рекомендуемых в таблице согласованных значениях;

применять другие согласованные в профильных стандартах значения (например, радиус наконечника щупа, выборочный интервал и т. д.), а длина в направлении движения щупа над прямоугольной частью поверхности должна в пять раз превышать длину волны отсечки.

Можно использовать только те ареальные параметры, что имеют прямой профильный эквивалент для сравнения (например, R_q и S_q).

К сожалению, параметр Str не имеет профильного эквивалента. Ареальные параметры текстуры поверхности, характеризующие ее экстремумы (например, S_p), стремятся не иметь большие значения измеряемых величин, чем их профильные эквиваленты, так как вершины и впадины на измеряемом профиле почти всегда достигают лишь торцов на вершинах, а впадины не имеют истинных экстремумов.

Рекомендованные согласованные значения для использования гауссова фильтра

λ_c , мм	λ_c , мм	λ_c / λ_c , мкм	r_{gmax} , мкм	Максимальный шаг дискретизации, мкм
0,08	2,5	30	2	0,5
0,25	2,5	100	2	0,5
0,8	2,5	300	2	0,5
2,5	8	300	5	1,5
8	25	300	10	5

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.552.11.7056) с применением оборудования Центра коллективного пользования ВНИИОФИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Brown C.A., Savary G.** Describing ground surface texture using contact profilometry and fractal analysis //Wear. 1991. V. 141. P. 211 – 226.
2. **Brown C. A., Johnsen W. A., Butland R. M.** Scale-sensitive fractal analysis of turned surfaces //Ann. CIRP. 1996. V. 45. P. 515 – 518.
3. **Scott R. S. e. a.** Dental microwear texture analysis // Hum. Evol. 2006. V. 51. P. 339 – 349.
4. **Malburg M.** A fractal-based comparison of surface profiling instrumentation // Proc ASPE. 1997. P. 36 – 41.
5. **Brown C. A., Siegmann S.** Fundamental scales of adhesion and areascale fractal analysis //Int. J. Mach. Tools Manufac. 2001. V. 41. P. 1927 – 1933.
6. **ISO/DIS 25178:2008.** Geometrical product specification (GPS) –Surface texture: Areal – Pt. 6: Classification of methods for measuring surface texture.
7. **McRae G. A. e. a.** Atomic force microscopy of fractal anodic oxides on Zr-2.5Nb //Appl. Surf. Sci. 2002. V. 191. P. 94 – 105.
8. **Whitehouse D. J. e. a.** Gloss and surface topography //Ann. CIRP. 1994. V. 2. P. 541 – 549.
9. **Shipulski E. M., Brown C. A.** A scale-based model of reflectivity //Fractals. 1994. V. 2. P. 413 – 416.
10. **Emerson I.-V. R. e. a.** Microscale correlation between surface chemistry, texture, and the adhesive strength of Staphylococcus epidermidis //Langmuir. 2006. V. 22. P. 11311 – 11321.

Дата принятия 10.01.2013 г.