

Устройство для измерений фрактальной размерности поверхностного слоя

77-48211/596023

06, июнь 2013

Бавыкин О. Б.

УДК. 681.2

Россия, Москва, Университет машиностроения (МАМИ)

Ray86@list.ru

Введение

Изучение взаимосвязи свойств поверхности и ее геометрических характеристик имеет давнюю историю, однако проблемы качества поверхности продолжают существовать и, более того, приобретают особую актуальность в связи с созданием новых технологий обработки материалов.

Они отчетливо проявляются в области нанотехнологий, для которых шероховатость рассматривается не как вторичная характеристика, являющаяся «откликом» структуры поверхностного слоя на воздействие того или иного физического процесса, а как свойство самой структуры.

Кроме того, форма элементов шероховатости, возникающие на поверхности при воздействии на материал концентрированными потоками энергии, как правило, сильно отличается от традиционного представления шероховатости как о периодическом чередовании выступов и впадин, описываемых в рамках евклидовой геометрии [1].

В связи с этим актуальна задача разработки и применения новых подходов в оценке свойств поверхности. Одним из возможных направлений поиска таких подходов является использование теории фракталов и разработанного на ее основе фрактального анализа, а в качестве оценочного количественного параметра – фрактальной размерности D .

Это подтверждается рядом исследований, обзор которых представлен в работе [2]. Можно предложить следующие зависимости между фрактальной размерностью D и свойствами поверхности (таблица 1).

Таблица 1 - Зависимости фрактальной размерности и свойств поверхности

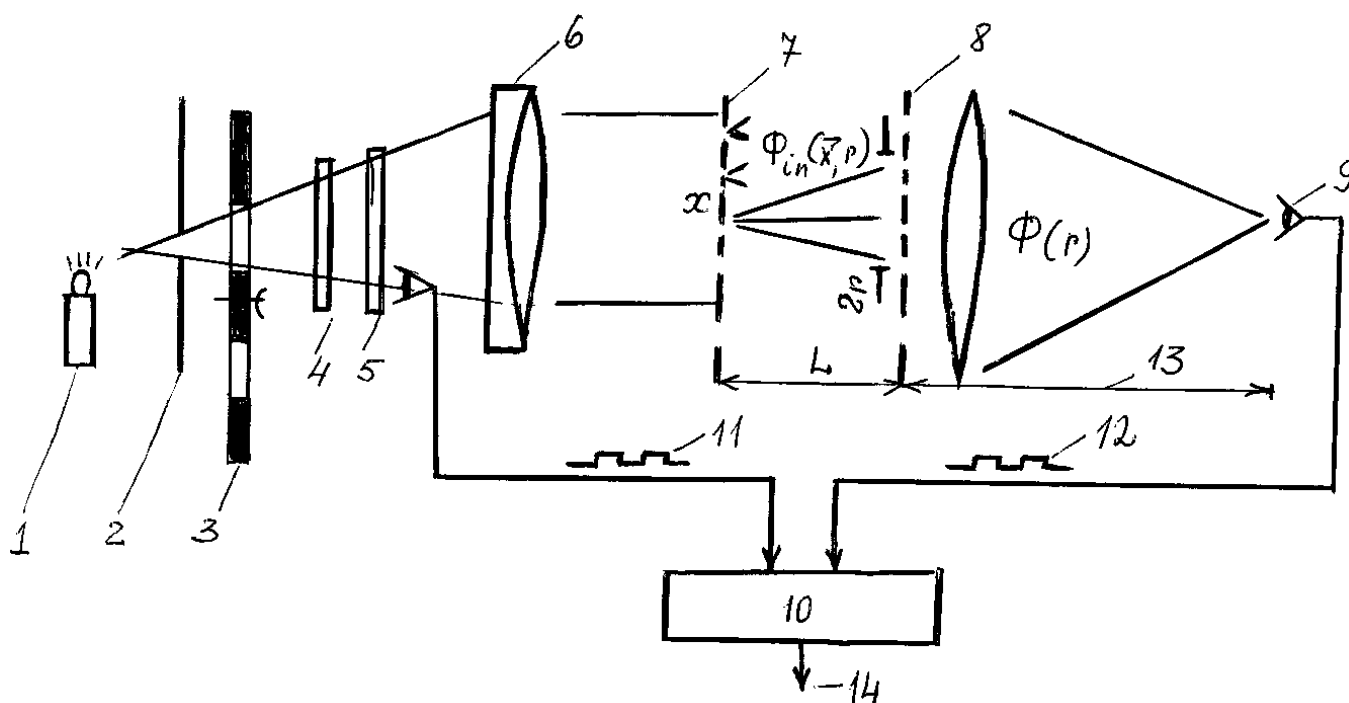
Свойство поверхности		Характер зависимости от параметра D
Триботехнические характеристики (коэффициента трения)		При уменьшении фрактальной размерности значение коэффициента трения увеличивается
Вязкоупругие характеристики	ударная вязкость	С повышением фрактальной размерности наблюдается падение ударной вязкости
	динамический модуль упругости	С ростом фрактальной размерности значение модуля упругости увеличивается
Физико-химические характеристики (степень растравливания поверхности)		При снижении параметра D происходит снижение скорости растравливания поверхности при обработке ее методами размерной электрохимической обработки
Коррозионная стойкость		Увеличение параметра D обработанной поверхности приводит к снижению коррозионной стойкости
Долговечность		Рост значений параметра D способствует повышению долговечности
Качество поверхности		Повышение параметра D характеризует увеличение характеристик Ra , Rz

Однако, для полноценного использования теории фракталов при решении задач описания свойств поверхностного слоя материала необходимо применять средства измерений, обладающие необходимыми возможностями и метрологическими характеристиками.

1 Известные подходы для оценки фрактальной размерности поверхностного слоя

В настоящее время можно выделить три подхода определения фрактальных параметров поверхности:

- применение установки для радиооптических измерений [3] (рисунок 1);
- использование методов сканирующей зондовой микроскопии [4];
- разложение высот неровностей поверхности во временной ряд и последующий их R/S-анализ [5].



- 1 – источник света; 2 – диафрагма; 3 – прерыватель; 4 – светофильтр; 5 – диффузор; 6 – линзы;
 7 и 8 – негативы; 9 – фотозаэлемент; 10 – синхронизированный усилитель;
 11 – эталонный сигнал; 12 – полезный сигнал; 13 – фиксированное расстояние;
 14 – световой поток.

Рисунок 1 - Схема установки для оптического измерения фрактальной размерности

Установка для радиооптических измерений носит экспериментальный характер и пригодна для исследования земных покровов. Она требует адаптации для выполнения фрактального анализа инженерной поверхности и поэтому в данной статье не рассматривается.

Сканирующие зондовые микроскопы отличаются высокой стоимостью, малой площадью исследуемого образца и необходимостью соблюдения определенных требований (например, наличие токопроводности у образца при реализации метода сканирующей туннельной микроскопии), что ограничивает их применение.

При попытке оценить фрактальную размерность через значение показателя Херста (параметр H), который вычисляется в рамках R/S-анализа, возникает проблема выбора направления создания временного ряда. Проведенные в работе [5] исследования показали, что показатель Херста обладает высокой чувствительностью к принципу создания временного ряда (таблица 2). Стоит отметить, что подобное явление имеет место только при исследовании поверхностей, так как происходит преобразование двумерных данных в одномерный временной ряд.

Таблица 2 - Значения показателя Херста для образцов №2 и №3 при различных направлениях создания временного ряда

Номер образца	Значение показателя Херста	
	Вертикальный срез рисунка	Горизонтальный срез рисунка
№2	0,634	0,792
№3	0,703	0,776

Таким образом, известные подходы для оценки фрактальной размерности поверхностного слоя обладают рядом недостатков. Это вызывает ограничение их применения и затруднение реализации.

В качестве универсального метода фрактального анализа поверхности материала, лишенного недостатков и ограничений известных, можно предложить совместное применение модернизированного микроинтерферометра МИИ-4 и компьютерной программы «Nova».

2 Модернизация микроинтерферометра МИИ-4

Оптические измерения шероховатости поверхности имеют ряд преимуществ по сравнению с контактными методами [4]. Наиболее распространенным оптическим средством измерений параметров шероховатости поверхности является микроинтерферометр МИИ-4, разработанный Владимиром Павловичем Линником в 30-х годах прошлого века.

Анализируя конструкцию микроинтерферометра, особенности его настройки, а также получения и обработки результатов измерений можно предложить следующие действия по его модернизации:

- использовать прибор в режиме металлографического микроскопа с установленной ПЗС-матрицей. Получение цифрового изображения исследуемой поверхности и отказ от интерференционного метода позволят исследовать относительно большой по площади образец и получить адекватную измерительную информацию;

- фрактальный анализ ПЗС-данных осуществлять на компьютере в специальном программном обеспечении. Это обеспечит автоматический анализ результатов измерений на ЭВМ, исключит погрешность оператора, а также даст возможность вычислить параметр D . Причем компьютерную обработку можно осуществлять дистанционно путем анализа заранее полученных снимков.

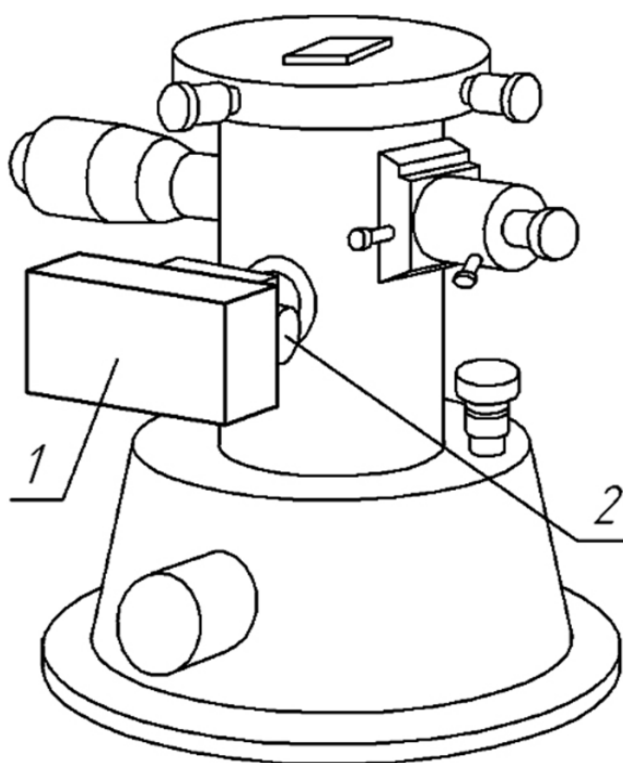
Конструкция микроинтерферометра МИИ-4 предусматривает три варианта установки фотоаппарата с ПЗС-матрицей:

1) в кадровое окно, которое предназначено для размещения пленочного фотоаппарата «Зоркий-4»;

2) на визуальный тубус, который служит для установки винтового окулярного микрометра;

3) на винтовой окулярный микрометр.

В качестве наиболее удачного варианта выбрана установка на окулярный микрометр (рисунок 2). В этом случае достигается максимальное качество полученных снимков, так как оптика микрометра увеличивает исследуемую поверхность в 490 раз. При монтаже цифрового фотоаппарата на другие детали прибора степень увеличения снижается, а также возникают трудности в установке и закреплении фототехники.



1 – фотоаппарат с ПЗС-матрицей; 2 – винтовой окулярный микрометр

Рисунок 2 - Установка фотоаппарата с ПЗС-матрицей на винтовой окулярный микрометр микроинтерферометра МИИ-4

3 Программное обеспечение для фрактального анализа поверхностного слоя

Компьютерная программа «Nova» предназначена для работы со сканирующей зондовой микроскопией и включает в себя несколько модулей, каждый из которых выполняет свою задачу: подготовка к сканированию образца, управление процедурой сканирования, обработка

полученной информации. Имеется удачный опыт применения данного программного продукта в учебном процессе [6].

Стоит отметить широкие возможности программы «Nova» по импорту данных. В таблице 3 представлены типы и форматы загружаемых файлов [7].

Таблица 3 - Типы и форматы файлов, загружаемых в программу «Nova»

Тип данных	Расширения файлов
СЗМ-данные	*.mdt, *.sm2, *.stm, *.wat
Двумерные графические данные	*.bmp, *.gif, *.tif, *.pcx
Одномерные (в виде кодировочной таблицы ASCII) данные	*.txt

Кроме того, работа с некоторыми модулями рассматриваемого программного обеспечения возможна и без наличия подключенного к компьютеру сканирующего зондового микроскопа или нанолaborатории, что делает программу «Nova» гибким инструментом для исследований заранее полученной информации.

Фрактальная обработка данных выполняется в программном модуле Image analysis.

Для определения точности вычисления размерности Хаусдорфа-Безиковича (параметра D) в программе «Nova» были отобраны несколько образцов [3]:

- сгенерированный фрактал;
- изображение со множеством простых геометрических фигур;
- радиолокационное изображение (РЛИ).

Кроме того, была измерена размерность фрактального объекта «Кривая Леви» [3].

Результаты фрактального анализа образцов представлены в таблице 4 (использовался размер окна 1 на 4 пикселя).

Таблица 4 – Результаты вычисления фрактальной размерности для сгенерированных поверхностей

Название объекта	Теоретическое значение параметра D	Подсчитанное значение параметра D	Относительная погрешность δ
Сгенерированный фрактал	D = 1,7	D = 1,74	$\delta=2,3\%$
Изображение со множеством геометрических фигур	D = 2	D = 1,97	$\delta=1,5\%$
Изображение РЛИ	D=1,66	D = 1,68	$\delta=1,2\%$
Кривая Леви	D=1,93	D = 1,96	$\delta=2,3\%$

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что встроенный в программу «Nova» алгоритм вычисления размерности Хаусдорфа-Безиковича обладает высокой точностью при исследовании искусственных фрактальных поверхностей.

В таблице 5 представлены результаты исследования точности заложенного в программе «Nova» алгоритма фрактальной обработки при исследовании стохастических объектов [7]. Оценка точностных характеристик фрактального анализа упомянутого программного продукта проводилась по значениям корреляционной размерности. В качестве «эталонных» значений данного параметра использовались результаты независимого фрактального анализа, выполненного в Институт радиотехники и электроники Российской академии наук (ИРЭ РАН).

Таблица 5 – Результаты вычисления корреляционной размерности

Название образца	Значение корреляционной размерности (ИРЭ РАН)	Значение корреляционной размерности ("Nova")	Относительная погрешность δ
электрохимически обработанная поверхность [8]	D=2,837	D=2,86	$\delta=0,8\%$
поверхность углепластика	D=1,999	D=2,03	$\delta=1,5\%$

Из таблицы 5 видно, что результаты вычисления корреляционной размерности в программе «Nova» обладают высокой сходимостью по отношению к данным независимого исследования.

Кроме того, значение корреляционной размерности образца из углепластика, близкое к топологической размерности, свидетельствуют о слабовыраженных фрактальных свойствах

4 Дальнейшее направление модернизации установки

Дальнейшие направления модернизации микроинтерферометра МИИ-4 следующие:

- использование предметного столика, управляемого от компьютера, для более точного позиционирования объекта измерения;
- замена ПЗС-матрицы на специальную окулярную ПЗС-камеру (рисунок 3). Это повысит качество получаемых снимков поверхностного слоя и позволит вести обработку информации в режиме онлайн;



Рисунок 3 – Окулярная ПЗС-камера

Заключение

1. Зависимости между свойствами поверхности и ее фрактальной размерности свидетельствуют о возможности использования параметра D для адекватного описания характеристик поверхностного слоя.

2. Известные подходы для оценки фрактальной размерности поверхностного слоя обладают рядом недостатков. Это вызывает ограничение их применения и затруднение реализации. В качестве универсального метода фрактального анализа поверхности материала,

лишенного недостатков и ограничений известных, можно предложить установку, на базе модернизированного МИИ-4. Модернизация заключается в комплексном применении ПЗС-матрицы (цифрового фотоаппарата) и специального программного обеспечения (программы «Nova»), позволяющее выполнить фрактальный анализ цифрового изображения поверхности образца.

3. Наиболее удачным размещением ПЗС-матрицы является установка на винтовой окулярный микрометр. В этом случае достигается наилучшее качество получаемых снимков исследуемой поверхности.

4. Поддержка программой "Nova" различных форматов загружаемых файлов открывает широкие возможности по фрактальному анализу разнообразных систем.

5. В результате сопоставительного анализа результатов исследований математических поверхностей выявлено, что встроенный в программный модуль Image analysis алгоритм вычисления размерности Хаусдорфа-Безиковича обладает высокой точностью.

6. Анализ результатов вычисления корреляционных размерностей образцов указывает на высокую сходимость относительно данных, полученных в рамках независимого исследования в ИРЭ РАН.

7. Намечены дальнейшие направления модернизации установки, реализация которых повысит точность позиционирования объекта измерения и улучшит качество получаемых цифровых изображений поверхностного слоя, а также позволит вести обработку информации в режиме онлайн.

Список литературы

1. Потапов А.А. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур / А.А. Потапов, В.В. Булавкин, В.А. Герман, О.Ф. Вячеславова // ЖТФ. 2005. Т. 75, № 5. С. 28 – 45.

2. Бавыкин О.Б. Взаимосвязь свойств поверхности и ее фрактальной размерности / О.Б. Бавыкин, О.Ф. Вячеславова // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 1. № 1 (15). С. 14-18.

3. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп.- М.: Университетская книга, 2005 г.- 848 с.

4. Бавыкин О.Б. Комплексная оценка качества поверхности и эксплуатационных свойств изделий из наноматериалов / О.Б. Бавыкин, О.Ф. Вячеславова // Автомобильная промышленность. 2012. № 3. С. 36-37.

5. Потапов А.А. Применения фрактального анализа для оценки качества инженерной поверхности и динамических свойств ее структуры / А.А. Потапов, О.Ф. Вячеславова,

О.Б. Бавыкин // Механические свойства современных конструкционных материалов: тез. междунар. науч. конф. М., 2012. С. 197-199.

6. Бавыкин О.Б. Применение в образовании специализированных компьютерных программ «NOVA» и «MYTESTX» / О.Б. Бавыкин // IDO Science. 2011. № 1. С. 10-11.

7. Потапов А.А. Исследование возможностей применения компьютерной программы «Nova» для фрактальной обработки информации / А.А. Потапов, О.Ф. Вячеславова, О.Б. Бавыкин // Волновая электроника и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах: материалы междунар. молодежной конф. Воронеж, 2012. С. 119-123.

8. Бавыкин О.Б. Формирование наименьшего значения шероховатости поверхности деталей машин на основе выбора оптимальных режимов размерной электрохимической обработки / О.Б. Бавыкин, О.Ф. Вячеславова // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 2 (10). С. 102-107.