

УДК 621.793

А.А. Потапов¹, О.Б. Бавыкин², О.Ф. Вячеславова²¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия² Московский государственный технический университет «МАМИ», Москва, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЦЕЛЬЮ РЕАЛИЗАЦИИ ФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Разработана концептуальная схема методологии оценки фрактальных свойств обрабатываемых поверхностей. Определение указанных свойств поверхностей осуществляется на основе применения современного цифрового программного обеспечения и методов сканирующей зондовой микроскопии. Фрактальность поверхности оценивается по значениям показателя Херста H , а уровень интенсивности фрактальности – по видоизмененной диаграмме Пирсона.

Ключевые слова: фрактальная размерность, показатель Херста, стохастичность, шероховатость, поверхность, покрытие.

Введение

Технология обработки материалов последних десятилетий (CVD-процессы, электрофизические и электрохимические методы обработки, ионно-плазменные покрытия и т.п.) формируют рабочие поверхности деталей с точностью, значительно отличающейся от той, которая является результатом традиционных (механических) методов обработки и создает свойства фрактальности и стохастичности.

Особую трудность представляют измерение и оценка параметров шероховатости таких поверхностей [1], принимая во внимание, что указанные процедуры необходимо реализовывать, как правило, в субмикро- и нанодиапазонах. Пренебрежение учетом фрактальных и скейлинговых свойств поверхностей приводит к потере весомой информационной составляющей (до 25 %), что, в свою очередь, весьма негативно влияет на эксплуатационные свойства деталей, в частности, при контакте их поверхностей с агрессивными средами.

Разрешить эту проблему возможно использованием теории фракталов для описания процесса формирования поверхностного слоя и последующего его изучения. Однако, такой подход дает результаты лишь в том случае, когда поверхность проявляет фрактальность высокой интенсивности.

В целях проведения анализа уровня "хаотичности" объекта и сохранения необходимой информации об его параметрах, весьма популярным является применения современных компьютерных технологий при решении задач измерений, мониторинга, а также управления технологическими процессами на основе технического, программного и методического обеспечения.

Методика исследования фрактальности поверхностей

1. Выбор инвариантов. Для достижения предложенной цели авторами разработана концептуальная схема методологии оценки уровня интенсивно-

сти фрактальных свойств поверхности на примере размерной электрохимической обработки (РЭХО) – рис. 1. Она включает в себя:

- применение R/S-анализа на базе компьютерной программы "NOVA" [2] и специального программного обеспечения, разработанного в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [3];
- использование диаграммы Пирсона [4];
- оценку функциональных свойств изделия на основе многомерной шкалы [5, 6].

Предложенные решения повышают уровень автоматизации измерения и обработки значений параметров поверхностей.

Первым шагом реализации концепции является выбор показателя фрактальности. Анализируя литературу [7 – 12], можно выделить несколько инвариантов, по значениям которых можно судить о синергетическом характере поведения объекта:

- энтропия Колмогорова-Синяя (КС-энтропия);
- показатель Ляпунова;
- показатель Херста.

2. Применение показателя Херста. В данной статье для достижения поставленной выше цели предлагается использовать R/S-анализ и показатель Херста H , вычисление которого подробно разобрано в [11]. В нашем случае, входными данными для расчета этого показателя служит числовой ряд, составленный из значений высот каждой элементарной точки исследуемой однородной поверхности. Стоит отметить, что при R/S-анализе распределения градиента серого цвета пикселей получают более грубые результаты.

По определенным значениям H можно [7 – 9, 12]:

- определить вид броуновского движения: фрактальное, при $H = 0 \dots 0,5$ и при $H = 0,5 \dots 1$; нефрактальное или вырожденное фрактальное, при $H = 0,5$;
- установить наличие зависимости прошлого от будущего: марковский процесс при $H = 0,5$; немарковский процесс при $H = 0 \dots 0,5$ и при $H = (0,5 \dots 1)$;

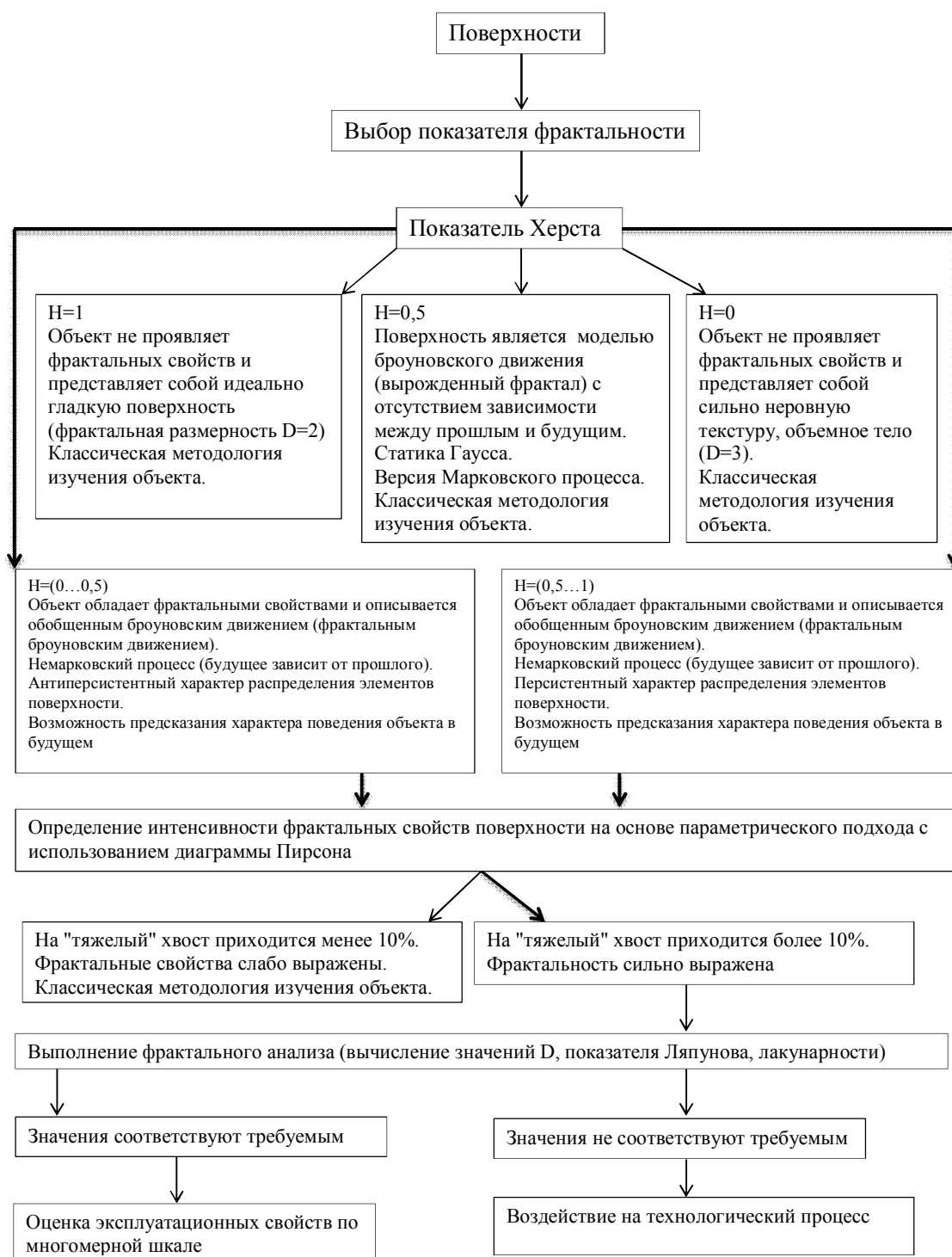


Рис. 1. Концепция оценки уровня интенсивности фрактальных свойств электрохимически обработанных поверхностей

– оценить зависимость прошлого в будущем: персистентная корреляция при $H = 0,5 \dots 1$; антиперсистентная корреляция при $H = 0 \dots 0,5$;

– определить возможность предсказания поведения объекта в будущем: предсказание возможно при $H = 0 \dots 0,5$ и при $H = 0,5 \dots 1$.

Кроме того, если говорить о поверхностях [12], то при:

– $H = 0$ поверхность соответствует очень неровной текстуре;

– $H = 0,5$ распределение элементов поверхности описывается гауссовой статистикой;

– $H = 1$ поверхность гладкая;

– $H = 0 \dots 0,5$ и $H = 0,5 \dots 1$ поверхность фрактальна.

Для автоматизации обработки числового ряда, составленного из параметров поверхности, и определения значений H предлагается использовать готовое программное решение, разработанные в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Таким образом, при $H = 0...0,5$ и при $H = 0,5...1$ исследуемый объект проявляет фрактальные свойства.

3. Применение диаграммы Пирсона. Следующий этап заключается в оценке интенсивности этих свойств, которую можно выполнить по видоизмененной диаграмме Пирсона. Оригинальная диаграмма представлена на рис. 2 [4].

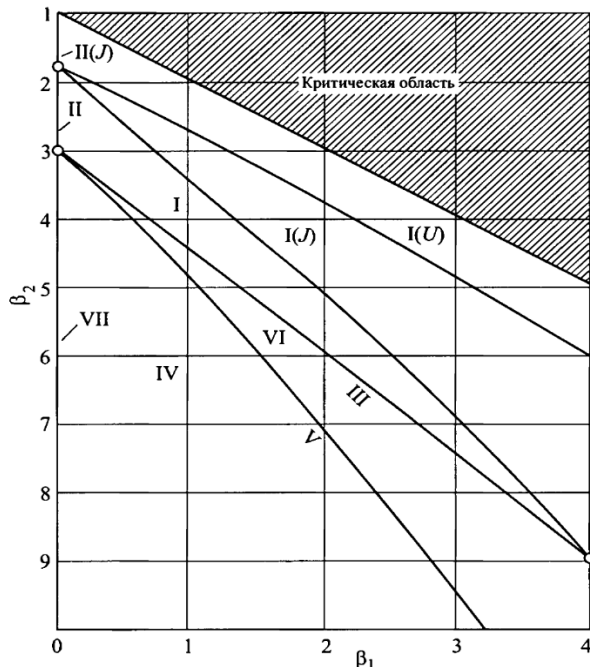


Рис. 2. Диаграмма Пирсона

Данная диаграмма предназначена для параметрического оценивания неизвестных законов распределений случайных величин на основе вычисления параметра $\beta_1 = K_a^2$ и $\beta_2 = K_3 + 3$. При этом: $K_a = \mu_3/\sigma^3$, $K_3 = \mu_4/\sigma^4 - 3$ – коэффициенты асимметрии и эксцесса (μ_3 и μ_4 – третий и четвертый центральные моменты соответственно; σ – среднеквадратичное отклонение).

Для большинства непрерывных распределений вероятностей функция плотности $p = p(x)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению вида (1):

$$\frac{dp}{dx} = \frac{(x+a)p}{b_0 + b_1x + b_2x^2}, \quad (1)$$

где a, b_0, b_1, b_2 – действительные числа.

В зависимости от характера корней уравнения в знаменателе семейство распределений Пирсона составляют 12 типов и нормальное распределение:

– тип 1: частный случай – β_1 -распределение 1-го рода (2):

$$p(x) = k(1+x/a_1)^{m_1}(1-x/a_2)^{m_2}, \quad (2)$$

где $-a_1 \leq x \leq a_2$ и $m_1, m_2 \geq -1$;

– тип 2: (вариант распределения Пирсона типа 1) частный случай – равномерное распределение (3):

$$p(x) = k(1-x^2/a^2)^m, \quad (3)$$

где $-a_1 \leq x \leq a_2$ и $m \geq -1$;

– тип 3: частные случаи – γ -распределение и χ^2 -распределение (4):

$$p(x) = k(1+x/a)^{\mu a} e^{-\mu x}, \quad (4)$$

где $-a_1 \leq x \leq +\infty$, $\mu > 0$, $a > 0$;

– тип 4 (5):

$$p(x) = k(1+x^2/a^2)^{-m} \exp(-\mu a \operatorname{arctg}(x/a)), \quad (5)$$

где $-\infty < x < \infty$, $\mu > 0$, $a > 0$;

– тип 5: сводится преобразованием к типу 3 (6):

$$p(x) = kx^{-q} \exp(-a/x), \quad (6)$$

где $0 \leq x < \infty$, $a > 0$, $q > 1$;

– тип 6: частные случаи – β_1 -распределение 1-го рода, распределение Парето, F-распределение Фишера (7):

$$p(x) = kx^{-q_2}(x-a)^{q_1}, \quad (7)$$

где $a_1 \leq x < \infty$, $q_1 > q_2 - 1$;

– тип 7: частный случай – распределение Стьюдента (8):

$$p(x) = k(1+x^2/a^2)^{-m}, \quad (8)$$

где $-\infty \leq x \leq \infty$ и $m > 1/2$;

– тип 8 (9):

$$p(x) = k(1+x^2/a^2)^{-m}, \quad (9)$$

где $-a \leq x < 0$ $0 \leq m \leq 1$;

– тип 9 (10):

$$p(x) = k(1+x^2/a^2)^m, \quad (10)$$

где $-a \leq x \leq 0$, $m > -1$;

– тип 10: показательное распределение (11):

$$p(x) = k \exp\left(-\frac{x-m}{\sigma}\right), \quad (11)$$

где $m \leq x < \infty$, $\sigma > 0$;

– тип 11: частный случай – Распределение Парето (12):

$$p(x) = kx^{-m}, \quad (12)$$

где $b \leq x < \infty$, $m > 0$;

– тип 12: вариант типа 1 (13):

$$p(x) = ((1+x/a_1)/(1-x/a_2))^m, \quad (13)$$

где $-a_1 \leq x \leq a_2$, $|m| > 1$.

4. Расширение диаграммы Пирсона. В данной работе, в целях использования диаграммы Пирсона для оценки интенсивности фрактальных свойств, предлагается провести ее некоторое расширение. Это расширение основано на результатах исследований обнаружения сверхслабых сигналов в интенсивных помехах негауссовского типа, в которых было выявлено, что всегда в окрестности значения фрактальной размерности D полезной состав-

ляющей присутствует "тяжелый хвост" фрактально-го распределения (паретиана), достигающий стабильной величины порядка 10 – 20% [7 – 9, 12].

Предлагается нанести на область, образованную прямыми β_1 и β_2 , специальные зоны. Эти зоны включают те функции плотности, которые содержат "тяжелые" хвосты, достигающие значения более 10%. Если для исследуемой поверхности значения параметров β_1 и β_2 попадают в такую область, то это указывает на сильное проявление фрактальных свойств. В этом случае для описания процесса формирования поверхностного слоя и последующего его изучения целесообразно использовать теорию фракталов.

В противном случае, даже если значение показателя Херста свидетельствует о присутствии фрактальности, классическая методология изучения объекта лучше описывает его свойства.

5. Будущие экспериментальные исследования. Для автоматизации процесса измерения характеристик поверхности и последующего вычисления параметров β_1 и β_2 предлагается использовать методы сканирующей зондовой микроскопии [2].

Следующим шагом предлагаемой методологии является проведение фрактально-скейлингового анализа, по результатам которого происходит корректировка параметров технологического процесса обработки деталей. В этом случае применение многомерной шкалы может стать необходимым инструментом контроля выполнения заданных эксплуатационных свойств деталей [5, 6].

Заключение

Разработанная методология оценки уровня интенсивности фрактальных свойств поверхности деталей (на примере РЭХО) позволяет оценить наличие фрактальных свойств поверхности по значениям показателя Херста H , а также уровень интенсивности этих свойств по видеоизмененной диаграмме Пирсона.

Определение указанных свойств поверхности осуществляется на основе применения современного программного обеспечения и методов сканирующей зондовой микроскопии. Это позволит повысить точность оценивания параметров, что, безусловно, повлияет на оценку неопределенности измерений, ее количественных характеристик (стандартной и суммарной стандартной ИС), а в конечном итоге – на оценку надежности результатов измерений в целом.

Список литературы

1. Потапов А.А. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур / А.А. Потапов, В.В. Булашкин, В.А. Герман, О.Ф. Вячеславова // *ЖТФ*. – 2005. – Т. 75, № 5. – С. 28-45.
2. Бавыкин О.Б. Применения компьютерных технологий для оценки качества изделий машиностроения / О.Б. Бавыкин, О.Ф. Вячеславова // *Труды международной НТК «Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении (ТМ-2010)»*. – Воронеж, 2010.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.cplire.ru/>.
4. Новейшие методы обработки изображений: монография по гранту РФФИ № 07 – 07 – 07005 / А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман; Под ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
5. Бавыкин О.Б. Многомерная шкала для комплексной оценки качества поверхности и функциональных параметров электрохимически обработанных изделий / О.Б. Бавыкин, О.Ф. Вячеславова // *Труды национального научного симпозиума с межд. участием «Метрология и метрологическое обеспечение 2010»*. – Болгария, 2010.
6. Вячеславова О.Ф. Моделирование процесса формирования структурногеометрических и эксплуатационных свойств поверхности и их оценка на основе многомерной шкалы / О.Ф. Вячеславова, С.А. Зайцев, О.Б. Бавыкин // *Труды семинара «Передовые российские технологии»*. – Мадрид, 2011.
7. Потапов А.А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы в обработке информации (Московская научная школа фрактальных методов в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 1981 – 2011 гг.) / А.А. Потапов // *Сб. науч. тр. “Необратимые процессы в природе и технике”*. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – Вып. IV. – С. 5-121.
8. Потапов А.А. О фрактальных радиосистемах, дробных операторах, скейлинге, и не только... / А.А. Потапов // *Фракталы и дробные операторы (Коллективная монография); с предисловием акад. Ю.В. Гуляева и чл.-корр. РАН С.А. Никитова; под ред. А.Х. Гильмутдинова*. – Казань: Изд-во "Фэн" Академии наук РТ, 2010. – С. 417-472.
9. Потапов А.А. Фрактальные модели и методы на основе скейлинга в фундаментальных и прикладных проблемах современной физики / А.А. Потапов // *Сб. науч. тр. “Необратимые процессы в природе и технике”*. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – Вып. II. – С. 5-107.
10. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение / Г. Шустер. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
11. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
12. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. / А.А. Потапов. – М.: Университетская книга, 2005. – 848 с.

Поступила в редколлегию 23.01.2012

Рецензент: канд. экон. наук, доц. Е.С. Блинкова, Московский государственный технический университет "МАМИ", Москва.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНО ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ З МЕТОЮ РЕАЛІЗАЦІЇ ФРАКТАЛЬНОГО ПІДХОДУ ДО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

О.О. Потапов, О.Б. Бавикін, О.Ф. Вячеславова

Розроблено концептуальна схема методології оцінки фрактальних властивостей оброблених поверхонь. Визначення зазначених властивостей поверхонь здійснюється на основі застосування сучасного цифрового програмного забезпечення і методів скануючої зондової мікроскопії. Фрактальність поверхні оцінюється за значеннями показника Херста H , а рівень інтенсивності фрактальності – по видозміненій діаграмі Пірсона.

Ключові слова: фрактальна розмірність, показник Херста, стохастичність, шорсткість, поверхня, покриття.

AUTOMATION PROCESS OF MEASURING THE PARAMETERS OF ELECTROCHEMICAL TREATED SURFACE IN ORDER TO IMPLEMENT FRACTAL APPROACH TO TECHNOLOGY MANAGEMENT

A.A. Potapov, O.B. Bavykin, O.F. Vyacheslavova

The authors propose a conceptual diagram of a methodology for assessing the fractal properties of the surfaces. Determination of these properties of surfaces is based on the use of modern digital software and methods of scanning probe microscopy. Fractal surface is estimated by the values of Hurst exponent H and the intensity level of fractality - by a modified diagram Pearson.

Keywords: fractal dimension, Hurst index, stochastic, roughness, surface coatings.