

01;05;11

Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур

© А.А. Потапов,¹ В.В. Булавкин,² В.А. Герман,¹ О.Ф. Вячеславова³¹ Институт радиотехники и электроники РАН,
125009 Москва, Россия² Федеральное государственное унитарное предприятие
Научно-производственное объединение „Техномаш“,
127018 Москва, Россия³ Московский государственный технический университет „Московский автомеханический институт“
105839 Москва, Россия
e-mail: potapov@mail.cplire.ru

(Поступило в Редакцию 20 сентября 2004 г.)

Рассмотрен новый подход к исследованию свойств микрорельефа конструкционных материалов, основанный на понятии фрактальных сигнатур. Данный подход был специально разработан и успешно апробирован при решении радиофизических задач обнаружения малоконтрастных целей. В основе метода заложены идеи теории фракталов, а в качестве оценочного параметра используются фрактальные сигнатуры и фрактальные размерности D , тесно связанные не только с топологией объектов, но и с процессами эволюции динамических систем. С помощью полученных экспериментальных результатов доказано существование на уровне микрорельефа обработанной поверхности фрактальных кластеров и определены их количественные характеристики.

Введение

Решение задачи создания поверхностей с определенными свойствами, необходимыми для стабильного функционирования изделий в процессе их эксплуатации, является насущной необходимостью в области технологического управления качеством поверхности таких изделий. Постулатом звучит тезис о том, что качество поверхности оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей и изделий в целом. К числу таких свойств относят коррозионную стойкость, сопротивление износу, а также трибологические и отражательные свойства [1].

Однако, несмотря на неоспоримость и солидный возраст этого постулата, проблемы формирования качества поверхности и, в частности, такой важнейшей его характеристики, как шероховатость, 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 (как в обработке резанием, например), а как свойство самой структуры, тем более что размеры таких слоев сопоставимы с длиной свободного пробега в них электронов.

Качество поверхности традиционно характеризуется шероховатостью (средним арифметическим отклонением профиля R_a , максимальной высотой неровностей R_{max} , средним шагом неровностей профиля S_m и т.п.) и физико-механическими свойствами поверхностного слоя [1]. Шероховатость поверхности рассмат-

ривается как статический объект, имеющий природу „отклика“ на некое воздействие (физический процесс обработки), т.е. фактически как след инструмента на обрабатываемой поверхности, закрепленный в определенных геометрических образах, аппроксимированных простейшими геометрическими телами — сферами, конусами, цилиндрами и т.п. При этом влияние на шероховатость оценивается только через некоторые параметры режима обработки, обычно считающиеся факторами влияния (скорость, глубина резания и т.п.).

Естественно, что, не имея методики оценки топографических свойств поверхности и ее геометрических характеристик, адекватно отражающей реальные процессы формирования поверхностного рельефа, невозможно со сколько-нибудь удовлетворительной достоверностью предсказать поведение этой поверхности в процессе эксплуатации детали или изделия. Особая заинтересованность в такой оценке проявляется в прогнозировании эксплуатационных характеристик таких сложных технических систем, как изделия ракетно-космической техники (РКТ) с повышенными требованиями к надежности и безопасности функционирования.

Все это ставит задачу разработки новых подходов в оценке шероховатости поверхности (по крайней мере, в отношении определенной группы поверхностей). Одним из возможных направлений поиска таких подходов является использование теории фракталов, а в качестве оценочного количественного параметра — фрактальной (дробной) размерности D и фрактальных сигнатур [2]. Данная работа была поставлена с целью проверки этих предположений. Такой подход позволит внести в оценку шероховатости поверхности свойство универсальности.

Классификация элементов рельефа при современных технологиях обработки поверхностей

В связи с интенсивным развитием в последние десятилетия методов обработки концентрированными потоками энергии — КПЭ (лазерной, плазменной, электроэрозионной), а также нанотехнологий (химическая сборка, золь-гель процессы, парофазное осаждение металлов, атомно-слоевая эпитаксия) возникают значительные трудности в описании и оценке шероховатости профильным методом. Форма элементов шероховатости, их распределение на обрабатываемой площади сильно отличаются от традиционного представления о них, сформированного в рамках процесса обработки резанием, как о периодическом чередовании „выступов“ и „впадин“, описываемых в рамках евклидовой геометрии (табл. 1) [1]. Элементы шероховатости, возникающие при взаимодействии материала с потоками энергии, высокими давлениями, высокоскоростными газовыми средами, комбинациями механических, ультразвуковых и т. п. колебаний, весьма специфичны и имеют „странную“ форму — грибообразную, гребешковую, ботиroidальную, форму сплэтов и висперов и т. п. [1,3,4]. Распределение этих элементов на обрабатываемой поверхности не носит периодического характера и имеет различные плотности вероятностей.

В этих случаях представляется весьма затруднительным или совсем невозможным использование для описания шероховатости поверхности классических геометрических параметров, а для оценки топографических свойств поверхности — кривой опорной поверхности Аббота–Файерстоуна [3]. Здесь уместно отметить, что для идеализированной фрактальной шероховатой поверхности предполагается наличие неровностей всех масштабов. В случае модели с фрактальными высотами неровностей неизбежно следует ее недифференцируемость (тем самым исключаются понятия нормали к фронту рассеиваемой волны, лучевой траектории и эффектов геометрической оптики), а для модели с фрактальными наклонами неровностей допускается существование только первой производной. Поэтому для фрактального рельефа наклоны, кривизна и распределение экстремумов не являются, как считалось в большинстве случаев, существенными свойствами поверхностей (более подробно см. [2]).

Новые технологии, использующие воздействие из внешней фазы на всю обрабатываемую поверхность (групповые процессы формирования поверхности), создают кластерные структуры, законы развития которых были частично описаны в работе [5]. Особенности таких процессов диктуют потребность в осмыслении новых подходов в прогнозировании свойств кластерных образований, их количественных параметрических оценок.


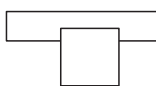
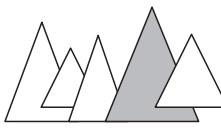
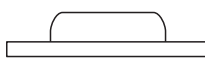
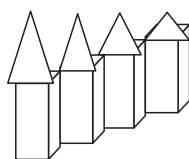

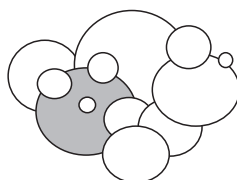
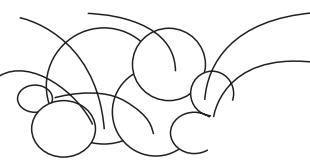
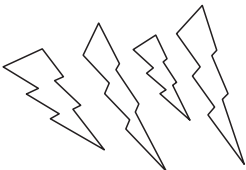

Процессы в материаловедении и радиолокации как примеры синергетической парадигмы открытых физико-технических систем

Плодотворное применение теории фракталов имеет место в области современного материаловедения для решения задачи получения материалов с заданными свойствами [6,7]. При этом теория фракталов органично объединена с представлениями о синергетике как теории о самоорганизующихся структурах. Можно сказать, что теория фракталов служит базой для количественного описания диссипативных структур, формирующихся в условиях, далеких от равновесных состояний. Такой подход позволил выделить в науке о материалах магистральное направление — фрактальное материаловедение, которое предложено и развивается в Институте металлургии и материаловедения РАН (ИМЕТ РАН) [6,7]. Становится возможным установление связей между составом, фрактальной структурой и свойствами материала, что весьма важно при исследовании процесса формирования поверхности, например, в нанотехнологии, где, как уже отмечалось выше, невозможно отделить матричную структуру материала от структуры его поверхностных слоев.

Понимая под динамической системой (ДС) объект или процесс, для которого однозначно определено состояние или совокупность некоторых величин в заданный момент времени и задан детерминированный оператор эволюции, это понятие можно распространить на объекты любой природы. Свойства ДС определяются такими инвариантами, как показатель Ляпунова, фрактальная размерность странного аттрактора, энтропия. Знание этих величин позволяет определить количество независимых переменных и установить конечную меру рассматриваемого явления. В фазовом пространстве систем после затухания переходных процессов можно выделить предельное множество точек, притягивающее фазовые траектории и называемое аттрактором. Существование аттракторов связано со свойствами сжатия фазового объема ДС под действием оператора эволюции.

Притягивающее множество в фазовом пространстве ДС, которое характеризуется режимом установившихся непериодических колебаний, было названо странным аттрактором [8]. Странный аттрактор всегда имеет дробную фрактальную размерность D . Важная особенность хаотического движения — чрезвычайная чувствительность к малым изменениям в начальных условиях. Это означает, что две близко расположенные траектории в фазовом пространстве экспоненциально разбегаются во времени. Количественная оценка скорости разбегания дается в терминах показателей Ляпунова, которые являются полной характеристикой степени сложности хаотического поведения и структуры аттрактора в фазовом пространстве ДС. Самым значимым является максимальный ляпуновский показатель λ_1 , поло-

Таблица 1.

№	Название	Виды элементов рельефа
1	Грибообразный	
2	T-образный	
3	Пики	
4	Сплэты	
5	Ботироидальные	
6	Лунки	
7	Глобулы	
8	Висперы (глобульно-висперный)	
9	Гребни	
10	Муар	

жительность которого свидетельствует о существовании хаоса в ДС. Показательно, что геометрия и динамика странных аттракторов тесно связаны: по показателям Ляпунова можно судить о геометрии аттрактора, а

измеряя фрактальную размерность D , получить сведения о значениях ляпуновских показателей ДС.

Основой исследования физико-химических процессов металлургии, материаловедения и технологических ме-

тодов обработки является термодинамика, позволяющая установить общие закономерности поведения систем из большого числа частиц независимо от специфических особенностей механизма протекающих в них процессов. Состояние термодинамического равновесия характеризуется условием равновесия

$$S(U, V, n_i) = \max; \quad dS = 0, \quad (1)$$

где U — внутренняя энергия, S — энтропия, V — объем, n_i — число молей для компонентов ($i = 1, 2, \dots$).

Из (1) следует, что термодинамическое равновесие соответствует наибольшей степени неупорядоченности, а движущей силой равновесных процессов является стремление системы к минимуму свободной энергии. Однако окружающий мир представляет собой выстроенную в строго иерархической последовательности весьма сложную систему, что противоречит второму закону термодинамики, в соответствии с которым энтропия системы с течением времени увеличивается. Снять это противоречие позволило развитие синергетики, проблематика которой часто обозначается как теория самоорганизации, или теория диссипативных систем, теория открытых систем, теория неравновесных систем, информационная динамика, динамическая теория формообразования и т.п. К основным ее принципам относятся: а) минимум производства энтропии, б) текущее и локальное равновесие, в) мозаичная неравновесная термодинамика, г) наименьшее принуждение, д) подчинение, е) „неравновесность—источник упорядоченности“ (см., например, [7,9–14]).

Эти принципы могут быть распространены как на живую, так и не живую материю, а простейшим эволюционным уравнением является выражение вида

$$\dot{q} = \alpha q, \quad (2)$$

где \dot{q} — скорость образования некоторого вещества, q — его концентрация, α — параметр порядка.

Синергетическим системам свойственна стохастичность, т.е. их временную зависимость нельзя предсказать с абсолютной точностью, поэтому в уравнение (2) необходимо ввести составляющую, учитывающую флуктуации сил $f(t)$,

$$\dot{q} = \alpha q + f(t). \quad (3)$$

Анализируя различия в механизмах формирования шероховатости поверхности физико-химическими методами и обработкой резанием, можно отметить, что в последнем случае шероховатость является „следом“ инструмента на обрабатываемой поверхности, развертываемым последовательно во времени и пространстве. При физико-химических методах обработки инструментом является по сути сама рабочая среда (жидкость, газы, пары металлов и т.д.), элементы которой, активизированные высокими температурой, давлением, различного рода полями, интенсивно взаимодействуют со всей обрабатываемой поверхностью материала почти

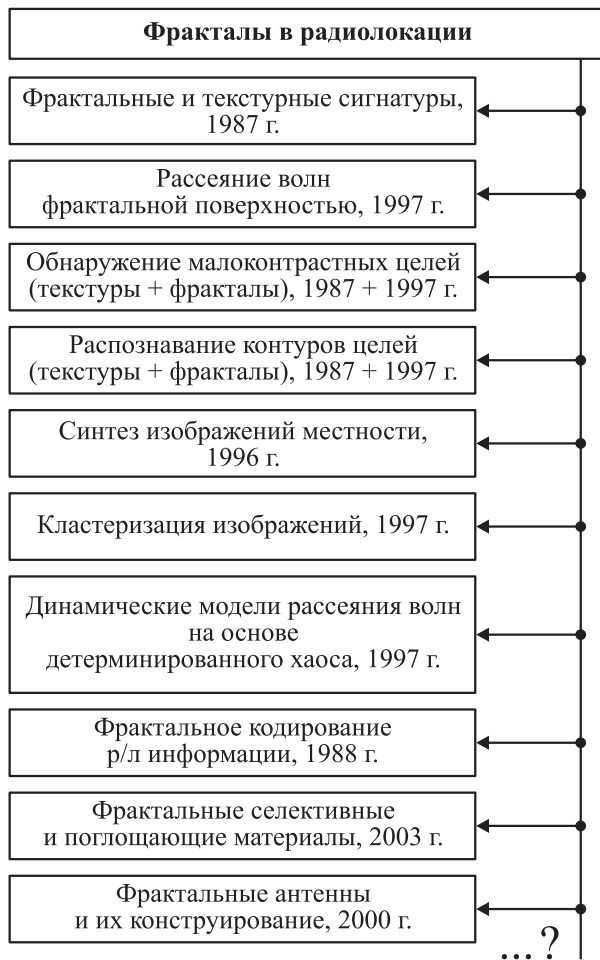
одновременно во множестве точек своего расположения в рабочем пространстве. Это и создает так называемый эффект группового воздействия на обрабатываемую поверхность. Итак, поверхность, сформированную посредством физико-химических методов обработки, можно представить как результат воздействия на материал целой совокупности процессов, обусловленных наложением различного рода активизирующих факторов, и рассматривать ее в качестве синергетической системы.

Обратимся теперь к другой области науки, а именно радиофизике — области физики электромагнитного излучения, имеющей дело с колебаниями и волнами в очень широком диапазоне частот. На базе радиофизики развивались и радиотехнические науки, в частности радиолокация. В последние годы многие страны мира ведут интенсивные работы по уменьшению радиолокационной заметности объектов с помощью перспективных радиопоглощающих материалов, имеющих ничтожно малые коэффициенты отражения (так называемая „стелс-технология“). Так, по данным [15], если к 1980 г. самолеты типа F-15 имели радиолокационную заметность σ около 10 m^2 , то при их дальнейшей модернизации σ удалось снизить до величины $1\text{--}1.5 \text{ m}^2$, а для сверхзвуковых самолетов пятого поколения, таких как F-22, JSF, — до величины 0.3 m^2 . Эти причины требуют принципиально новых подходов к традиционным задачам радиолокации. Классические методы фильтрации позволяют вести оптимальную обработку радиолокационных сигналов от объектов лишь при гауссовых помехах. В действительности помехи почти всегда — негауссовские с тяжелыми хвостами и имеют значительную интенсивность в различных спектральных интервалах. Поэтому в реальных условиях использование классических алгоритмов для фильтрации при малых отношениях сигнал/фон q_0^2 не всегда возможно.

Современные радиолокационные системы в совокупности с каналом зондирования необходимо рассматривать с точки зрения теории сложных неравновесных систем, открытых для потоков энергии, энтропии и информации. Все это и определило развитие в Институте радиотехники и электроники РАН (ИРЭ РАН) новых информационных технологий в радиофизике и радиолокации с использованием текстурных (середина 80-х годов XX века) и фрактальных мер на основе принципов динамических систем (середина 90-х годов XX века). По сути дела развивается новое направление в радиофизике — применение теории динамических систем и фрактальной топологии в задачах повышения информативности радиосистем различного назначения. По результатам этих исследований были введены понятия текстурных и фрактальных сигнатур, а данное научное направление было кратко обозначено как фрактальная радиолокация и фрактальная радиофизика [2].

На схеме 1 показаны основные направления этих исследований и приведены сведения о начале соответствующих работ. В самом общем случае любые

Схема 1. Эскиз развития новых информационных технологий



радиосистемы вместе со средой распространения радиоволн и объектами зондирования естественно отнести к открытым динамическим системам со странными аттракторами и точками бифуркаций, определяющими все особенности радиофизических процессов, протекающих в таком пространственно-временном континууме. Наиболее адекватным языком радиофизики является язык нелинейной динамики, фрактальной топологии и информационно открытых диссипативных систем. Ниже рассмотрим на радиолокационном примере основные понятия фрактального анализа.

К понятию „фрактал“ в радиофизике и радиолокации

Радиолокационное изображение в общем виде можно представить как множество элементов X_k , значения которых пропорциональны эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) k -го элемента разрешения радиолокационной станции (РЛС). На рис. 1, *a* приведено радиолокационное изображение (РЛИ) местности, полученное на длине волны 8.6 mm с вертолета. Рядом на

рис. 1, *b* показано РЛИ того же участка местности, полученное РЛС на длине волны примерно 30 см. Оба изображения являются двумерными с уровнем серого, пропорциональным ЭПР. Предположим, что для каждого РЛИ построена поверхность (рис. 1, *c*) с высотами h , пропорциональными уровням серого. Пусть требуется измерить площадь получившейся поверхности. На РЛИ, соответствующем длине волны 30 см, площадь получится меньше, чем для РЛИ на 8.6 mm, из-за того что с уменьшением длины волны различается больше деталей местности. Зондирующая электромагнитная волна выступает в этом случае как некоторая „измерительная“ линейка. При этом начинает сказываться все более тонкая структура пространственно-временных сигналов, или волновых полей.

Если в нашем распоряжении имеется РЛИ, полученное в коротковолновом диапазоне, то его площадь была бы больше, и т.д. Уменьшая длину волны, будем получать возрастающие значения площадей. Тогда возникает вопрос, а какова в действительности площадь поверхности, с которой получены РЛИ. Если поверхность покрыта простыми объектами, например прямоугольным возвышением (рис. 1, *d*), и размеры этого возвышения гораздо больше длины волны, то площади РЛИ объектов на коротких и длинных волнах будут примерно одинаковыми. Тогда на поставленный вопрос можно было бы ответить, подсчитав число элементов разрешения, покрывающих объект. Площадь S поверхности в этом случае была бы равна

$$S \equiv S(\lambda) = N(\lambda)\delta(\lambda), \quad (4)$$

где $\delta(\lambda)$ — площадь элемента разрешения РЛС; $N(\lambda)$ — число элементов разрешения, необходимых для покрытия объекта; λ — длина волны РЛС; как уже было сказано, для простого объекта (рис. 1, *d*) $S(\lambda) = \text{const}$.

Для РЛИ на рис. 1, *a* и *b* можно построить зависимость $S(\lambda) = f(\lambda)$ и, предположив, что $\delta(\lambda) = K(\lambda)$, где K — известная функция, затем построить зависимость $S(\lambda) = f(\delta)$. Оказывается, что измеренная площадь S поверхности прекрасно описывается формулой

$$S(\lambda) = k\lambda^{-D}. \quad (5)$$

Тогда $\log(S(\lambda)) = \log k - D \log \lambda$ (k и D — константы), и мы можем вычислить параметр D . Зависимость $\log S(\lambda) = f(\log \delta)$, определяющая собой фрактальную сигнатуру РЛИ (рис. 1, *a, b*), показана на рис. 1, *e*. Она характеризует пространственный фрактальный кепстр изображения (данное понятие введено в 1997 г. [2]). Дробный параметр D называется размерностью Хаусдорфа–Безиковича, или фрактальной размерностью. Для РЛИ объектов, имеющих простой геометрический вид (прямоугольники, круги, гладкие кривые), эта размерность совпадает с топологической, т.е. равна значению 2 для двумерных РЛИ и определяется угловым коэффициентом прямых (5) в логарифмических координатах. Однако значение D для большинства

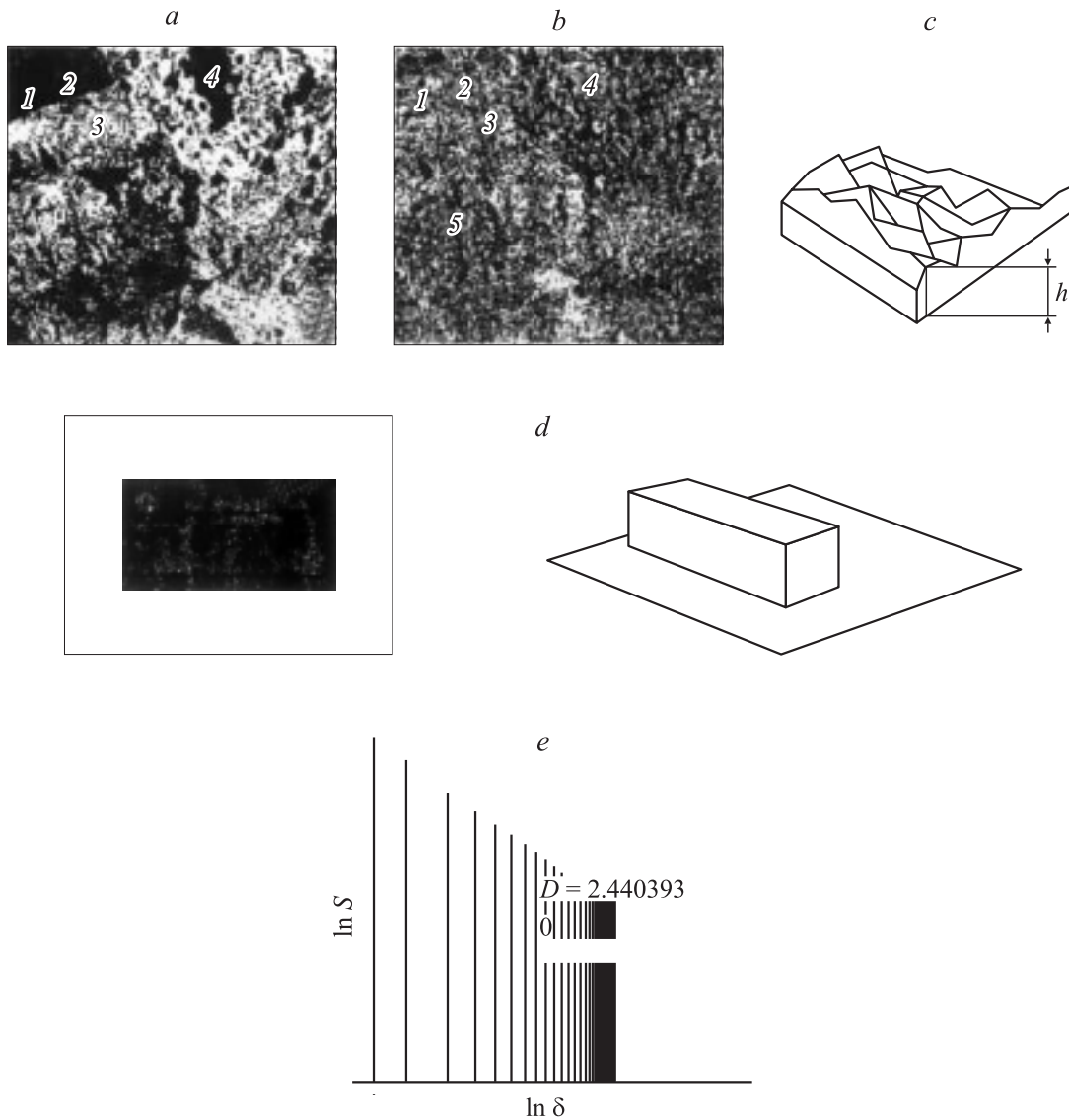


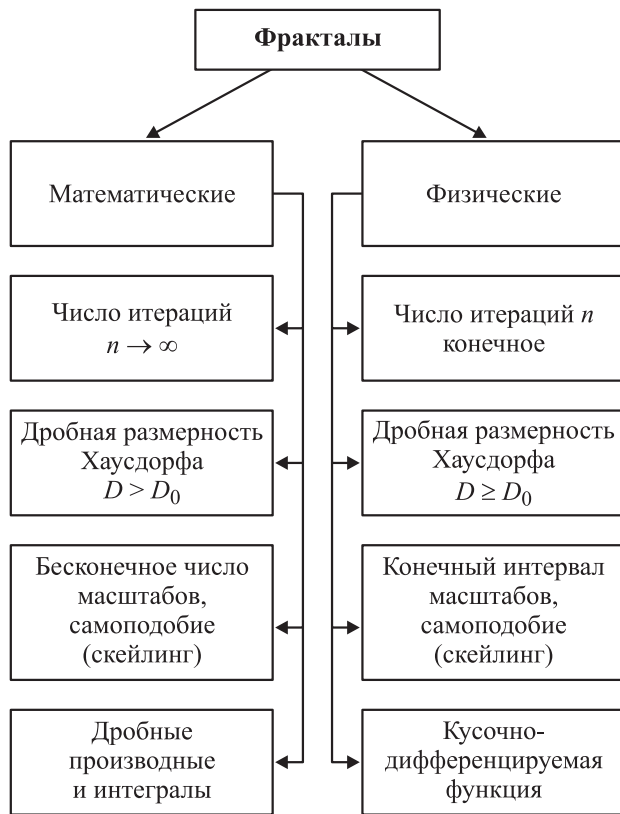
Рис. 1. Примеры, объясняющие сущность фрактальной обработки (a-d) и фрактальный пространственный кепстр РЛИ (e).

изображений реальных покровов и метеорологических образований оказывается большим, чем топологическая размерность 2, тем самым подчеркивая и выделяя их сложность и хаотичность.

Между теорией фракталов, опирающейся на геометрию и теорию размерности, и теорией динамического хаоса существует тесная связь. Теория фракталов рассматривает вместо целочисленных мер дробные и базируется на новых количественных показателях в виде дробных размерностей D и соответствующих сигнатур. Фрактальные дробные размерности и сигнатуры D не только характеризуют топологию объектов, но и отражают процессы эволюции динамических систем и связаны с их свойствами. Теория фракталов и нелинейность составляют геометрию хаоса. По-видимому, фракталы — это не только язык хаоса, но и язык природы. По своему содержанию контуры всех природ-

ных объектов суть динамические процессы, внезапно застывшие в физических формах и объединяющие в себе устойчивость и хаос. В природе во множестве ситуаций Порядок и Хаос — основные взаимозависимые тенденции, особенно в эволюции сложных открытых ДС. При этом бифуркации ассоциируются с катастрофическими изменениями или конфликтами. Наличие нелинейности означает возможность неожиданных изменений течения процесса. Между точками бифуркаций открытая система подчиняется детерминистическим законам, а в окрестности таких точек только флуктуации определяют поведение системы. Поэтому столь велика роль флуктуаций в окрестностях точек бифуркации. Хаотические процессы на микроуровне могут „взлететь“ на макроуровень и влиять на всю систему. При этом способность открытой системы находиться в режиме детерминированного хаоса стимулирует информационные процессы вне

Схема 2. Классификация и морфология фрактальных множеств (сигнатур)



зависимости от начальных условий. Это относится в общем случае к любым техническим, экологическим, биологическим, экономическим и социальным сложным открытым системам [16].

Можно отметить, что одним из важнейших вопросов фрактальной геометрии является связь фракталов и текстур. Полученные результаты в данном научном направлении широко представлены в многочисленных работах (см., например, [2,17–34] и библиографические ссылки в них). На схеме 2 показана специально разработанная в [27] для практических задач радиолокации и радиофизики классификация математических и физических фракталов. Для замкнутости изложения есть смысл привести также введенные в [27] определения. Формализованное математическое определение фрактала: фрактал — это функциональное отображение, или множество, получаемое бесконечным рекурсивным процессом и имеющее следующие свойства: 1) самоподобие, или масштабную инвариантность (бесконечный скейлинг), т.е. фракталы на малых масштабах выглядят в среднем так же, как и на больших; 2) их размерность (называемую размерностью Хаусдорфа), дробную и строго больше топологической размерности; 3) недифференцируемость и оперирование дробными производными и интегралами. Физическое определение фрактала следующее: фракталы — это геометрические объекты (линии, поверхности, тела),

имеющие сильно изрезанную структуру и обладающие свойством самоподобия в ограниченном масштабе. Отметим, что D_0 — топологическая размерность пространства, в котором рассматривается фрактал с дробной размерностью D .

Термодинамическая неравновесность процессов обработки и фрактальность формируемых ими поверхностей

Ко взгляду на процесс формирования рельефа поверхности (в частности, шероховатости), описываемой в рамках фрактального анализа, можно прийти через рассмотрение природы процессов, лежащих в основе современных технологических методов обработки. Спектр этих методов весьма широк по своим конечным целям и по тем физическим основам, которые в них заложены. Это и не удивительно: интенсивное развитие машиностроения и приборостроения характеризуется созданием уникальных по габаритам машин и устройств, резким усложнением конструкций, усложнением формы и миниатюризацией размеров, ужесточением требований к качеству поверхностного слоя деталей, существенным повышением требований к надежности изделий.

В контексте намеченных подходов в оценке механизмов формирования шероховатости поверхности можно все разнообразие физико-химических методов обработки подразделить (в зависимости от целей их применения) на три основных класса (табл. 2): класс А — методы, при которых формирование поверхности осуществляется за счет процессов съема поверхностных слоев материала при неизменной матрице (основной материал); класс В — методы, формирующие свойства поверхности за счет процессов нанесения (осаждения) материала на матрицу, его частичной диффузии в поверхностные слои и изменения свойств поверхности при неизменной матрице; класс С — методы, позволяющие формировать структуры, выполняющие функции как матрицы, так и поверхности одновременно за счет сверхминиатюрных размеров таких структур (нанотехнологии).

Анализируя физическую природу методов обработки, относящихся к первому и второму классам, можно прийти к выводу, что многие из них (электроэрозионная, электронно-лучевая, лазерная обработки, микродуговое окисление, газоплазменное, лазерное, ионное и т.п. упрочнение) характеризуются некоторыми общими процессами, в частности — плазменными, т.е. процессами рождения и гибели заряженных частиц, происходящих в определенной области пространства и образующих газ, состоящий из носителей заряда. Уже ограниченность в пространстве означает, строго говоря, термодинамическую неравновесность плазменной среды [35]. Неравновесность плазменной среды проявляется в протекании диссипативных волновых процессов — столкновительных либо бесстолкновительных, поглощении волн

Таблица 2. Условная классификация физико-химических методов обработки

Класс А	Класс В	Класс С
Электроэрозионная размерная обработка	Металлизация жидкостными методами (химическими и электрохимическими)	Химическая сборка
Лазерная обработка	Металлизация распылением расплавленного металла	Золь-гель процессы
Электронно-лучевая обработка	Плазменное напыление	Атомно-слоевая эпитаксия
Ультразвуковая обработка	Физические конденсационные методы	CVD-процессы
Электрохимическая размерная обработка	Микродуговое оксидирование	Химические синтезы в сочетании с различными физическими процессами
Плазменная резка	Электроэрозионный синтез покрытий (упрочнение)	Лазерная обработка пленочных элементов
Механическая обработка с наложением высокочастотных колебаний	Газоплазменное упрочнение	Абразивная обработка свободным абразивом в специальных средах
Комбинированные методы	Лазерное, ионное, электронное упрочнение
Лазерное скрайбирование	Ионная имплантация	

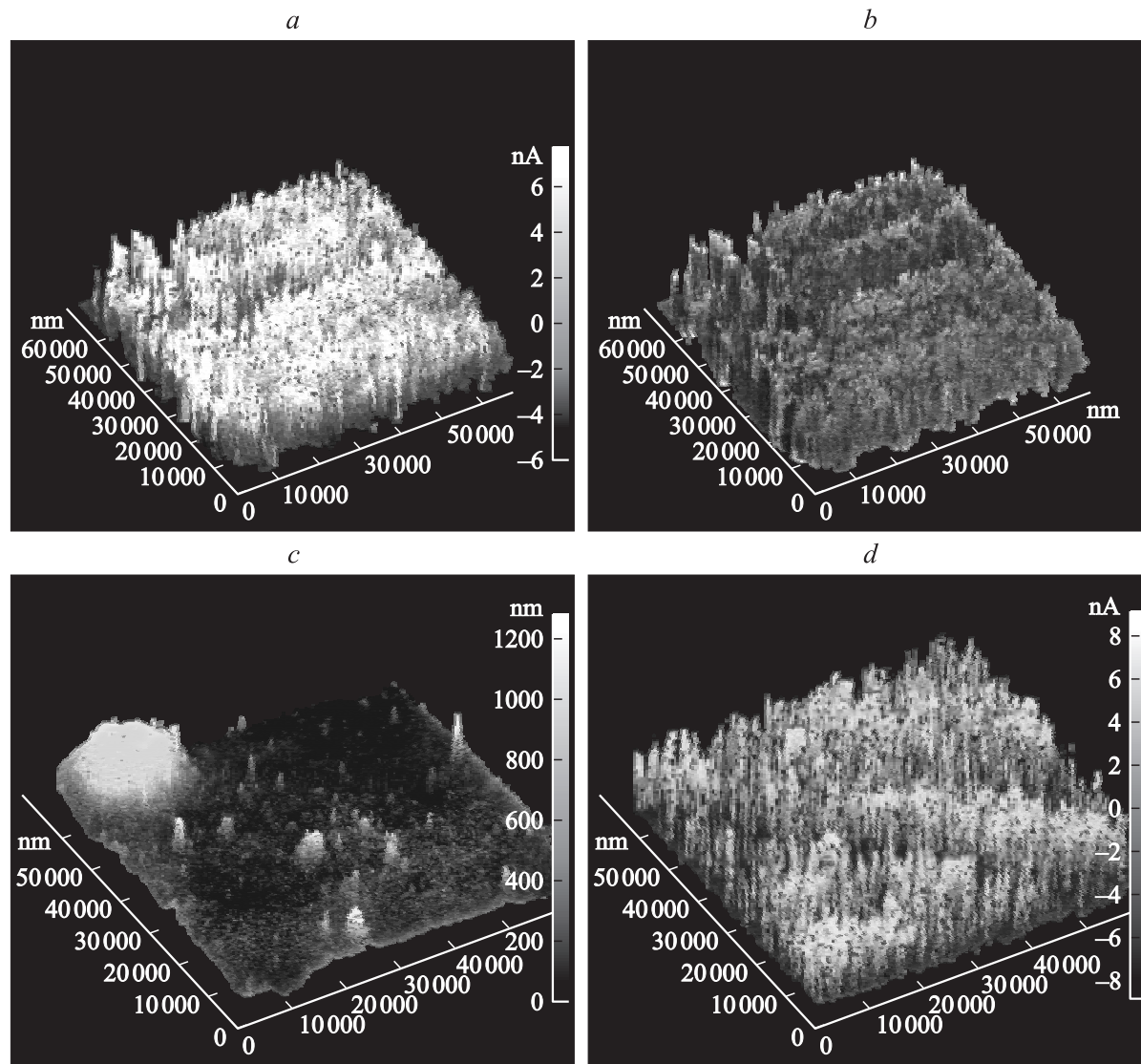


Рис. 2. SPM (3D)-изображения поверхности образцов, обработанных (a, b, e, g, i, h) микродуговым оксидированием, режимы 1, 2, 5, 7, 9 соответственно; c, d — микродуговым оксидированием, режимы 15, 12 соответственно; f, k, l — эрозионным синтезом покрытий, режимы 1, 3, 5 соответственно; m — алмазным шлифованием; n — алмазным точением с последующим электрохимическим стравливанием.

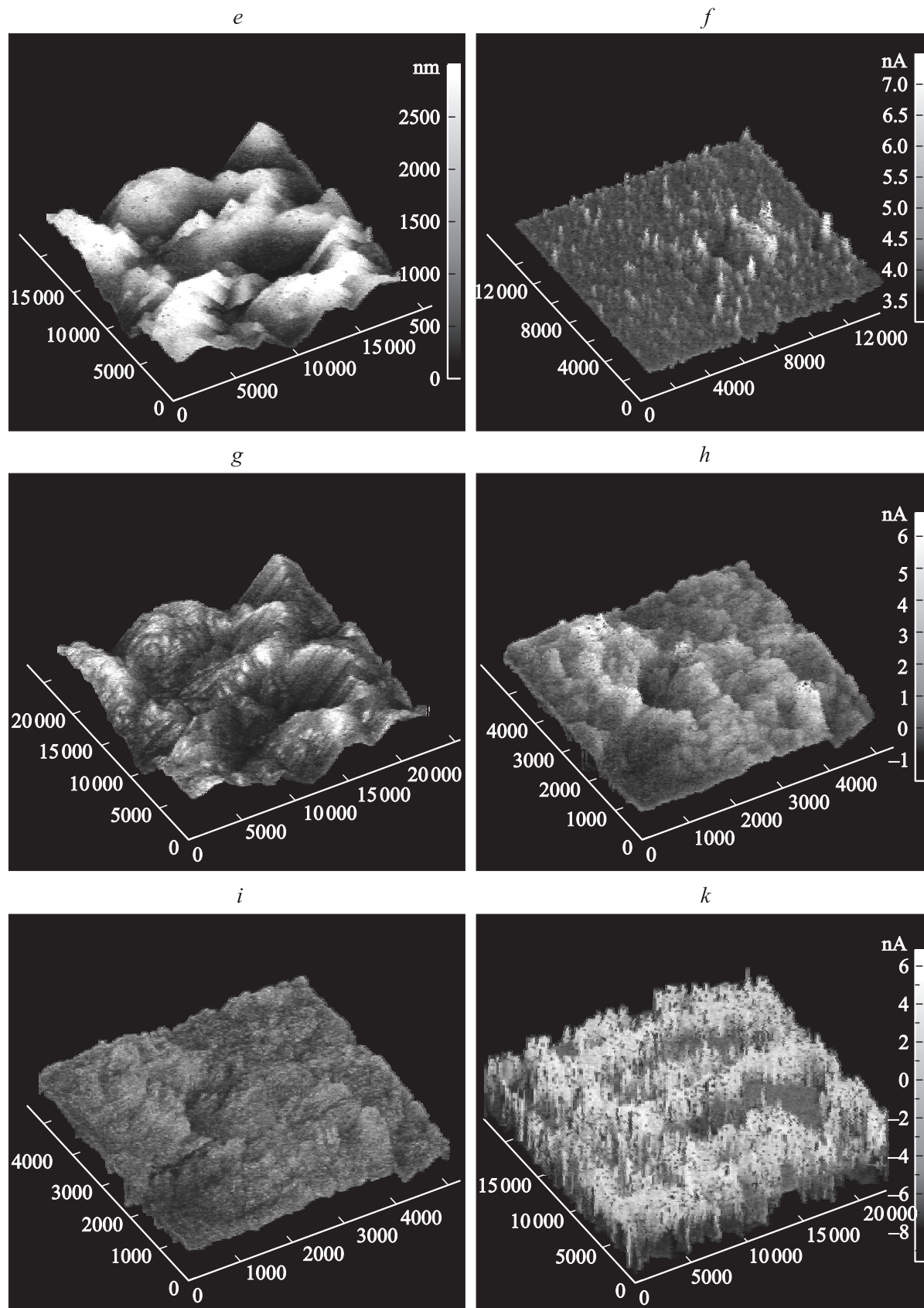


Рис. 2 (продолжение).

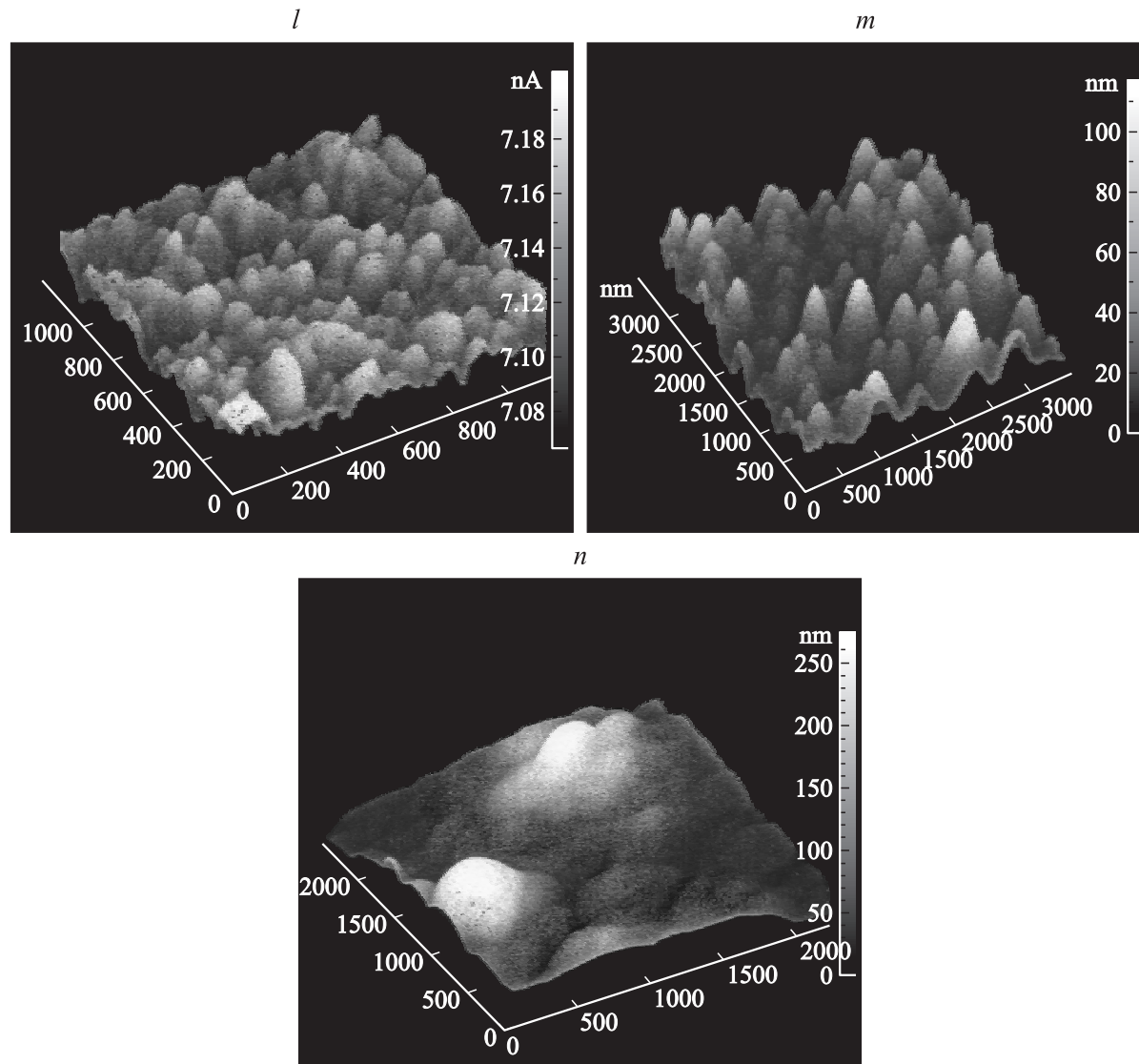


Рис. 2 (продолжение).

носителями заряда с последующим уменьшением их амплитуды.

Кроме указанных видов нелинейности волновых явлений в плазменных средах действуют и другие регулярные нелинейные волны — солитоны. В ряде случаев такие солитоны образуют целые структуры в плазменных средах и тогда говорят о процессах самоорганизации нелинейных волн (синергетические процессы). Иногда в плазменных средах возникает солитонный хаос. Таким образом, речь идет о динамических процессах с характерным для них образованием диссипативных и самоорганизующихся структур, проявлением которых (в глубине поверхностного слоя и непосредственно на поверхности) является образование „странных“ рельефов (табл. 1).

Анализируя процессы, протекающие при лазерной обработке, можно отметить, что они характеризуются формированием в зоне обработки низкопорогового оптического пробоя (10^{-8} s) и образованием плазменного

облака (10^{-6} – 10^{-5} s) [36]. Взаимодействие обрабатываемого материала с тепловыми потоками плотностью от 10^2 до 10^5 W/m² в среде активных (N₂, CO₂, H₂, CO, метан), а также инертных газов (Ar, He, Xe) приводит к формированию на поверхности материала теплового источника, способствующего созданию специфической морфологии, являющейся проявлением различного рода неустойчивостей.

При лазерной обработке в импульсном режиме (длительность импульса порядка 10^{-6} – 10^{-9} s) происходит процесс как теплового, так и динамического разрушения материалов при воздействии теплового удара в диапазоне долговечности $t = 10^{-7}$ – 10^{-10} s [37]. Сам каскад центров разрушения, возникающих в процессе динамического разрушения, можно рассматривать как фрактальный кластер [38]. Отмечается, что при импульсном разогреве материала действует динамический режим нагружения, при котором происходит переход от одноочагового механизма разрушения к характерному

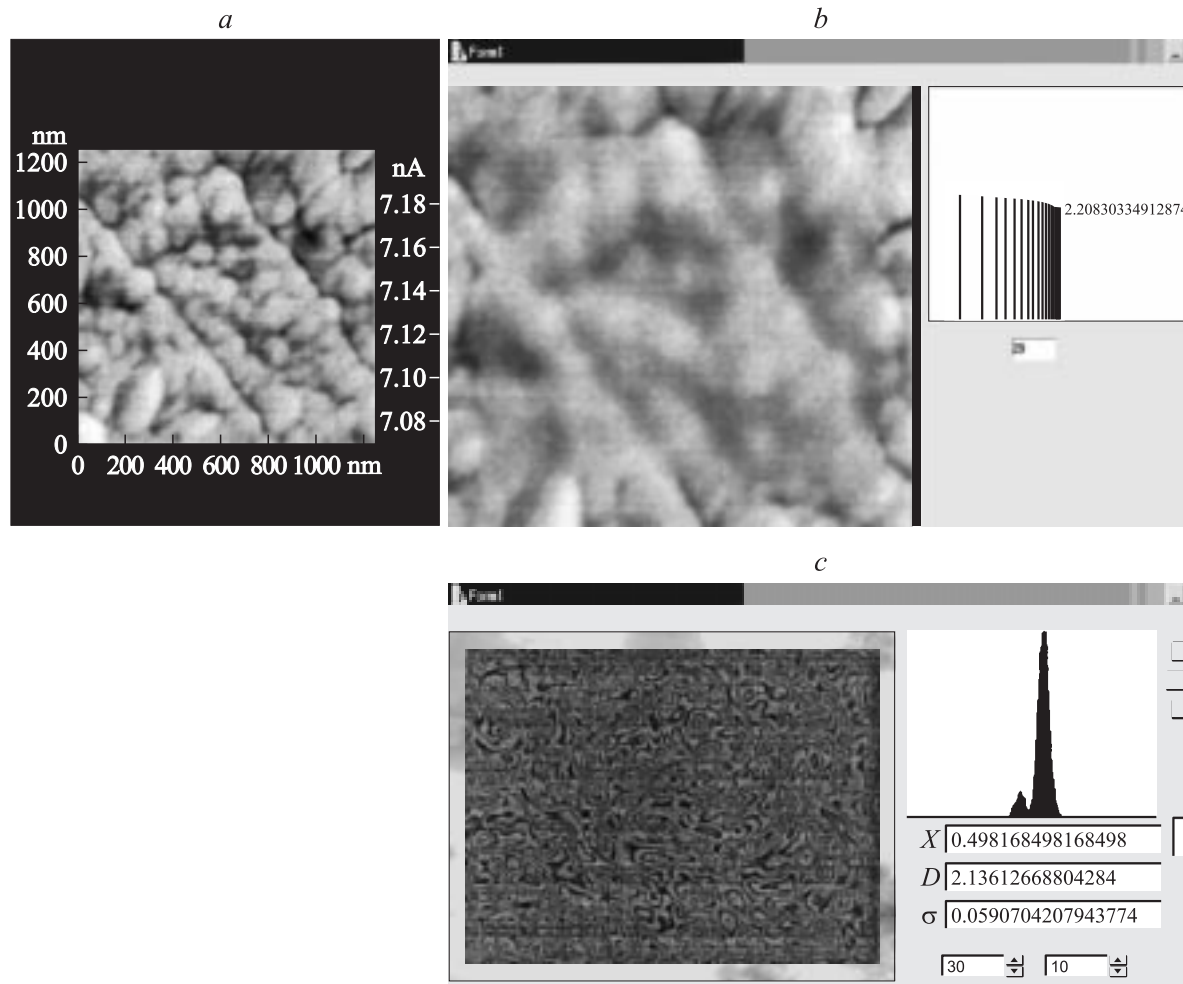


Рис. 3. Фрактальный анализ поверхности образцов, обработанных алмазным точением (а) с последующим стравливанием (д) или последующим оксидированием (г): б, е, г — фрактальная сигнатура изображений образца (фрактальный келстр); в, д, ж — поле (слева) и экспериментальное распределение локальных фрактальных размерностей D (справа).

многоочаговому. Кинетика процесса динамического разрушения может быть определена действием концентрационного процесса (являющегося перколяционным по своей природе) развития центров разрушения на разных масштабных уровнях.

Пробоем диэлектрической среды под действием внешнего приложенного электрического поля за время $10^{-8} - 10^{-7}$ с и лавинообразным нарастанием числа носителей зарядов (образованием плазменной среды) объясняется рабочий процесс при электрической эрозии [39]. Он также относится к синергетическим, так как соединяет в себе целую совокупность динамических процессов, протекающих одновременно. К последним относятся бомбардировка поверхности обрабатываемого материала заряженными частицами ($W_a^{(1)}, W_k^{(1)}$), газокинетическая (термическая) бомбардировка частицами ($W_a^{(2)}, W_k^{(2)}$), составляющими канал разряда, торможение факелов паров, поступающих на катод и анод с противоположного электрода ($W_a^{(3)}, W_k^{(3)}$), тепловое

излучение ($W_a^{(4)}, W_k^{(4)}$) и действие объемного источника тепла ($W_a^{(5)}, W_k^{(5)}$)

$$W_a = W_a^{(1)} + W_a^{(2)} + W_a^{(3)} + W_a^{(4)} + W_a^{(5)},$$

$$W_k = W_k^{(1)} + W_k^{(2)} + W_k^{(3)} + W_k^{(4)} + W_k^{(5)}, \quad (6)$$

где W — энергия соответствующего процесса.

При лазерном упрочнении сплавов [40] установлено, что следствием воздействия концентрированных потоков на обрабатываемую поверхность могут являться либо образование флуктуационного неупорядоченного возникновения и роста зародышей новой фазы (что указывает на хаотическое течение процесса), либо сдвигового, упорядоченного, характеризующегося кооперативным перемещением атомов на небольшие расстояния. Последнее может быть связано с самоорганизующимися процессами, что вполне согласуется с синергетическим подходом в материаловедении.

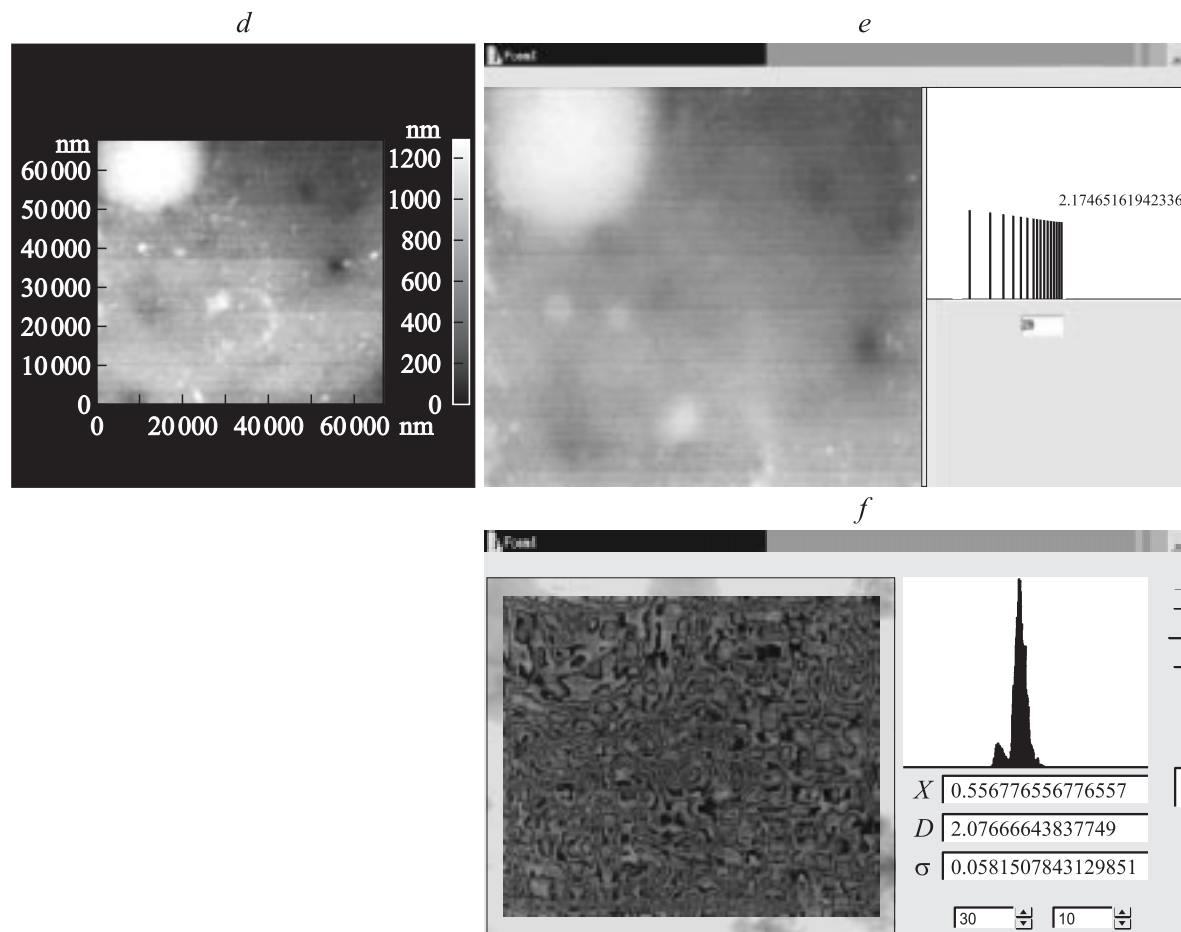


Рис. 3 (продолжение).

Известно, что при размерной электрохимической обработке ответственным за сьем материала являются электродные процессы в растворах электролитов. Их можно считать разновидностью обычных гетерогенных химических реакций, протекающих на поверхности раздела жидкой и твердой фаз под действием приложенной к электродам разности потенциалов [41]. Именно они и определяют все изменения, происходящие на поверхности металла при его потенциалах, отличных от равновесного. Процесс анодного растворения является многостадийным, включающим в себя одновременно протекающие явления образования двойного электрического слоя (и собственно электрохимические реакции в пределах его плотной части), подвода и отвода реагирующей частицы через диффузионную часть двойного слоя и образование новых веществ.

При прохождении тока через электрохимическую систему происходит отклонение электродных потенциалов φ_{ia} и φ_{ik} от их равновесного значения (явление электродной поляризации) на некоторую величину $\Delta\varphi$. Поляризация характеризует фактически необратимость электрохимического процесса. Определенная скорость электрохимического процесса может быть достигнута только при достаточно больших величинах поляризации

(перенапряжения), когда суммарный ток на электроде практически совпадает с током, выражающим преобладающий процесс, а величина смещения потенциала (концентрационное перенапряжение) определяется уравнением Тафеля

$$-\Delta\varphi = a + b \ln J_k, \quad (7)$$

где a и b — константы, J_k — величина тока.

Фрактальные свойства кинетики коррозии сталей отмечаются при исследованиях коррозии конструкционных материалов в натрии [42]. Было установлено, что растворение пленки, покрывающей металл, развивается путем слияния отдельных очагов коррозии, причем увеличение размера зоны коррозии не меняет фрактальный характер границы следа очага растворения. По результатам эксперимента длина коррозионной границы

$$L(l) \approx l^{-D}, \quad (8)$$

где $D \approx 1.20$ — фрактальная размерность коррозионной границы.

Характеризуя процессы размерной электрохимической обработки с точки зрения синергетических принципов, можно отметить, что они относятся к дина-

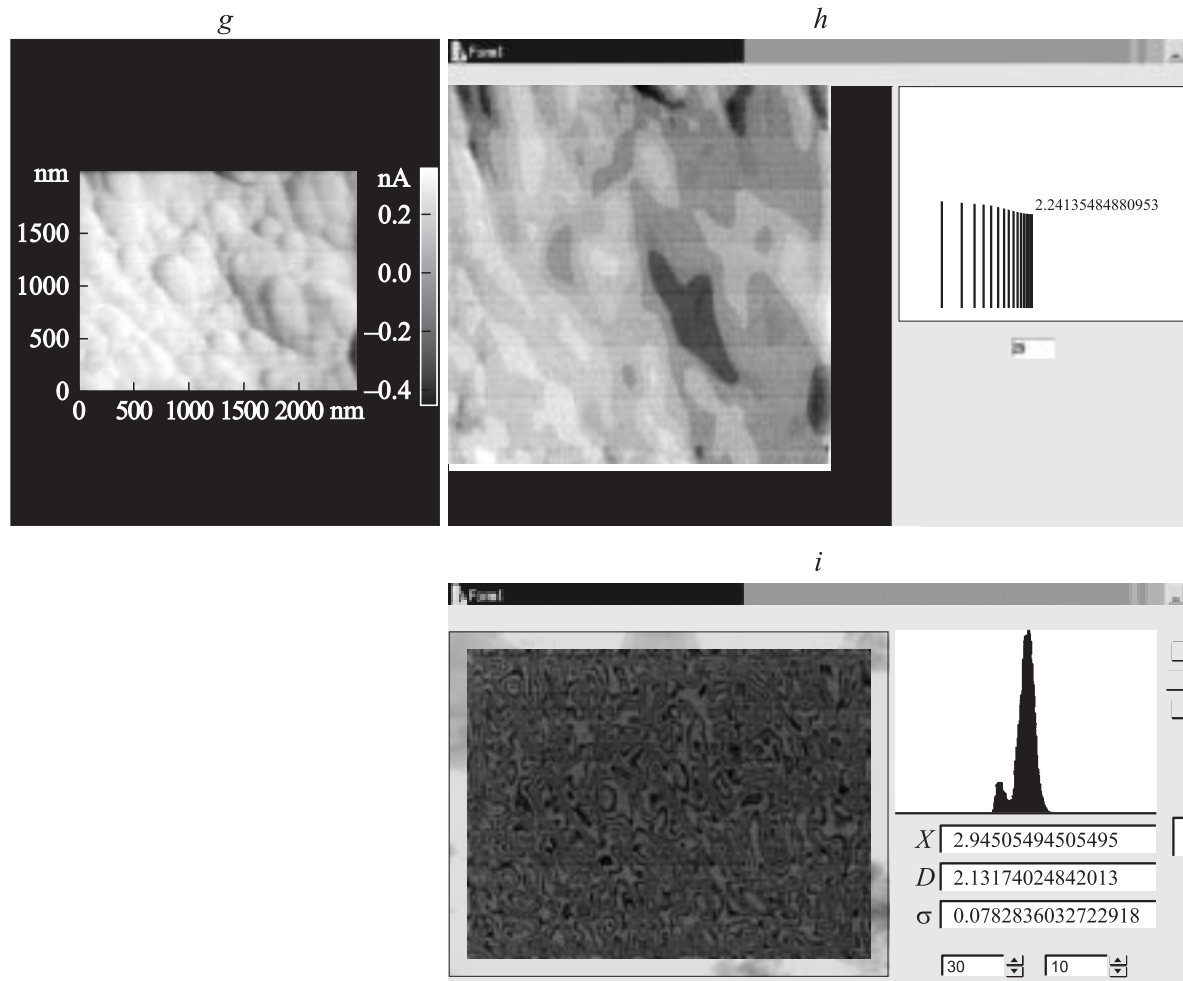


Рис. 3 (продолжение).

мическим процессам, подчиняющимся принципу текущего и локального равновесия, принципу мозаичной неравновесной термодинамики и хорошо коррелируют с эволюционным уравнением (2).

При исследовании процессов, связанных с осаждением из паровой фазы (CVD-процессы, или химическое парофазное осаждение, метод газофазнохимической металлизации и т.п.), а также при ионной бомбардировке поверхности твердого тела установлено [4,43], что характерным для них является образование поверхностных конусов или фасеток либо слоистых столбчатых структур, а также крупных и нитевидных кристаллов (висперов). Возникновение таких форм рельефа связывается с проявлением нелинейных кинетических закономерностей в условиях, далеких от термодинамического равновесия (например, при температурах в диапазоне от 150 до 1000°C для CVD-процессов). Существенный вклад в образование поверхностных структур того или иного типа вносят несовершенства строения решетки обрабатываемого материала, влияющие в свою очередь на плотность и равномерность распределения элементов

рельефа по площади обработки, а также на начало процесса растворения или осаждения.

Установлено [44], что осаждение покрытий из паровой фазы — сложный многостадийный процесс, включающий стадии массо- и теплопереноса, адсорбции и десорбции, собственно стадию химической реакции термораспада металлоорганических соединений, а также стадии формирования твердой фазы и кристаллизации. Различные типы структур, возникающие на поверхности, определяются преобладанием термодинамических неустойчивых или равновесных состояний. Существенный вклад в образование поверхностных структур разного типа вносят несовершенства строения решетки обрабатываемого материала, которые в свою очередь влияют на плотность и равномерность распределения элементов рельефа по площади обработки, а также на начало процесса растворения или осаждения [45].

Таким образом, большинство процессов, лежащих в основе физико-химических методов обработки, относятся к динамически неравновесным, подчиняющимся принципам синергетики, и образуют так называемые

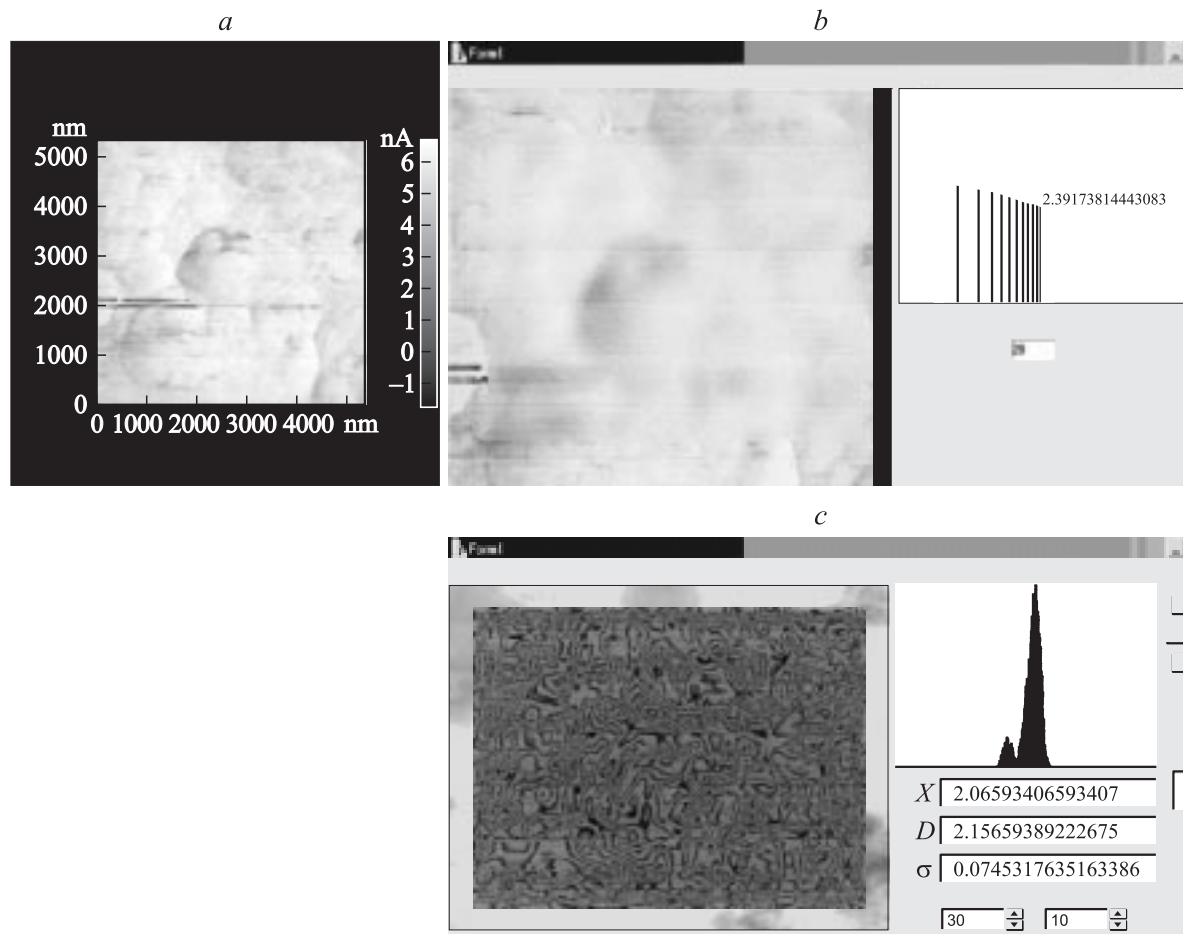


Рис. 4. Фрактальный анализ поверхности образцов, обработанных микродуговым оксидированием при разных режимах (*a, d*) и алмазным шлифованием (*g*): *b, e, h* — фрактальная сигнатура изображений образца (фрактальный кепстр); *c, f, i* — поле (слева) и экспериментальное распределение локальных фрактальных размерностей D (справа).

неравновесные технологии. Такие процессы вызывают, как правило, образование диссипативных структур, требующих для своего существования постоянного притока энергии извне. Приток обеспечивается за счет электрической, тепловой, световой и т.п. энергии, вводимой в зону обработки специальными устройствами (источниками питания, электронными пушками, системами накачки и т.д.). Опираясь на представления о процессах, далеких от равновесного состояния, необходимо ввести для их описания теорию фракталов, а для количественной оценки шероховатости поверхности — фрактальную (дробную) размерность D , или фрактальные сигнатуры.

Указанные процессы связаны с качественно новыми механизмами образования рельефа поверхности, отличными от традиционной обработки резанием. Эти процессы обусловлены применением различных полей (электромагнитных, тепловых и т.п.) при условии высоких температур и давлений, что приводит к сложному одновременному их воздействию на обрабатываемую поверхность. Такие процессы образуют методы обработки, которые условно могут быть названы методами груп-

пового воздействия, причем формирование поверхности начинается почти мгновенно и протекает одновременно во множестве зародышевых точек, хаотически расположенных по всей обрабатываемой поверхности.

В формировании рельефа поверхности принимают участие как внешняя рабочая среда, так и структура обрабатываемого материала. К рабочим средам относятся растворы электролитов, диэлектрические среды, атмосфера активных и инертных газов, пары металлов и т.п., а в качестве параметров условий можно назвать, например, температуру, скорость течения электролита, давление, наложение различного рода полей. Существенный вклад в образование поверхностных структур того или иного типа вносят несовершенства строения решетки обрабатываемого материала, влияющие на плотность и равномерность распределения таких структур по площади обработки. Согласно теории фрактального материаловедения [6], несовершенства строения, проявляющиеся как в матрице, так и на поверхности, обусловлены в свою очередь механизмами самоорганизации диссипативных структур со спонтанной их перестройкой вблизи точек бифуркаций, связанных с фрактальными свойства-

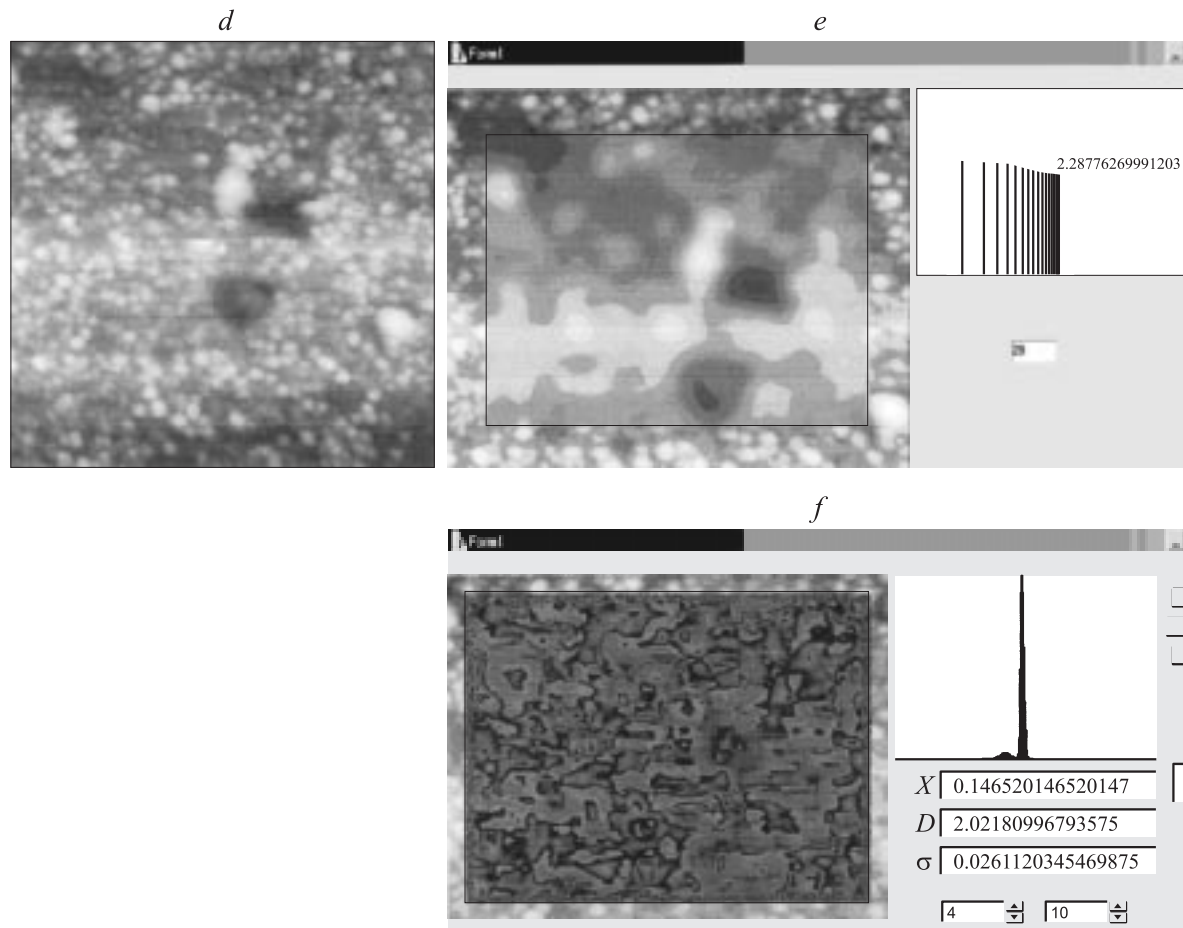


Рис. 4 (продолжение).

ми материалов. Проявлением действия таких механизмов можно считать выход на поверхность различного рода несовершенств структуры: вакансий, дислокаций, полос скольжения, границ зерен, атомных кластеров (микроуровень), блоков мозаики, дислокационных ансамблей (макроуровень), сформированных на предыдущих стадиях обработки материалов при литье, прокатке, термообработке и т.п. Такие особенности структуры и определяют развитие элементов обрабатываемой поверхности в начальный момент. Так, процессы зародышеобразования атомарных/молекулярных кластеров, формирующих покрытия и процессы растворения (питингообразования), начинаются в точках, энергетически предрасположенных к взаимодействию с рабочей средой при определенных условиях (режимах обработки).

При дальнейшем развитии процесса обработки происходит суперпозиция фрактальных свойств материала и рабочей среды (например, электромагнитных полей), что в конечном итоге и формирует рельеф поверхности и, в частности, такую его характеристику, как шероховатость. В этом процессе поверхность должна рассматриваться как растущая стохастическая кластерная система, удовлетворяющая свойству самоподобия (скейлинга).

Экспериментальные исследования фрактальных характеристик поверхности образцов

Для проверки предложенного подхода были проведены экспериментальные исследования [46] поверхности образцов, обработанных методами алмазного шлифования, микродугового оксидирования, электроэрозионного синтеза покрытий (упрочнение) и алмазного точения с последующим электрохимическим стравливанием. В качестве матричной основы образцов использовались материалы АК-12М, АД-16, сталь 45.

Предварительно поверхность образцов осуществлялась на сканирующем зондовом микроскопе (SPM) компании NT-MDT (г. Зеленоград). Изображения поверхностей образцов представлены с *bmp*-расширением в формате $512 \times 655 \times 256$ (рис. 2).

Измерения фрактальной размерности D и фрактальных сигнатур (фрактальных кепстров) поверхности образцов проводились по специальной методике, разработанной в ИРЭ РАН [2,17–34]. Более подробно оригинальные методы измерения фрактальной размерности и фрактальных сигнатур многомерных стохастических сигналов изложены в [27,34]. Результаты экспериментов

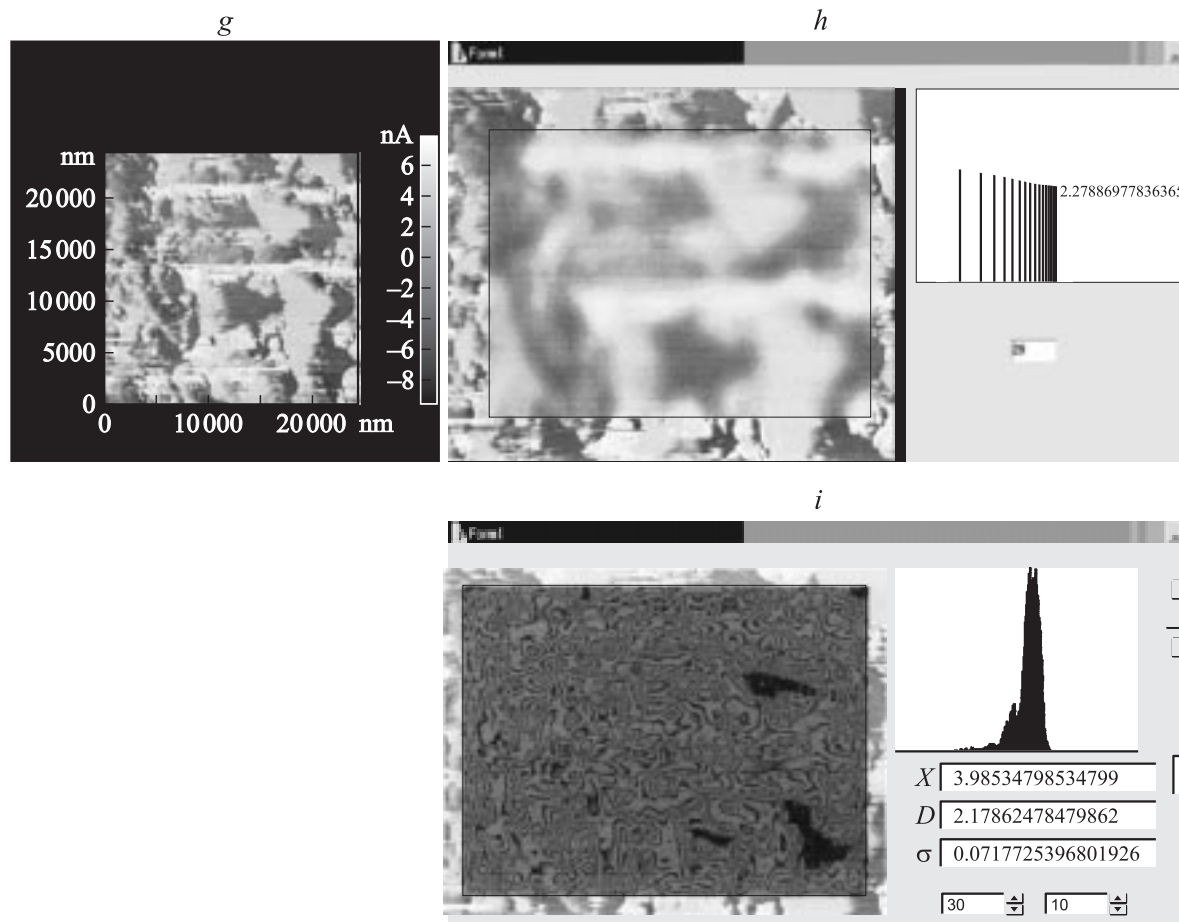


Рис. 4 (продолжение).

Таблица 3. Значения фрактальных размерностей D и D_s для исследованных образцов

№	Вид обработки	№ режима	Фрактальная размерность D	Фрактальная размерность D_s	Дисперсия Σ^2
1	Алмазное шлифование	5	2.117	1.985	0.024
		8	2.288	2.022	0.026
2	Микродуговое оксидирование	1	2.102	2.065	0.029
		2	2.279	2.179	0.072
		16	2.420	2.215	0.070
		23	2.392	2.157	0.075
3	Электроэрозионный синтез покрытий	1	2.445	2.237	0.077
		2	2.303	2.179	0.032
		10	2.536	2.136	0.498
4	Алмазное точение с последующим электрохимическим стравливанием	1	2.085	1.971	0.025
		4	2.097	1.978	0.038
		8	2.174	2.132	0.078

представлены на рис. 3 и 4. Ряд избранных результатов был опубликован ранее в [46]. На фрактальных сигнатурах (позиции b, e, h на рис. 3 и 4) показано среднее значение фрактальной размерности D при ее средне-квадратической величине σ . В режиме кластеризации, задавая требуемый диапазон локальных фрактальных размерностей ΔD , мы на экране компьютера получаем поле фрактальных размерностей, для которых все значения $D_i \in \Delta D$ отображаются черным цветом.

Программная реализация методов вычисления фрактальных характеристик позволяет непосредственно на экране компьютера отображать экспериментальные распределения локальных фрактальных размерностей (позиции c, f, i на рис. 3 и 4). Цвет каждой точки изображения образца прямо пропорционален значениям D_i . Все измерения получаются в большой палитре псевдоцветов. При этом на двумерном изображении поверхности образца (слева на позициях c, f, i на рис. 3 и 4) псевдоцветом выделяются все кластеры с заданной величиной D фрактальной размерности.

При алмазном точении образцов (рис. 3) экспериментальные пространственные распределения D всегда имеют тяжелые хвосты (так называемые паретианы [2,24,26,27,29,31,33]), что говорит о иерархии микро-рельефа. Последующие операции стравливания или оксидирования значительно увеличивают диапазон средних значений фрактальной размерности. В случае микро-дугового оксидирования режим обработки 2 (рис. 4, $a-c$) дает меньшее значение D , чем режим обработки 7 (рис. 4, $d-f$). Алмазное шлифование дает более широкий спектр локальных фрактальных размерностей D , что хорошо видно из полученных экспериментальных данных (рис. 4, $g-i$).

Таким образом, анализ численных результатов исследований поверхности образцов позволяет сделать вывод о существовании областей поверхности, обладающих фрактальными свойствами. Это подтверждается фрактальными сигнатурами и вероятностными распределениями с тяжелыми хвостами (рис. 3, 4), а также дробными значениями размерности как по изображению (D), так и по спектру (D_s), приведенными в табл. 3. Отметим, что значения фрактальной размерности изображений должны удовлетворять условию D и $D_s \geq 2$ [2,34]. Значения D_s меньше двух определяются погрешностью алгоритмов и в нашем случае должны интерпретироваться как быстрое приближение D_s к топологической размерности плоскости.

Заключение

В данной работе на основании проведенных нами экспериментов впервые предложен метод оценки качества поверхности изделий с использованием различных фрактальных характеристик. К достоинствам метода можно отнести его универсальность и наглядность.

Существование фрактальных областей обработанных поверхностей подтверждает возможности кластерного механизма формирования поверхности (на микро-, мезо-, макроуровне), являющегося следствием динамических неравновесных процессов. В связи с этим особенно интересным представляется разработка фрактально-синергетической модели процесса формирования рельефа поверхности (шероховатости), основанной на анализе заложенных в методах группового воздействия процессов самоорганизации. При этом шероховатость поверхности и поверхностный слой материала необходимо рассматривать как единую иерархическую фрактальную или мультифрактальную структуру. Такая модель позволит не только прогнозировать механизмы формирования шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя, но и управлять ими. В данной работе изложен лишь один из подходов к решению сложнейшей задачи — оценке поверхности, полученной методами неравновесных технологий, с целью управления геометрическими параметрами шероховатости для получения заданных эксплуатационных свойств изделий. Предложенные и экспериментально отработанные [2,17–34] эффективные цифровые методы измерения фрактальных характеристик (фрактальных сигнатур) могут широко использоваться в различных физико-технических, астрономических, биологических, медицинских и т. п. исследованиях.

Список литературы

- [1] Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
- [2] Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002. 664 с.
- [3] Стандарт ISO 4287: 1998. Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности: профильный метод. Термины, определения и параметры структуры. М., 1999. 252 с.
- [4] Сыркин В.Т. CVD-метод. Химическое парофазное осаждение. М.: Наука, 2000. 418 с.
- [5] Колмогоров А.Н. // Изв. АН СССР. Сер. Математическая. 1937. № 3. С. 355–360. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. С. 178–182.
- [6] Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогов А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
- [7] Иванова В.С., Новиков В.У. // Нелинейный мир. 2004. Т. 2. № 3. С. 197–202.
- [8] Странные аттракторы. Сб. статей. М.: Мир, 1981. 256 с.
- [9] Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М.: Мир, 1973. 280 с.
- [10] Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 400 с.
- [11] Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур. М.: Мир, 1979. 279 с.
- [12] Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядочению через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.

- [13] Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. М.: Янус, 1995. Т. 1. 624 с. 1999. Т. 2. 440 с. 2001. Т. 3. 508 с.
- [14] Кадолицев Б.Б. Динамика и информация. М.: УФН, 1999. 400 с.
- [15] Лагарьков А.Н., Погосян М.А. // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 779–787.
- [16] Потапов А.А. // Нелинейный мир. 2003. Т. 1. № 1–2. С. 3.
- [17] Бункин Б.В., Реутов А.П., Потапов А.А. и др. Вопросы перспективной радиолокации / Под ред. А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.
- [18] Подосенов С.А., Потапов А.А., Соколов А.А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / Под ред. А.А. Потапова. М.: Радиотехника, 2003. 720 с.
- [19] Потапов А.А. // Зарубежная радиоэлектроника. 2000. № 6. С. 3–65.
- [20] Потапов А.А., Герман В.А. // РиЭ. 2000. Т. 45. № 8. С. 946–953.
- [21] Potapov A.A., German V.A. // Proc. I Intern. Workshop on Mathematical Modeling of Physical Processes in Inhomogeneous Media Mexico: Guanajuato, 2001. P. 44–46.
- [22] Potapov A.A., German V.A. // Proc. of the 4th Symposium „Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves“. Kharkov, 2001. Vol. 1. P. 268–270.
- [23] Потапов А.А., Герман В.А. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 14. С. 19–25.
- [24] Реутов А.П., Потапов А.А., Герман В.А. // Нелинейный мир. 2003. Т. 1. № 1–2. С. 12–27.
- [25] Потапов А.А. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8. № 1. С. 26–35.
- [26] Потапов А.А. // Радиотехника. 2003. № 8. С. 55–66.
- [27] Потапов А.А. // РиЭ. 2003. Т. 48. № 9. С. 1101–1119.
- [28] Потапов А.А. // Тез. докл. I НТК „Радиооптические технологии в приборостроении“. Сочи. 2003. С. 58–61.
- [29] Потапов А.А. // Труды Третьего расширенного семинара „Использование методов искусственного интеллекта и высокопроизводительных вычислений в аэрокосмических исследованиях“. Переславль-Залесский, 2003. С. 76–90.
- [30] Потапов А.А. // Нелинейный мир. 2004. Т. 2. № 1. С. 4–13.
- [31] Потапов А.А., Герман В.А. // Труды X Международной НТК „Радиолокация, навигация, связь“. Воронеж, 2004. Т. III. С. 1869–1896. (Potapov A.A., German V.A. // Proc. X Intern. Sc.-Res. Conf. „Radiolocation, Navigation, Communication“. Voronezh, 2004. P. 318–341).
- [32] Потапов А.А. // Материалы Первой Междунар. научно-практической конф. „Стратегии динамического развития России: единство самоорганизации и управления“. М., 2004. Т. III. Ч. 3. С. 129–135.
- [33] Potapov A.A. // Proc. of the 2nd IEEE Intern. Conf. Circuits and Systems for Communications (ICCSC-2004). М., 2004. 4 p.
- [34] Потапов А.А., Герман В.А. // РиЭ. 2004. Т. 49. № 12 (в печати).
- [35] Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Лекции по электродинамике плазмоподобных сред. Неравновесные среды. М.: МГУ, 2002. 232 с.
- [36] Углов А.А. // Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии. М.: Наука, 1989.
- [37] Учаев А.Я., Бонюшкин Е.К., Новиков С.А., Завада Н.И. Откольное разрушение металлов в режиме быстрого объемного разогрева. М.: ЦНИИатоминформ, 1999.
- [38] Бонюшкин Е.К., Завада Н.И., Платонова Л.А. и др. // Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в системах и технологиях / Под ред. Ю.Г. Кабалдина. Владивосток, 2002. С. 123–171.
- [39] Золотых Б.Н. Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1975. 67 с.
- [40] Кокора А.Н., Соболев Э.Н. // Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии. М.: Наука, 1985. С. 54–65.
- [41] Седькин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 302 с.
- [42] Засорин Н.И., Кузин В.В., Морозов В.А., Шимневич А.Л. Препринт ФТИ. Обнинск, 1996. 12 с.
- [43] Модифицирование и легирование поверхности лазерным, ионным, электронными пучками / Под ред. Дж. Поут, Т. Фоти. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
- [44] Грибов Б.Г., Домрачев Г.А., Жук Б.В. и др. Осаждение пленок и покрытий разложением металлоорганических соединений. М.: Наука, 1991. 322 с.
- [45] Трофимов В.И., Осадченко В.А. Рост и морфология тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1993. 272 с.
- [46] Булавкин В.В., Потапов А.А., Вячеславова О.Ф., Герман В.А. // Тр. Междунар. междисциплинарного симпозиума „Фракталы и прикладная синергетика“. М., 2003. С. 250–253.