

УДК 53.087/.088

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ДАТЧИКАМИ

С. В. Панин¹, Ю. А. Алтухов¹, П. С. Любутин¹,
А. В. Бяков¹, С. А. Хижняк²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021, г. Томск, просп. Академический, 2/4
E-mail: svp@isprms.tsc.ru

²ОАО «Опытно-конструкторское бюро им. П. О. Сухого»,
125284, Москва, ул. Поликарпова, 23Б

Исследуется влияние различных способов получения изображений на вычисляемое значение их фрактальной размерности как количественной характеристики состояния поверхности. Показано, что изображения, полученные как с помощью растрового электронного микроскопа, так и фотокамеры, характеризуются заметным уровнем шумов, что приводит к изменению характера поведения фрактальной размерности. Обсуждаются различные способы корректировки выявленного эффекта.

Ключевые слова: фрактальная размерность, обработка изображений, фильтрация, оптическое изображение, шум.

Введение. Использование фрактального анализа для количественной характеристики изображений в литературе встречается достаточно часто [1–3]. В работе [4] приведён сопоставительный анализ точности расчёта фрактальной размерности (ФР) различными методами для решения задач обнаружения малоконтрастных наземных и надводных объектов в радиолокации. В [5] расчёт ФР методом структурной функции использовали для выделения характерных стадий развития деформации. В [6] на примере обработки серий модельных фрактальных изображений проведено сопоставительное сравнение различных методов вычисления ФР на предмет определения «точности» расчёта, а также показано, что влияние шумов на оптических изображениях приводит преимущественно к «завышению» вычисленных значений.

На основании анализа литературных данных, а также с учётом опыта разработки и исследований различных методов анализа изображений [7–9] следует:

1. Сравнение различных методов вычисления ФР может быть корректно проведено только при обработке модельных изображений фрактальных поверхностей, для которых априори известно значение ФР, изменяющееся в диапазоне от 2 до 3 [10].

2. При исследованиях изображений поверхностей реальных объектов метод расчёта ФР также может быть использован, но не для оценки степени самоподобия объекта, а для получения количественной оценки его образа, например деформационного рельефа, с учётом наличия шумов, искажений и пр. В этом случае получаемое абсолютное значение ФР должно быть интерпретировано правильным образом [11].

3. При применении различной аппаратуры для фото- или видеорегистрации цифровых изображений поверхности последние, как правило, содержат значительное количество шумов и помех, что существенно изменяет рассчитываемое значение ФР. Таким образом, при расчёте требуется оценивать и учитывать влияние искажений, вносимых видеодатчиком, АЦП и другими компонентами тракта видеорегистрации.

4. При использовании оптического метода получения информации о поверхности материала регистрируемая яркостная картина есть образ наблюдаемой поверхности, которая характеризует её рельеф в единицах отражательной способности, но не является точным отображением первой.

5. Помимо расчёта ФР эффективным способом получения количественной оценки может быть привлечение аппарата спектрального фурье- и вейвлет-анализа [8, 9]. Однако, как показывают наши предыдущие исследования и литературные данные, результаты расчёта, например, величин энергии таких спектров оказываются весьма чувствительными к изменению уровня освещённости, повороту объекта относительно камеры, но главное — абсолютные значения информативных параметров могут меняться в широких пределах, что затрудняет их использование в качестве универсальных критериев оценки. Фрактальная размерность изменяется в известном диапазоне значений, инвариантна к изменению освещённости, поворотам и т. д. [6].

Таким образом, в предлагаемой работе ставится задача оценки влияния различных способов получения изображений на вычисляемое значение ФР как количественной характеристики объекта анализа.

1. Методики расчёта ФР и получения изображений. В данной работе применено несколько распространённых методов: треугольные призмы [1], показатели Хёрста [10], структурная функция [12], изаритмы [6]. Тестирование проводилось на основе следующих серий изображений.

1.1. *Модельные изображения фрактальных поверхностей.* Для каждого заданного значения ФР Dg в интервале 2,1–2,9 с шагом 0,1 методом смещения средней точки [3] генерировали по пятьдесят модельных изображений. С использованием всех вышеперечисленных методов оценивали ФР Df и находили среднее значение.

1.2. *РЭМ-изображения поверхности.* Серия изображений содержала участки поверхности образца кремнистого железа (FeSi), расположенные на различном удалении от места разрушения [7]. Изображения размером 512×512 пикселей при 256 уровнях серого формировали путём оцифровки аналогового выходного сигнала микроскопа РЭМ-200, реализованной с помощью устройства ввода изображений.

1.3. *Оптические изображения поверхности алюминиевого сплава Д16АТ.* Серия изображений была получена с использованием цифровой видеокамеры DCM-310 производства "Hangzhou Scopetek Opto-Electric Co., Ltd.", имеющей КМОП-сенсор размером 1/2 дюйма с разрешением 3 Мпикселя. Поверхность образцов сплава Д16АТ, на которую напылялась алюминиевая плёнка толщиной ~ 2 мкм, фотографировали в процессе циклического изгиба. При этом на поверхности плёнки по мере циклического нагружения постепенно формировались мелкие поперечные складки. Для расчёта ФР брали фрагменты размером 1024×1024 пикселя при 256 уровнях серого; количество изображений в серии составило 64.

Изображения поверхностей, полученные с помощью РЭМ и видеокамеры, дополнительно обрабатывали для уменьшения влияния шумовых составляющих сигнала путём фильтрации:

1. Интерполяционная фильтрация производилась посредством процедур субдискретизации и интерполяции изображения с использованием двумерного B -сплайна. При субдискретизации изображение уменьшалось в 8 раз.

2. ДПФ-фильтрация (дискретное преобразование Фурье) основана на операциях ДПФ и обнуления ВЧ-составляющих в частотном спектре сигнала. Отбрасывались частоты выше 100 (пиксель⁻¹).

3. Медианная фильтрация.

4. Фильтрация Собеля. Обработка изображения оператором Собеля в целях выделения объектов, содержащихся в рельефе [13].

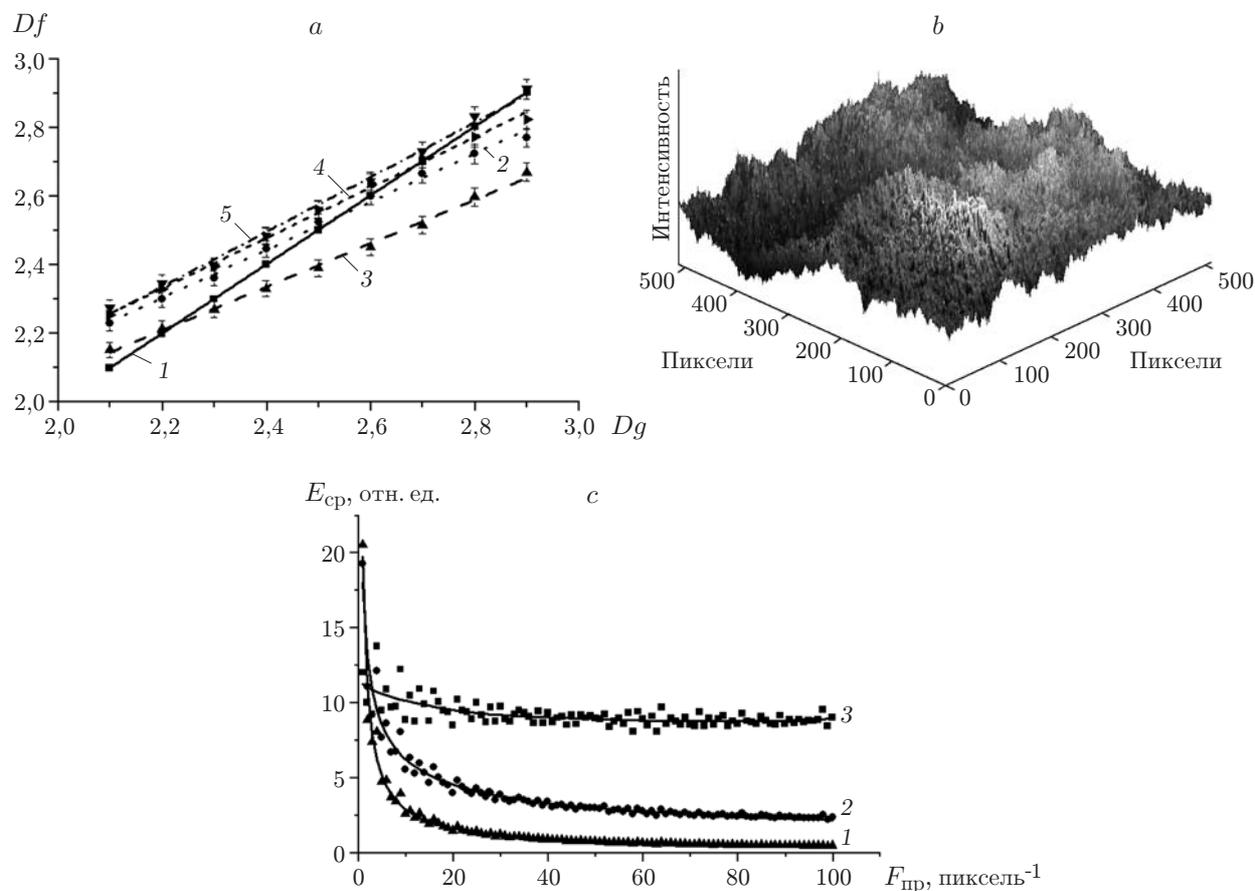


Рис. 1. Данные анализа модельных изображений: *a* — сводный график зависимости рассчитанного значения ФР от заданного с использованием методов показателя Хёрста (кривая 2), изаритм (3), структурной функции (4), триангуляции (5), реальная ФР (1); *b* — трёхмерная визуализация модельного изображения с $Df = 2,5$; *c* — зависимость средней энергии фурье-спектра от пространственной частоты для изображений с разными ФР (кривая 1 — 2,1, 2 — 2,5, 3 — 2,9)

2. Результаты исследования и их обсуждение. 2.1. *Модельные изображения фрактальных поверхностей.* На рис. 1, *a* показаны зависимости изменения ФР для расчётов, проведённых с помощью четырёх методов, и график, отражающий реальное значение ФР (кривая 1). Фрактальные размерности Df , рассчитанные каждым из способов, имеют близкие значения, а также идентичную тенденцию изменения: при малых величинах ФР полученные значения несколько выше реальной величины Dg , в то время как при больших значениях они несколько меньше её. Для визуализации результатов анализа модельных изображений на рис. 1, *b* дано трёхмерное распределение отсчётов яркости изображения с $Dg = 2,5$. Наконец, на рис. 1, *c* показаны зависимости величины энергии амплитудного фурье-спектра E_{cp} от пространственной частоты $F_{пр}$ в диапазоне от 1 до 100. При малом значении ФР ($Dg = 2,1$) основная энергия спектра сосредоточена в области низких пространственных частот (кривая 1), в то время как при высоком значении ФР ($Dg = 2,9$) (кривая 3) энергия практически однородно распределена в отображаемом диапазоне, что свидетельствует о наличии на изображении значительного числа элементов малого размера.

2.2. *РЭМ-изображения поверхности.* Построены графики зависимости ФР РЭМ-изображений поверхности FeSi как функции расстояния от места разрушения (рис. 2, *a*).

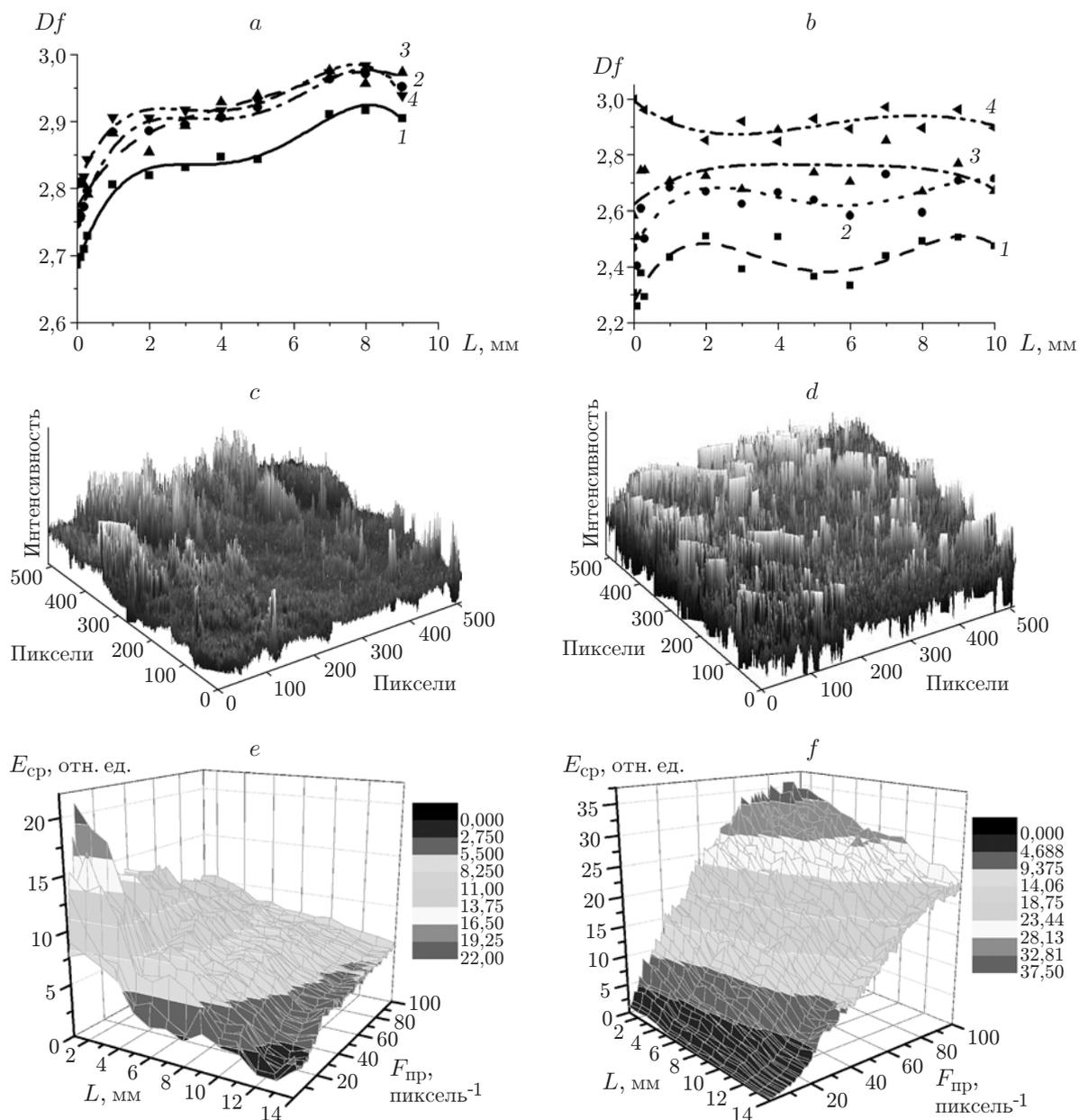


Рис. 2. Данные анализа РЭМ-изображений: зависимость ФР как функции расстояния от места разрушения исходных изображений при расчёте методами показателя Хёрста (кривая 1), изаритм (2), структурной функции (3), триангуляции (4) (a); изображения после фильтрации (кривая 1 — интерполяционная, 2 — медианная, 3 — ДДФ, 4 — Собеля) (b); трёхмерная визуализация изображений при $L = 0,1$ исходного изображения (c) и после фильтрации Собеля (d); изменение энергии фурье-спектра в зависимости от пространственной частоты в диапазоне 1–100 для РЭМ-изображений до фильтрации (e) и после фильтрации Собеля (f)

Характер изменения всех графиков является подобным: вблизи места разрушения величина ФР имеет минимальное значение $Df = 2,7-2,8$, а затем все кривые (имеющие S-образный характер) достигают максимума $Df = 2,9-2,95$ для изображений, характеризующихся минимальной деформацией или наиболее гладкой поверхностью. Поскольку этот результат несколько противоречит разд. 2.1, в работе была поставлена задача выяснить причину наблюдаемого эффекта, а также попытаться найти возможные пути его устранения.

Проанализировано трёхмерное распределение яркостных картин изображений данной серии (рис. 2, *c*). Несмотря на то что на двумерном изображении поверхность выглядит чёткой и контрастной, её реальный профиль характеризуется значительной ВЧ-осцилляцией. Видимо, по этой причине ФР здесь имеет столь высокое значение ($Df = 2,7-2,8$). Более того, двумерная поверхность, которую глаз экспериментатора воспринимает как гладкую, содержит существенные ВЧ-осцилляции (что, наиболее вероятно, связано с высоким уровнем шумов при оцифровке). По этой причине визуально гладкая поверхность характеризуется высоким значением ФР.

Влияние ВЧ-составляющих подтверждается графиком зависимости энергии амплитудного фурье-спектра от пространственной частоты (рис. 2, *e*). Для «гладких» изображений в спектре практически отсутствуют НЧ-составляющие, в то время как в области высоких пространственных частот энергия спектра имеет высокое значение.

Снижение влияния ВЧ-составляющих несколькими методами НЧ-фильтрации изображений позволяет сохранить элементы рельефа, но устраняет ВЧ-осцилляции, тем самым изменяя характер зависимости ФР как функции расстояния от места разрушения. Было протестировано несколько методов НЧ-фильтрации: интерполяционная, медианная и ДПФ-фильтрация. Их применение приводило к снижению величины ФР, но не изменяло характера кривых ФР (рис. 2, *b*, кривые 1–3).

Предложено также использовать фильтр Собеля, который за счёт подчёркивания границ структурных элементов может позволить нивелировать влияние шумовых ВЧ-составляющих. На рис. 2, *b* показаны графики ФР изображений после применения НЧ-фильтров и фильтра Собеля. В последнем случае максимальное значение ФР наблюдается вблизи места разрушения и уменьшается при удалении от него (кривая 4). Поскольку результаты расчёта ФР для разных методик практически совпадают, то на рис. 2, *b* приведены результаты, полученные только с использованием метода триангуляции.

Причина подобного поведения графиков на рис. 2, *b* становится понятной из анализа трёхмерной яркостной картины поверхности FeSi после фильтрации (рис. 2, *d*). Крупные элементы рельефа на поверхности стали более выраженными на уровне фона; в то же время на изображении сохраняется значительная по уровню ВЧ-осцилляция, несмотря на то что на двумерном распределении поверхность выглядит достаточно гладкой. Видимо, по этой причине возрастает и абсолютное значение ФР (см. рис. 2, *b*). Об этом свидетельствует и график зависимости энергии амплитудного фурье-спектра от пространственной частоты (в диапазоне 1–100) для отфильтрованных изображений (рис. 2, *f*). Для фильтрованных изображений в области низких пространственных частот составляющие спектра уменьшились по величине, тогда как на высоких частотах энергия спектра увеличилась более чем в 3 раза.

2.3. *Оптические изображения поверхности алюминиевого сплава Д16АТ.* Подобно результатам, описанным в разд. 2.2, гладким оптическим изображениям плёнки в начале испытаний свойственно более высокое значение ФР (рис. 3, *a*). Кроме того, уровень ФР, характерный для изображений в начале испытаний, значителен: $Df = 2,75-2,9$. Максимальное значение ФР из всех использованных методов расчёта даёт метод триангуляции. Причина наблюдаемых эффектов становится понятной при анализе трёхмерной яркостной картины поверхности (рис. 3, *c*) — преимущественно видны ВЧ-осцилляции,

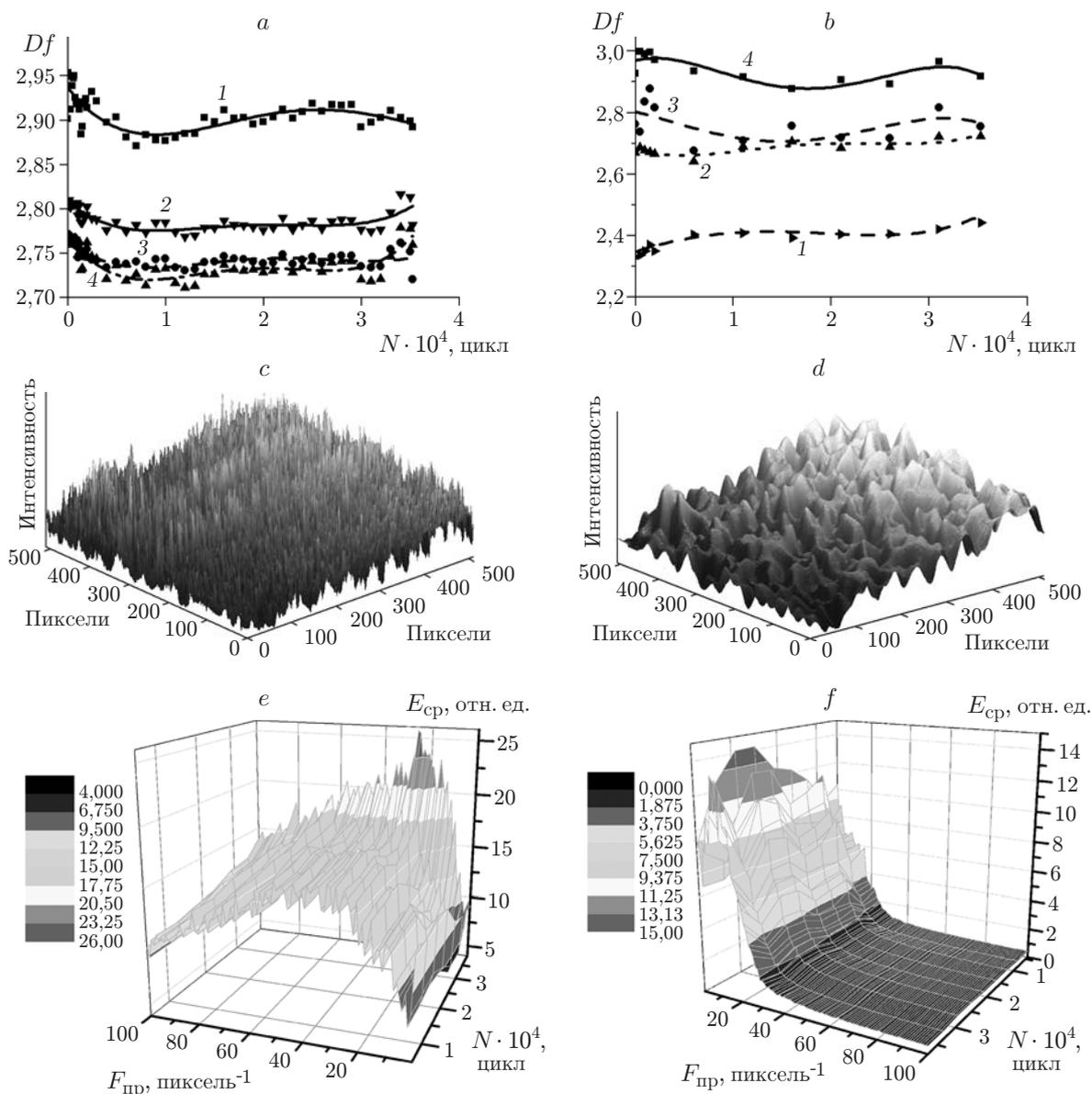


Рис. 3. Данные анализа оптических изображений: зависимость ФР от количества циклов нагружения исходных изображений при расчёте методами показателя Хёрста (кривая 1), изаритм (2), структурной функции (3), триангуляции (4) (a); изображения после фильтрации (кривая 1 — интерполяционная, 2 — медианная, 3 — ДПФ, 4 — Собеля) (b); трёхмерная визуализация изображений при $N = 12000$ исходного (c) и изображения после интерполяционной фильтрации (d); изменение энергии фурье-спектра в зависимости от пространственной частоты в диапазоне 1–100 для оптических изображений до интерполяционной фильтрации (e) и после неё (f)

в то время как на оптической двумерной картине более различимы именно поперечные складки. Это также подтверждается графиком зависимости энергии амплитудного фурье-спектра от пространственной частоты (диапазон 1–100, рис. 3, *e*). В начале испытаний НЧ-составляющие в спектре практически отсутствуют, тогда как ВЧ-составляющие являются преобладающими. Поэтому используемый способ регистрации оптических изображений поверхности приводит при получении её численной оценки через расчёт ФР к заметному влиянию ВЧ-составляющей спектра на результат количественной оценки поверхности напылённой плёнки, визуально воспринимаемой как гладкая.

Изображения были обработаны фильтрами по аналогии с разд. 2.2. Видно, что изображения, полученные при фильтрации интерполированием, стали менее резкими, что связано с отсутствием ВЧ-составляющих. Графики изменения ФР, полученной как для всех способов НЧ-фильтрации (расчёт методом триангуляции), так и для всех четырёх методов расчёта ФР, приведены на рис. 3, *b*. Наиболее эффективным методом фильтрации с позиции изменения характера кривой является интерполяционный.

При этом значение ФР заметно снижается (ср. с рис. 3, *a*). Но самое важное, что после применения процедуры НЧ-фильтрации интерполированием характер изменения всех кривых ФР стал другим: минимальное значение свойственно визуально более гладкой поверхности в начале испытаний, а максимум ФР достигается на наиболее шероховатой поверхности плёнки, содержащей максимальное количество складок (см. рис. 3, *b*). Причина наблюдаемого эффекта становится очевидной при анализе трёхмерной яркостной картины фильтрованного изображения (рис. 3, *d*): в результате обработки большинство ВЧ-осцилляций на изображении исчезает. Это также сопровождается определённой потерей важных деталей, присутствовавших на исходном более контрастном изображении. Данный тезис иллюстрируется графиком зависимости энергии амплитудного фурье-спектра от номера пространственной гармоники для изображений после НЧ-фильтрации интерполированием. В спектре практически отсутствуют составляющие, пространственная частота которых превышает 25. По мере увеличения количества циклов нагружения в области низких пространственных частот энергия спектра возрастает, отражая появление поперечных складок на изображении.

Авторы считают, что подобный вид обработки имеет смысл для вычисления количественной оценки изображений и может быть принят лишь в первом приближении. Наши дальнейшие исследования будут направлены как на поиск критериев оценки качества изображений и их предобработку, так и на поиск и реализацию методов адаптивной и нелинейной фильтрации изображений, получаемых с помощью ПЗС-матриц.

Заключение. В предлагаемой работе показано, что все четыре реализованные методики расчёта ФР позволяют дать оценку её значения, удовлетворительно совпадающую с заданным при моделировании. При анализе изображений, зафиксированных с помощью реальных систем технического зрения, к интерпретации результатов расчёта ФР следует подходить дифференцированно, а именно с учётом специфики формирования изображения, прежде всего при оцифровке.

При анализе РЭМ-изображений величина ФР для визуально более гладких поверхностей больше, что связано с высоким уровнем шумов. Применение процедур НЧ-фильтрации не позволило изменить характер кривой зависимости ФР как функции расстояния от места разрушения. Фильтрация Собеля с подчёркиванием границ даёт возможность получить визуально более контрастное изображение, что не изменяет характера зависимости ФР.

Для оптических изображений ФР гладких поверхностей имеет большее значение, что также вызвано значительным количеством шумов. Применение интерполяционной фильтрации (НЧ-фильтрации) позволило изменить ход зависимости ФР от количества циклов нагружения на противоположный, что сопровождалось заметным снижением контрастнос-

ти изображения. Фрактальная размерность может быть количественной мерой рельефа на поверхности, однако необходимо оценивать и максимально исключать влияние шумов на результаты расчёта, что достигается процедурами нелинейной фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Clarke K. C.** Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method // *Comput. and Geosci.* 1986. **12**, N 5. P. 713–722.
2. **Jaggi S., Quattrochi D. A., Lam N. S.-N.** Implementation and operation of three fractal measurement algorithms for analysis of remote-sensing data // *Comput. and Geosci.* 1983. **19**, N 6. P. 745–767.
3. **Lam N. S.-N., Qiu H. L., Quattrochi D. A., Emerson C. W.** An evaluation of fractal methods for characterizing image complexity // *Cartography and Geographic Inform. Sci.* 2002. **29**, N 1. P. 25–35.
4. **Русскин А. Б.** Сравнительный анализ методов измерения фрактальной размерности // Тр. 11-й Междунар. конф. DSPA-2009. М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова Т. 1. С. 346–348.
5. **Петракова И. В.** Исследование механизмов образования и эволюции деформационных структур, образующихся на фольгах монокристалла алюминия $\{100\}\langle 001\rangle$ при несвободном циклическом растяжении: Дис. ... канд. техн. наук /ИФПМ СО РАН. Томск, 2009. 173 с.
6. **Напрюшкин А. А.** Математическое и программное обеспечение системы оценки деформации по оптическим изображениям для решения задач контроля механического состояния материалов: Дис. ... канд. техн. наук /ИФПМ СО РАН. Томск, 2011. 119 с.
7. **Панин В. Е., Кузнецов П. В., Дерюгин Е. Е. и др.** Фрактальная размерность мезоструктуры поверхности пластически деформированных поликристаллов // *Физика металлов и металловедение.* 1997. **84**, № 2. С. 118–122.
8. **Панин С. В., Сырямкин В. И., Глухих А. И.** Применение спектрального анализа изображений поверхности для изучения процессов усталостного разрушения на мезомасштабном уровне // *Автометрия.* 2003. **39**, № 4. С. 79–92.
9. **Панин С. В., Шакиров И. В., Сырямкин В. И., Светлаков А. А.** Применение вейвлет-анализа изображений поверхности для изучения процессов пластической деформации и разрушения на мезомасштабном уровне // *Автометрия.* 2003. **39**, № 1. С. 37–53.
10. **Федер Е.** Фракталы: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.
11. **Sun W., Hu G., Gong P., Liang S.** Fractal analysis of remotely sensed images: A review of method and applications // *Intern. Journ. Remote Sensing.* 2006. **27**, N 22. P. 4963–4990.
12. **Кузнецов П. В., Панин В. Е., Шрайбер Ю.** Фрактальная размерность как характеристика стадий деформации на мезоуровне при циклическом и активном нагружении // *Материаловедение.* 2000. № 10. С. 23–29.
13. **Gonzalez R. C., Woods R. E.** *Digital Image Processing.* Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall, Inc., 2002. 954 p.

Поступила в редакцию 2 февраля 2012 г.