

С. В. Панин, В. И. Сырямкин, А. И. Глухих

(Томск)

**ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ
НА МЕЗОМАСШТАБНОМ УРОВНЕ ***

Предложено с использованием ряда численных характеристик, полученных путем анализа двумерного спектра мощности серии оптических изображений поверхности, оценивать интенсивность процессов локализованной пластической деформации, развивающейся в условиях усталостного разрушения. Показано, что наличие усталостной трещины как малоинформативной области на изображении не оказывает значительного влияния на результаты расчета энергетических характеристик спектра мощности. Сопоставление результатов расчета с результатами вычисления фрактальной размерности свидетельствует о качественном подобии данных подходов, что основано на многомасштабности измерений, реализуемых в том и другом случае.

Введение. Интенсивное развитие вычислительных средств и компьютерной техники обуславливает все более широкое применение спектральных методов обработки и анализа одно- и двумерных сигналов в различных областях науки и техники [1]. Поэтому несмотря на высокие затраты машинных ресурсов гармонический анализ все более эффективно применяется для оценки параметров сигналов, распознавания образов и обработки изображений в условиях наличия помех и отсутствия априорной информации. Значительным стимулом для использования спектрального анализа стал предложенный Кули – Тьюки алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) [2], а в приложении к двумерным сигналам – алгоритм двумерного БПФ [3], реализуемый, в частности, построчно-столбцевым методом.

Обработка и анализ изображений с преобразованием в частотную область имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами, поскольку позволяет оценить вклад тех или иных пространственных составляющих в спектр, а также исключить из рассмотрения частотные диапазоны, соответствующие шумовым составляющим (лежащим, как правило, в обла-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант поддержки ведущих научных школ («Школа академика В. Е. Панина») № 00-15-96174).

ти высоких пространственных частот). Особый интерес в области анализа двумерных спектров изображений представляет работа [4], авторы которой путем вычисления ряда энергетических характеристик спектра мощности полутонных и бинаризованных оптических изображений классифицировали объекты (поверхности шлифов стальных отливок) по шероховатости. При этом двумерный спектр мощности оптических изображений разделялся на несколько частотных диапазонов, представляемых в виде колец различного диаметра, энергия в которых и являлась оцениваемым параметром. Дополнительная информация получалась за счет вычисления энергии фурье-спектра мощности в одном из частотных диапазонов бинаризованного изображения и вычисления лапласиана нулевой гармоники (постоянной составляющей) спектра мощности бинарного изображения. В работе [4] также отмечалось, что применение алгоритмов оценки текстурных признаков [5, 6] для анализа изображений в частотной области, предложенное в [7] при классификации поверхностей стальных отливок, не дало удовлетворительных результатов.

В данной работе поставлена задача экспериментального исследования алгоритмов двумерного спектрального анализа в приложении к исследованию процессов пластической деформации в условиях усталостного разрушения. Ожидалось, что расчет ряда численных характеристик двумерного спектра мощности оптических изображений и зависимости энергии спектра мощности в пределах определенных частотных диапазонов от приращения циклической нагрузки позволят выявить характерные стадии процессов пластической деформации (усталостного разрушения), а также характерные размеры ее носителей.

1. Оптические методы исследования усталостного разрушения на мезомасштабном уровне. В рамках методологии физической мезомеханики материалов [8] традиционно используются три подхода к описанию процессов пластической деформации, наблюдаемых на поверхности нагруженного твердого тела. Во-первых, корреляционные методы. К ним, прежде всего, относится метод построения полей векторов смещений участков поверхности материала при его внешнем механическом нагружении. Данный метод основан на корреляционной обработке оптических изображений и позволяет оценить распределение деформаций при помощи расчета компонент тензора пластической дисторсии [9]. Этот метод известен под названием "surface strain mapping" [10]. Во-вторых, структурные методы, которые основаны на измерении геометрических параметров структурных элементов на изображении поверхности деформируемого материала и предназначены для оценивания изменений, происходящих с ними при нагружении [9]. В-третьих, фрактальные методы, в основе которых лежит вычисление степени самоподобия элементов деформационного рельефа на поверхности, а также их характерного масштаба. При этом поверхность аппроксимируется набором простых геометрических фигур различного масштаба [11], а степень самоподобия рельефа характеризуется одной численной характеристикой – фрактальной размерностью [9].

В условиях приложения к материалу циклических нагрузок пластическая деформация развивается крайне локализованно [12]. Развитие процессов усталостного разрушения изучают на различных структурных и масштабных уровнях [13], при этом особая роль отводится мезоскопическому уровню пластической деформации и разрушения. Этот уровень определяется внутренней структурой материала и условиями его нагружения, а изуче-

ние мезоскопических процессов деформации и нарушения сплошности позволяет выявить характерные стадии усталостного разрушения и на основе этой информации прогнозировать остаточный срок службы [14, 15].

Результаты исследований процессов усталостного разрушения убедительно показали, что в процессе роста усталостной трещины можно выделить несколько характерных стадий, выявляемых, как правило, по скорости ее распространения. При этом традиционно анализировали поверхности разрушения, снятые при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) [16], а численной характеристикой изображений считали фрактальную размерность [17]. Значение фрактальной размерности в определенной степени пропорционально энергии, затраченной на распространение усталостной трещины (раскрытие ее берегов) в данной области материала на рассматриваемом этапе ее роста. В работе [18] методику расчета фрактальной размерности применяли для анализа процессов пластической деформации, используя обработку оптических изображений поверхности плоской грани образцов аустенитной стали. При этом предлагался корреляционный метод вычисления фрактальной размерности, позволивший выявить характерные стадии и масштабы формирования мезоструктуры на поверхности деформируемых образцов.

В то же время следует отметить, что анализ РЭМ- и оптических изображений подразумевает своеобразный переход от реального распределения высот (профиля) поверхности к ее оптическому образу, не всегда однозначно ему соответствующему [19]. В результате в процессе анализа изображений интенсивность пластической деформации оценивается по оптическому образу деформационного рельефа, сформировавшегося на поверхности. Поскольку установить однозначную связь между ними не всегда представляется возможным, зачастую прибегают к анализу текстурных характеристик оптических изображений [5, 6] либо по изменению значения фрактальной размерности выделяют характерные стадии развития пластической деформации [18, 20].

Таким образом, при разработке методов изучения мезоскопической пластической деформации, основанных на обработке оптических изображений, необходимо найти подход, позволяющий через набор численных параметров связать текстуру оптического изображения, деформационный рельеф на поверхности материала, а также характерные стадии пластического течения (и усталостного разрушения).

2. Методика исследований. В работе исследованы образцы алюминиевого сплава Д16АТ, изготовленные в форме двусторонней плоской лопатки из листового проката. Ширина рабочей части образцов составляла 10 мм, длина 100 мм, толщина 1,0 мм. С целью обеспечения локализации процессов усталостного разрушения посередине образцов на боковые грани наносили макроконцентратор напряжений в виде острого V-образного поперечного надреза глубиной ~0,5 мм.

Механические испытания проводили на гидравлической испытательной машине "Schenck-Sinus-100" по схеме циклического растяжения. Цикл нагружения – односторонний, несимметричный, синусоидальный, с постоянной амплитудой. Образцы испытывали в малоцикловой области усталости. Эволюцию деформационного рельефа поверхности и динамику роста трещин изучали на плоской грани образцов с использованием оптико-телевизионного комплекса TOMSC на базе оптического микроскопа "Epiquant" [9].

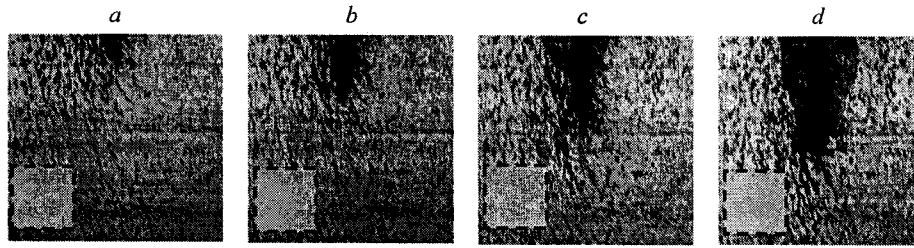


Рис. 1. Оптические изображения поверхности образца сплава Д16АТ при циклических нагрузках: $N = 31 \cdot 10^3$ (a); $N = 31,2 \cdot 10^3$ (b); $N = 31,4 \cdot 10^3$ (c); $N = 31,6 \cdot 10^3$ (d). $\Delta N = 200$, размер изображений 512×512 пикселей. (N – количество циклов нагружения; ΔN – приращение циклической нагрузки.)

Увеличение оптического микроскопа позволило получить изображения поверхности размером 600×600 мкм (рис. 1).

2.1. *Двумерный фурье-спектр мощности.* Для реализации быстрого фурье-преобразования использовалась стандартная процедура, выполненная в виде динамической библиотеки языка программирования Borland Delphi. Для исходного изображения размером 512×512 элементов построчно-столбцовой процедурой метода БПФ рассчитывался его дискретный фурье-образ $F(\omega_x, \omega_y)$. Затем рассчитывался двумерный спектр мощности

$$P(\omega_x, \omega_y) = |F(\omega_x, \omega_y)|^2.$$

Дискретный фурье-спектр мощности представляет собой двумерный массив чисел, который может быть записан в декартовых $[i, j]$ или полярных $[\alpha, r]$ координатах: $P_{i, j}$ или $\tilde{P}_{\alpha, r}$. Центр координат спектра мощности, содержащего $\omega = 256$ гармоник, соответствует середине дискретного двумерного массива размером 512×512 элементов.

Анализ амплитудного фурье-спектра проводился путем расчета энергии составляющих его секторов (сегментов), которая вычислялась как сумма значений элементов двумерного массива v_{ij} , попадающих в сектор с заданными радиусом и шириной. Таким образом, положение и размер каждого сегмента определялись номером его начальной $k\%$ и конечной $e\%$ гармоник, а также количеством сегментов l , на которое разбивался спектр мощности, представленный в полярных координатах:

$$v_{i, j} = \sum_{\alpha = \frac{\pi(i-1)}{l}}^{\alpha < \frac{\pi i}{l}} \tilde{P}_{\alpha, k+j} = \sum_{\alpha = \frac{\pi(i-1)}{l}}^{\alpha < \frac{\pi i}{l}} P_{\cos(\alpha)(k+j), \sin(\alpha)(k+j)},$$

$$i \in [1, l], \quad j \in [1, e - k], \quad k = k\% \omega / 2, \quad e = e\% \omega / 2,$$

где i – порядковый номер сектора, а j – номер гармоники.

Нулевую гармонику (постоянную составляющую), несущую информацию о среднем уровне яркости изображения и имеющую, как правило, амплитуду, значительно превышающую уровень всех остальных гармоник, в расчетах не рассматривали. В данной работе спектр мощности разбивался на

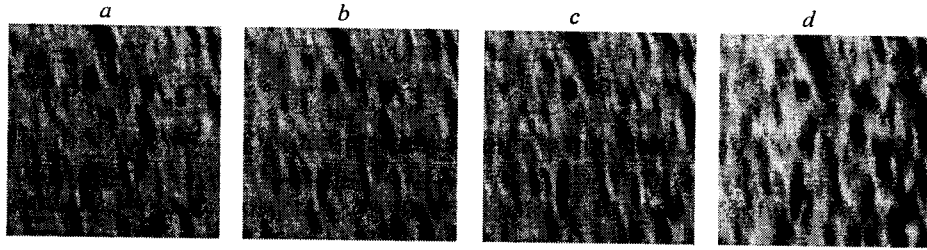


Рис. 2. Детальное представление фрагментов оптических изображений (см. рис. 1) при циклических нагрузках: $N = 31 \cdot 10^3$ (a); $N = 31,2 \cdot 10^3$ (b); $N = 31,4 \cdot 10^3$ (c); $N = 31,6 \cdot 10^3$ (d). $\Delta N = 200$, размер изображений 128×128 пикселей

$l=2$ сектора, и результирующая нормированная энергия рассчитывалась как сумма энергий каждого из сегментов:

$$R_i = \frac{1}{S_i} \int_{j=1}^{e-k} v_{i,j}, \quad i \in [1, l],$$

где S_i – площадь сектора, равная количеству элементов спектра, составляющих данный сектор.

С целью исключения влияния самой усталостной трещины (как малоинформативной области) на результаты вычислений из изображений вырезали фрагменты размером 128×128 пикселей, соответствующие области интенсивного формирования деформационного рельефа слева и справа от трещины. Это должно было позволить получить численную характеристику эволюции деформационного рельефа в «чистом виде» и путем сопоставления ее с данными для исходных (полных) изображений оценить влияние малоинформативной области изображений, соответствующей непосредственно усталостной трещине. В работе приведены результаты расчетов для фрагментов, обозначенных на рис. 1 пунктирной рамкой. Более детально они представлены на рис. 2.

3. Результаты исследований. Нормированная энергия фурье-спектра мощности. На рис. 3 приведены изображения двумерного фурье-спектра мощности, рассчитанные для оптических изображений, представленных на рис. 1. Как видно из представленных изображений, перевод их в частотную область не позволяет найти точное соответствие между вкладом того или иного элемента изображения и его положением на исходном оптическом

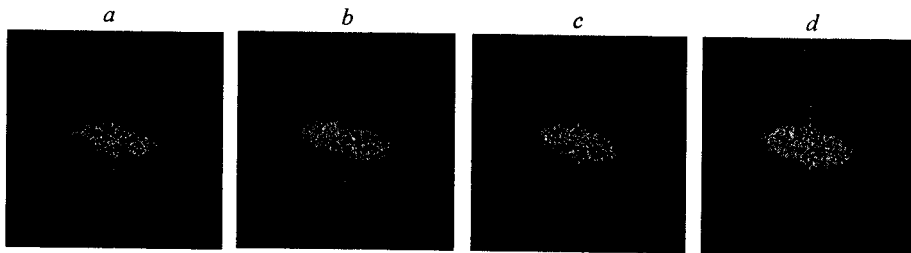


Рис. 3. Двумерный фурье-спектр мощности оптических изображений (см. рис. 1)

изображении. В то же время сопоставление изменений, происходящих в спектре мощности по мере приращения циклической нагрузки (длины усталостной трещины) для серии оптических изображений, позволяет получить некоторые численные оценки рельефа на поверхности с возможностью последующей их интерпретации в терминах деформации.

Для выявления взаимосвязи между характерными размерами элементов деформационного рельефа и видом двумерного спектра мощности анализируемых изображений в работе построен график зависимости его нормированной энергии от номера гармоники в диапазоне от 1 до 50 %. Подобные графики, рассчитанные для «полных» (исходных) изображений и их фрагментов, приведены на рис. 4, *a, b*. Анализ приведенных зависимостей показывает, что по мере роста усталостной трещины на обоих графиках наблюдается постепенное формирование нескольких выраженных максимумов. Для фрагмента изображений они соответствуют 2, 4, 7, 9 и 15 гармоникам, в то время как для полного изображения их количество несколько больше, и наиболее характерными являются максимумы, соответствующие 2, 6, 9, 17, 25 и 32 гармоникам.

Для более подробного исследования изменений (рис. 4, *c, d*), происходящих в двумерном фурье-спектре мощности по мере роста усталостной трещины, а также для выявления области (части) двумерного спектра, в которой формирование деформационного рельефа обуславливает наибольшие изменения, анализировали величину его нормированной энергии, рассчитанную в четырех частотных диапазонах: 1–25 % (кривая 1); 26–50 % (2); 51–75 % (3) и 76–100 % (4). Приведенные зависимости свидетельствуют о качественном подобии изменений энергии спектра мощности в каждом из четырех анали-

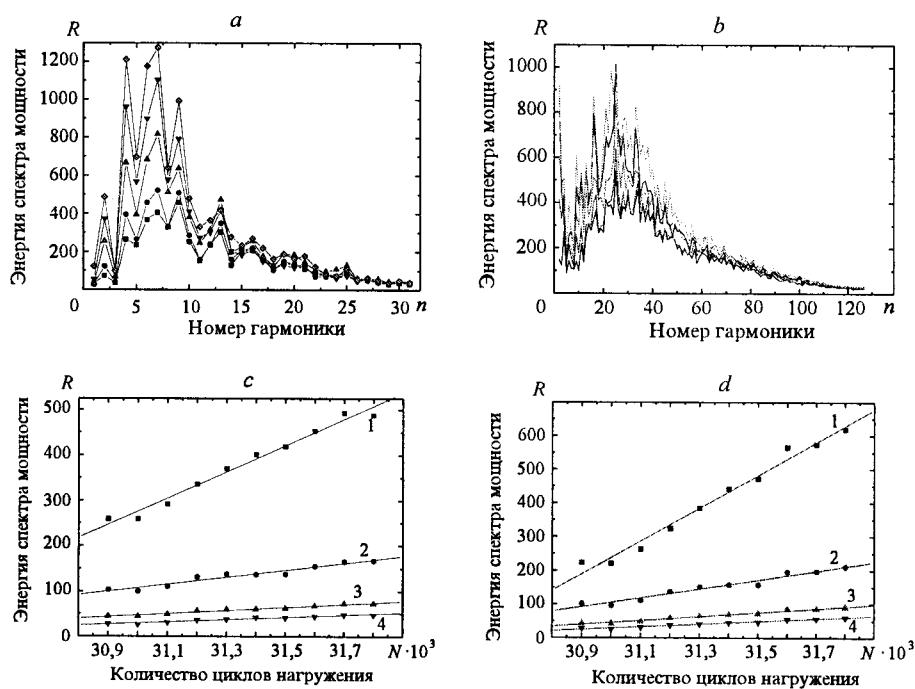


Рис. 4. Графики зависимостей нормированной энергии R фурье-спектра мощности от номера гармоники n

Значение коэффициента b аппроксимирующей кривой

Частотный диапазон	Коэффициент b аппроксимирующей кривой	
	для фрагментов изображений	для полных изображений
1	29,0	48,8
2	7,7	13,3
3	3,4	5,8
4	2,5	4,0

зируемых частотных диапазонов для исходных изображений и их фрагментов. С целью определения численной оценки их различия был рассчитан угол наклона b соответствующих аппроксимирующих прямых. Данные вычислений приведены в табл. 1.

Полученные результаты позволяют сделать предварительное заключение: поскольку наибольшие изменения в процессе роста усталостной трещины происходят именно в диапазоне гармоник 1–25 %, то прежде всего следует анализировать изменения в данном первом частотном диапазоне.

В силу того что полученные оптические изображения характеризуются невысокой степенью контраста, в работе была сделана попытка «улучшения» изображений, реализованная процедурой подчеркивания границ полутонового изображения, при помощи вычисления его лапласиана. Предполагалось, что подчеркивание границ элементов формирующегося деформационного рельефа позволит получить их более достоверную оценку при вычислении характеристик фурье-спектра мощности. На рис. 5, *a* приведены графики зависимости нормированной энергии от номера гармоники спектра мощности для исходных изображений и их фрагментов (рис. 5, *b*), полученные для необработанных (кривая 1) и подвергнутых действию оператора Лапласа (кривая 2). На рис. 5, *c, d* приведены зависимости нормированной энергии от номера гармоники спектра мощности для лапласианов полных изображений и их фрагментов соответственно, рассчитанные во всех четырех частотных диапазонах: 1–25 % (кривая 1); 26–50 % (2); 51–75 % (3) и 76–100 % (4).

Показательно различие коэффициента b аппроксимирующей кривой, характеризующего угол ее наклона, рассчитанное во всем частотном диапазоне для лапласианов исходного изображения и его фрагмента. Значения коэффициента b для графика, рассчитанного во всем частотном диапазоне (1–100 %), для исходного изображения и его лапласиана составляют 13,6 и 6 соответственно, в то время как для фрагмента изображения и его лапласиана их величины равны 8,2 и 4,7 соответственно. Таким образом, подобное представление изображений не позволяет получить дополнительную полезную информацию об анализируемом изображении.

Приведенные на рис. 5, *a, b* зависимости свидетельствуют о том, что в результате подобной обработки как полных изображений, так и их фрагментов скорость увеличения энергии спектра мощности по мере роста трещины снижается. По-видимому, это связано с частичной потерей деталей рельефа и возрастанием уровня высокочастотных пространственных (шумовых) составляющих при получении лапласианов исследуемых изображений. Ана-

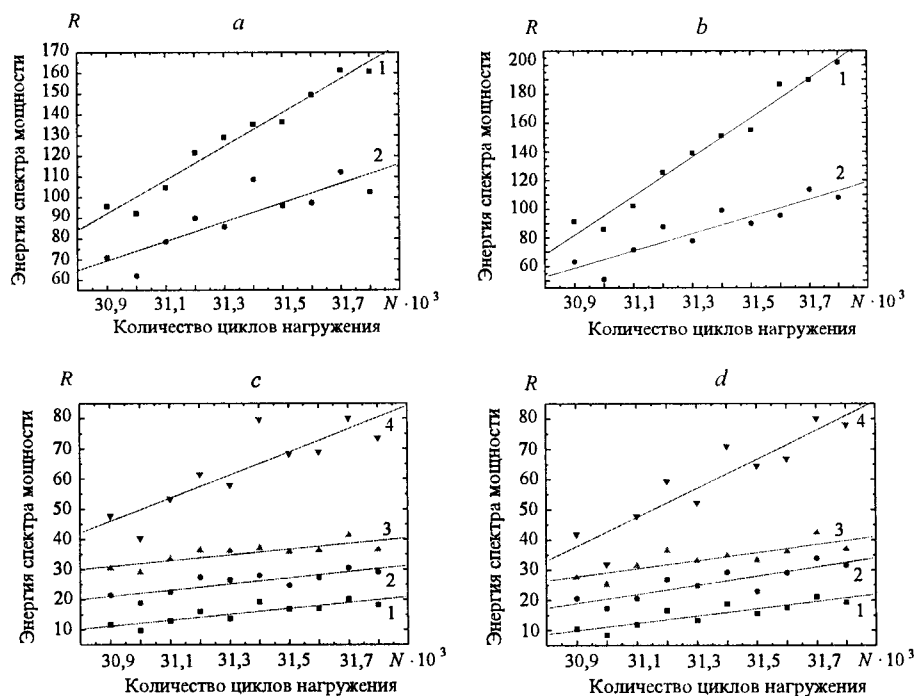


Рис. 5. Энергия R спектра мощности по всему частотному диапазону

лиз графиков изменения нормированной энергии по четырем частотным диапазонам подтвердил это предположение. Данные, приведенные на рис. 5, *c, d*, показывают, что максимальное увеличение уровня энергии высокочастотных пространственных составляющих на обработанных изображениях происходит как раз в четвертом частотном диапазоне 75–100 %.

В то же время графики на рис. 5, *c, d* качественно подобны. Для определения их различий был рассчитан угол наклона соответствующих аппроксимирующих прямых. Данные вычислений приведены в табл. 2 и свидетельствуют о том, что энергия спектра мощности лапласианов полутоновых изображений и их фрагментов отличается в значительно меньшей степени (менее чем в 1,5 раза) по сравнению с исходными изображениями и их фрагментами.

В ходе последующих экспериментальных исследований по аналогии с подходом, предложенным в [11], анализировали бинарные изображения, что

Таблица 2

Значение коэффициента b аппроксимирующей кривой для лапласианов

Частотный диапазон	Коэффициент b аппроксимирующей кривой	
	для фрагмента изображения	для полных изображений
1	0,98	1,22
2	1,03	1,51
3	0,95	1,34
4	3,82	4,80

вызвано, прежде всего, уменьшением количества в них шумовых составляющих в процессе бинаризации. Критерием выбора порога бинаризации являлось равенство на изображении количества пикселей с интенсивностью 0 и 1. Графики зависимости энергии спектра мощности от количества циклов нагружения N фрагмента бинарных изображений в четырех частотных диапазонах приведены на рис. 6, *a*, а также его нормированной энергии спектра мощности по всему частотному диапазону (рис. 6, *b*).

Как видно из сравнения рис. 6, *a* с рис. 4, *c* и рис. 5, *c* бинаризация изображения, действительно, позволяет выявить роль элементов деформационного рельефа, относящихся к низким пространственным частотам. В остальных же частотных диапазонах энергия спектра мощности снижается примерно с одинаковой скоростью. В целом же по всему частотному диапазону наблюдается снижение суммарной нормированной энергии спектра мощности фрагментов бинаризованных изображений (см. рис. 6, *b*).

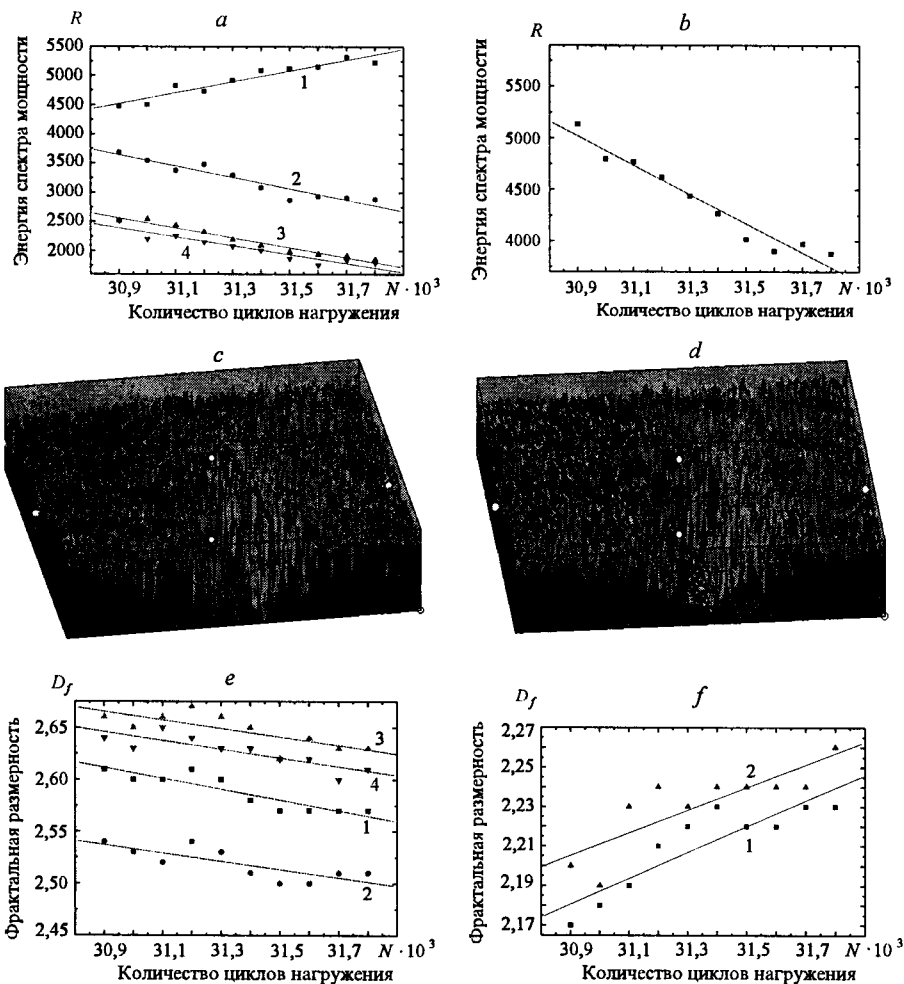


Рис. 6. Энергия спектра мощности фрагмента бинаризованного изображения

Заключительный этап экспериментальных исследований был посвящен сравнению результатов расчета численных характеристик, полученных с помощью фурье-спектра мощности и известного в литературе метода фрактальной размерности (в данном случае метода триангуляции поверхности в приложении к обработке оптических изображений). Кроме того, проанализировано влияние фильтрации (предобработки) оптических изображений с переводом в частотную область на результаты таких вычислений.

На рис. 6, *c, d* показаны псевдотрехмерные представления оптического изображения, приведенного на рис. 1, *c*, без обработки и подвергнутые предобработке с применением низкочастотного фильтра Баттерворта восьмого порядка (low-pass filter) в полосе частот $\sim 25\%$ от размера частотного диапазона амплитудного фурье-спектра или в первом частотном диапазоне. Видно, что в результате подобного вида фильтрации значительно снижается уровень шумовых флуктуаций на изображении, но в то же время не уменьшается информативность изображения, а также не устраниваются полезные детали на нем.

На рис. 6, *e* приведен график зависимости фрактальной размерности (ФР) D_f от количества циклов нагружения, рассчитанный для полного (кривая 1) и фрагмента (кривая 3) изображения при использовании процедуры фильтрации, а также при ее отсутствии (кривые 2 и 4 соответственно). Приведенные графики свидетельствуют о подобном характере изменения ФР для картин как только отражающих изменение деформационного рельефа (фрагментов), так и для содержащих усталостную трещину (полных изображений).

Анализ результатов расчета, учитывающих применение процедуры фильтрации, позволяет сделать следующее заключение. Традиционно используемый подход к расчету ФР по методу триангуляции поверхности предусматривает построение аппроксимирующей прямой по всему диапазону масштабов измерений, поэтому значение ФР до и после фильтрации изображений изменилось незначительно (см. рис. 6, *e*). В связи с этим в данной работе предложено при построении аппроксимирующей прямой учитывать лишь ту часть диапазона масштаба измерений, которая соответствует измерениям с большим шагом (т. е. диапазон, соответствующий низким частотам в двумерном спектре мощности). Это позволит избавиться от влияния высокочастотных (шумовых) пространственных составляющих на оптических изображениях.

График зависимости ФР D_f от количества циклов нагружения при подобной методике ее расчета для полных изображений и их фрагментов представлен на рис. 6, *f* (кривые 1 и 2 соответственно). Видно, что по сравнению с предыдущим случаем значение ФР снизилось от $\sim 2,65$ до $\sim 2,2$ как для полных изображений, так и для их фрагментов. Однако более важным результатом является изменение характера ФР по мере роста трещины. Если на рис. 6, *e* все графики демонстрируют уменьшение ФР с увеличением количества циклов нагружения, то на рис. 6, *f* значение ФР по мере формирования деформационного рельефа возрастает в обоих случаях, причем скорости их роста различаются в небольшой степени (кривая 1 и 2). Следует также отметить следующую закономерность, выявленную для полных изображений: до количества циклов нагружения $N = 31,4 \cdot 10^3$ значение ФР постоянно увеличивается, что соответствует интенсивному формированию деформационного рельефа, после чего значение ФР остается примерно постоянным, т. е. интенсивно распространяется трещина (см. рис. 1). Показательно, что во

втором случае увеличение размера несплошности практически не сказывается на рассчитанном значении ФР.

4. Обсуждение результатов. Обсуждение полученных результатов начнем с анализа формы графика зависимости энергии спектра мощности от номера гармоники и формирования на нем характерных пиков. На подобном графике, построенном для идеального (модельного) изображения, положение каждого максимума должно соответствовать некоему характерному размеру соответствующих объектов на изображении, однако вследствие возможных эффектов «сложения» могут возникать дополнительные максимумы, не соответствующие реальным элементам деформационного рельефа. Поэтому следует оценивать либо огибающую приведенных зависимостей, либо ее сглаженный/фильтрованный вариант. Кроме того, оценка размеров элементов на изображении благодаря поиску характерных максимумов на графике энергии спектра мощности будет полностью корректна лишь для «равноосных» объектов, т. е. имеющих одинаковый размер по осям X и Y (что определяется построчно-столбцовой схемой получения двумерного спектра мощности). В случае, если такие элементы «неравноосны», на графике энергии спектра мощности могут появиться несколько максимумов либо один, но размытый.

Немаловажен и тот факт, что изменения в спектре мощности могут быть обусловлены изменением уровня освещенности изображения, засветкой некоторых его участков, выходом их из отражения и т. д. Видимо, по этой причине график ФР для полных изображений отличается от графика ФР для их фрагментов (см. рис. 6, *f*, кривые 1 и 2), что по нашему мнению обусловлено потерей ряда мелких деталей рельефа вследствие выхода некоторых участков поверхности из отражения, сопровождающегося их частичной засветкой. В результате на фоне формирующегося рельефа происходит некоторое «уплощение» изображения. Наложение этих двух эффектов и приводит к тому, что ФР для фрагментов после $N = 31,1 \cdot 10^3$ практически не меняется (см. рис. 6, *f*, кривая 2). В то же время параметр «энергия спектра мощности» менее подвержен такому влиянию (см. рис. 5, *b*, кривая 1). Таким образом, при спектральном анализе процессов пластической деформации особое внимание должно уделяться предварительной обработке оптических изображений.

Следует также отметить важную выявленную закономерность, касающуюся влияния непосредственно самой трещины на изображении (как области не несущей полезной информации) на оценку интенсивности формирования деформационного рельефа полного изображения и его фрагмента. Расчет таких характеристик, как энергия спектра мощности фурье-спектра и фрактальная размерность, в меньшей степени учитывает наличие трещины на изображении, позволяя тем самым более объективно оценить характер развития деформационного рельефа.

Несмотря на наличие на исходном изображении значительной по площади малоинформативной области, соответствующей усталостной трещине, это не сильно сказывается на скорости изменения энергии в спектре мощности: угол наклона соответствующих аппроксимирующих кривых отличается примерно в 2 раза в каждом из частотных диапазонов. Таким образом, можно провести аналогию между расчетом фрактальной размерности и расчетом энергии фурье-спектра мощности: при мультимасштабном анализе наличие на изображении значительного перепада яркости, соответствующего берегам трещины, не оказывает значительного влияния на величину ФР. А коль

скоро вычисление энергии спектра мощности можно будет также отнести к мультимасштабному анализу, характер изменения данной характеристики подобен ФР.

Результаты, полученные при обработке бинаризованных изображений, наводят на следующие размышления. При классификации стальных отливок по шероховатости в работе [4] также анализировали черно-белые изображения, однако только в одном из частотных диапазонов. По-видимому, размер элементов на шлифах соответствовал именно этому пространственному диапазону частот. В данной работе преимущественным размером элементов деформационного рельефа является размер, соответствующий низкой пространственной частоте. Таким образом, при анализе спектра мощности бинарных изображений может быть получена оценка лишь вклада крупных элементов деформационного рельефа. В то же время особое внимание должно быть уделено выбору порога бинаризации, что определяет как результаты вычислений, так и их последующую интерпретацию.

В предлагаемом методе анализа оптических изображений в отличие от метода построения полей векторов смещений основным оцениваемым параметром является изменение деформационного рельефа по мере приращения нагрузки. Это накладывает некоторые ограничения на его использование, поскольку результаты вычислений должны быть в дальнейшем интерпретированы в терминах напряжений/деформаций. Такая задача пока не решена. Однако предлагаемый подход может быть достаточно эффективно использован для получения ряда численных характеристик, учитывающих многомасштабность элементов на изображении, а также способных выявить характерные стадии их формирования. Это в совокупности с методом расчета полей векторов смещений позволяет получить надежную оценку интенсивности процессов пластической деформации с учетом ее локализации и в заданных условиях нагружения спрогнозировать характер последующего роста усталостной трещины.

Заключение. Анализ распределения фурье-спектра мощности оптических изображений поверхности в области низких пространственных частот позволяет определить лидирующий масштаб развития пластической деформации по мере роста усталостной трещины, а использование информации об увеличении оптической системы может служить источником информации о характерном размере ее носителей.

Оценка интенсивности развития пластической деформации, полученная путем анализа рельефа, может быть представлена в более информативном виде при построении зависимости энергии спектра мощности оптического изображения от номера гармоники. При этом в отличие от фрактальной размерности, численное значение которой не всегда может быть однозначно интерпретировано, можно проследить и оценить количественно влияние составляющих различного масштаба на итоговый результат расчета.

Анализ результирующего значения энергии спектра мощности должен проводиться только после исключения из рассмотрения шумовых составляющих, являющихся весьма характерными для оптических изображений и расположенных, как правило, в области высоких пространственных частот. В данной работе показано, что для использованного увеличения оптической системы наиболее информативным является первый частотный диапазон 1–64 гармоники (1–25 %). Подобная предобработка изображений может быть эффективно реализована путем их фильтрации с преобразованием

в частотную область с последующей полосовой или низкочастотной фильтрацией.

Схожесть зависимостей энергии спектра мощности и фрактальной размерности (при расчете в первом частотном диапазоне и при большом масштабе измерений) от приращения циклов нагружения как для полных изображений, так и для их фрагментов, по-видимому, связана с подобием этих характеристик, что обусловлено многомасштабностью, учитываемой при их измерении. Таким образом, при анализе процессов пластической деформации, сопровождающих распространение усталостной трещины, наличие последней в виде неинформативной области не оказывает значительного влияния на результаты расчета.

Конечной целью предлагаемого подхода к анализу пластической деформации в условиях усталостного разрушения является нахождение соответствия между энергией спектра мощности изображений поверхности и интенсивностью развития пластической деформации в наблюдаемой области, а также энергией, затрачиваемой на распространение усталостной трещины на рассматриваемом этапе ее роста. Нахождение корреляции между этими параметрами будет являться предметом нашей дальнейшей работы.

Авторы выражают благодарность научному сотруднику ИФПМ СО РАН С. В. Сапожникову за помощь в проведении усталостных испытаний на машине "SchencK-Sinus-100", а также младшему научному сотруднику ИФПМ СО РАН А. Ю. Быдзану за предоставленную серию оптических изображений сплава Д16АТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1989.
3. Даджион Д. Э., Мерсеро Р. М. Цифровая обработка многомерных сигналов. М.: Радио и связь, 1985.
4. Tsai D. M., Tseng Ch. F. Surface roughness classification for castings // Pattern Recogn. 1999. N 32. P. 389.
5. Харалик Р. М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. 1979. 67, № 5. С. 98.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 2.
7. Muzzolini R., Yang Y.-H., Pierson R. Texture characterization using robust statistics // Pattern Recogn. 1994. 27. P. 119.
8. Physical Mesomechanics of Heterogeneous Media and Computer-Aided Design of materials /Ed. by V. E. Panin. Cambridge: Cambridge Interscience Publishing, 1998.
9. Сырямкин В. И., Панин В. Е., Парфенов А. В. и др. Оптико-телевизионные методы исследования и диагностики материалов на мезоуровне // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. С. 176.
10. Sutton M. A., Cheng M. Q., Peters W. H. et al. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis // Image and Vision Computing. 1986. 4, N 3. P. 143.
11. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994.

12. **Иванова В. С., Терентьев В. Ф.** Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1976.
13. **Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И.** Структурные уровни деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990.
14. **Панин В. Е., Плешанов В. С., Кибиткин В. В., Сапожников С. В.** Анализ полей векторов смещений и диагностика усталостного разрушения алюминиевого сплава на мезоуровне // Дефектоскопия. 1998. № 2. С. 80.
15. **Шаняевский А. А.** Ротационная неустойчивость деформации и разрушения металлов при распространении усталостных трещин на мезоскопическом масштабном уровне. I. Процессы пластической деформации в вершине трещины. II. Механизмы разрушения // Физическая мезомеханика. 2001. 4, № 1. С. 73.
16. **Иванова В. С., Шаняевский А. А.** Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металлургия, 1988.
17. **Иванова В. С., Кузеев И. Р., Закиричная М. М.** Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998.
18. **Кузнецов П. В., Панин В. Е., Левин К. В. и др.** Стадии и характерные масштабы формирования фрактальной мезоструктуры при активном растяжении аустенитной нержавеющей стали // Физическая мезомеханика. 2000. 3, № 4. С. 89.
19. **Huang Z. H., Tian J. F., Wang Z. G.** Analysis of fractal characteristics of fractured surfaces by secondary electron line scanning // Mater. Sci. and Eng. 1989. A118. P. 19.
20. **Панин В. Е., Кузнецов П. В., Дерюгин Е. Е. и др.** Фрактальная размерность мезоструктуры поверхности пластически деформируемых поликристаллов // Физика металлов и металловедение. 1997. 84, № 2. С. 189.

*Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН,
E-mail: svp@ms.tsc.ru*

*Поступила в редакцию
11 декабря 2002 г.*