

С. В. Панин, И. В. Шакиров, В. И. Сырякин, А. А. Светлаков

(Томск)

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА
ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ
НА МЕЗОМАСШТАБНОМ УРОВНЕ***

В рамках подхода физической мезомеханики материалов предложен новый метод численных оценок процессов деградации поверхности (вследствие пластической деформации, электромиграции, усталостного разрушения и т. д.). Численные характеристики вейвлет-спектров, а также их графическое двумерное представление могут быть использованы как для оценки качества и улучшения оптических изображений (на стадии предобработки), так и для анализа изменений, происходящих при приложении к исследуемым материалам внешних нагрузок (на стадии анализа (понимания) изображений).

Введение. В настоящее время обработка изображений является одной из наиболее актуальных проблем, в рамках которой решается множество фундаментальных и прикладных задач. В общем случае в процессе обработки изображений в системах технического зрения решаются две основные задачи: детектирование (обнаружение) объектов различной природы на общем фоне и их последующая идентификация (распознавание). Как правило, термин «изображение» используется применительно к видимому диапазону электромагнитных волн. Однако разработка новых методов и аппаратных средств получения двумерных сигналов позволяет получать двумерные распределения (образы) и в других диапазонах, отличных от видимого. В результате независимо от типа датчика двумерного сигнала основной задачей обработки изображений является извлечение характерных информативных признаков присутствующих на нем объектов.

Спектральные, корреляционные и фрактальные методы анализа изображений подчас оказываются недостаточно эффективными, и, как правило, при оценке характеристик последних необходимо учитывать совокупность результатов, полученных от применения всех указанных подходов [1, 2].

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

Развитие новых методов обработки изображений, основанных на использовании вейвлет-преобразования [3], определяется высоким потенциалом его математического аппарата и эффективностью алгоритмов обработки изображений в системах различного назначения. Последнее определяется возможностью проведения эффективной оценки свойств сигнала одновременно в частотной и во временной областях [4].

В данной работе делается попытка использовать вейвлет-спектры изображений поверхности нагруженных материалов и ряд их численных оценок, полученных при кратномасштабном анализе, для изучения процессов пластической деформации и разрушения некоторых материалов при различных методах их внешнего нагружения. Для этого проводили обработку и анализ изображений их поверхности, полученных с помощью оптико-телевизионного комплекса, растрового электронного микроскопа (РЭМ) и сканирующего туннельного микроскопа (СТМ).

1. Обзор методов анализа изображений, используемых в физической мезомеханике. В рамках методологии физической мезомеханики материалов особое внимание уделяется исследованиям процессов на поверхности нагруженного твердого тела [5]. При этом поверхность, с одной стороны, является местом зарождения пластических сдвигов, а с другой стороны, отражает процессы, развивающиеся в объеме нагруженного твердого тела. Численный анализ характеристик деформационного рельефа, сформировавшегося при заданных времени и условиях нагружения на поверхность деформируемого образца, особенно когда развитие деформации протекает крайне неоднородно и локализованно (усталостное разрушение, изнашивание в парах трения и т. п.), должен позволить как оценить характерные размеры и форму носителей деформации мезомасштабного уровня, так и спрогнозировать остаточный ресурс работы. Первое в совокупности с результатами построения полей векторов смещений [6] может служить исходными данными для построения адекватных моделей механического поведения материалов при их механическом нагружении [7]. Второе особенно привлекательно для решения задач диагностики состояния нагруженных материалов и деталей машин [8, 9].

В приложении к решению материаловедческих проблем и задач физической мезомеханики материалов обработка изображений используется для получения интегральных и дифференциальных характеристик внутренней структуры материала или рельефа (топографии) его поверхности [6]. Для этого применяются статистические и структурные алгоритмы выявления и оценивания информативных признаков анализируемых изображений. К первым относится метод построения полей векторов смещений, предназначенный для оценки малых и практически неразличимых глазом изменений деформационного рельефа. Последующая численная оценка напряженно-деформированного состояния осуществляется вычислением компонент тензора пластической дисторсии [6]. Ко вторым относятся методы, основанные на выделении на изображении объектов и последующем определении их размеров, местоположения и т. п. [6, 10].

Кроме того, выделяют фрактальные алгоритмы, основанные на расчете фрактальной размерности. Это позволяет путем аппроксимации поверхности или ее оптического образа набором простых геометрических фигур различного масштаба получить численное значение, связанное определенным образом с характерным размером элементов этого изображения [6, 11, 12]. Также анализ внутренней структуры материалов зачастую проводят путем

оценки текстурных характеристик оптических изображений поверхности или шлифов поперечного сечения. Наиболее подробный обзор методов оценки текстурных характеристик изображений объектов различной природы проведен в работе [13].

К основным недостаткам вышеописанных методов можно отнести следующие. Метод построения полей векторов смещений ориентирован на анализ плоских деформаций (развивающихся в плоскости изображения XU). В то же время формирование деформационного рельефа, как правило, связано с перемещениями элементов внутренней структуры вдоль оси Z (и прежде всего под действием поворотных мод деформации). Немаловажным является и тот факт, что при больших приращениях деформации метод построения векторов смещений оказывается неспособным установить точную корреляцию между процессом пластической деформации и перемещениями участков поверхности. Метод расчета фрактальной размерности также имеет ряд недостатков, связанных с тем, что изображению поверхности ставится в соответствие одно число, и установление точной связи между его значением и характерным пространственным размером структурных элементов изображения не всегда представляется возможным. Помимо этого оптическое изображение поверхности, представляя собой функцию распределения яркости (оптический образ его рельефа), зачастую неоднозначно соответствует последнему. В этом случае численные оценки оптических либо РЭМ-изображений могут не соответствовать распределению рельефа, приводя к ложным выводам и заключениям [14].

2. Вейвлет-преобразование: математический аппарат и численные характеристики. В ряде работ [15, 16] показано, что главное отличие вейвлет-преобразования от преобразования Фурье заключается в более информативном представлении частотно-временных свойств сигналов. За способность вейвлет-анализа рассматривать сигнал в различных временных масштабах его часто называют математическим микроскопом [15]. В настоящее время получили распространение два основных направления вейвлет-преобразования. Одно направление – непрерывный вейвлет-анализ, основными приложениями которого являются локализация и классификация особых точек сигнала, а также вычисление его различных характеристик и частотно-временной анализ. Другое направление – дискретный вейвлет-анализ, основной областью применения которого является сжатие видеoinформации, а также обработка изображений [15]. Кратко рассмотрим задачи, связанные с обработкой изображений и представляющие наибольший интерес для изучения поведения материалов при их статическом, циклическом и динамическом нагружениях, анализа процессов деградации тонких пленок в процессе их формирования и нагружения и т. п.

Результат вейвлет-преобразования при большой информативности характеризуется и большим объемом вычислений, а также, как правило, избыточностью представления результатов (по сравнению с фурье-преобразованием). Это объясняется прежде всего тем, что вейвлет-преобразование позволяет вычислить относительный вклад частот в каждый момент времени (нахождением свертки с разномасштабными версиями вейвлета). Следовательно, наблюдается эволюция спектра, аналогичного Фурье, но не за выбранный период времени, как в случае фурье-преобразования, а по всему временному интервалу. Таким образом, для информативного разложения исходного сигнала достаточно знать его вейвлет-преобразование на некоторой довольно редкой решетке в частотно-временной плоскости.

Начало работам, получившим название «многомасштабный анализ» (multiresolution analysis), положено в 1983 году П. Бэртом и Е. Адельсоном [15]. Был предложен алгоритм, основным принципом работы которого является разложение конечного сигнала на две составляющие с помощью сглаживающего фильтра. На основе алгоритма Бэрта – Адельсона предложен алгоритм Малла, суть которого состоит в том, что сигнал раскладывается при помощи копий эталонного сигнала, порожденного ровно одним фиксированным сигналом (H -фильтром) и его сдвигами (реализациями, смещенными по оси времени), огрубляющими (сглаживающими) исходный сигнал на каждом этапе преобразования [15]. В то же время сглаженная часть анализируемого сигнала находится при помощи другой функции (G -фильтра), у которой ортогональны не только сдвиги, но и все перемасштабированные версии [15]. В общем случае коэффициенты фильтра G должны соответствовать коэффициентам фильтра H с чередующимися знаками, а также функция фильтра G (импульсная характеристика фильтра) должна соответствовать ограничениям на вейвлетобразующую функцию, т. е. являться вейвлетом. Алгоритм Малла несколько отличается от алгоритма Бэрта – Адельсона. Главным его преимуществом является то, что длина массивов (низкочастотного и высокочастотного) разложенного сигнала равна длине исходного [15].

Для изображения размером $M \times N$ элементов каждая итерация вейвлет-преобразования реализуется в два этапа. Сначала с помощью фильтров G и H выполняются одномерные преобразования по всем строкам матрицы изображения, в результате получают две матрицы, состоящие из низкочастотных и высокочастотных компонент размером $(M/2) \times N$ каждая. На втором этапе с помощью этих же фильтров выполняют преобразования столбцов обеих матриц изображений. В итоге после выполнения первой итерации вейвлет-преобразования получается изображение размером $M \times N$, условно разбитое на четыре квадранта:

LP1–LP1 – квадрант, представляющий собой уменьшенную и сглаженную по строкам и столбцам версию изображения – оригинала;

LP1–HP1 – квадрант, содержащий дифференциальную информацию об исходном изображении в горизонтальном направлении;

HP1–LP1 – квадрант, содержащий дифференциальную информацию об исходном изображении в вертикальном направлении;

HP1–HP1 – квадрант, содержащий дифференциальную информацию об исходном изображении в диагональном направлении.

Большая и важнейшая часть информации, необходимая для восстановления исходного изображения, сконцентрирована в квадранте LP1–LP1. Дифференциальные квадранты содержат локальную информацию о высокочастотном заполнении оригинала. Данное свойство вейвлет-преобразования определяет его основное преимущество перед фурье-аналогом. Вейвлет-преобразование изображения содержит не только частотную информацию об исходном сигнале, но и пространственную, допуская тем самым локализацию различных свойств исходного изображения. Следовательно, вейвлет-преобразование изображения позволяет синтезировать на его основе адаптивные алгоритмы, обладающие пространственно-частотными свойствами.

Из существования для вейвлет-преобразования аналога равенства Парсевала [16] следует, что в пространстве действительных функций полная энергия сигнала может быть записана через амплитуды вейвлет-преобразования, где плотность энергии сигнала характеризует энергетические уровни.

К энергетическим характеристикам вейвлет-преобразования относятся мера локальной перемежаемости спектра $I_w(a, t)$ и мера контраста $C_w(a, t)$, которые определяются следующим соотношением:

средняя энергия по времени; величина E'_w удовлетворяет равенству вида

$$I_w(a, t) = \frac{E_w(a, t)}{E'_w};$$

$$E'_w(a, t) = \int_{a'=0}^{a'=a} E_w(a', t) da'$$

Мера локальной перемежаемости есть мера локальных отклонений от среднего поля спектров на каждом масштабе; она позволяет определить степень неравномерности распределения энергии по масштабам (угловыми скобками обозначено усреднение по t). Мера контраста позволяет определять даже малые изменения в сигнале, когда необходимо, например, выявить структурированность слабого сигнала или слабые вариации на фоне крупной структуры (встроенные структуры). Данные характеристики для оценки одномерных сигналов были предложены классиком отечественного вейвлет-анализа Н. М. Астафьевой в работе [16]. В ней предлагается использовать энергетические характеристики вейвлет-преобразования применительно к ортогональному анализу для определения количественных мер изображений.

Большинство вейвлет-функций, описанных в литературе, обладало существенным недостатком, заключающимся в том, что либо импульсная характеристика фильтров, построенных на их основе, имела бесконечный набор коэффициентов, либо (как в случае вейвлет-функции Хаара) была плохо локализована в частотной области [15]. И. Добеши синтезировала семейство ортогональных вейвлетов, порожденных двумя D2, четырьмя D4, шестью D6 отсчетами и т. д. [3, 17], фильтрам которых соответствует конечная импульсная характеристика. При этом чем больше отсчетов во временной области, тем лучше вейвлет локализован в частотной. Следует отметить, что вейвлет Хаара является частным случаем системы фильтров Добеши и соответствует фильтру D2. В данной работе исследования проводились с использованием фильтров D2, D4 и D6 (см. разд. 3.3). Более подробное описание принципов синтеза и функционирования фильтров Добеши дано в работах [3, 17].

3. Разработка экспериментальных методов обработки и анализа изображений. Среди основных этапов обработки изображений, реализуемых при работе систем технического зрения [18], следует выделить:

- 1) предобработку, предназначенную как для удаления шумов и помех, так и для фильтрации и улучшения изображений;
- 2) сегментацию как стадию декомпозиции изображения на объекты и фон;

3) анализ изображений или определение информативных признаков, которые призваны охарактеризовать объекты и процессы в зоне наблюдения.

Рассмотрим применение вейвлет-преобразования на всех трех отмеченных стадиях и более подробно остановимся на экспериментальном исследовании анализа изображений.

3.1. *Предобработка изображений.* Анализ литературных данных [19, 20] показывает, что даже качественные, высококонтрастные изображения, полученные с помощью различной информационно-измерительной техники (аппаратуры), несут в себе большое количество искажений различной природы, шумовых полей и т. п. Это мешает работе алгоритмов обработки изображений и требует дополнительных усилий для их подавления и устранения.

Вейвлет-спектр изображений также подвержен искажениям различного рода, связанным с шумовыми свойствами сигналов. Следует отметить, что понятие «помеха» связано с типом обработки изображения, и один и тот же эффект может по-разному интерпретироваться в различных задачах обработки изображений, таких, как слежение, сжатие, текстурная обработка и т. п. [21]. В данной работе понятие «помеха» связано с факторами, препятствующими правильному детектированию полезного сигнала (формированию деформационного рельефа на поверхности). Перечислим основные мешающие факторы [20]:

- 1) белый шум (связан с преобразованием светового поля в электрический сигнал);
- 2) низкочастотный шум (связан с искажениями постоянной составляющей в сигнале);
- 3) высокочастотный шум (связан с высокочастотным заполнением);
- 4) текстурные помехи (не связаны со способом получения двумерного сигнала).

Известны основные (базовые) пути решения проблемы фильтрации помех [20, 22]: для белого шума это, прежде всего, линейная фильтрация сигнала (например, фильтр линейного среднего) или нелинейный медианный фильтр; для устранения искажений постоянной составляющей используются либо спектральные методы, либо приведение к нулю постоянной составляющей в ограниченном скользящем окне. Высокочастотные помехи устраняются также спектральными методами либо цифровыми фильтрами. Задача обработки текстурных помех в настоящее время не формализована и связана с решением конкретных задач, а анализ таких методов выходит за рамки данной работы.

У каждого из перечисленных методов имеются свои достоинства и недостатки. Соотнесем их с алгоритмами, основанными на вейвлет-преобразовании: ортогональное вейвлет-преобразование относится к спектральным методам, однако его основное преимущество перед преобразованием Фурье, как уже отмечалось выше, заключается в возможности локализации низко- и высокочастотных деталей, следовательно, для большинства задач можно синтезировать алгоритмы, осуществляющие за один подход решение задачи предобработки и обработки изображений. Рассмотрим основные способы подавления шумов в вейвлет-спектре. Одним из наиболее важных достоинств вейвлет-спектра является разграничение низко- и высокочастотных компонент таким образом, что низкочастотные компоненты, а следовательно, и низкочастотные шумы, сосредотачиваются в квадранте LP-LP, поэтому они не влияют на обработку остальных трех квадрантов. То же самое относится и к высокочастотным шумам, сосредоточенным в квадранте HP-HP.

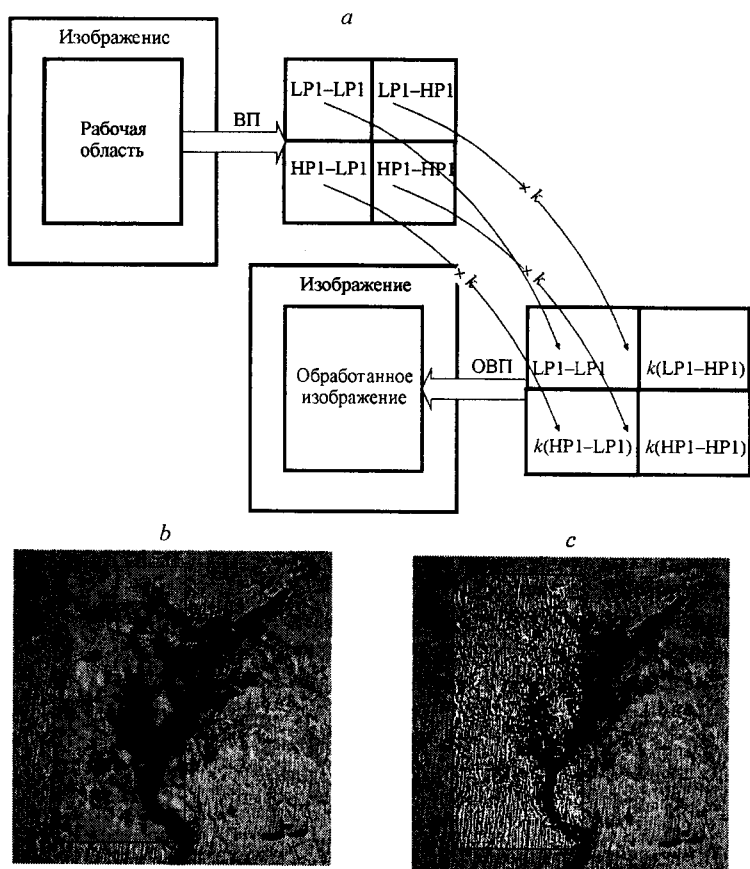


Рис. 1. Алгоритм предварительной обработки изображения с использованием прямого и обратного вейвлет-преобразования ($k \in 0, 1, 2, \dots$) (a): сглаживающий фильтр ($k = 0$) (b): повышение четкости изображения ($k = 2$) (c)

Специфика вейвлет-преобразования позволяет реализовать простые и эффективные алгоритмы работы блока предварительной обработки сигнала: сглаживающий фильтр и алгоритм повышения резкости изображения. В первом случае достаточно обнулить высокочастотные составляющие вейвлет-спектра изображения, а затем выполнить обратное вейвлет-преобразование. Во втором случае необходимо пропорционально увеличить высокочастотные составляющие вейвлет-спектра изображения. Общая схема алгоритмов представлена на рис. 1, a. Результаты обработки изображения показаны на рис. 1, b, c.

Однако, если свойства сигналов и постановка задачи таковы, что разграничения компонент недостаточно, можно провести предобработку сигнала на основе энергетических характеристик, например меры локальной перемежаемости. Это позволит определить среднюю энергию квадранта и таким образом разнести по уровню (бинаризовать) отсчеты вейвлет-спектра, разделив его на фон-объект (данный алгоритм эффективен в задачах сегментации). В то же время данный параметр позволяет «отсечь» ложные выбросы энергии в ограниченном окне, тем самым повышая эффективность алгоритма.

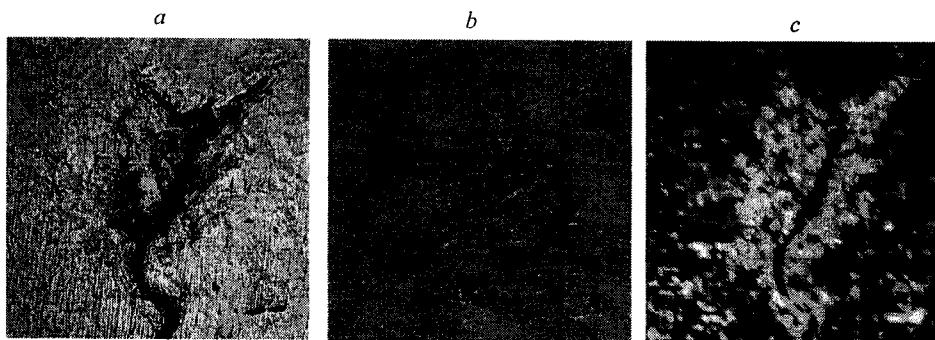


Рис. 2. Результаты расчета энергии вейвлет-спектра исходного изображения (а) с помощью контурного алгоритма без предобработки (b) и с предобработкой вейвлет-спектра (с)

мов последующей обработки. Как правило, выбор порога для обоих методов происходит по следующей схеме:

1. Вычисляется средняя энергия E_{cp} квадранта (либо расчеты производятся в ограниченном окне).
2. Вычисляется среднеквадратичное отклонение (СКО) энергии E_{σ} в данном квадранте (либо в ограниченном окне).
3. Применяется алгоритм отсекающих ложных выбросов:

$$I(x, y) = \begin{cases} I(x, y), & \text{если } |E(x, y) - E_{cp}| < 3E_{\sigma}, \\ \sqrt{E_{\sigma}} & \text{иначе} \end{cases}$$

(I – яркость пиксела в текущей точке с координатами (x, y)).

Следует отметить, что для разного рода задач могут быть синтезированы более сложные (адаптивные) алгоритмы. Пример использования данного подхода для обработки изображений представлен на рис. 2, а–с.

3.2. *Сегментация изображений (выделение контурных линий)*. Использование вейвлет-преобразования позволяет реализовать подходы и для решения задач сегментации. Применение меры локальной перемежаемости выявляет даже слабое отклонение энергии поля полезной составляющей по отношению к энергии фона. Для этого допустимый порог появления ложных выбросов устанавливается пропорциональным величине фоновой помехи в изображении, что способствует выделению значимых коэффициентов, принадлежащих границе объект–фон (сегментация посредством разделения границ областей [22]). Аналогично использование величины контраста позволяет выявить крупные структуры, принадлежащие объекту на изображении, так как их локальная составляющая отлична от составляющих фона (сегментация посредством разметки точек области [22]). Схема работы алгоритма и полученные результаты представлены на рис. 3, а–с.

3.3. *Описание изображений (вычисление информативных признаков)*. Для исследования возможностей применения вейвлет-анализа к изучению процессов деградации поверхности материалов в условиях приложения внешних нагрузок были использованы полученные с помощью различных датчиков видеоинформации три серии изображений:

– образец кремнистого железа, разрушенный в результате испытаний на статическое растяжение. Запись картин рельефа на поверхности осуществ-

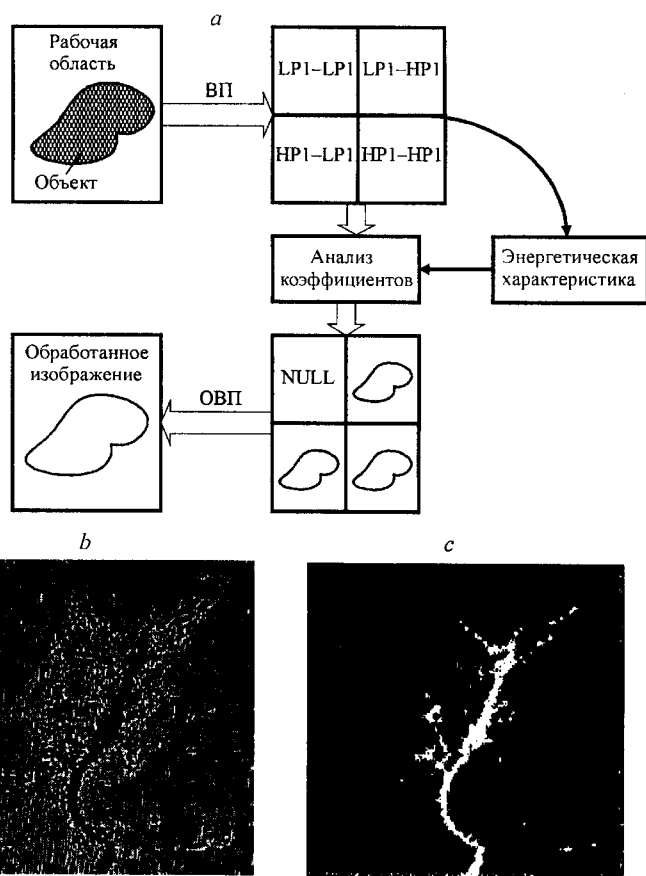


Рис. 3. Общий вид алгоритма сегментации с использованием прямого и обратного вейвлет-преобразования (а): сегментация посредством выделения границ областей (б): сегментация посредством разметки точек области (с)

лялась на различном расстоянии от места разрушения с помощью РЭМ [23] (рис. 4, *a-d*);

– тонкий золотой проводник, деградация которого происходила вследствие пропускания через него постоянного тока высокой плотности. Запись изображений поверхности при различных временах пропускания электрического тока проводилась с помощью СТМ [24] (рис. 5, *a-d*);

– образец конструкционной стали 20Х13, в котором в условиях плоского знакопеременного изгиба распространялась усталостная трещина. Запись изображений на различных этапах роста трещины производили оптико-телевизионной измерительной системой на базе микроскопа EPIQUANT [25] (рис. 6, *a-d*).

Результаты расчета значений энергии горизонтальной компоненты вейвлет-спектра, а также меры его локальной перемежаемости для образцов кремнистого железа как функции расстояния от места съемки до области разрушения представлены на рис. 4, *i, j*. Для сравнения на тех же графиках приведена зависимость фрактальной размерности, рассчитанной методом триангуляции поверхности [26]. Символами D2, D4 и D6 обозначены зависимости, полученные при расчете с использованием вейвлет-функций типа

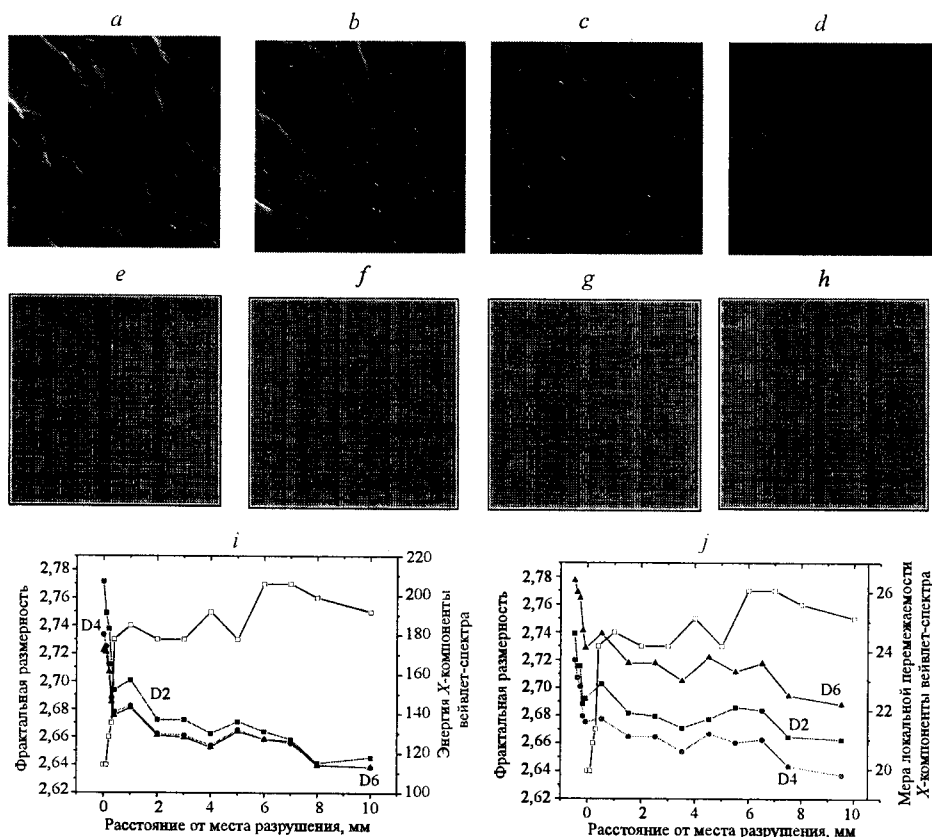


Рис. 4. РЭМ-изображения образцов кремнистого железа, полученных на различном удалении от места разрушения: 0 (a), 0,3 (b), 2 (c), 10 мм (d) (размер изображений 500 × 500 мкм); соответствующие им векторные представления X- и Y-компоненты энергии вейвлет-спектра (e–h); графики изменения энергии X-компоненты вейвлет-спектра (i) и меры ее локальной перемежаемости (j)

Добеши второго, четвертого и шестого порядков соответственно. Обращают на себя внимание следующие особенности.

1. График фрактальной размерности ведет себя противоположно графику, рассчитанному для характеристик вейвлет-спектра.

2. Разброс значений энергии горизонтальной компоненты вейвлет-спектра при расчете с использованием различных типов вейвлет-функции (см. рис. 4, i) значительно меньше, чем при таких же расчетах меры их локальной перемежаемости (см. рис. 4, j).

3. Изменение значения энергии X-компоненты вейвлет-спектра (по вейвлету D2) происходит примерно в 2 раза, в то время как для меры локальной перемежаемости это значение составляет примерно 0,2.

При получении изображений путем прямого измерения профиля поверхности с помощью СТМ шум на изображениях содержится в значительно меньшей степени (за счет соответствующей аппаратной реализации). Это обуславливает подобие графика зависимости фрактальной размерности и графиков характеристик вейвлет-спектра (рис. 5, i, j). При этом независимо от типа используемой вейвлет-функции результаты расчета совпадают до-

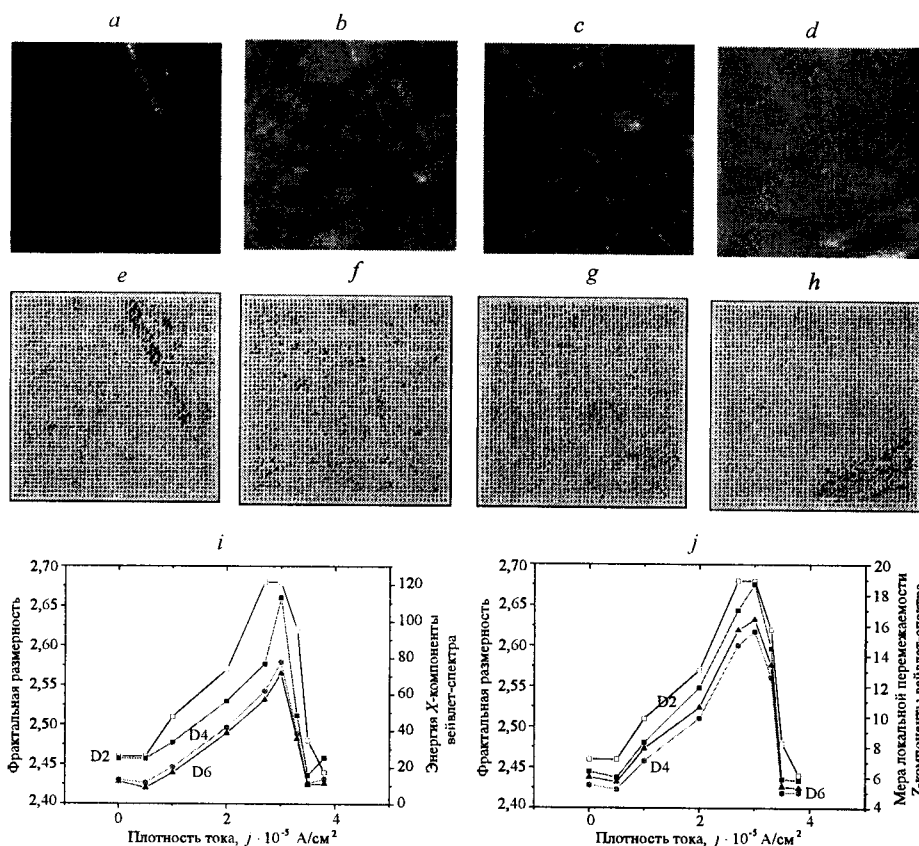


Рис. 5. СТМ-изображения поверхности золотого проводника, полученные при различных плотностях пропускаемого тока: 0 (a), $2 \cdot 10^{-5}$ (b), $3 \cdot 10^{-5}$ (c), $3,5 \cdot 10^{-5}$ А/см² (d) (размер изображений 8×8 мкм): соответствующие им векторные представления X- и Y-компоненты энергии вейвлет-спектра (e–h): графики изменения энергии X-компоненты вейвлет-спектра (i) и меры ее локальной перемежаемости (j)

статочно близко. Отметим следующие характерные особенности графиков, приведенных на рис. 5, i, j.

1. Изменение значений энергии горизонтальной компоненты спектра происходит в 5 раз (вейвлет D2), в то время как для меры локальной перемежаемости величина изменения составляет 3 раза.

2. Расчет обеих численных характеристик с использованием вейвлет-функции D2 обеспечивает максимальную «чувствительность» расчета.

3. Значение фрактальной размерности, полученное в результате обработки оптических изображений, растет достаточно резко при небольшой скорости роста трещины и незначительном изменении деформационного рельефа соответственно и может иметь спады при локализациях пластического течения в окрестности вершины распространяющейся усталостной трещины.

4. Значение энергии горизонтальной компоненты вейвлет-спектра за время наблюдений увеличилось в 5 раз (вейвлет D2), в то время как мера ее локальной перемежаемости выросла только в 2 раза.

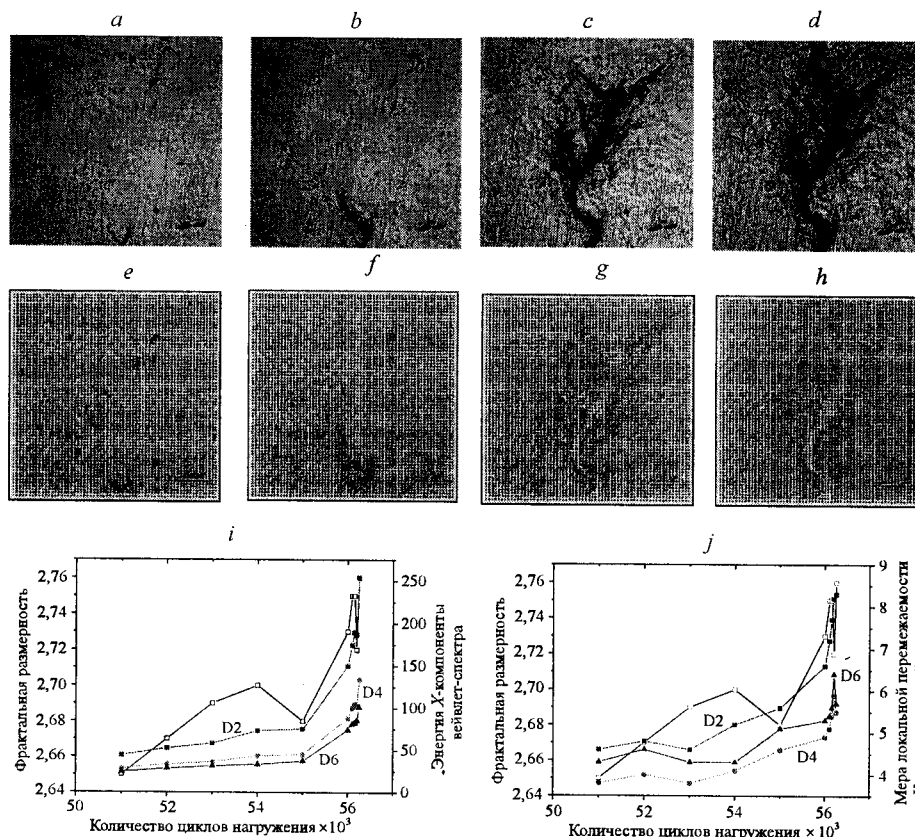


Рис. 6. Оптические изображения образцов стали 20X13, полученные при различном приращении циклической нагрузки: $51 \cdot 10^3$ (a), $55 \cdot 10^3$ (b), $56 \cdot 10^3$ (c), $56,2 \cdot 10^3$ циклов (d) (размер изображений 400×400 мкм): соответствующие им векторные представления X- и Y-компоненты энергии вейвлет-спектра (e–h); графики изменения энергии X-компоненты вейвлет-спектра (i) и меры ее локальной перемежаемости (j)

5. При расчете обеих численных характеристик вейвлет-спектра с использованием функции D2 результат вычислений наиболее чувствителен к изменениям, происходящим на оптическом изображении.

При записи изображений с помощью оптико-телевизионной системы уровень шумов так же, как и в случае с РЭМ, является достаточно высоким. Однако за счет используемого при расчете вейвлет-спектра в процедуре фильтрации (правило 3σ) зависимости изменяются достаточно плавно, и их вид близко напоминает вид кривой скорости роста усталостной трещины, рассчитанной для данного образца [25].

Следует также отметить, что в процессе разработки программы вейвлет-анализа был предложен метод графического представления результатов расчета вейвлет-спектра путем построения векторов, горизонтальная и вертикальная компоненты которых равны значению энергии спектра по X- и Y-компоненте соответственно. Результаты такого графического представления, рассчитанные для РЭМ, СТМ и оптических изображений, приведены на рис. 4, e–h, 5, e–h и 6, e–h соответственно. Анализ полученных картин по-

казывает, что подобные графические представления позволяют эффективно выявлять, локализовывать (определять местоположение) характерные элементы деформационного рельефа и отбрасывать влияние шумовых составляющих изображения.

4. Обсуждение результатов. При обработке изображений, полученных с помощью РЭМ (см. рис. 4, *a-d*), наглядно прослеживается изменение деформационного рельефа на поверхности: по мере удаления от места разрушения элементы внутренней структуры материала (зерна) проявляются все менее отчетливо. Поэтому при прочих равных условиях на изображении (см. рис. 4, *a*) количество ярких перепадов является максимальным по отношению к плоской поверхности (см. рис. 4, *d*). Таким образом, степень деформации материала, проявляющаяся в данном случае через интенсивность формирования деформационного рельефа, оказывается пропорциональной энергии вейвлет-спектра (см. рис. 4, *i*), поэтому последняя может быть использована как ее численная характеристика. В то же время график фрактальной размерности, расчет которой основан на вычислении отношения площади поверхности к площади ее проекции, вопреки ожиданиям ведет себя противоположным образом. Наиболее вероятным объяснением этому является наличие на изображении высокочастотной шумовой составляющей, вносящей решающий вклад в результат расчета площади поверхности методом триангуляции. Таким образом, на более контрастном изображении (см. рис. 4, *a*), содержащем низкочастотную информативную часть (границы зерен), площадь поверхности (а в конечном итоге и фрактальная размерность) оказывается меньше, чем на гладком изображении, не содержащем деформационный рельеф (см. рис. 4, *d*). По этой причине использование метода расчета и самого термина «фрактальная размерность» применительно к оптическим изображениям с физической точки зрения является не совсем корректным.

Сопоставление результатов расчета энергии горизонтальной составляющей вейвлет-спектра и меры его локальной перемежаемости показывает, что первая более однозначно характеризует яркие перепады на изображении, хотя характер изменения обеих характеристик качественно подобен. При этом использование различного вида вейвлет-функций практически не изменяет форму и численные значения энергии спектра. Однако в данный момент у авторов нет однозначного мнения по поводу того, почему график меры локальной перемежаемости, рассчитанный с использованием вейвлета D_2 , лежит между графиками для D_4 и D_6 .

Анализ последовательности СТМ-изображений позволяет указать на характерные особенности изменения рельефа поверхности вследствие пропуска через проводник электрического тока высокой плотности. На изначально гладкой поверхности (см. рис. 5, *a*) из-за электромиграции происходит формирование микропор (см. рис. 5, *b*), размер которых вследствие их самоорганизации постепенно увеличивается, приводя к формированию более крупномасштабных структур на поверхности (см. рис. 5, *c*) [24]. Эволюция данного процесса завершается потерей электропроводимости и формированием грубого рельефа, размер элементов которого сопоставим с размером изображения (см. рис. 5, *d*). При этом шероховатость поверхности снижается, что проявляется в уменьшении значения фрактальной размерности на последних этапах пропуска тока. График энергии горизонтальной составляющей вейвлет-спектра, а также график меры его локальной перемежаемости ведут себя подобным образом, т. е. численные характеристики вей-

влет-спектра пропорциональны или соответствуют наблюдаемым изменениям рельефа на поверхности.

Заслуживает обсуждения экспериментальный результат, касающийся влияния помех на изображения на результаты расчета численных характеристик вейвлет-спектра. Наличие помех на СТМ-изображениях (хорошо различимых на рис. 5, *a* в виде царапины на его правом крае, а на рис. 5, *d* в виде складчатой структуры в нижнем правом углу) проявляется и на векторном поле (см. рис. 5, *e*, *h*). Видимо, по этой причине на графиках энергии вейвлет-спектра и меры его локальной перемежаемости на краях есть небольшие выбросы, в то время как график фрактальной размерности (при расчете с использованием метода триангуляции поверхности обладающий малой чувствительностью к таким помехам) имеет вид плавно изменяющейся зависимости с максимумом. С другой стороны, результаты расчета фрактальной размерности не позволяют сделать однозначное заключение о причине, вызывающей изменения ее численного значения. В то же время при расчете и графическом представлении вейвлет-спектра изменения (приводящие к изменению его численных характеристик) совершенно наглядны и четко пространственно локализованы.

При изучении процессов усталостного разрушения анализ оптических изображений, как правило, используется в двух направлениях: а) для исследования скорости роста трещины и раскрытия ее берегов за известное время циклического нагружения; б) для анализа деформационного рельефа, формирующегося в области вершины усталостной трещины вследствие локализованного развития пластической деформации. Во втором случае наличие усталостной трещины на изображении служит отрицательным фактором, поскольку идентификация и оценивание процессов, протекающих внутри трещины, практически невозможны в силу малой информативности области изображения, соответствующей ей. Данная проблема успешно решается при использовании вейвлет-спектра. Наглядным подтверждением этого тезиса служит векторное представление вейвлет-спектра, на котором видно, что область, соответствующая усталостной трещине, не вносит существенных изменений в результат расчета его численных характеристик (см. рис. 6, *e-h*). В то же время, как свидетельствует график изменения фрактальной размерности (см. рис. 6, *i*), по мере роста трещины фрактальная размерность изменяется далеко не плавным образом.

В заключение следует отметить, что интерпретация результатов расчета энергии вейвлет-спектра и меры его локальной перемежаемости в терминах деформации – задача пока не решенная, однако чем выше плотность перепадов высоты (яркости), тем выше значение данных характеристик. Это дает возможность использовать характеристики вейвлет-спектра для выявления стадийности процессов пластической деформации, а также для выявления (визуализации) элементов деформационного рельефа, вносящих вклад в рассчитываемое значение.

Кроме того, весьма актуальной задачей является предобработка оптических и РЭМ-изображений, ВЧ-шумовые пространственные составляющие которых могут вносить существенный вклад в численные характеристики вейвлет-спектра и меры локальной перемежаемости. Помимо этого критичным при вычислении энергетических параметров вейвлет-спектра является наличие на изображении помех (царапин, неравномерности освещенности по изображению, бликов и т. д.), что может существенно сказываться на результатах вычислений. В качестве алгоритмов предобработки могут быть эф-

фактивно использованы сглаживающий фильтр и повышение четкости, реализованные между прямым и обратным вейвлет-преобразованиями, а также статистический алгоритм отсека ложных выбросов.

Заключение. Полученные в работе результаты позволили сделать следующие выводы.

1. Из трех проанализированных в работе серий изображений наибольший уровень шумов характерен для РЭМ-изображений, что проявилось в инверсии графика энергии горизонтальной составляющей вейвлет-спектра по сравнению с графиком фрактальной размерности. При прямом измерении профиля поверхности с помощью СТМ уровень шумов на изображении минимальный, поэтому графики энергии вейвлет-спектра и фрактальной размерности совпадают достаточно близко.

2. Использование вейвлетов типа D2 при вычислении энергии вейвлет-спектра и меры его локальной перемежаемости является более предпочтительным по сравнению с D4 и D6, поскольку при подобном характере их поведения первый изменяется в большем диапазоне значений, а его двумерное векторное представление является наиболее наглядным для визуального анализа.

3. При малом уровне зашумленности изображений графики энергии вейвлет-спектра и фрактальной размерности имеют похожий вид. Различие этих графиков, наблюдавшееся в серии СТМ-изображений, по-видимому, связано с помехами (царапинами и т. п.), наличие которых менее критично при расчете фрактальной размерности. Однако результаты расчета фрактальной размерности не позволяют делать однозначное заключение о причине, вызывающей изменения ее численного значения. В то же время при расчете и графическом представлении вейвлет-спектра изменения (приводящие к изменению его численных характеристик) совершенно наглядны и четко пространственно локализованы.

4. При использовании численных характеристик вейвлет-спектров для анализа процессов деградации поверхности в результате внешних воздействий необходимо применять алгоритмы предварительной обработки и сегментации изображений. В качестве первых могут быть применены сглаживающий фильтр и повышение четкости, реализованные между прямым и обратным вейвлет-преобразованиями, а также статистический алгоритм «отсека ложных выбросов».

5. Конечной целью использования вейвлет-анализа в приложении к задачам исследований является интерпретация результатов расчета энергии вейвлет-спектра и меры его локальной перемежаемости в терминах степени деформации либо подведенной энергии, обусловившей изменения на поверхности. Выявленная прямая пропорциональность между плотностью перепадов высоты (яркости) и энергией вейвлет-спектра позволяет использовать последнюю, подобно фрактальной размерности, для выявления стадийности процессов пластической деформации.

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику ИФПМ СО РАН П. В. Кузнецову за предоставленные РЭМ-изображения кремнистого железа, старшему научному сотруднику ИФПМ СО РАН А. В. Панину за предоставленные СТМ-изображения золотой проводящей дорожки, а также младшему научному сотруднику ИФПМ СО РАН А. Ю. Быдзану за предоставленную серию оптических изображений конструкционной стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буймов А. Г. Корреляционно-экстремальная обработка изображений. Томск.: Изд-во ТГУ, 1987.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1989.
3. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets // CBMS-NSF Regional Conf. Series in Appl. Math. Vol. 61. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, PA, 1992.
4. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // УФН. 2001. 171, № 5. С. 465.
5. Панин В. Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел // Физическая мезомеханика. 1999. 2, № 6. С. 5.
6. Сырямкин В. И., Панин В. Е., Парфенов А. В. и др. // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. С. 176.
7. Панин В. Е. Методология физической мезомеханики как основа построения моделей в компьютерном конструировании материалов // Изв. вузов. Физика. 1995. № 11. С. 6.
8. Пат. 2126523 РФ. Способ неразрушающего контроля механического состояния объектов и устройство для его осуществления /Е. Е. Дерюгин, В. Е. Панин, С. В. Панин, В. И. Сырямкин. Опубл. 20.02.99, Бюл. № 5.
9. Сырямкин В. И., Плешанов В. С., Кириков А. А. и др. Оптико-телевизионные измерительные системы неразрушающего контроля газового оборудования и трубопроводов // Диагностика оборудования и трубопроводов. 1998. № 1. С. 15.
10. Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высш. шк., 1983.
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., Кузеев И. Р., Закирничная М. М. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998.
13. Харалик Р. М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. 1979. 67, № 5. С. 98.
14. Huang Z. H., Tian J. F., Wang Z. G. Analysis of fractal characteristics of fractured surfaces by secondary electron line scanning // Materials Science and Engineering. 1989. A118. P. 19.
15. Левкович-Маслюк Л. Дайджест вейвлет-анализа в двух формулах и 22 рисунках // Компьютерра. 1998. № 8. С. 31.
16. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН. 1996. 166, № 11. С. 1145.
17. Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis // IEEE Trans. on Information Theory. 1990. 36. P. 961.
18. Сырямкин В. И., Титов В. С., Якушенков Ю. Г. и др. Системы технического зрения: Справочник /Под ред. В. И. Сырямкина, В. С. Титова. Томск: МГПИ «РАСКО», 1992.
19. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио, 1978.
20. Казанцев Г. Д., Курячий М. И., Пустынский И. Н. Измерительное телевидение: Учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1994.
21. Абламейко С. В., Лагуновский Д. М. Обработка изображений: технология, методы, применение: Учебное пособие. Минск: Амалфея, 2000.

22. **Путятин Е. П., Аверин С. И.** Обработка изображений в робототехнике. М.: Машиностроение, 1990.
23. **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.
24. **Панин А. В., Шугуров А. Р.** Дegrаdация тонкопленочных Au проводников при пропускании электрического тока высокой плотности // Физическая мезомеханика. 2000. **3**, № 5. С. 101.
25. **Быдзан А. Ю., Панин С. В., Почивалов Ю. И.** Механизм формирования мезоскопической деформационной структуры в образцах поликристаллических материалов при знакопеременном плоском изгибе // Там же. № 3. С. 43.
26. **Douketis C., Wang Zh., Haslett T. L., Moskovits M.** Fractal character of cold-deposited silver films determined by low-temperature scanning tunneling microscopy // Phys. Rev. B. **51**, N 16. P. 11022.

*Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН,
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники,
E-mail: svp@ms.tsc.ru*

*Поступила в редакцию
29 августа 2002 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!