

*В.И. Сырямкин, Е.П. Саночкин, Д.В. Саньков,
И.А. Тарасенко, В.П. Туголуков, А.В. Лобанов*

ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №05-01-98008-Р_обь_а.

Приведены результаты разработки аппаратно-программного обеспечения для анализа деформированных материалов, что позволяет выяснить характер, степень деформации, получить качественные характеристики рельефа поверхности, проанализировать динамику процессов, происходящих в материале.

Нами создана программно-аппаратная измерительная система для измерения морфологических и оптических характеристик микро- и наноструктурированных материалов, обеспечивающая автоматизированное сканирование образцов, компьютерную обработку, анализ и цветную визуализацию объектов на базе оптических и акустических микроскопов. Сделан вывод о том, что оптико-телевизионная система является одной из лучших для диагностики и исследования неорганического материала под нагрузкой.

Изменения, происходящие внутри деформируемого материала, находят однозначное отражение в изменениях рельефа его поверхности. Оценка напряженно деформированного состояния исследуемого материала может быть произведена по анализу этого рельефа. Поэтому изучение зарождения, развития и взаимодействия элементов мезосубструктуры на поверхности позволяет проследить динамику развития процессов, протекающих в исследуемом материале в целом [1].

По типу используемого излучения системы неразрушающего контроля и диагностики (СНКД) делятся на электронные (растровые электронные микроскопы), оптические (оптические микроскопы, оптико-телевизионные системы, лазеры), ультразвуковые (акустические и эмиссионные излучатели), рентгеновские (просвечивающие) и радиометрические (измерители радиации, радиолокаторы). По принципу действия СНКД можно подразделить на тактильные (механические профилометры), интерференционные, дифракционные, проекционные, дефектоскопические и обзорно-сравнительные (сравнивающие текущую и эталонную информацию – изображения). По функциональному назначению СНКД классифицируются на измерители параметров топологии (рисунка) и микрорельефа, измерители чистоты поверхности, измерители несплошностей или трещин материала или конструкций (внешних и внутренних).

В соответствии с приведенной классификацией для аттестации наноматериалов согласно техническому заданию будут использоваться СНКД следующего состава: тип используемого излучения (электронное, оптическое, ультразвуковое), принцип действия, функциональное назначение (измерители параметров топологии (рисунка) и микрорельефа, измерители несплошностей или трещин (внешних и внутренних), способ обработки сигнала (цифровой), вид получаемой рабочей информации (одномерная, двумерная, трехмерная).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для анализа процессов, происходящих внутри материала при неразрушающем контроле, необходимо получить изображение поверхности исследуемого материала. В связи с тем что в процессе получения изображений неизбежно воздействие помех, необходимо предусмотреть процедуру предварительной обработки изображения для улучшения его качественных характеристик. Для анализа процессов, происходящих в исследуемом материале, применяются корреляционные алгоритмы. Необходимо разработать методику, позволяющую применять эти алгоритмы с различными параметрами для обработки серии изображений, получаемых в процессе исследования материала.

При исследовании различных материалов выделяют характерные признаки в области деформации (таблица).

Признаки в области деформации

Тип материала	Характерный элемент мезосубструктуры	Информативный признак
Пластичный поликристалл (растяжение)	Зерно, конгломерат зерен	Площадь, ориентация, периметр, коэффициент формы, координаты центра тяжести
Высокопрочный дисперсно-упрочненный сплав (растяжение)	Мезополоса (распространяющаяся через многие зерна)	Длина, ширина, период
Сдвигонеустойчивый Поликристалл (растяжение)	а) Мартенситные Ламели б) поперечная мартенситная полоса	а) Длина, период, ориентация б) длина, ширина
Мелкозернистый поликристалл (растяжение)	Дисклинация, змейка	Длина, ориентация, ширина
Высокоазотистая сталь негартованная прокаткой (растяжение)	Мезополосовая структура	Площадь, период полос, длина, ориентация
Малоуглеродистая сталь (растяжение)	Полоса Людерса	Ориентация, длина
Сварное соединение (растяжение)	Макрополоса (в зоне термического влияния)	Длина, ориентация, ширина
Усталостное разрушение	Петля деформированных зёрен	Площадь, периметр, координаты центра тяжести, коэффициент формы, периметр

ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Для получения изображений поверхности исследуемого материала используется оптико-телевизионная измерительная система (ОТИС) (рис. 1) [2].

Все элементы расположены внутри корпуса. На задней панели корпуса расположены разъем для подключе-

ния блока питания, разъем последовательного интерфейса для подключения к компьютеру, разъем для подключения устройства подсветки, 2 разъема для подключения шаговых двигателей. На передней панели корпуса расположены кнопки управления шаговыми двигателями и устройством подсветки, а также светодиоды, отображающие состояние датчиков-ограничителей; блок питания с тумблером и светодиодом (рис. 2).

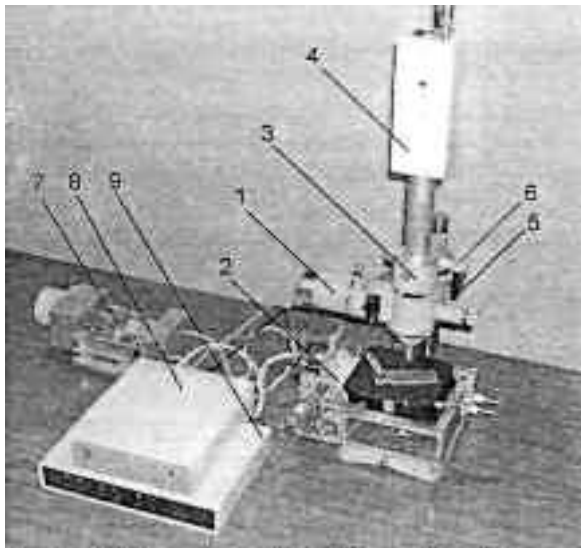


Рис. 1. Оптико-телевизионная измерительная система. Основные конструктивные блоки:
1 – устройство подсветки; 2 – механизм сканирования, включающий в себя несущие конструкции, два шаговых двигателя, четыре датчика-ограничителя; 3 – оптико-механический узел металлографического микроскопа; 4 – телевизионная камера;

5 – микровинт точной настройки фокусировки; 6 – микровинт грубой настройки фокусировки;
7 – устройство нагружения, в состав которого входят шаговый двигатель с блоком управления для деформации образца, механизм растяжения/сжатия, четыре тензодатчика, аналого-цифровой преобразователь;
8 – блок питания; 9 – устройство управления включает печатную плату с размещенными на ней электронными компонентами



Рис. 2. Обобщенная структурная схема ОТИС

Элементы структурной схемы выполняют следующие функции.

Технические характеристики ОТИС:

1. Определяемые параметры деформации материала: распознавание (нахождение) области деформации; размер деформируемой области (площадь, периметр, длина, ширина); величину смещения деформируемой

области и ее элементарных площадок; структурные (рисунок, цвет) признаки деформируемой области.

2. Быстродействие оценки параметров 1 кадра ~1 с.

3. Абсолютная погрешность оценки смещения (деформации) области и элементарных площадок исследуемого материала – 0,1 мкм.

4. Число пикселей телевизионного изображения до 7 млн.

5. Рабочая зона – 150·150 мм.
6. Размер исследуемого образца – 10·10·100 мм.
7. Вес установки 7 кг.
8. Габариты – 300·300·500 мм.
9. Питание – 220В 50 Гц, потребляемая мощность не более 100 Вт.

Полученные с помощью ОТИС изображения сохраняются на жестком диске компьютера для дальнейшей обработки с помощью программных продуктов.

Процессы предварительной обработки изображения реализованы в отдельном программном продукте (рис. 3). Основной целью предварительной обработки является удаление шумов, улучшение контрастности и т.д.

Число методов для предварительной обработки основных параметров изображения довольно велико, но требованиям по скорости вычислений и по эксплуатационной стоимости, лежащим в основе систем технического зрения ОТИС, удовлетворяет только определенная подгруппа этих методов.

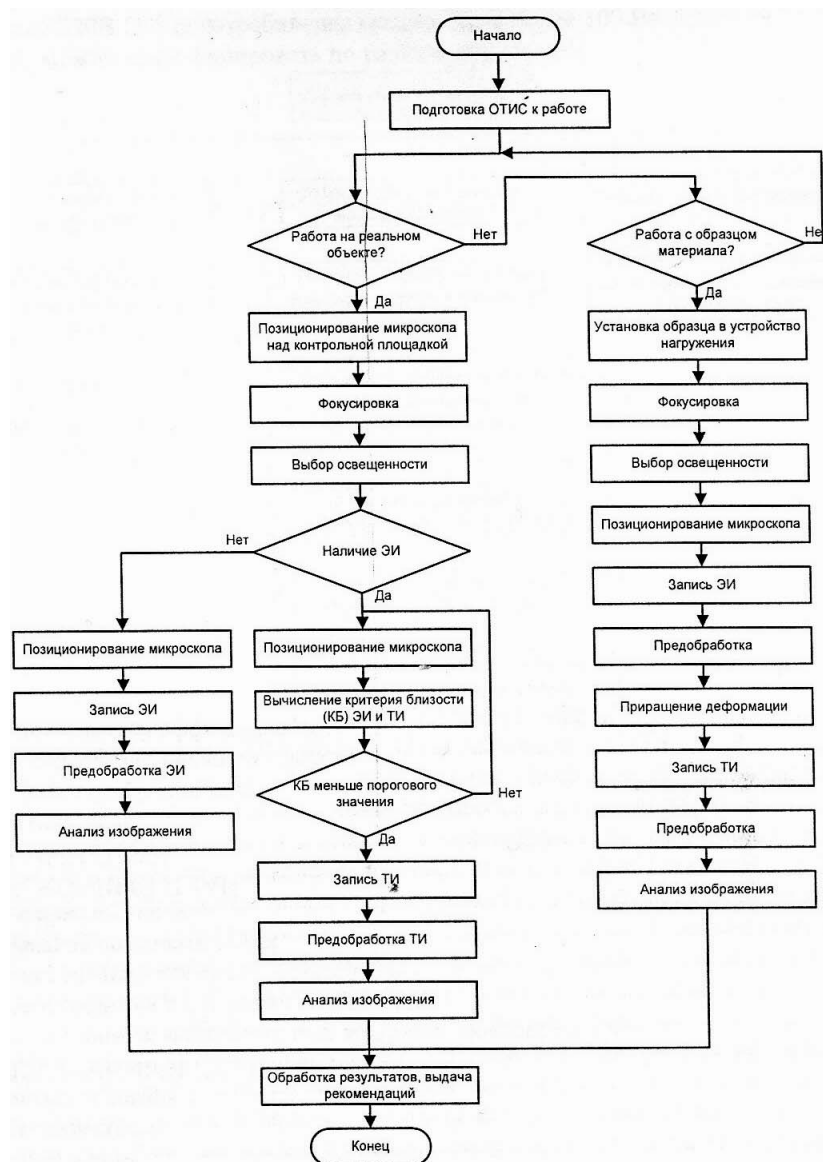


Рис. 3. Схема программного обеспечения ОТИС

СГЛАЖИВАНИЕ

Операции сглаживания используются для снижения шума и других помех, которые могут появляться на изображении в результате дискретизации, квантования, передачи или возмущений внешней среды при получении изображения.

Усреднение окрестности. Для имеющегося изображения $f(x,y)$ процесс заключается в получении сгла-

женного изображения $g(x,y)$, интенсивность которого в каждой точке (x,y) равна усредненному значению интенсивности пикселей функции f , содержащихся в заданной окрестности точки (x,y) .

Другими словами, сглаженное изображение получается при использовании соотношения для всех x и y функции $f(x,y)$, где S – множество координат точек в окрестности точки (x,y) , включая саму точку (x,y) , а P – общее число точек в окрестности.

$$g(x, y) = \frac{1}{P} \sum_{(n, m) \in S} f(n, m). \quad (1)$$

В соответствии с приведенными выше методами была разработана программа.

В ней реализованы методы сглаживания изображения усреднением окрестности и усреднением серии изображений, возможно получение бинарного изображения. Результат сглаживания изображения представлен на рис. 4. Слева на рис. 5 показано исходное изображение, полученное с помощью ОТИС.

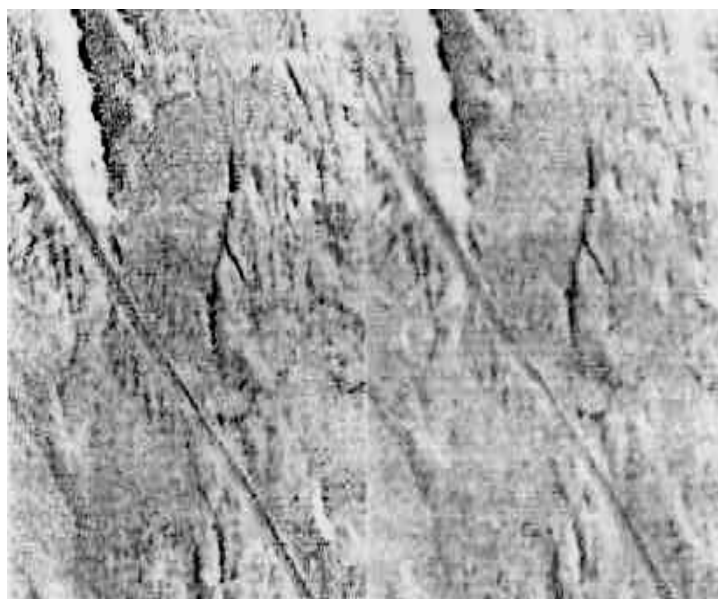


Рис. 4. Результат сглаживания изображения



Рис. 5. Результат бинаризации с локальным порогом исходного и сглаженного изображений стали

Справа показано обработанное изображение. В результате сглаживания помехи на изображении частично удалены, частично сделаны менее заметными. Сглаженное изображение более пригодно для проведения бинаризации. Сравним результаты бинаризации исходного и сглаженного изображения (рис. 6).

По результатам бинаризации изображений видно, что при обработке сглаженного изображения контуры объектов получаются четкими, без шероховатостей. Области, занимаемые исследуемыми объектами, легко выделяемы.

Для получения достоверной численной информации о механическом состоянии материала под нагрузкой возможно использование методов измерения

фрактальной размерности. Использувавшиеся до этого в неразрушающем контроле методы и средства предназначались в основном для обнаружения в деформируемом материале трещин, что часто является недопустимым при эксплуатации реальных изделий и конструкций. Эволюция процессов внутри деформируемого материала должна приводить к образованию на поверхности субструктуры, имеющей фрактальный характер.

Подобный подход позволяет определять степень деформации с помощью численной характеристики, получаемой на основе анализа субструктуры, наблюдаемой на поверхности материала под нагрузкой.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ. МЕТОД НОРМИРОВАННОГО РАЗМАХА (R/S-ОТНОШЕНИЯ)

Метод базируется на положении о том, что многие временные ряды можно исследовать с помощью статистического подхода – метода Херста [7].

Для каждого промежутка наблюдений определяется среднее значение интенсивности по формуле

$$\Psi_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \Psi(t), \quad X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{\Psi(u) - \Psi_\tau\}, \quad (2)$$

где t – количество учитываемых отрезков в промежутке, Ψ_τ – средняя яркость в рассматриваемом отрезке. Затем вычисляем накопившееся отклонение яркости от средней Ψ_τ : где $\Psi(u)$ – значение интенсивности в каждом пикселе рассматриваемого участка. Величину размаха находим как разность минимального и максимального отклонения:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min(t, \tau). \quad (3)$$

Теперь рассчитываем стандартное отклонение

$$S = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\Psi(t) - \Psi_\tau)^2 \right)^{1/2}. \quad (4)$$

$$R/S = (r/2)^H, \quad D = 2 - H. \quad (5)$$

В качестве временных рядов используются строки, столбцы и диагональные элементы исследуемого изображения. Значение фрактальной размерности вычисляется для каждого такого временного ряда с последующим ее усреднением по всему изображению. Расчет производится из условия, что в каждом временном ряду может быть выделено несколько различных выборок с длиной 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 и 576 (768) пикселей соответственно.

Затем вычисляются R/S-отношения по приведенным выше формулам (1–4) для каждой выборки. После этого в логарифмическом масштабе строится зависимость R/S-отношения от величины выборки. Далее по методу наименьших квадратов производится аппроксимация полученной кривой и определение угла ее наклона по следующей зависимости:

$$y = a + bx,$$

$$\text{где } b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i - N \sum_{i=1}^N x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 - N \sum_{i=1}^N x_i^2},$$

$$a = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i - b \sum_{i=1}^N x_i \right). \quad (6)$$

Коэффициент b , определяющий угол наклона аппроксимирующей кривой, также определяет и значение показателя H . Херста. Основным недостатком данного метода является то, что при расчете значения ФР двухмерное изображение заменяется набором некоторых временных рядов с последующим их усреднением.

МЕТОД СЕРИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При определении фрактальной размерности данным методом необходимо иметь серию изображений участка поверхности, снятых при различных увеличениях.

Определение фрактальной размерности D производится по формулам

$$L = L_0 \cdot T^{1-D}; \quad D = D' + 1, \quad (7)$$

где T – масштаб изображения, L – длина профилей строк, L_0 – длина проекции профилей.

На практике данный расчет осуществляется следующим образом. Сначала для каждого изображения, полученного при коэффициенте увеличения T , рассчитывается длина профиля каждой строки. Затем вычисляется общая длина всех строк изображения L и находится ее отношение к длине проекций этих строк L/L_0 . После этого строится график зависимости L/L_0 от δ в логарифмическом масштабе. Затем на графике выбирается участок, отстоящий на 15% от максимального и минимального значения этой функции и производится аппроксимация данного участка методом наименьших квадратов [8]. На рис. 7 показана серия снимков области разлома материала.

Используя приведенные алгоритмы, можно вычислить значение фрактальной размерности для данных изображений (рис. 7).

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ

При помощи светового металлографического микроскопа снимаются эталонное изображение (ЭИ) исследуемого участка поверхности образца (до приращения деформации) и текущее изображение (ТИ) этого же участка (после приращения деформации). ТИ и ЭИ разбиваются одинаково на равное число фрагментов (элементарных квадратных площадок). Каждый фрагмент ЭИ сравнивается с соответствующим фрагментом ТИ и определяется смещение фрагмента ТИ относительно фрагмента ЭИ. Выделим три основных алгоритма сравнения: модифицированный корреляционный, разностный и разностный быстрый.

Анализируя серию таких изображений, снятых в процессе разрушения материала при проведении эксперимента, по длине и направлению векторов можно проследить динамику процессов разрушения и движение пластов поверхности (мезосубструктур). При анализе файлов изображений можно уменьшить зависимость от этих факторов путем подбора размера элементарных площадок. Рассмотрим процесс исследования образца под нагрузкой (рис. 8).

На рис. 9. показан результат работы программы при размерах площадки 16 (а) и 24 (б) пикселей.

Места разрыва материала на картах смещения векторов можно обнаружить по характерным областям, называемым «вихрями». Эти области характеризуются разнонаправленностью векторов смещения и хаотичностью направления и величины векторов смещений. Как видно из рисунка, такие области расположены по центру изображения снизу вверх, и затем в стороны под углом 90°С. На исходном изображении (рис. 8) в этих местах видны деформации в виде темных областей.

Данный программный комплекс предназначен для исследования неорганических объектов. Методы, описанные в статье, применимы для исследования как неорганических, так и органических структур.

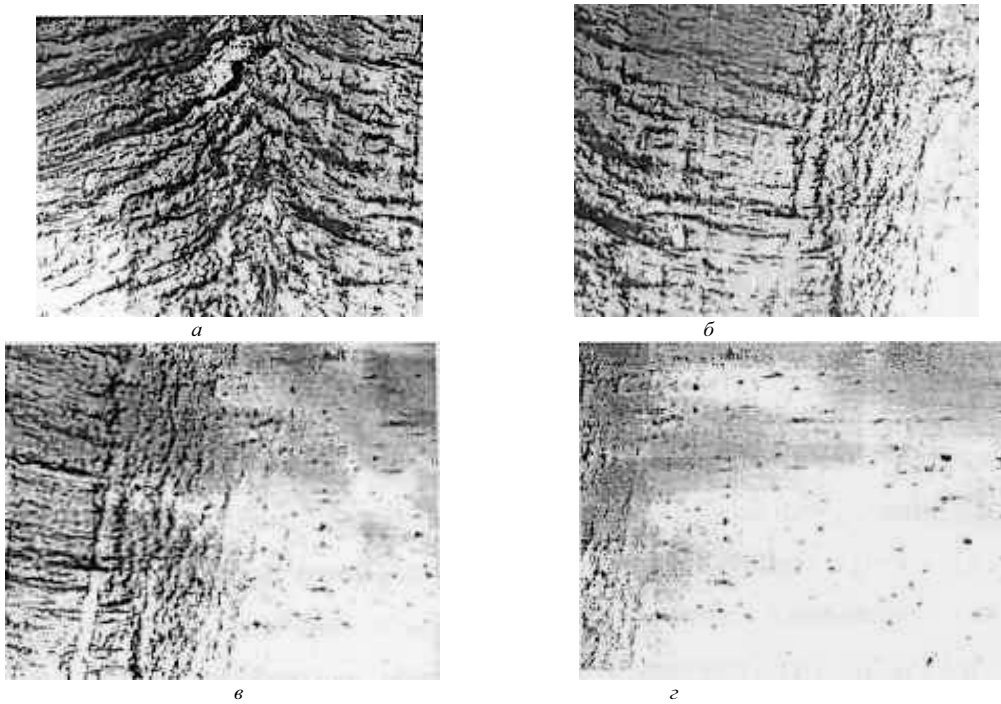


Рис. 6. Область разлома на разном расстоянии от места разрушения:
a – 0 мм; *б* – 0,5 мм; *в* – 1 мм; *г* – 1,5 мм

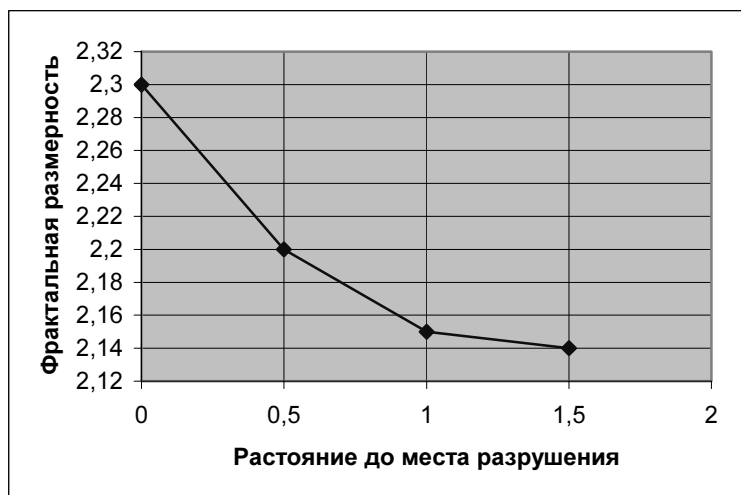


Рис. 7. Результат измерения фрактальной размерности по полученным изображениям

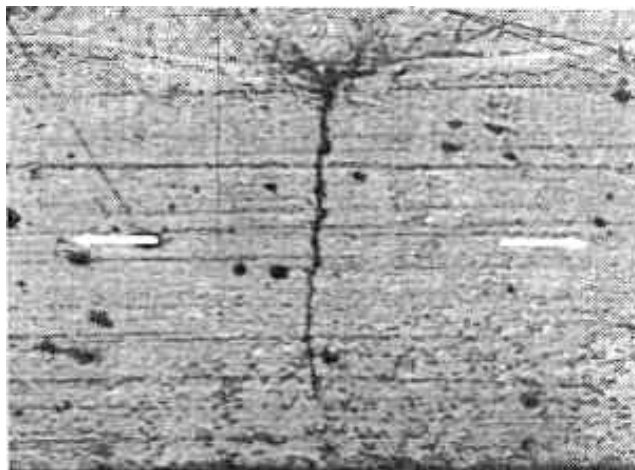


Рис. 8. Изображение поверхности деформируемого материала

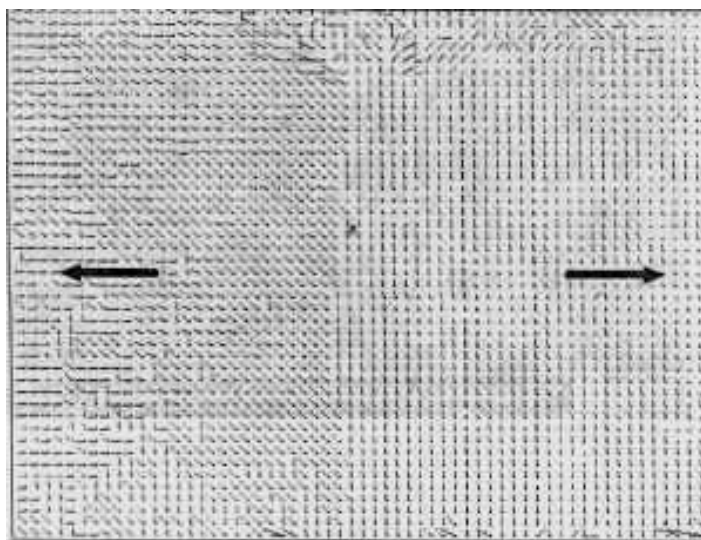


Рис. 9. Карты векторов смещения при различных размерах элементарной площадки

Исследование органических структур обуславливает необходимость в использовании для анализа цветных изображений, т.е. дополнительно изучение цветовой информации об объекте исследования.

Авторами разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее использовать результаты математической обработки изображения для диагностики органических и неорганических материалов. Поверхность исследуемых материалов отражает поступающий свет от источника освещения и вызывает появление бликов на изображении, получаемом малогабаритной видеокамерой. Блики на изображении исключать из обработки для достоверности получаемых результатов. Проанализировав частоту различных цветовых оттенков на изображениях здоровых органов и органов, имеющих различные отклонения, авторы пришли к выводу, что они значительно отличаются.

На основании проведенного анализа нескольких изображений материалов, полученных с помощью ОТИС, была выделена область спектра, в которую укладываются спектры эталонных образцов.

ВЫВОД

В результате проведенной работы рассмотрен аппаратно-программный комплекс для исследова-

ния различных материалов под нагрузкой, а также были рассмотрены методы, на которых основывается ПО для анализа деформированного материала. Данные методы ПО позволяют выяснить характер и степень деформации, а также получить качественные характеристики рельефа поверхности, проанализировать динамику процессов, происходящих в материале.

Программа вычисляет отношение точек конкретного изображения, цветовые оттенки которых попадают в эту область, к общему числу точек и использует полученную величину как меру соответствия спектра изображения исследуемого материала спектру, характерному для эталонного образца. Полученные результаты могут быть использованы для диагностики материалов в различных областях науки и техники.

В дальнейшем планируется расширить область применения данного аппаратно-программного комплекса для анализа морфологических и оптических характеристик микро- и наноструктурированных материалов, обеспечивающих автоматизированное сканирование образцов, компьютерную обработку, анализ и цветную визуализацию объектов на базе оптического микроскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов*: В 2 т. / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П.В. Макаров и др. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 298 с.
2. *Системы технического зрения*: Справочник / В.И. Сырякин, В.С. Титов и др.; Под ред. В.И. Сырякина и В.С. Титова. Томск: РАСКО, 1992. 367 с.
3. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. М: Мир, 1989. 624 с.
4. Хорн Б.К.П. Зрение роботов: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 487 с.
5. Петров А.А. Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющих систем адаптивных роботов (алгоритмы технического зрения роботов) // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. М.: ВНИИТИ, 1984. 359 с.
6. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.
7. Dauskardt R.H., Haubensak F., Ritchie R.O. On the interpretation of the fractal character of fracture surfaces // Acta metallurgica et materialie. 1990. Vol. 38, № 2. P. 143–159.
8. Кориков А.М., Сырякин В.И., Титов В.С. Корреляционные зрительные системы роботов. Томск: Радио и связь. Том. отд-ние, 1990. 264 с.
9. Ахо А.В., Хоткрофт Д.Э., Ульман Д.Д. Структуры данных и алгоритмы. М.: Вильямс, 2000. 384 с.

Статья поступила в редакцию журнала 4 декабря 2006 г., принята к печати 11 декабря 2006 г.