

УДК 004.932

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА МЕЗОУРОВНЕ ПУТЕМ АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРУЖЕННЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

П. С. Любутин, С. В. Панин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск
E-mail: svp@ms.tsc.ru

Выполнено исследование и тестирование алгоритма оценки деформации твердых тел на мезомасштабном уровне, основанного на построении полей векторов перемещений и расчете компонент деформации. Проверка метода проводилась путем сравнения рассчитанных аналитически компонент деформации с экспериментальными данными, полученными по модельным изображениям, а также по изображениям, записанным с помощью оптико-телевизионной измерительной системы TOMSC, при растяжении полимерных образцов. Показано, что оценки компонент деформации, полученные в результате корреляционного анализа изображений, хорошо согласуются с результатами аналитического расчета при известных параметрах нагружения и размерах анализируемых изображений. Результаты проведенных исследований подтверждают возможность использования комплекса TOMSC для оценки локальных деформаций путем обработки изображений поверхности образцов нагруженных материалов.

Ключевые слова: поле векторов перемещений, обработка изображений, деформация, корреляционный анализ.

Введение. В настоящее время для исследования параметров деформации, а также для неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций разработан и используется ряд методов. Каждый из этих методов имеет недостатки и преимущества, что обусловлено возможностью применения метода в конкретных условиях, его точностью, вероятностью корректной идентификации дефектов конечных размеров, чувствительностью, затратами на изготовление и эксплуатацию приборов, сложностью проведения измерений и т. д.

В данной работе рассматривается оптико-телевизионный метод построения векторов перемещений и расчета компонент деформации. Целью работы является тестирование рассматриваемого метода оценки деформации твердых тел на мезомасштабном уровне с использованием серий модельных и экспериментально полученных изображений, отражающих формоизменение образцов при различных схемах нагружения.

1. Метод оценки деформации, основанный на корреляционном анализе изображений. Алгоритм оценки перемещений основан на вычислении функции корреляции и поиске максимума этой функции. В данной работе для расчета коэффициента корреляции

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ (грант № НШ-2324.2003.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 04-01-08030-офи-а).

использовалось следующее соотношение:

$$k_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{1,i,j} I_{2,i,j} / \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{2,i,j}^2}.$$

Здесь I_1 , I_2 — яркости элементов (пикселей) сравниваемых участков изображений; n — длина стороны элементарной площадки, для которой вычисляется коэффициент k_r . Максимальное значение коэффициента k_r в пределах зоны сканирования находится построчно с шагом 1 пиксел [1–3]. Размер зоны сканирования задается параметром r ; построение векторов проводится с заданным шагом. Значения параметров k_r , r и шаг построения векторов задаются независимо.

После определения перемещения участка с точностью до одного пиксела необходимо дальнейшее уточнение значения перемещения до долей пиксела. Субпиксельная точность достигается бикубической (двумерной) интерполяцией узлов с наибольшими значениями k_r , т. е. интерполируется не все распределение корреляционной функции в расчетной области, а только один участок. После интерполяции находится максимум функции бикубического сплайна, координаты которого определяют величину и направление смещения.

Количественные характеристики деформации определяются путем численного дифференцирования компонент поля векторов перемещений [2, 3].

2. Моделирование деформации поверхности. Проверка предложенного метода проводилась путем тестовых расчетов с использованием модельных и экспериментально полученных изображений поверхностей при известных параметрах деформирования. Тестовые расчеты с использованием серии модельных изображений предназначались для проверки метода в условиях отсутствия внешних возмущающих воздействий, таких как шум, геометрические искажения и др. Для создания модельных изображений, соответствующих различным схемам нагружения материала, использовался следующий подход.

Изображение реальной поверхности представляет собой оптический образ, каждый участок которого характеризуется определенной яркостью (интенсивностью отраженного света). При дальнейшем описании моделирования изображений поверхностью будем называть непрерывное распределение яркости (оптический образ). Процесс построения модельных изображений можно разделить на несколько этапов:

- 1) получение набора дискретных отсчетов яркости (узловых точек) поверхности с заданным распределением;
- 2) построение непрерывного распределения яркости (поверхности) путем интерполяции полученных узловых точек;
- 3) задание параметров (типа и приращения) деформации и пересчет поверхности с учетом заданных значений;
- 4) дискретизация поверхности с целью получения модельного изображения.

Поскольку выделение характерных объектов на изображении не является целью настоящего исследования, модель оптического образа поверхности представляет собой фон. Фон можно рассматривать как случайный процесс, имеющий ряд признаков, не свойственных объекту, что затрудняет выделение информационных признаков объекта. Также следует учитывать, что реальные изображения содержат шум и искажения, возникающие в процессе преобразования двумерного яркостного сигнала на входе датчика в электрический ток на выходе, например шум, обусловленный неоднородностью чувствительности датчика по полю, геометрическими искажениями, шумами дискретизации сигнала и т. д. [4].

В качестве модельных использовался ряд однотипных изображений, различающихся статистическими параметрами (средним уровнем яркости, дисперсией). Наиболее просто

и эффективно моделируются изображения фона в виде двумерных стохастических полей с заданными статистическими свойствами с использованием соотношения вида [4]

$$F_{x,y} = \alpha F_{x,y-1} + \beta F_{x-1,y} - \alpha\beta F_{x-1,y-1} + n_{x,y}\sigma\sqrt{(1-\alpha)(1-\beta)} + m(1-\alpha)(1-\beta), \quad (1)$$

где $F_{x,y}$ — текущее значение фона в точке (x, y) ; α, β — коэффициенты корреляции между соседними элементами по горизонтали и вертикали соответственно; $n_{x,y}$ — случайная последовательность чисел с нулевым средним и единичной дисперсией; σ — задаваемое среднеквадратичное отклонение амплитуд яркости изображения; m — задаваемая величина математического ожидания амплитуд яркости изображения.

Варьируя параметры m, σ, α, β в выражении (1), можно получить широкий диапазон фоновых изображений с контролируруемыми статистическими параметрами. При фиксированных статистических параметрах можно создать банк однотипных изображений, что в свою очередь позволяет проводить более точные численные эксперименты. При $\alpha = 0, \beta = 0$ модель фона сводится к случайной последовательности $n_{x,y}$, приведенной с помощью параметров m, σ к нужному масштабу (по яркости пикселей изображения). В качестве распределения случайной последовательности использовалось равномерное распределение.

После расчета двумерного набора узлов с заданными статистическими параметрами проводилась интерполяция узлов для получения непрерывного распределения яркости. Расстояние между узлами принималось равным 1 пиксел. Таким образом, вся модель разбивается на квадратные участки; интерполяция проводится бикубическими двумерными сплайнами вида

$$f(x, y) = a_0x^3 + a_1x^2 + a_2x + a_3y^3 + a_4y^2 + a_5y + a_6x^3y^3 + a_7x^3y^2 + a_8x^3y + a_9x^2y^3 + a_{10}xy^3 + a_{11}x^2y^2 + a_{12}x^2y + a_{13}xy^2 + a_{14}.$$

Дискретизация поверхности подразумевает нахождение яркости каждого пиксела изображения после деформации. Яркость каждого пиксела определяется как среднее значение яркости участка поверхности, соответствующего положению и размеру пиксела.

Для проведения последующих тестовых расчетов использовалась модель типа равномерного распределения с параметрами $m = 150, \sigma = 40$.

2.1. *Модель двухосного растяжения поверхности.* Рассмотрим участок поверхности прямоугольной формы размером $l \times w$ (рис. 1, а). При равномерном растяжении поверхности по осям x и y значения l и w увеличиваются на Δx и Δy соответственно. Начало координат

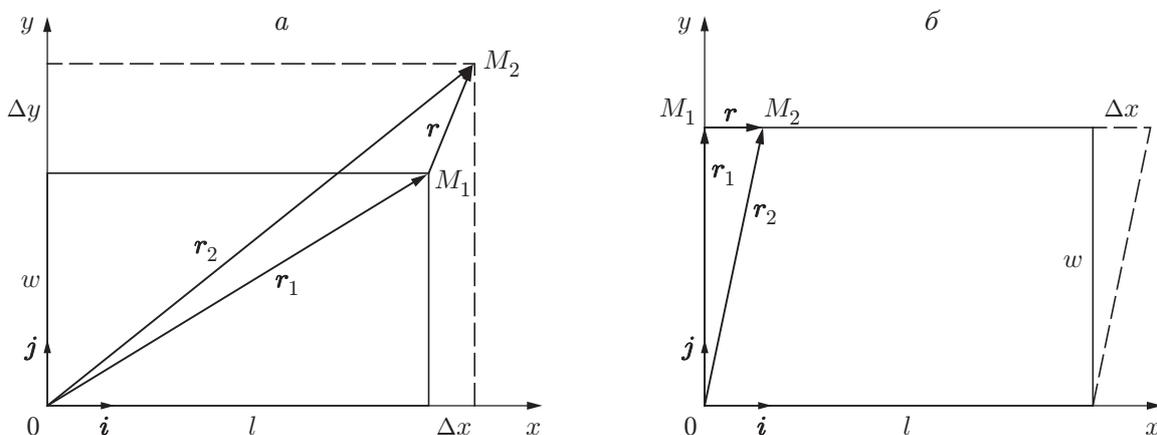


Рис. 1. Схема деформации участка прямоугольной формы:
а — двухосное растяжение; б — одноосный сдвиг

находится в левом нижнем углу прямоугольника. Запишем координаты радиус-векторов \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 :

$$\mathbf{r}_1 = (l, w), \quad \mathbf{r}_2 = (l + \Delta x, w + \Delta y).$$

При деформации точка M_1 переходит в точку M_2 , вектор \mathbf{r} равен разности векторов \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 :

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (l + \Delta x - l, w + \Delta y - w) = (\Delta x, \Delta y).$$

Поскольку растяжение равномерное, для каждой точки поверхности вектор смещения имеет вид

$$\mathbf{r}_{xy} = (k_1 x, k_2 y), \quad k_1 = \Delta x/l, \quad k_2 = \Delta y/w$$

(x, y — координаты точки). Для всех точек поверхности можно записать векторное поле в декартовых координатах:

$$\mathbf{V}(x, y) = V_x(x, y) \cdot \mathbf{i} + V_y(x, y) \cdot \mathbf{j}, \quad V_x(x, y) = k_1 x, \quad V_y(x, y) = k_2 y.$$

Тензор дисторсии удобно использовать для описания деформаций объекта. Приведем выражения для продольной ε_{xx} , поперечной ε_{yy} и сдвиговой ε_{xy} компонент тензора дисторсии [1, 2]:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial V_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right).$$

Запишем также выражение для интенсивности деформации сдвига γ_i [5, 6]:

$$\gamma_i = \sqrt{2/3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + (3/2)\varepsilon_{xy}^2}. \quad (2)$$

Зная векторное поле перемещений, можно определить указанные компоненты тензора дисторсии и интенсивность деформации сдвига:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial(k_1 x)}{\partial x} = k_1, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial(k_2 y)}{\partial y} = k_2, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial(k_1 x)}{\partial y} + \frac{\partial(k_2 y)}{\partial x} \right) = 0, \quad (3)$$

$$\gamma_i = \sqrt{2/3} \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + k_1^2 + k_2^2}.$$

Размер модельных изображений, использованных в данной работе, составлял 512×512 пикселей. Проведено четыре серии экспериментов, каждая из которых включала 11 изображений; приращение длины l и ширины w модельной поверхности на каждом шаге составляло 0,5 пиксела. Поля векторов перемещений строились с использованием описанного выше алгоритма при следующих значениях параметров: размер площадки для расчета коэффициента корреляции 32 пиксела, шаг построения векторов 12 пикселей, радиус области для поиска вектора 8 пикселей. Путем численного дифференцирования векторных полей получены значения интенсивности деформации сдвига γ_i (рис. 2, а). При расчете распределений γ_i по полученным модельным изображениям отклонение от значений, вычисленных аналитически, составило $\Delta\gamma_i = 1,114 \cdot 10^{-3}$.

2.2. Модель одноосного сдвига поверхности. Рассмотрим участок поверхности прямоугольной формы размером $l \times w$ (см. рис. 1, б). При равномерном сдвиге поверхности вдоль оси x поверхность принимает вид параллелограмма. Начало координат находится в левом нижнем углу прямоугольника. Точка M_1 переходит в точку M_2 , расстояние между точками равно Δx . Запишем координаты радиус-векторов $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}$:

$$\mathbf{r}_1 = (0, w), \quad \mathbf{r}_2 = (\Delta x, w), \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (\Delta x, w - w) = (\Delta x, 0).$$

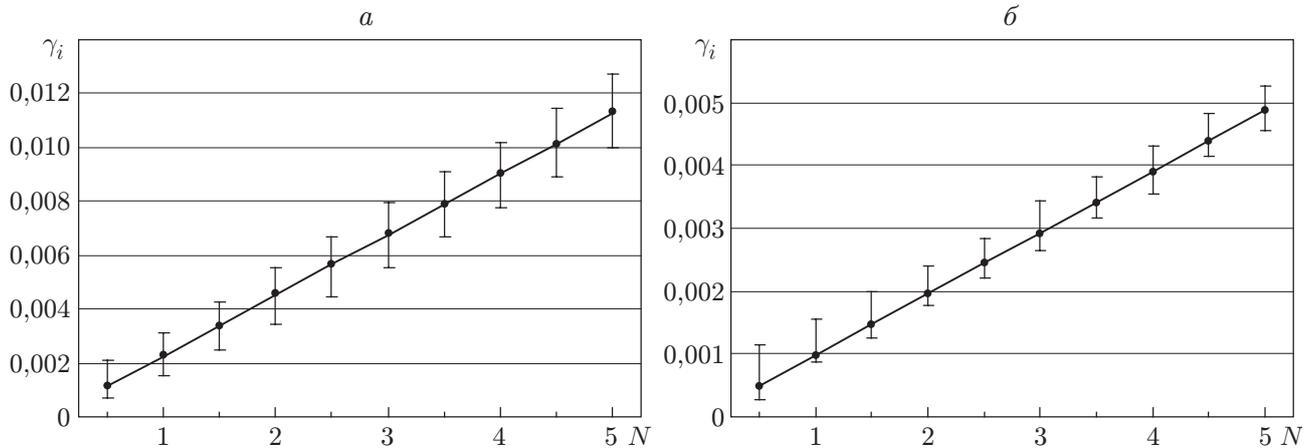


Рис. 2. Интенсивность деформации сдвига, рассчитанная аналитически по соотношению (3) (сплошная линия), и ее среднеарифметическое дискретное распределение (N — количество пикселей):

a — двухосное растяжение; b — одноосный сдвиг

Поскольку сдвиг равномерный, для каждой точки поверхности вектор смещения имеет вид

$$\mathbf{r}_{xy} = (ky, 0), \quad k = \Delta x/w.$$

Для всех точек поверхности можно записать векторное поле в декартовых координатах:

$$\mathbf{V}(x, y) = V_x(x, y) \cdot \mathbf{i} + V_y(x, y) \cdot \mathbf{j}, \quad V_x(x, y) = ky, \quad V_y(x, y) = 0.$$

Зная параметры перемещений, задаваемые векторным полем, можно определить продольную ε_{xx} , поперечную ε_{yy} , сдвиговую ε_{xy} компоненты тензора дисторсии и интенсивность деформации сдвига γ_i :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial(ky)}{\partial x} = 0, \quad \varepsilon_{yy} = 0, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial(ky)}{\partial y} + 0 \right) = \frac{k}{2}, \quad \gamma_i = |\varepsilon_{xy}| = \left| \frac{k}{2} \right|.$$

На рис. 2, b приведены результаты расчета интенсивности деформации сдвига по модельным изображениям. Параметры алгоритма построения векторного поля и изображений те же, что и в подп. 2.1. При вычислении среднеарифметических значений γ_i по полученным модельным изображениям отклонение от значений, вычисленных аналитически, составило $\Delta\gamma_i = 4,72 \cdot 10^{-4}$.

3. Расчет деформации путем анализа изображений поверхностей реальных объектов. Ниже приведены результаты тестирования разрабатываемого метода по изображениям поверхностей реальных образцов. В экспериментах использовались полимерные образцы из полипропилена, нагружавшиеся на механической испытательной машине ИМАШ-2078 в условиях одноосного статического растяжения.

Эксперимент проводился с образцами из полипропилена, имевшими форму двусторонней плоской лопатки. Размеры рабочей части образцов $39 \times 2 \times 1$ мм. Изображения были получены в центральной части образца, размер наблюдаемого участка составлял 800×600 мкм (рис. 3, a). Размер изображений (разрешение) равен 768×576 пикселей. Скорость растяжения образца 15 мм/ч; запись изображений образца проводилась через промежутки времени, равные нескольким секундам. Поле векторов перемещений, построенное по двум изображениям образца, приведено на рис. 3, b . Использование в эксперименте данного материала обусловлено его способностью выдерживать существенные упругие деформации, что необходимо при разработке метода оценки деформации.

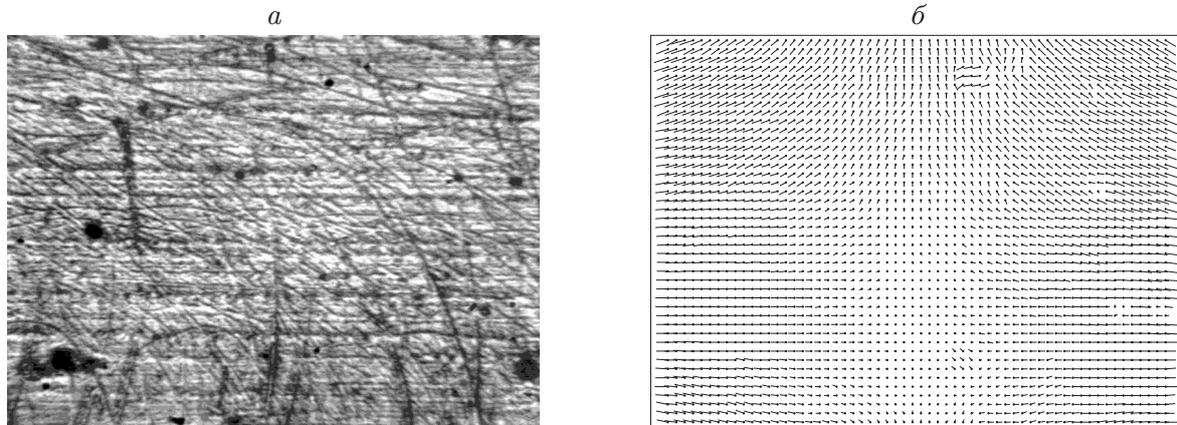


Рис. 3. Участок образца из полипропилена (а) и соответствующее поле векторов перемещений (б)

Приведем метод расчета значений γ_i по известным скорости нагружения образца и промежутку времени между записями изображений. Скорости растяжения участка образца (соответствующего размеру изображения) по оси x и сжатия по оси y равны соответственно: $V_x = LV_H/L_0 = 768 \cdot 4,2/39\,000 = 0,0827$ пиксел/с, $V_y = \mu HV_x/L = 0,5 \cdot 576 \cdot 0,0827/768 = 0,031$ пиксел/с ($V_H = 15 \cdot 10^3/3600 = 4,2$ мкм/с — скорость нагружения образца; L_0 — длина образца, мкм; L, H — длина и ширина изображения ($L \times N = 768 \times 576$ пикселов); $\mu = 0,5$ — коэффициент Пуассона). Зная промежуток времени между записями изображений, с использованием выражения (3) можно определить приращение деформации и значения компонент тензора дисторсии ε_{xx} и ε_{yy} для каждой пары изображений:

$$\varepsilon_{xx} = V_x t/L, \quad \varepsilon_{yy} = -V_y t/H.$$

Здесь t — промежуток времени между записями изображений; знак “-” компоненты ε_{yy} соответствует сжатию образца по оси y . Зная, что при растяжении образца $\varepsilon_{xy} = 0$, можно рассчитать интенсивность деформации сдвига по формуле (2).

На рис. 4 приведены зависимости параметра γ_i от времени приращения нагрузки, полученные с использованием “прямого” метода, описанного выше, и “косвенного” метода, предложенного в данной работе и реализованного в виде программы. Количественное и качественное соответствие результатов выполненных расчетов свидетельствует о том, что предложенная методика оценки деформаций, основанная на анализе перемещений участков поверхности, является корректной и может использоваться совместно с оптико-

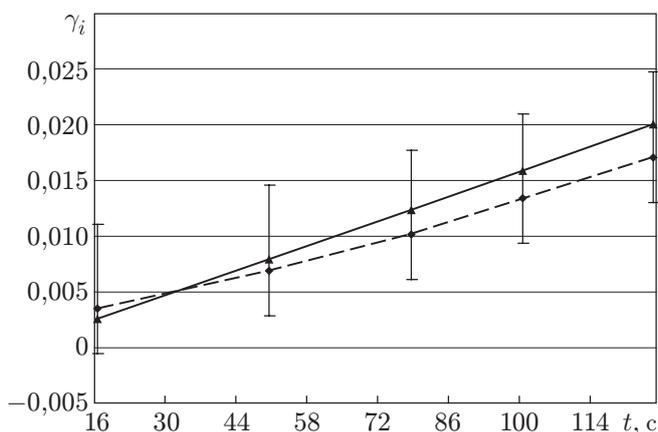


Рис. 4. Зависимости интенсивности деформации сдвига при растяжении образца из полипропилена от времени с начала регистрации серии изображений, полученные с использованием “прямого” (сплошная линия) и “косвенного” (штриховая линия) методов расчета

телевизионным измерительным комплексом TOMSC при проведении экспериментальных исследований.

Заключение. В данной работе впервые в рамках методологии физической мезомеханики проведено тестирование метода оценки деформаций поверхности, основанного на обработке изображений (построении векторов смещений).

Предложен алгоритм определения смещений участков поверхности с субпиксельной точностью, что достигается бикубической (двумерной) интерполяцией наибольших коэффициентов распределения корреляционной функции. Более высокая точность определения смещения достигается за счет двумерной интерполяции участка, а не поочередной интерполяции одномерными сплайнами. Сокращение объема вычислений достигается за счет интерполяции одного необходимого участка и замены последовательного перебора значений при определении максимума поиском экстремума путем вычисления градиентов.

Проведена проверка предложенного метода путем выполнения тестовых расчетов с использованием серий модельных изображений. Созданы модельные изображения, соответствующие формоизменению поверхности при двухосном растяжении и одноосном сдвиге. Полученные результаты аналитического и “экспериментального” расчета деформации хорошо согласуются.

Результаты оценки деформации, полученные путем аналитического расчета по известным параметрам нагружения и по результатам обработки экспериментальных изображений образцов из полипропилена, также хорошо согласуются. Таким образом, рассмотренный метод вычисления параметров деформации, основанный на построении полей векторов перемещений участков поверхности, является корректным и может быть использован совместно с оптико-телевизионным измерительным комплексом TOMSC при проведении экспериментальных исследований.

Авторы выражают благодарность Ю. П. Стефанову за ряд полезных советов и замечаний по аналитическим методам расчетов деформации, А. В. Панину за предоставленные образцы из полипропилена, И. В. Шакирову за помощь в создании модельных изображений с заданными статистическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2126523 РФ, 6 G 01 B 11/16. Способ неразрушающего контроля механического состояния объектов и устройство для его осуществления / Е. Е. Дерюгин, В. Е. Панин, С. В. Панин, В. И. Сырямкин. Оpubл. 20.02.99, Бюл. № 5.
2. **Физическая** мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / Под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1995.
3. Панин С. В., Сырямкин В. И., Любутин П. С. Разработка и исследование алгоритмов обработки изображений поверхности для оценки деформации твердых тел // Автометрия. 2005. Т. 41, № 2. С. 44–58.
4. Шакиров И. В. Некоторые вопросы прикладного вейвлет-анализа для обработки статических изображений: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2003.
5. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформированного тела: В 3 т. М.: Наука, 1975. Т. 1.
6. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Киев: Наук. думка, 1988. Т. 1.