

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ВЕКТОРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАЦИЙ ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ

П. С. ЛЮБУТИН, С. В. ПАНИН

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Томск, Россия*

e-mail:pavel@docsis.ru, svp@ms.tsc.ru

A method for evaluating the strains of surface of solids based on optical image processing and displacement vector construction is tested. The purpose of the study is to reveal the accuracy of the displacement estimation and error rate performance of the method when noise (Gaussian and white), blurring and image brightness distortion are present. We investigate the influence of cracks that occur in an image and thus give rise to a discontinuity of the displacement distribution function on estimation of the strain components. An algorithm allowing reduction of such influence is proposed.

Введение

Оптико-телевизионный метод исследований является одним из наиболее перспективных для изучения процессов деформации и разрушения структурно-неоднородных материалов (металлов, сплавов, керамических материалов и т. п.). Применение оптико-телевизионных измерительных систем (ОТИС) позволяет развивать следующие направления: проектирование и разработка перспективных материалов в рамках научного направления “компьютерное конструирование материалов”, создание принципиально нового подхода к неразрушающему контролю, основанному на выявлении стадии предразрушения, а также проводить тарировку существующих приборов дефектоскопии и неразрушающего контроля и т. п. [1].

Принцип действия ОТИС основан на корреляционном анализе оптических изображений. Одним из основных подходов оценки деформации объекта является метод построения полей векторов перемещений (ПВП) и последующего расчета компонент деформации.

В статье [2] W. Clocksin описывает метод расчета векторов оптического потока, использующий распределения в пространстве скоростей, который был использован для нахождения деформаций поверхностей материалов. Метод основан на вычислении вероятности,

что пиксел с яркостью $p_1 = I(x, t)$ и пиксел $p_2 = I(x + \delta x, t + \delta t)$ — это один и тот же пиксел в моменты времени t и $t + \delta t$ соответственно:

$$P = \exp(-(p_1 - p_2)^2/\alpha),$$

где p_1 — яркость пиксела в момент времени t ; p_2 — яркость пиксела в момент времени $t + \delta t$; α — параметр, влияющий на скорость уменьшения вероятности при увеличении разности $(p_1 - p_2)$.

Весьма интересные данные в области математической обработки результатов исследований по методу Surface-strain mapping получены в группе проф. Ph. Withers [3]. В качестве критерия для оценки неоднородности развития деформации в указанной работе предлагается использовать карты несоответствия смещений (displacement mismatch maps).

В [4] приведен обзор основных корреляционных методов расчета оптических потоков. Рассмотрены варианты алгоритмов с субпиксельной точностью, а также способы улучшения существующих методов.

Подход, основанный на вычислении компонент деформации, производимый путем пересчета карт векторов смещений (или карт деформации поверхности — surface strain mapping), наиболее широко получил развитие в группе проф. М. Саттона (Sutton) в университете штата Южная Каролина [5, 6]. Основное внимание при этом уделяется вопросам усталостного разрушения гетерогенных материалов. В результате исследований, проведенных данной группой, был предложен критерий оценки интенсивности деформации при раскрытии трещины, основанный на вычислении параметра COD (crack opening displacement) [7]. Другой подход, основанный на построении карт векторов перемещений и последующем вычислении компонент деформации с целью оценки трещиностойкости, был предложен нашими коллегами в работе [8].

В проанализированных нами литературных источниках не было проведено исследование точности методов при различных типах и уровнях возмущающих воздействий, не оценивалась помехоустойчивость методов, а также возможность корректировки полей векторов и влияние корректировки на конечный результат (величины компонент деформации).

В настоящей работе ставилась задача провести численную оценку работоспособности метода, влияния внешних факторов, таких как гауссовский и белый шум на изображении, размытие изображения, искажение яркости изображения, на точность вычислений векторов перемещений. Предложен метод корректировки (обработки) полей векторов перемещений, позволяющий уменьшить степень влияния раскрытия трещин на изображении, обуславливающих разрывы в функции распределения перемещений, на результат расчета компонент деформации.

1. Описание метода

В общем виде схема работы оптико-телевизионной измерительной системы представлена на рис. 1. Отметим, что конечный результат работы ОТИС — картина распределения деформации — зависит от качества обработки информации на этапах: 1) формирования изображения; 2) его предварительной обработки; 3) расчета информативных признаков; 4) посткорректировки результатов расчета (фильтрации), — а также участия оператора в настройке параметров расчета (обучения системы) и ручной корректировке промежуточных данных.



Рис. 1. Схема, иллюстрирующая принцип действия оптико-телевизионной измерительной системы.

Алгоритм оценки перемещений основан на установлении соответствия между участками двух изображений путем вычисления взаимно корреляционной функции (ВКФ) и поиске экстремума этой функции [9]. Если для вычисления ВКФ используются коэффициенты корреляции, то в качестве экстремума берется максимум, если используются коэффициенты разности, то берется минимум. Ниже приведены основные выражения для вычисления коэффициентов разности [9, 4]:

$$\begin{aligned}
 k_{\text{SAD}} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |I_{1,i,j} - I_{2,i,j}|, & k_{\text{SSD}} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - I_{2,i,j})^2, \\
 k_{\text{ZSSD}} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - \bar{i}_1 - I_{2,i,j} + \bar{i}_2)^2, & k_{\text{LSSD}} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\bar{i}_2 I_{1,i,j} - \bar{i}_1 I_{2,i,j})^2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где I_1, I_2 — яркости элементов (пикселей) сравниваемых участков изображений; \bar{i}_1, \bar{i}_2 — среднеарифметические значения элементов тех же участков; n — размер стороны элементарной площадки, для которой вычисляется коэффициент. Названия коэффициентов корреляции, соответствующие индексам, приведены в табл. 1.

Для нахождения перемещения участков изображения широко используют сумму абсолютных разностей SAD и сумму квадратов разностей яркостей участков SSD, так как для вычисления этих коэффициентов требуется наименьшее количество операций по сравнению с остальными вышеперечисленными. Выражения для расчета коэффициентов SAD и SSD могут быть модифицированы с учетом средних яркостей анализируемых участков. Коэффициент ZSSD представляет собой сумму квадратов разностей элементов участков с нулевым средним. При вычислении коэффициента LSSD элементы участков масштабируются средними значениями \bar{i}_1 и \bar{i}_2 , что позволяет привести яркость двух сравниваемых участков к одному масштабу.

Наибольшие вычислительные затраты характерны для расчета коэффициентов корреляции. При вычислении коэффициентов корреляции используют следующие

Таблица 1. Методы оценки соответствия между участками изображений

N	Сокращенное название	Полное название
1	SAD	Sum of absolute differences (сумма абсолютных разностей)
2	SSD	Sum of squared differences (сумма квадратов разностей)
3	ZSSD	Zero-mean sum of squared differences (сумма квадратов разностей с нулевым средним)
4	LSSD	Locally scaling sum of squared differences (сумма квадратов разностей с локальным масштабированием элементов)
5	ZNCC	Zero-mean normalized cross-correlation (нормированная кросс-корреляция с нулевым средним)
6	NCC	Normalized cross-correlation (нормированная кросс-корреляция)

выражения [9, 4]:

$$k_{\text{NCC}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{1,i,j} I_{2,i,j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{1,i,j}^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{2,i,j}^2}}, \quad k_{\text{ZNCC}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - \bar{i}_1) \cdot (I_{2,i,j} - \bar{i}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - \bar{i}_1)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{2,i,j} - \bar{i}_2)^2}}, \quad (2)$$

использованные обозначения аналогичны указанным выше для коэффициентов разности. Отметим, что при расчете коэффициента NCC производится нормировка, а коэффициент ZNCC вычисляется с приведением среднего значения элементов участков к нулю.

Нахождение максимума коэффициента в пределах зоны сканирования производится построчно с шагом 1 пиксел [9, 10]. Размер зоны сканирования и шаг построения векторов задаются оператором. После определения перемещения участка с пиксельной точностью необходимо дальнейшее уточнение величины перемещения до долей пиксела. Субпиксельная точность достигается бикубическим (двумерным) интерполированием узлов с наибольшими значениями коэффициентов, т. е. интерполируется не все распределение корреляционной функции в расчетной области, а только один участок [11]. После интерполяции находится максимум функции бикубического сплайна, координаты которого определяют величину и направление смещения. Поиск экстремума сплайна производится итеративно, через вычисление градиентов.

2. Получение модельных изображений

Проведение тестовых расчетов с использованием серии модельных изображений предназначено для проверки качества работы метода в условиях отсутствия внешних возмущающих воздействий, таких как шум, геометрические искажения и др. Для создания модельных изображений, отражающих различные схемы 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 под термином “поверхность” будем понимать непрерывное распределение яркости (оптический образ). Построение модельных изображений можно разбить на несколько этапов:

- получение набора дискретных отсчетов яркости (узловых точек) “поверхности” с заданным распределением;
- построение непрерывного распределения яркости (“поверхности”) путем интерполирования полученных узловых точек;
- задание параметров (типа и приращения) деформации и перерасчет “поверхности” с учетом заданных значений;
- дискретизация “поверхности” с целью получения модельного изображения.

Получить узловые точки “поверхности” как значения двумерных стохастических полей с заданными статистическими свойствами [12] можно наиболее простым и эффективным способом:

$$F_{x,y} = \alpha F_{x,y-1} + \beta F_{x-1,y} - \alpha\beta F_{x-1,y-1} + n_{x,y} \sigma \sqrt{(1-\alpha)(1-\beta)} + m(1-\alpha)(1-\beta), \quad (3)$$

где $F_{x,y}$ — текущее значение точки с координатами x, y ; α, β — коэффициенты корреляции между соседними элементами по горизонтали и вертикали; $n_{x,y}$ — случайная последовательность чисел с нулевым средним и единичной дисперсией; σ — требуемая величина среднеквадратичного отклонения амплитуд яркости изображения; m — требуемая величина математического ожидания амплитуд яркости изображения.

Варьируя параметры m, σ, α и β в выражении (3), можно получать широкий диапазон модельных изображений с контролируемыми статистическими параметрами. В качестве распределения случайной последовательности нами было использовано равномерное распределение.

Более подробно изложение данного подхода описано в [11], там же приведены примеры модельных изображений.

3. Тестирование метода

В тестах алгоритмов использовались серии изображений, в которых “поверхность” смещалась по оси x на заданную величину (трансляция). Данный способ позволяет наиболее эффективно оценить ошибку для конкретного значения перемещения, поскольку все векторы поля имеют одинаковые длину и направление. Алгоритмы тестировались с использованием модельных изображений размером 512×512 пикселей и 8 бит яркости, отведенных под один пиксел (grayscale). Изображения моделировались с использованием статистической модели с параметрами $\alpha = \beta = 0.9$. Тестирование алгоритмов проводилось для установления помехоустойчивости и точности метода при влиянии внешних факторов, таких как гауссовский и белый шум на изображении, размытие изображения, искажение яркости изображения, а также оценивалось влияние такого параметра изображения, как корреляция между соседними элементами изображения. В первом тесте оценивались максимальная ошибка и среднее максимальной ошибки. Во всех остальных тестах оценивались средняя ошибка нахождения векторов (определения перемещения) и среднеквадратичное отклонение найденных векторов поля от заданного перемещения “поверхности” на модельных изображениях.

3.1. Влияние корреляции между соседними элементами (пикселами) модельного изображения

Исследование влияния корреляции между соседними элементами изображения (пикселами) показало, что при увеличении коэффициента корреляции α ($\alpha = \beta$) (см. уравнение (3)) ошибка определения смещения δ растет неодинаково при различных величинах смещения “поверхности” dx (рис. 2, а). На рис. 2, б приведена зависимость средней ошибки определения перемещения от коэффициента корреляции α для смещений “поверхности” в диапазоне от 0.05 до 1.0 пиксела. При отсутствии корреляции между пикселами изображения ($\alpha = 0$) ошибка определения перемещения в среднем составляет $\delta = 0.01$ пиксела. При увеличении коэффициента корреляции ошибка значительно возрастает при значениях перемещений $\delta \sim 0.2$ и $\delta \sim 0.8$ пиксела и практически не изменяется для перемещения, равного 0.5 пиксела. Такой вид графиков, во-первых, связан с методом нахождения перемещения с субпиксельной точностью, т. е. бикубическим интерполированием распределения ВКФ. Во-вторых, увеличение степени корреляции между элементами изображения является возмущающим воздействием, приводящим к возрастанию ошибки определения

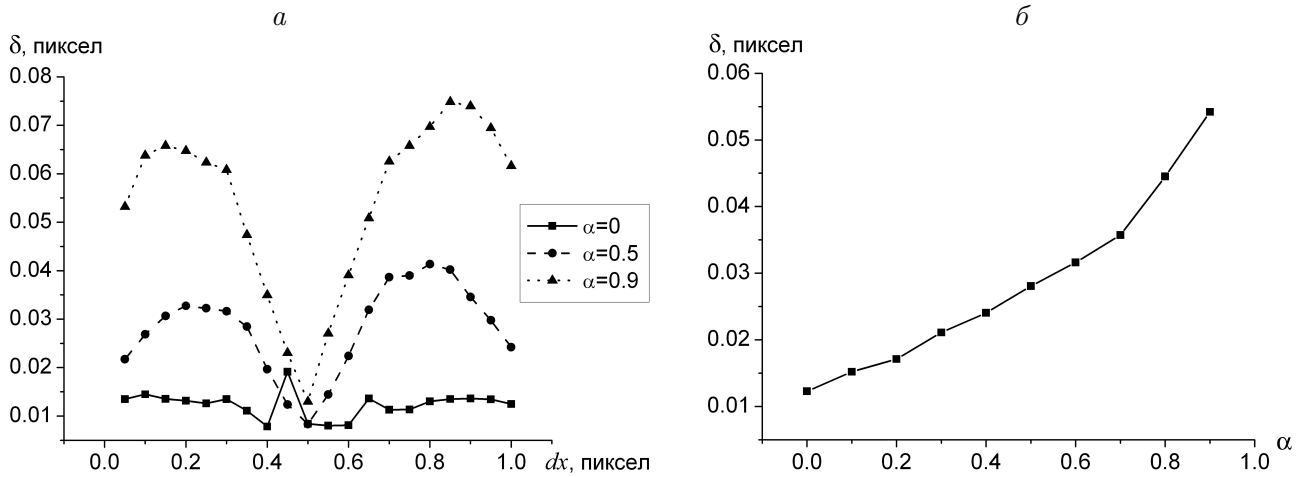


Рис. 2. Влияние коэффициентов корреляции α элементов изображений на точность нахождения векторов перемещений.

смещения. Поскольку при проведении данного теста все использованные алгоритмы показали схожие результаты, графики приведены только для алгоритма SSD.

3.2. Влияние шума на модельном изображении

Реальные изображения изначально содержат шум, одним из источников которого является ПЗС-матрица телевизионной камеры. В тестах анализировали пары модельных изображений, одно из которых соответствовало несмещенной “поверхности”, а второе отражало смещение “поверхности” на 0.5 пиксела.

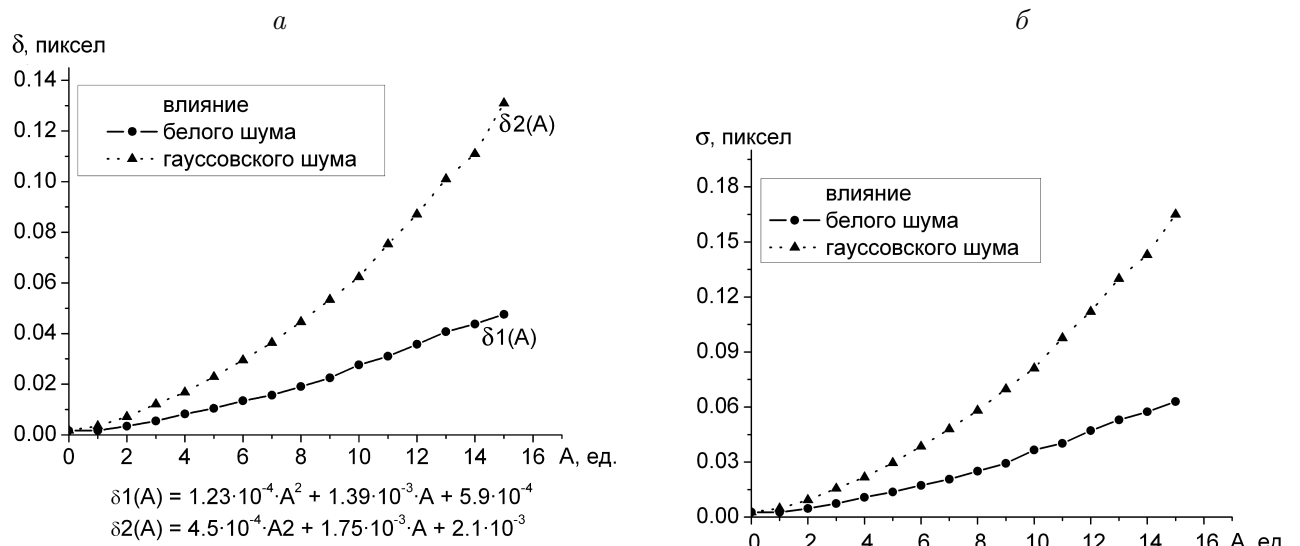


Рис. 3. Влияние шума на изображении на точность нахождения векторов перемещений: *a* — зависимость ошибки определения перемещения от амплитуды шума; *б* — зависимость среднеквадратичного отклонения определения перемещения от амплитуды шума.

Таблица 2. Влияние белого шума

Параметр	SAD	SSD	ZSSD	LSSD	ZNCC	NCC
δ , пиксел	0.20	0.166	0.167	0.168	0.173	0.168
σ , пиксел	0.257	0.212	0.214	0.215	0.223	0.215

Таблица 3. Влияние гауссовского шума

Параметр	SAD	SSD	ZSSD	LSSD	ZNCC	NCC
δ , пиксел	0.144	0.126	0.127	0.127	0.131	0.127
σ , пиксел	0.186	0.163	0.165	0.166	0.17	0.165

Шум представляет собой случайный аддитивный сигнал, который статистически не зависит от видеосигнала. Модель аддитивного шума используется тогда, когда сигнал на выходе изображающей системы или каком-нибудь промежуточном этапе преобразования может рассматриваться как сумма полезного сигнала и некоторого случайного сигнала (шума) [12]. В тестах использовали аддитивную модель гауссовского и белого шумов, распределенных по всему полю исследуемого изображения. На оба изображения из пары попиксельно накладывался случайный сигнал (шум) одинаковых амплитуды и распределения.

Из результатов тестов видно, что при увеличении амплитуды шума наблюдается рост ошибки вычисления перемещения δ (рис. 3, *a*) и среднего квадратичного отклонения σ (рис. 3, *b*). Причем наличие на изображении гауссовского шума приводит к большей ошибке, чем при наличии белого шума той же амплитуды (рис. 3). Графики приведены для алгоритма SSD. Зависимость определения перемещения от амплитуды шума можно выразить аналитически, аппроксимируя полученные данные (см. рис. 3, *a*).

В табл. 2 приведены результаты тестирования алгоритмов в условиях зашумления модельного изображения белым шумом с амплитудой 30 ед. (под единицей подразумевается один отсчет по шкале яркости). В табл. 2 и последующих таблицах приняты следующие обозначения: δ — ошибка определения перемещения; σ — среднеквадратичное отклонение.

В табл. 3 приведены результаты тестирования алгоритмов в условиях зашумления модельного изображения гауссовским шумом с амплитудой 15 ед. Наименьшие ошибка и среднеквадратичное отклонение достигаются при использовании алгоритма SSD, а наибольшая ошибка — при использовании алгоритма SAD.

3.3. Влияние искажений яркости на модельном изображении

На реальных изображениях часто можно наблюдать потемнение отдельных участков (вследствие изменения отражающей способности поверхности), что связано с локализацией деформации в малых по размеру областях нагруженного образца. В тестах анализировали пары модельных изображений, одно из которых соответствовало несмещенной “поверхности”, а второе отражало смещение “поверхности” на 0.5 пиксела. Для исследования влияния подобного рода искажений на точность построения векторов перемещений был проведен тест на модельных изображениях, в котором яркость второго изображения понижалась на заданную величину.

Проведенное исследование влияния изменения (отклонения) яркости изображения характеризует отсутствие “чувствительности” алгоритмов с нулевым средним элементов

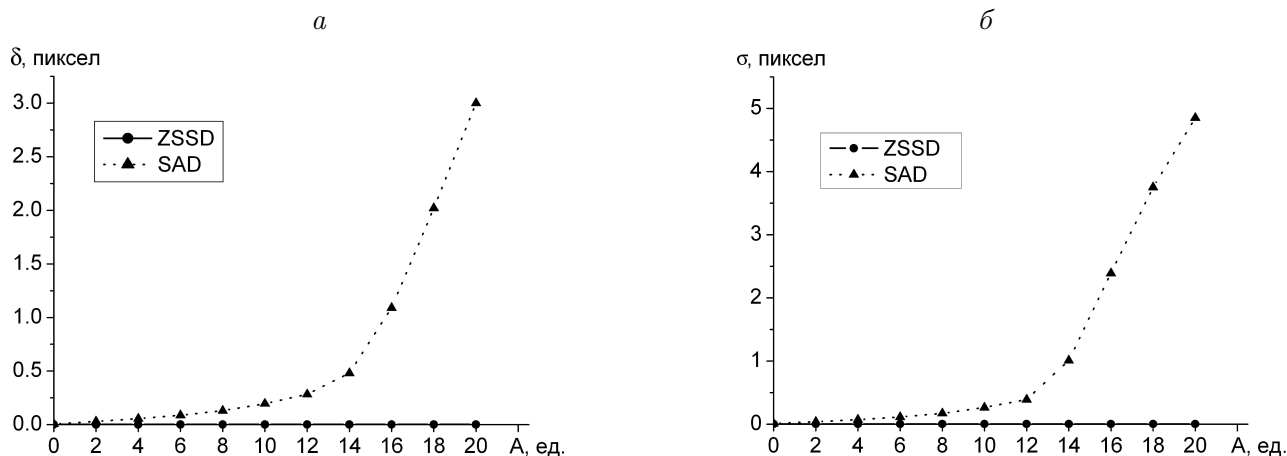


Рис. 4. Влияние отклонения яркости изображения на точность нахождения векторов перемещений: *а* — зависимость ошибки определения перемещения от величины отклонения яркости; *б* — зависимость среднеквадратичного отклонения определения перемещения от величины отклонения яркости.

Таблица 4. Влияние отклонения яркости изображения

параметр	SAD	SSD	ZSSD	LSSD	ZNCC	NCC
δ , пиксел	1.41	0.19679	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$9.4 \cdot 10^{-3}$
σ , пиксел	2.12	0.413	$2.77 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-2}$

(ZNCC, ZSSD) к такому виду искажений, в то время как использование алгоритмов SSD, SAD сопровождается значительным ростом величины ошибок в результатах определения смещения при увеличении отклонения яркости (параметр A — рис. 4). Отметим, что результаты расчетов совпадают как при уменьшении, так и при увеличении яркости.

Для разностного алгоритма SAD (SSD) зависимость ошибки и среднеквадратичного отклонения можно разделить на два диапазона: от 0 до 14 ед. и от 14 ед. и более. При отклонении яркости в диапазоне от 0 до 14 ед. ошибка не превышает 0.5 пиксела, в то время как дальнейшее увеличение отклонения яркости приводит к возрастанию скорости роста ошибки (рис. 4, *а*) и среднего квадратичного отклонения (рис. 4, *б*).

В табл. 4 приведен результат тестирования алгоритмов при величине отклонения яркости 20 ед. Анализ представленных данных показывает, что для исследуемых алгоритмов наименьшие ошибка и среднеквадратичное отклонение достигаются при использовании алгоритмов ZSSD и ZNCC. Наибольшая ошибка наблюдается в результатах тестов алгоритмов SAD и SSD (аналогично графикам, приведенным на рис. 4). Средняя величина ошибки отмечена при использовании LSSD и NCC.

3.4. Влияние размытия (расфокусировки) модельных изображений

В результате расфокусировки микроскопа изображения могут иметь размытие, которое также будет сказываться на результате расчета перемещений. Как и в предыдущих тестах, в данном эксперименте анализировались пары модельных изображений, одно из которых соответствовало несмещенной “поверхности”, а второе отражало смещение “поверхности”

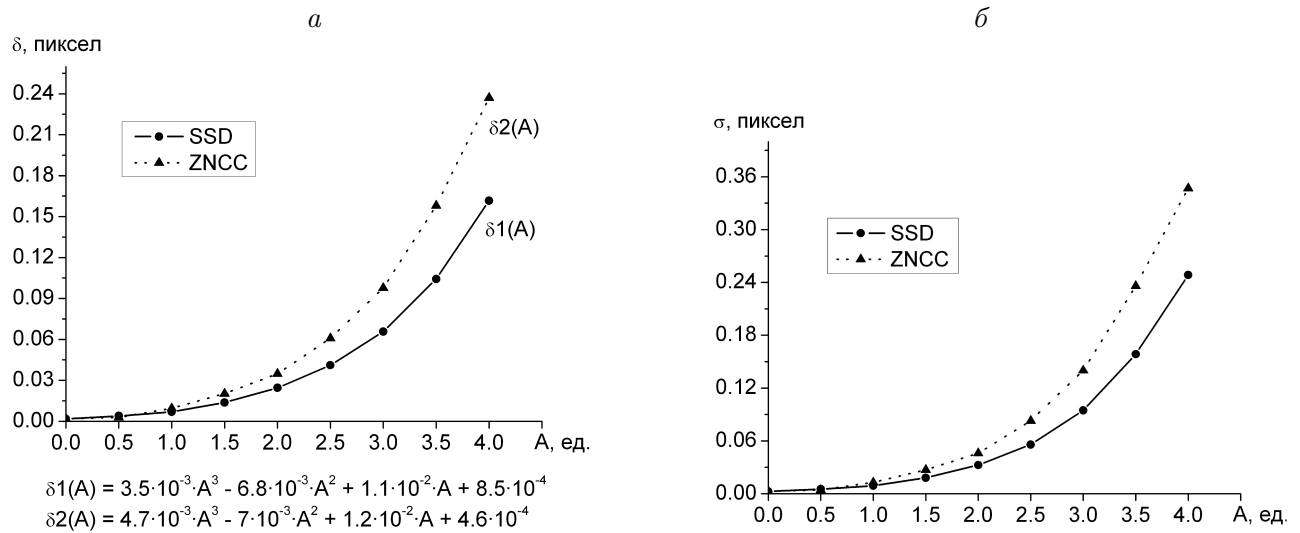


Рис. 5. Влияние размытия изображения на точность нахождения векторов перемещений: a — зависимость ошибки определения перемещения δ от степени размытия изображения A ; b — зависимость среднеквадратичного отклонения определения перемещения σ от степени размытия A .

Таблица 5. Влияние размытия изображения

Параметр	SAD	SSD	ZSSD	LSSD	ZNCC	NCC
δ , пиксел	0.21	0.165	0.17	0.21	0.23	0.18
σ , пиксел	0.31	0.26	0.27	0.32	0.34	0.28

на 0.5 пиксела. Для имитации расфокусировки микроскопа второе модельное изображение из пары подвергалось размытию, которое моделировалось гауссовой функцией рассеяния точки [13]:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2} \frac{x^2+y^2}{\sigma^2}}. \quad (4)$$

Из результатов эксперимента видно, что алгоритм SSD (разностный) оказался устойчивее к такому типу искажений, чем корреляционный алгоритм ZNCC (рис. 5). Зависимость ошибки от радиуса размытия (обозначен как A) можно выразить аналитически, аппроксимируя полученные данные (рис. 5, a).

В табл. 5 приведен результат тестирования алгоритмов при гауссовом размытии радиусом 4 ед. При использовании корреляционного алгоритма ZNCC величина средней ошибки на 40% больше, чем при использовании SSD. Наибольшая величина ошибки наблюдается при использовании алгоритма ZNCC, а наименьшая — при использовании SSD. Остальные алгоритмы по “чувствительности” к искажению типа размытия изображения занимают промежуточное место между вышеуказанными алгоритмами, причем можно видеть, что алгоритм SAD по чувствительности наиболее близок к LSSD, а ZSSD — к NCC.

4. Постобработка

При исследовании процессов деформации материалов, особенно при глубоких степенях деформации и/или на стадии разрушения, на изображениях, как правило, присутствуют трещины. Расчет перемещений в областях, соответствующих трещинам, может вызвать

ошибку при последующем расчете распределения деформации в указанной области, поскольку в ней происходит разрыв функции перемещения. Предлагается исключать влияние трещины путем выполнения таких операций как:

- распознавание трещины на изображении;
- выделение векторов перемещений, построенных на участке, соответствующем трещине;
- замена векторов на новые, найденные путем интерполирования векторов справа и слева (сверху и снизу) от трещины (в зависимости от ориентации трещины на изображении).

На рис. 6 приведена схема построения поля векторов перемещений с последующей корректировкой (постобработкой).

Для распознавания и нахождения положения объекта типа трещины выполняют сегментацию изображения. При этом основываются на том, что трещина как объект имеет минимальную яркость на изображении, так как в ней отсутствует материал. На рис. 7 приведены одно из исходных изображений (*a*), результат сегментации изображения (*b*), а также ПВП без корректировки векторов (*в*) и после корректировки, которая включала сглаживание и интерполяцию векторов перемещений (*г*).

Ниже подробнее описаны некоторые блоки схемы построения ПВП с применением процедуры постобработки (рис. 6).

Вычисление порогов $th1$ и $th2$. Для каждого участка изображения размером 16×16 пикселей вычисляется среднеарифметическое значение яркости; из полученных

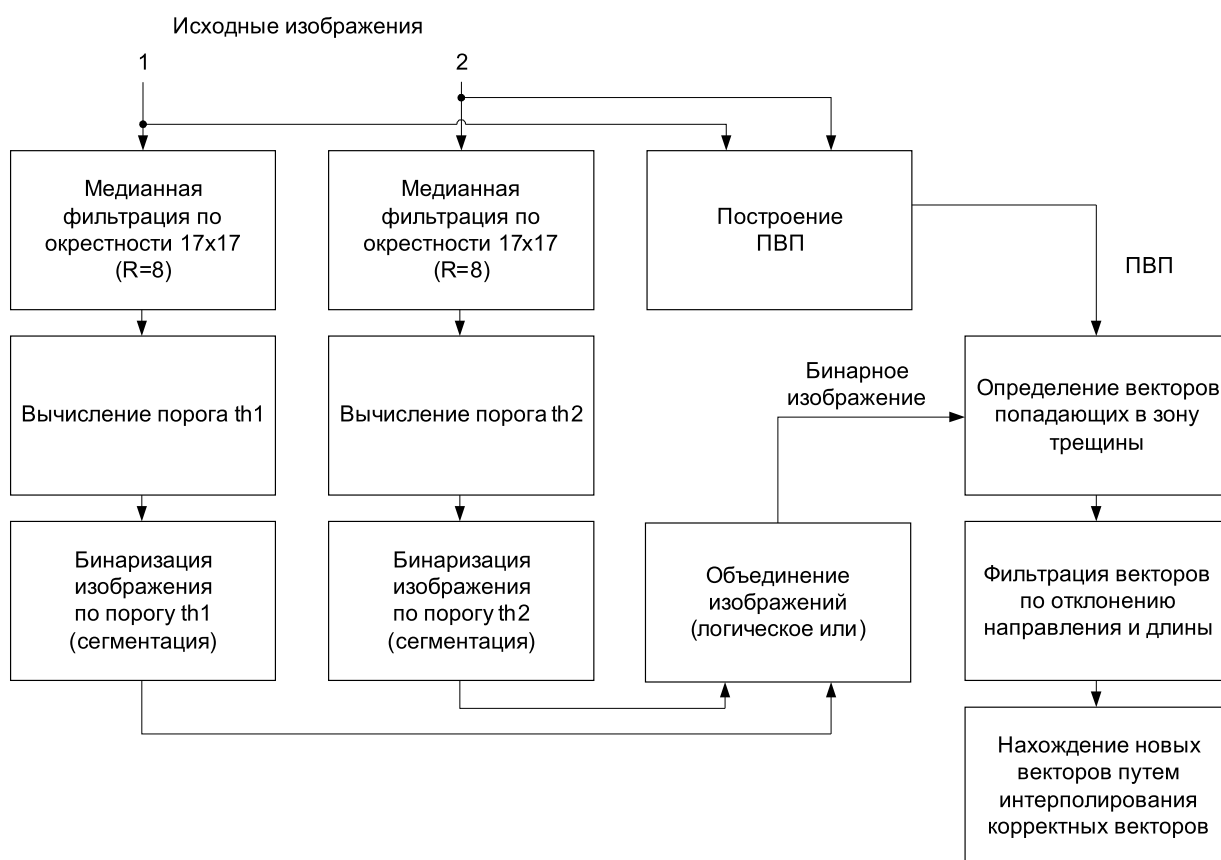


Рис. 6. Схема построения ПВП с последующей корректировкой.

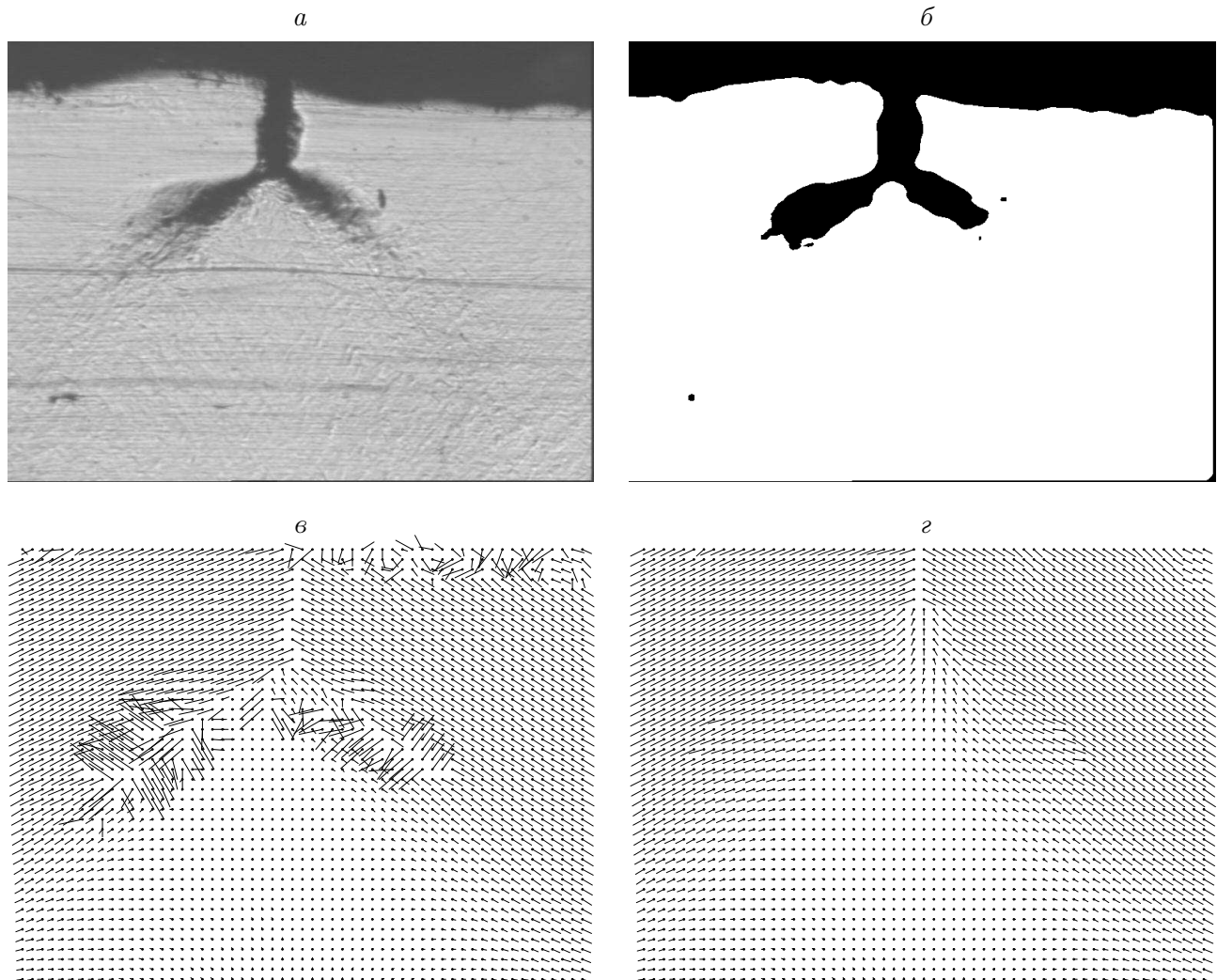


Рис. 7. Исходное (а), сегментированное (б) изображения и поля векторов перемещений без корректировки (в) и после корректировки (г).

данных находятся максимальное и минимальное среднее. После этого порог бинаризации вычисляется как среднеарифметическое максимального и минимального среднего.

Бинаризация изображений осуществляется по найденным порогам. В результате бинаризации получается сегментированное изображение, где трещина является искомым объектом.

Определение векторов, попадающих в зону трещины, осуществляется по бинарному изображению, полученному после объединения бинарных изображений с использованием операции “логического ИЛИ”.

Фильтрация векторов по отклонению направления и длины делится на два этапа. На первом находятся некорректные векторы. Некорректным считается вектор, длина и направление которого отличаются от векторов в его окрестности по значению заданного порога (порог задается пользователем). Второй этап, являющийся непосредственно фильтрацией, совмещен с этапом корректировки поля векторов перемещений.

Корректировка поля векторов перемещений осуществляется сглаживанием и интерполированием векторов. Сглаживание поля производится по окрестности 84×84 пиксела, что соответствует окрестности 7×7 векторов при шаге построения векторов в поле,

равном 12 пикселям. Новый вектор рассчитывается как среднеарифметическое векторов, попадающих в указанную окрестность изображения. Сглаживанию подвергаются только корректно найденные векторы, некорректные векторы заменяются на новые, найденные путем интерполирования других соседних векторов.

Интерполирование некорректных векторов реализовано описанным ниже способом. На рис. 8, *а* приведен участок поля размером 4×3 вектора, при этом некорректными векторами являются векторы 6 и 7. Вектор 6 находится путем билинейного интерполирования векторов 1, 3, 11 и 9, соответственно вектор 7 находится по векторам 2, 4, 12 и 10. В случае, приведенном на рис. 8, *б*, оба вектора 6 и 7 будут находиться по векторам 1, 4, 9 и 12, так как вектор 11 также является некорректным.

Исследование эффективности предложенного метода постобработки проводилось на экспериментально полученных изображениях. В эксперименте использовались изображения участков образцов стали 9ХФМ, имевших форму двусторонней плоской лопатки. Образцы имели размер рабочей части $46 \times 2.6 \times 0.8$ мм. Размер участка, наблюдаемого на изображении, составлял 420×317 мкм (см. рис. 7, *а*) [14]. Размер изображений (разрешение) равнялся 768×576 пикселей. Скорость растяжения образца составляла 5.6 мм/ч; запись изображений образца производилась через промежутки времени, равные нескольким секундам.

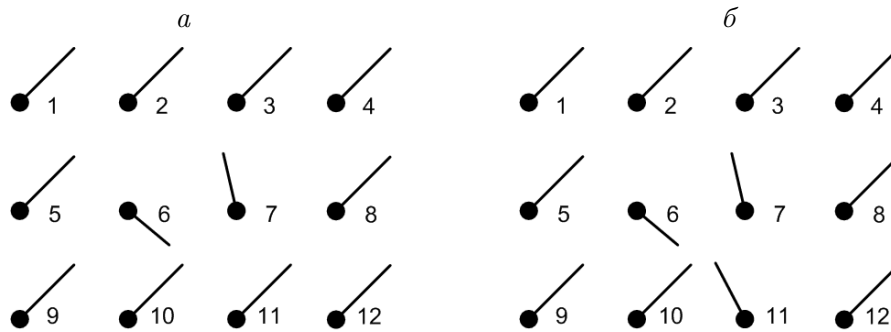


Рис. 8. Пример участков ПВП с некорректными векторами.

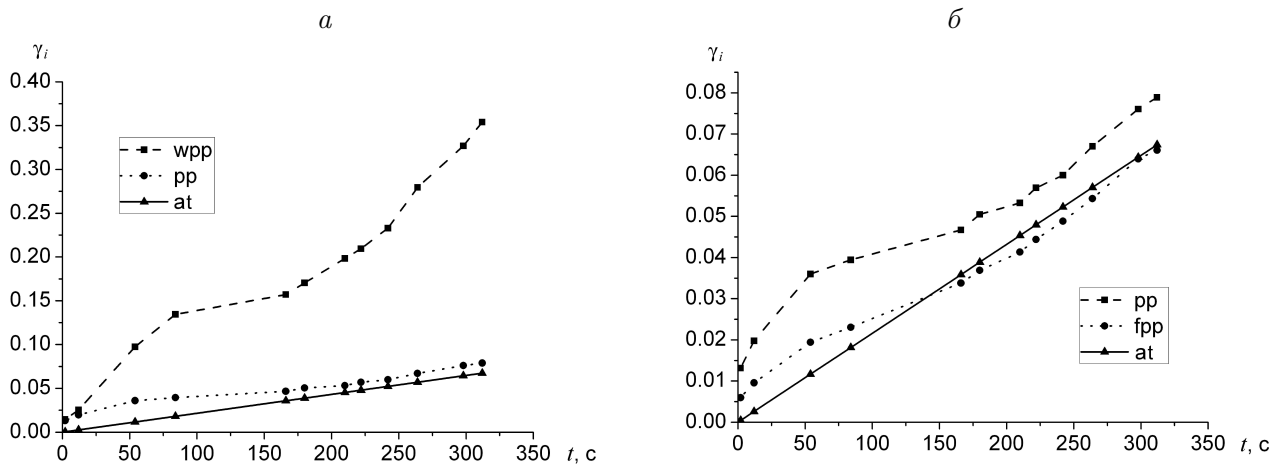


Рис. 9. Интенсивность деформации сдвига, рассчитанная по серии изображений: *а* — wpp — без постобработки ПВП, pp — с постобработкой ПВП, at — аналитически рассчитанные показатели; *б* — fpp — с фильтрацией и постобработкой; pp, at — то же, что и на рис. *а*.

Зная скорость растяжения образца и время между записью изображений и учитывая, что $\varepsilon_{xy} = 0$, можно рассчитать интенсивность деформации сдвига γ_i по формуле [11, 15, 16]

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

На рис. 9, *а* приведены зависимости γ_i , рассчитанные по ПВП без постобработки, с постобработкой и аналитически рассчитанные значения γ_i (по параметрам эксперимента, приведенным выше). На рис. 9, *б* представлены зависимости γ_i , рассчитанные по ПВП с корректировкой неправильно построенных векторов интерполированием, с корректировкой векторов и последующим сглаживанием, и аналитически рассчитанные значения γ_i . Из зависимостей видно, что исправление (корректировка) неправильных векторов поля значительно снижает ошибку определения компонент деформации (рис. 9, *а*). Дополнительное сглаживание поля позволяет снизить выбросы, возникающие при дифференцировании поля (рис. 9, *б*).

Заключение

Проведено исследование метода оценки деформации поверхности твердых тел с целью определения влияния внешних факторов, таких как гауссовый и белый шум на изображении, размытие изображения, влияние искажения яркости изображения на точность вычислений векторов перемещений. Предложен метод корректировки векторов перемещений, позволяющий уменьшить степень влияния раскрытия трещин на изображении, обуславливающих разрывы в функции распределения перемещений, на результат расчета компонент деформации. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Корреляция между элементами изображения (пикселями) фактически является возмущающим фактором, и с ростом коэффициента корреляции наблюдается увеличение ошибки определения перемещения.

2. Наличие белого шума на изображении влияет на точность определения перемещения в меньшей степени, чем наличие гауссова шума при той же амплитуде. “Чувствительность” метода к гауссовому шуму примерно в два раза выше. Наименьшая ошибка получена при использовании алгоритма SSD.

3. Искажение яркости изображения показало отсутствие “чувствительности” алгоритмов с нулевым средним элементов (ZNCC, ZSSD) к такому виду искажений, тогда как использование алгоритмов SSD, SAD сопровождается значительным ростом величины ошибок в результатах расчета перемещений при увеличении отклонения яркости. Наименьшая ошибка при проведении данного искажения была получена при использовании алгоритма ZNCC, а наименьшее среднее квадратичное отклонение отмечено при использовании ZSSD.

4. Расфокусировка объектива микроскопа моделировалась путем размытия изображений гауссовой функцией рассеяния точки. Наименьшая ошибка была достигнута использованием алгоритма SSD, а использование алгоритма ZNCC, напротив, привело к наибольшей ошибке при определении векторов.

5. Предложен метод корректировки полей векторов перемещений, основанный на сглаживании векторов поля и замене неправильно найденных векторов на векторы, полученные путем интерполирования корректных векторов в его окрестности. Эксперименты, проведенные на сериях реальных изображений материала, в котором присутствует трещина,

показали, что метод корректировки неправильно построенных векторов значительно снижает влияние трещин (как разрывов в функции распределения перемещений) на значение рассчитываемых компонент деформации. Сглаживание векторов перемещений позволяет снизить величину выбросов, возникающих при дифференцировании распределения перемещений.

Список литературы

- [1] ПАТ. 2126523 РФ. Способ неразрушающего контроля механического состояния объектов и устройство для его осуществления / Дерюгин Е.Е., Панин В.Е., Панин С.В., Сырямкин В.И. Опубл. 20.02.99. Бюл. изобретений № 5.
- [2] CLOCKSIN W.F. A New Method for Estimating Optical Flow. Technical Report 436, Computer Laboratory, Univ. of Cambridge, 1997. 18 p.
- [3] CLOCKSIN W.F., CHIVERS K.F., TORR P.H.S. ET AL. Inspection of surface strain in materials using dense displacement fields // Intern. Conf. on New Challenges in Mesomechanics, Aalborg Univ. Denmark, Aug. 26–30, 2002. Vol. 2. P. 467–474.
- [4] GIACCHETTI A. Matching techniques to compute image motion // Image and Vision Computing. 2000. Vol. 18. P. 247–260.
- [5] 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. Vol. 4, N 3. P. 143–151.
- [6] MCNEILL S.R., PETERS W.H., SUTTON M.A. Estimation of stress intensity factor by digital image correlation // Eng. Fracture Mech. 1987. Vol. 28, N 1. P. 101–112.
- [7] SUTTON M.A., HELM J.D., BOONE M.L. Experimental study of crack growth in thin sheet 2024-T3 aluminum under tension-torsion loading // Intern. J. of Fracture. 2001. Vol. 109. P. 285–301.
- [8] ПЛЕШАНОВ В.С., КИВИТКИН В.В., ПАНИН В.Е. Экспериментальная оценка типа разрушения и характеристик трещиностойкости поликристаллов оптико-телевизионным методом на мезоуровне при циклическом нагружении // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2, № 4. С. 87–90.
- [9] ПАНИН С.В., СЫРЯМКИН В.И., ЛЮБУТИН П.С. Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности // Автометрия. 2005. Т. 41, № 2. С. 44–58.
- [10] ФИЗИЧЕСКАЯ мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. В 2 т.
- [11] ПАНИН С.В., ЛЮБУТИН П.С. Верификация метода оценки деформации на мезоуровне, основанного на построении полей векторов перемещений участков поверхности // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 2. С. 69–80.
- [12] ШАКИРОВ И.В. Некоторые вопросы прикладного вейвлет-анализа для обработки статических изображений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Томск, 2003. 20 с.
- [13] ХОРН Б.К.П. Зрение роботов: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 487 с.

- [14] Панин С.В., Кашин О.А., Шаркеев Ю.П. Изучение процессов пластической деформации на мезомасштабном уровне инструментальной стали, поверхностно упрочненной методом электроискрового легирования // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2, № 4. С. 75–85.
- [15] Филин А.П. Прикладная механика твердого деформированного тела. М.: Наука, 1975. Т. 1.
- [16] МЕХАНИКА разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей ред. В.В. Панасюка. Киев: Наук. думка, 1988. Т. 1.

*Поступила в редакцию 16 декабря 2005 г.,
в переработанном виде — 27 января 2006 г.*