

С. В. Панин, В. И. Сырякин, П. С. Любутин

(Томск)

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ПОВЕРХНОСТИ

Развивается подход к оценке процессов локализованной пластической деформации на мезомасштабном уровне, основанный на методе построения полей векторов перемещений, получаемых путем обработки пар изображений. Проведено сравнительное исследование алгоритмов с точки зрения помехоустойчивости и времени определения перемещений участков поверхности. Исследовано влияние субпиксельной точности расчета перемещений и посткорректировки на результаты построения полей векторов перемещений и последующего расчета на их основе компонент деформации. Показано, что субпиксельная точность построения полей векторов перемещений позволяет более корректно интерпретировать физический смысл протекающих процессов и повышать точность определения компонент деформации: компонент тензора дилатации, главного пластического сдвига и т. д.

Введение. Корреляционные зрительные системы используют корреляционно-экстремальный метод обработки зрительной информации и, по сути, представляют собой разновидность корреляционно-экстремальных систем. Известно, что работа этих систем основана на распознавании объекта и определении его искомым характеристик путем обработки информации, представленной в виде реализаций случайных функций [1]. В начале 90-х годов прошлого века в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (с использованием опыта и разработок Томской школы под руководством В. П. Тарасенко) была создана оптико-телевизионная измерительная система (ОТИС) [2], принцип действия которой основан на корреляционном анализе изображений поверхности нагруженных твердых тел, а также на подходе физической мезомеханики материалов, отводящей процессам на поверхности нагруженного твердого тела особую роль в развитии пластического течения [3].

За прошедшее время с использованием ОТИС было проведено большое количество исследований. Основные усилия были направлены: а) на получение экспериментальных данных для построения адекватных математических моделей для компьютерного моделирования поведения нагруженных материалов; б) разработку подхода к неразрушающему контролю, основанному на выявлении стадии предразрушения; в) экспериментальное исследование процессов пластической деформации на мезоуровне, развивающихся в конструкционных материалах при различных условиях нагружения [4], что должно позволить выработать рекомендации: по новым методам упрочне-

ния, созданию оптимальных типов покрытий, определению оптимальных соотношений механических свойств покрытия и матрицы (основы), составам композиционных материалов.

Функционирование ОТИС предполагает проведение обработки изображений с использованием статистических, структурных и спектральных алгоритмов. Для получения информации о механическом состоянии нагруженного твердого тела путем анализа изменений топологии поверхности используют ряд алгоритмов, позволяющих оценивать перемещения участков поверхности исследуемого материала с пространственным разрешением, достаточным для выявления характера развития пластической деформации на мезоуровне, в том числе следить за эволюцией напряженно-деформированного состояния поверхности [5]. Эти алгоритмы будут представлены в данной работе.

1. Методы обработки изображений в экспериментальной механике.

В экспериментальной механике разработано достаточно большое количество методов и средств для изучения и оценки пластической деформации в области вершины усталостной трещины, основанных на обработке изображений. В частности, весьма распространенным является метод муаровых сеток [6], однако данный подход эффективен для анализа изменений, вызванных большими пластическими деформациями, что, как правило, имеет место лишь на завершающей стадии роста усталостной трещины. Весьма удачным был предложенный в работе [7] подход, основанный на построении векторов перемещений фотографий усталостной трещины, полученных с помощью растрового электронного микроскопа и оцифрованных с помощью сканера. Однако данный метод лимитирован с точки зрения аппаратных возможностей. Подход, основанный на вычислении компонент деформации, производимом путем пересчета карт векторов перемещений (или карт деформации поверхности), получил наиболее широкое развитие в работах [8, 9]. Основное внимание в них уделяется вопросам усталостного разрушения гетерогенных материалов. В результате исследований предложен критерий оценки интенсивности деформации при раскрытии трещины, основанный на вычислении параметра COD (crack opening displacement) [10]. Другой подход, базирующийся на построении карт векторов перемещений и последующем вычислении компонент деформации с целью оценки трещиностойкости, предложен в работе [11]. Интересные результаты в области математической обработки результатов исследований по методу пересчета карт деформации поверхности получены в [12]. В качестве критерия оценки неоднородности развития деформации в указанной работе предлагается использовать карты несоответствия перемещений.

В предлагаемой работе излагаются результаты разработки и экспериментального тестирования алгоритмов построения векторов перемещений и расчета на их основе компонент деформации, накопленные в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН за последние годы. В рамках данной работы учтен опыт обработки изображений (от формирования изображений до интерпретации результатов – построения модели проблемной области) и проанализированы результаты исследований поведения конструктивных материалов при различных условиях нагружения.

2. Алгоритмы оценки перемещения участков изображений. Общий вид блок-схемы оптико-телевизионной измерительной системы представлен на рис. 1, а. Не останавливаясь подробно на вопросе калибровки оптической системы, отметим, что конечный результат работы ОТИС – картина распре-

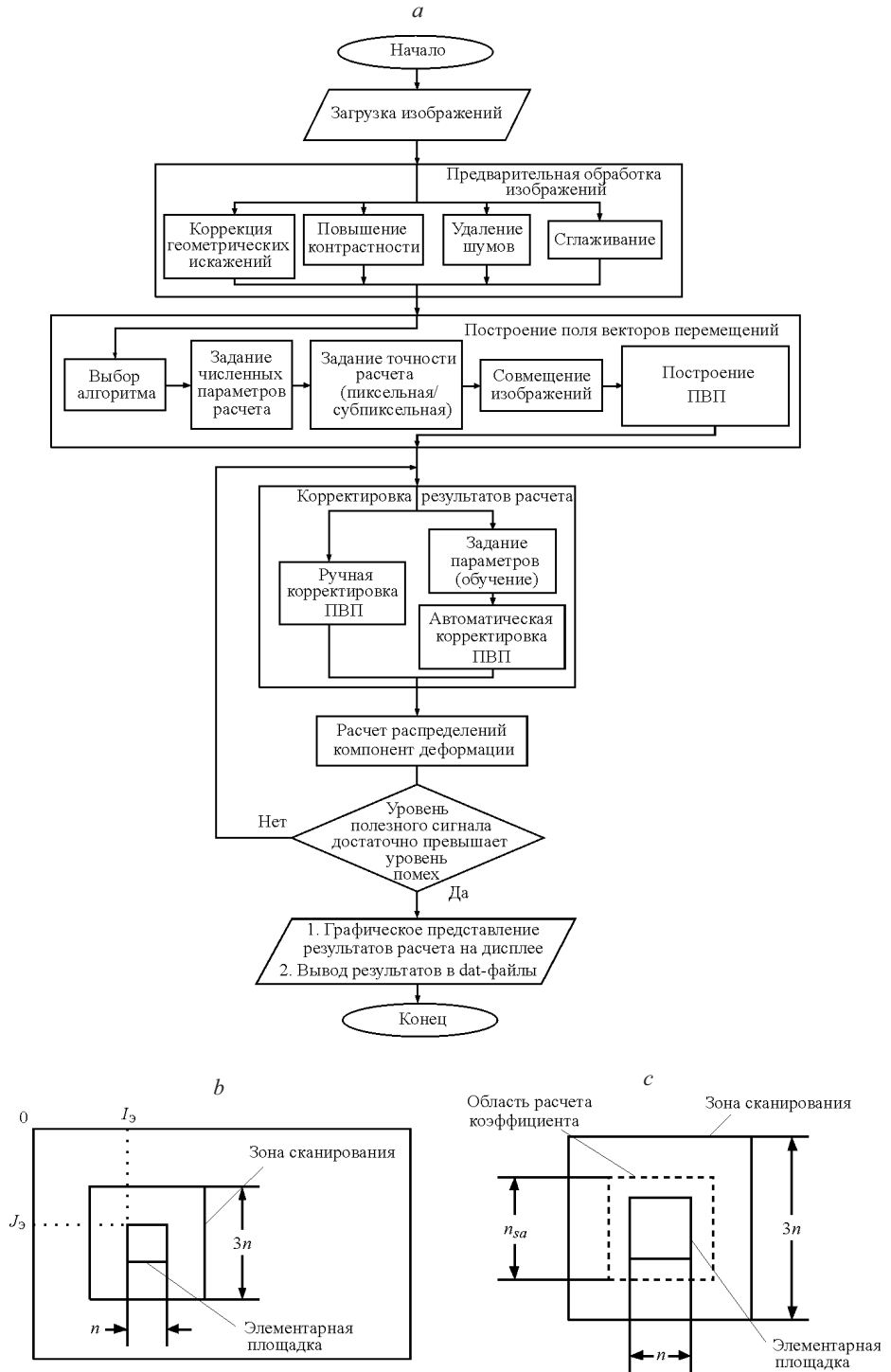


Рис. 1. Схема принципа работы ОТИС: блок-схема алгоритма работы системы (а); принципы определения перемещения путем сканирования в пределах зоны поиска (b, c)

деления 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 и ручной корректировке промежуточных данных.

Традиционно для определения перемещения участков изображения используются корреляционные алгоритмы (КА). Наиболее распространенным является классический КА, в котором производится вычисление взаимно корреляционной функции (ВКФ) или интеграла типа свертки с последующим поиском максимума этого функционала. Реализация КА в классическом варианте требует значительных вычислительных затрат для осуществления операций умножения и интегрирования при всех сдвигах и разворотах текущего изображения (ТИ) и эталонного изображения (ЭИ) [13].

Алгоритмы оценки перемещений основаны на использовании процедуры установления соответствия между участками двух изображений путем вычисления оценки следующего вида [13]:

$$\hat{v} = \arg \operatorname{extr}_v J(F_1, F_2(v)), \quad (1)$$

где v – геометрические параметры, имеющие смысл сдвигов по декартовым координатам, по углу, масштабу и т. п.; F_1 – текущее изображение; $F_2(v)$ – эталонное изображение, полученное до деформации или в определенный момент времени; J – мера близости ТИ и ЭИ.

Для определения меры близости одинаковых по форме и размеру участков ТИ и ЭИ используется коэффициент корреляции или коэффициент разности. Коэффициент разности можно представить выражением [13]

$$k_{\text{dif}} = \left(1 - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |I_{1,i,j} - I_{2,i,j}| \right)^r, \quad (2)$$

где I_1, I_2 – значения яркости пикселей сравниваемых участков ТИ и ЭИ соответственно; r – степень, усиливающая полезную составляющую.

Коэффициент корреляции может быть записан в следующем виде:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - m_1)(I_{2,i,j} - m_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - m_1)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{2,i,j} - m_2)^2}}, \quad (3)$$

где m_1, m_2 – среднеарифметические значения I_1, I_2 соответственно; n – размер сторон участков изображений.

Рассмотрим более подробно основные алгоритмы, реализованные в ходе проведенных исследований.

Базовый алгоритм. Для удобства обозначим наиболее простой алгоритм построения полей векторов перемещений (ПВП) как базовый, принцип функционирования которого заключается в нахождении максимума коэффициента k_r или k_{dif} в пределах зоны сканирования [2, 3] (рис. 1, б). В рамках базового алгоритма в зависимости от использования меры близости (коэффициента корреляции или разности) подразделяют корреляционный и разно-

ственный подходы. Принцип определения перемещения можно сформулировать следующим образом: в пределах зоны сканирования (как правило, она имеет размер $3n$, где n – размер стороны элементарной площадки, в пределах которой определяется коэффициент k_r (k_{dif})) построчно с шагом 1 пиксель производится поиск его максимума. Перед сканированием в пределах зоны поиска коэффициент k_r (k_{dif}) определяется без перемещения, как показано на рис. 1, *b*, в точке (I_3, J_3) эталонного изображения. Таким образом, из рассмотрения исключаются два предельных случая, когда яркости всех элементов площадки совпадают (перемещения по осям абсцисс и ординат равны 0) или имеют значения 0 и 255 (для полутонового изображения, содержащего 256 уровней серого). Во втором случае из черного участка вычитается белый и значение коэффициента вырождается в 1 или 0. Подобным образом путем разбиения изображения на участки одинакового размера n производится построение полного ПВП [14].

Алгоритм с заданием области расчета коэффициента корреляции (разности) наиболее требователен к вычислительным ресурсам. Его отличие от базового алгоритма в том, что размер области n_{sa} , в пределах которой производится расчет коэффициента k_r (k_{dif}), задается больше размера элементарной площадки (рис. 1, *c*), в то время как размер зоны сканирования остается неизменным, т. е. $3n$. Обычно размер области n_{sa} выбирается равным $2n$. Принципиальная особенность алгоритма состоит в том, что максимально возможное абсолютное перемещение искомой площадки остается равным размеру элементарной площадки.

Алгоритм с усреднением окрестности заданного радиуса позволяет отфильтровывать единичные выбросы функции распределения k_r (k_{dif}) в зоне сканирования (по базовому алгоритму), которые по амплитуде значительно больше окрестности (значений соседних коэффициентов). Коэффициент определения меры близости участков рассчитывается как среднеарифметическое окрестности коэффициентов k_r (k_{dif}) заданного радиуса R . Результирующее распределение коэффициентов ВКФ будет иметь размер $(2n + 1 - 2R) \times (2n + 1 - 2R)$.

Алгоритм с оптимизацией по времени расчета (предварительным сканированием). Оптимизация расчета (определения перемещения) по времени достигается за счет уменьшения объема вычислений, которое реализуется за счет введения в базовый алгоритм предварительного этапа сканирования с грубым шагом, равным $n/4$ [14].

Алгоритм расчета с субпиксельной точностью. Известно, что определение перемещений с точностью до одного пикселя может вносить существенную погрешность при последующем определении компонент деформации, что связано с аппаратом численного дифференцирования. Повышение точности расчета может быть достигнуто путем интерполирования либо фрагментов изображения [15], либо распределения ВКФ. В данной работе нами реализован второй подход. После процедуры интерполирования определяются положение максимума найденного распределения, по которому вычисляются величину и направление перемещения участка изображения (элементарной площадки). Поскольку реализованный метод работает не с изображением, а с распределением ВКФ, искажение изображения не происходит. Интерполирование производится в двух плоскостях: первоначально по вертикали и затем по горизонтали. Нами реализовано два метода сплайнового интерполирования (кубическое и квадратичное).

Автоматическая корректировка результатов построения векторов перемещений (фильтрация). В данной работе предложен подход к проведению фильтрации векторов, перемещения которых превышали значение некоторой заданной величины порога. Как правило, значение порога фильтрации подбиралось экспериментально в зависимости от условий и параметров нагружения, а также типа материала. В проводившихся тестовых расчетах величина порога для автоматической корректировки ПВП по осям x и y была выбрана равной 4.

Компоненты деформации. Конечным результатом работы оптико-телевизионной измерительной системы является расчет компонент деформации, которые находятся путем численного дифференцирования горизонтальной и вертикальной составляющих векторов перемещений. Выражения для продольной ε_{xx} , поперечной ε_{yy} , сдвиговой ε_{xy} и поворотной ω_z компонент тензора дисторсии имеют следующий вид [3]:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{dU_x}{dx}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{dU_y}{dy}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{dU_x}{dy} + \frac{dU_y}{dx} \right); \quad \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{dU_y}{dx} - \frac{dU_x}{dy} \right), \quad (4)$$

где dU_x, dU_y – приращение перемещений элементарных площадок вдоль соответствующих осей.

В данной работе также реализованы программные модули для вычисления главного пластического сдвига (инвариантного к разворотам) и интенсивности скорости деформации (учитывающей время между регистрациями изображений поверхности нагруженного материала) [16, 17]:

$$\gamma = \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4\varepsilon_{xy}^2};$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xy}^2}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} - \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xy}^2}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0; \quad \dot{\varepsilon}_t = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2}.$$

3. Результаты исследований и их обсуждение. Тестовые расчеты с использованием предложенных алгоритмов производились на персональном компьютере, оснащенный процессором Intel Celeron (766 МГц и 256 Мбайт оперативной памяти).

3.1. Количественное сравнение показателей работы алгоритмов построения векторов перемещений. Для проведения тестовых расчетов были использованы изображения размера 768×576 пикселей, содержащие 256 градаций серого. Анализируемыми параметрами были выбраны помехоустойчивость и время построения поля векторов перемещений. Размер стороны элементарной площадки для построения ПВП составлял 12 пикселей. Пороги автоматической корректировки (фильтрации) ПВП по осям x и y равнялись четырем. В дальнейших расчетах использовались именно такие параметры. В качестве тестовых применялись изображения, полученные при следующих методах нагружения образцов:

- 1) знакопеременном симметричном консольном изгибе;
- 2) одноосном статическом сжатии;

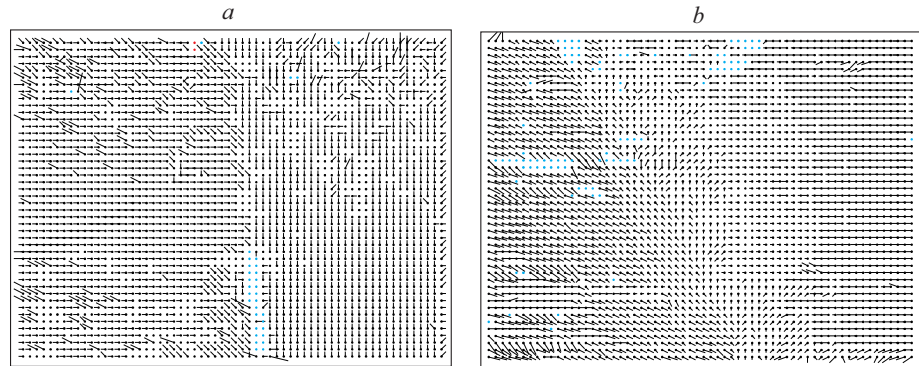


Рис. 2. Результаты расчета полей векторов перемещений: при растяжении образцов стали 20X13 (a) и сжатии интерметаллического сплава Ni₆₃Al₃₇ (b)

3) одноосном статическом растяжении.

Усталостное разрушение [18]. Эксперимент проводился на образцах нержавеющей стали 20X13. Механические испытания образцов осуществлялись в условиях знакопеременного симметричного консольного изгиба с заданной амплитудой деформации. Значения среднеквадратической ошибки (СКО) и коэффициента корреляции совмещенных изображений составляли $MSE = 11,838$ и $K_{cor} = 0,935$ соответственно. Размер изображения 250×190 мкм.

Одноосное статическое сжатие [19]. В эксперименте использовались образцы интерметаллического сплава Ni₆₃Al₃₇. Степень деформации была 9 %, размер изображения 800×600 мкм. СКО и коэффициент корреляции совмещенных изображений составляли $MSE = 19,594$ и $K_{cor} = 0,8515$ соответственно.

На рис. 2, a, b приведены ПВП, построенные с использованием корреляционного алгоритма с заданием области расчета коэффициента корреляции.

Результаты тестирования алгоритмов с заданными параметрами расчета по приведенным изображениям представлены в табл. 1. В таблице использованы следующие обозначения: K_{Σ} – среднеарифметическое максимумов всех ВКФ построенного ПВП; Qm – помехоустойчивость метода, определяемая как отношение количества векторов, отфильтрованных по критерию превышения величины порога, к количеству всех векторов ПВП.

Среднеарифметическое значение максимумов всех ВКФ построенного ПВП определяется как

$$K_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{cols} \sum_{j=1}^{rows} k_{max_{i,j}}}{N_{total}}, \quad (6)$$

где cols и rows – количество столбцов и строк векторов ПВП соответственно; k_{max} – максимальный коэффициент (разности или корреляции) в конкретной ВКФ; N_{total} – общее количество векторов ПВП.

Величину помехоустойчивости метода можно найти из соотношения

$$Qm = N_{incorr} / N_{total}, \quad (7)$$

где N_{incorr} – количество отфильтрованных векторов.

Т а б л и ц а 1

Название алгоритма	Метод нагружения образца	K_{Σ}	N_{incorr}	Q_m
Базовый разностный алгоритм	1	0,8613	128	0,0449
	2	0,7600	876	0,3072
Разностный алгоритм с заданием области расчета коэффициента разности	1	0,8541	77	0,0270
	2	0,7210	445	0,1560
Разностный алгоритм с усреднением окрестности заданного радиуса	1	0,8229	124	0,0435
	2	0,6840	866	0,3037
Разностный алгоритм, оптимизированный по времени расчета	1	0,8603	141	0,0494
	2	0,7530	898	0,3149
Базовый корреляционный алгоритм	1	0,7670	177	0,0621
	2	0,9090	362	0,1269
Корреляционный алгоритм с заданием области расчета коэффициента корреляции	1	0,8190	36	0,0126
	2	0,9030	88	0,0309
Корреляционный алгоритм с усреднением окрестности заданного радиуса	1	0,6550	222	0,0778
	2	0,7930	451	0,1581
Корреляционный алгоритм, оптимизированный по времени расчета	1	0,7635	196	0,0687
	2	0,8980	556	0,1950

П р и м е ч а н и е. 1 – циклический изгиб, 2 – статическое сжатие.

В результате проведенных исследований было выявлено, что разностные алгоритмы обеспечивают наименьшую точность определения перемещений. Применявшиеся для тестирования изображения имеют сравнительно высокий показатель СКО и малый коэффициент корреляции, т. е. изменения на изображениях (изменения распределения яркости, вызванные деформацией поверхности) различимы достаточно хорошо. Подобные изображения позволяют наиболее наглядно оценить качество работы исследуемых алгоритмов. Наименьшее количество векторов, отфильтрованных по критерию превышения порога, было найдено при применении корреляционных алгоритмов. При обработке изображений, полученных в условиях сжатия, с использованием базового разностного алгоритма было определено $N_{\text{incorr}} = 876$ отфильтрованных векторов, в то время как при использовании корреляционного алгоритма – $N_{\text{incorr}} = 362$ вектора (общее количество векторов по всему полю составляет $N_{\text{total}} = 2852$). На рис. 2 векторы, характеризующие не найденные перемещения, обозначены более светлыми точками. Наиболее высокий результат показал корреляционный алгоритм с заданием области

расчета коэффициента корреляции, количество неправильных векторов было всего $N_{\text{incorr}} = 88$ (см. рис. 2, *b*). При построении поля векторов перемещений аналогичного разностного алгоритма количество отфильтрованных векторов составило $N_{\text{incorr}} = 445$. Алгоритмы с усреднением окрестности заданного радиуса показали эффективность не выше, а в случае с корреляционным алгоритмом ниже соответствующих базовых алгоритмов (количество отфильтрованных векторов составило $N_{\text{incorr}} = 451$ для модифицированного и $N_{\text{incorr}} = 362$ для базового алгоритмов).

Следующим этапом исследований была оценка влияния размера элементарной площадки на величину параметра Qm . Результаты расчетов, проведенных для пары изображений, полученных в условиях циклического изгиба, представлены кривыми на рис. 3, *a*. Видно, что у всех алгоритмов, кроме оптимизированных по времени расчета, при увеличении размера стороны элементарной площадки прослеживается тенденция к уменьшению Qm (увеличению помехоустойчивости построения ПВП).

Зависимости, приведенные на рис. 3, *a*, позволили выявить следующие закономерности. По уровню помехоустойчивости определения перемеще-

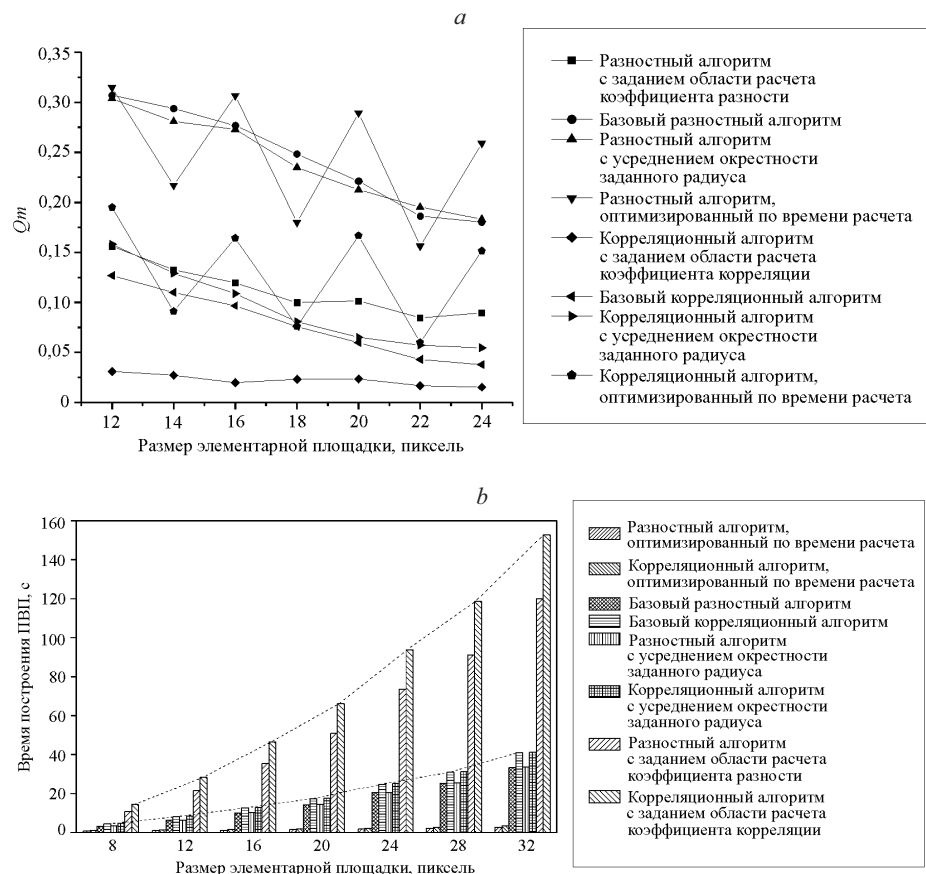


Рис. 3. Результаты тестирования алгоритмов построения векторов перемещений: зависимость помехоустойчивости определения перемещений Qm (*a*) и времени построения поля векторов перемещений (*b*) при использовании исследованных алгоритмов от размера n элементарной площадки

ний рассматриваемые алгоритмы можно разделить на три группы. Наименьшую помехоустойчивость имеют разностные алгоритмы первой группы: а) базовый, б) с усреднением окрестности заданного радиуса и в) оптимизированный по времени расчета. По мере увеличения размера площадки параметр Qm для них снижается с $Qm \approx 0,3$ до $Qm \approx 0,2$. Более помехозащищенными являются алгоритмы второй группы: а) разностный алгоритм с заданием области расчета коэффициента разности, а также ряд корреляционных алгоритмов, б) базовый, в) с усреднением окрестности заданного радиуса, г) оптимизированный по времени расчета. Наконец, корреляционный алгоритм с заданием области расчета коэффициента корреляции (третья группа) имеет наименьшее значение параметра $Qm \approx 0,03$, которое практически не снижается по мере увеличения размера элементарной площадки. Интересной тенденцией, просматривающейся на графике, можно также назвать скачкообразное изменение параметра Qm для алгоритмов, оптимизированных по времени расчета: значение анализируемого параметра существенно снижается при размере стороны элементарной площадки, не кратном 4, и повышается при размере стороны площадки, равном 12, 16, 20, 24.

Результаты тестирования алгоритмов построения ПВП по параметру «время вычислений» представлены в виде гистограммы (рис. 3, *b*). Видно, что алгоритмы, использующие в качестве меры близости участков изображения коэффициент разности, быстрее аналогичных, использующих коэффициент корреляции, в среднем на 25,5 %. В целом следует отметить, что алгоритмы, оптимизированные по времени расчета, показали быстроедействие в среднем в 8 раз большее, чем базовые алгоритмы при увеличении числа неправильно найденных векторов на 2,5 % при разностном и на 54 % при корреляционном алгоритмах (см. табл. 1).

3.2. Влияние субпиксельной точности. Одноосное статическое растяжение [20]. Эксперименты проводились на образцах нержавеющей стали 20X13 с покрытием на основе порошка ПГ19Н-01, нанесенным электронно-лучевым методом. Механические испытания образцов производились в условиях одноосного статического растяжения со скоростью 0,03 мм/мин. В эксперименте были использованы изображения поверхности боковой грани размера 1685×1260 мкм. СКО и коэффициент корреляции совмещенных изображений составили $MSE = 14,28$ и $K_{кор} = 0,965$ соответственно. Степень деформации $\varepsilon = 4,5$ %, приращение степени деформации $\Delta\varepsilon = 0,3$ %.

Расчет ПВП с пиксельной точностью приводит к резким дискретным переходам между векторами как по величине, так и по направлению (рис. 4, *a*). При субпиксельной точности построения ПВП переходы сглаживаются (рис. 4, *b*).

Распределения поворотной компоненты тензора дисторсии ω_z , соответствующие вышеуказанным ПВП, приведены на рис. 4, *c*, *d*: рассчитанное с учетом пиксельной точности (*c*), рассчитанное с учетом субпиксельной точности (0,1 пикселя) (*d*). Расчет перемещений с субпиксельной точностью был произведен с использованием метода интерполирования кубическими сплайнами. Интерполирование квадратичными сплайнами является более грубым по сравнению с интерполированием кубическими сплайнами, что подтверждают результаты проведенных нами тестовых расчетов.

При увеличении точности определения перемещений повышается визуально воспринимаемое качество результата построения векторов перемещений, но возрастает время построения ПВП. В тестовых расчетах по определению временных характеристик работы исследуемых алгоритмов приме-

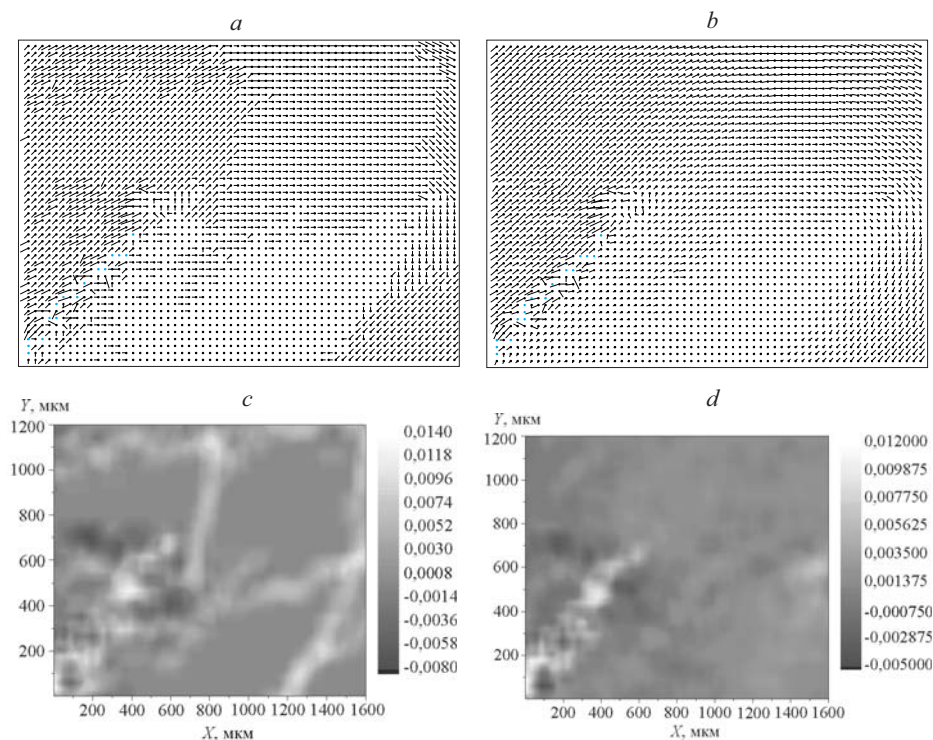


Рис. 4. Влияние субпиксельной точности на результаты построения ПВП: поля векторов перемещений (*a*, *b*) и рассчитанные по ним распределения поворотной компоненты тензора деформации ω_z (*c*, *d*) (расчет с использованием субпиксельной точности (*b*, *d*))

нялся корреляционный алгоритм с заданием области расчета коэффициента корреляции. Были заданы значения параметров, аналогичные параметрам в разд. 3.1.

Результаты, представленные на рис. 4, *c*, *d*, свидетельствуют, прежде всего, о том, что повышение точности расчета перемещений до субпиксельной позволяет получить более корректную картину распределения деформации с точки зрения ее физической интерпретации, поскольку позволяет исключить из рассмотрения ряд ложных максимумов (связанных с особенностями реализации процедуры численного дифференцирования). Таким образом, целесообразность проведения расчетов с использованием субпиксельной точности является очевидной. Вопрос заключается лишь в том: насколько корректна с физической точки зрения картина распределения яркости (либо поверхность распределения ВКФ) с искусственно увеличенным разрешением, полученным за счет проведения интерполяции? Кроме того, важно оценить временные затраты, необходимые для проведения расчета с субпиксельной точностью.

В табл. 2 приведены результаты тестовых расчетов по параметру «время построения ПВП» с использованием интерполяции кубическими и квадратичными сплайнами. В качестве алгоритмов построения ПВП применялись разностный алгоритм с заданием области расчета коэффициента разности и корреляционный алгоритм с заданием области расчета коэффициента корреляции. Изменялся размер элементарной площадки (параметр *n*), при этом

Т а б л и ц а 2

Вид интерполяции	Алгоритм			
	разностный ($n=12$)	корреляционный ($n=12$)	разностный ($n=16$)	корреляционный ($n=16$)
Без интерполяции	20,910	28,060	34,470	46,077
Квадратичная (шаг 0,5)	21,280	28,561	35,031	46,788
Кубическая (шаг 0,5)	21,431	28,812	35,060	46,967
Квадратичная (шаг 0,25)	22,482	30,054	37,494	49,511
Кубическая (шаг 0,25)	22,813	30,714	37,974	50,432
Квадратичная (шаг 0,1)	48,140	56,180	56,792	70,041
Кубическая (шаг 0,1)	50,102	59,456	57,673	73,486

размер (сторона) области расчета ВКФ задавался в 2 раза больше размера элементарной площадки $2n$. Из гистограммы (см. рис. 3, *b*) видно, что повышение субпиксельной точности (уменьшение шага интерполирования) приводит к увеличению времени расчета ПВП, причем повышение точности в 5 раз (с 0,5 до 0,1) приводит к увеличению времени расчета примерно в 2 раза.

3.3. *Корректировка поля векторов перемещений. Одноосное статическое сжатие* [21]. Эксперимент проводился на изображениях боковой поверхности образца стали Ст3 с покрытием, нанесенным газопламенным методом; степень деформации 2,1 %. Размер изображения 640×430 мкм. СКО и коэффициент корреляции совмещенных изображений составили $MSE = 10,919$ и $K_{\text{кор}} = 0,9454$ соответственно.

Без проведения постобработки на ПВП наблюдаются векторы перемещений, которые сильно отличаются по длине и направлению от соседних векторов. Такие ошибки могут возникать из-за плохого качества изображений, т. е. различных искажений, которые вносит аппаратная часть оптико-телевизионного комплекса. На исследуемом изображении (рис. 5) в левом верхнем углу видно пятно, которое присутствует на всей серии изображений (помеха в оптическом тракте). При совмещении изображений пятно сдвигается, что проявляется при построении ПВП и расчете главного пластического сдвига (рис. 5, *a*). Вследствие автоматической корректировки ПВП векторы с величинами перемещений по горизонтали и вертикали dx , dy , превышающие по абсолютному значению пороговое значение 4, обнуляются. Однако векторы, характеризующие нулевые перемещения (рис. 5, *b*), сказываются на результате расчета главного пластического сдвига, максимальное значение которого в наблюдаемой области, как и на рис. 5, *a*, составляет $\gamma_{\text{max}} = 4 \cdot 10^{-2}$.

Кроме того, на результате расчета продолжает сказываться наличие пятна на изображении (обозначено стрелкой). Минимальная ручная корректировка ПВП позволяет качественно улучшить распределение γ (рис. 5, *c*). Отсутствие ложного максимума приводит к снижению максимального значения главного пластического сдвига на представленном распределении до

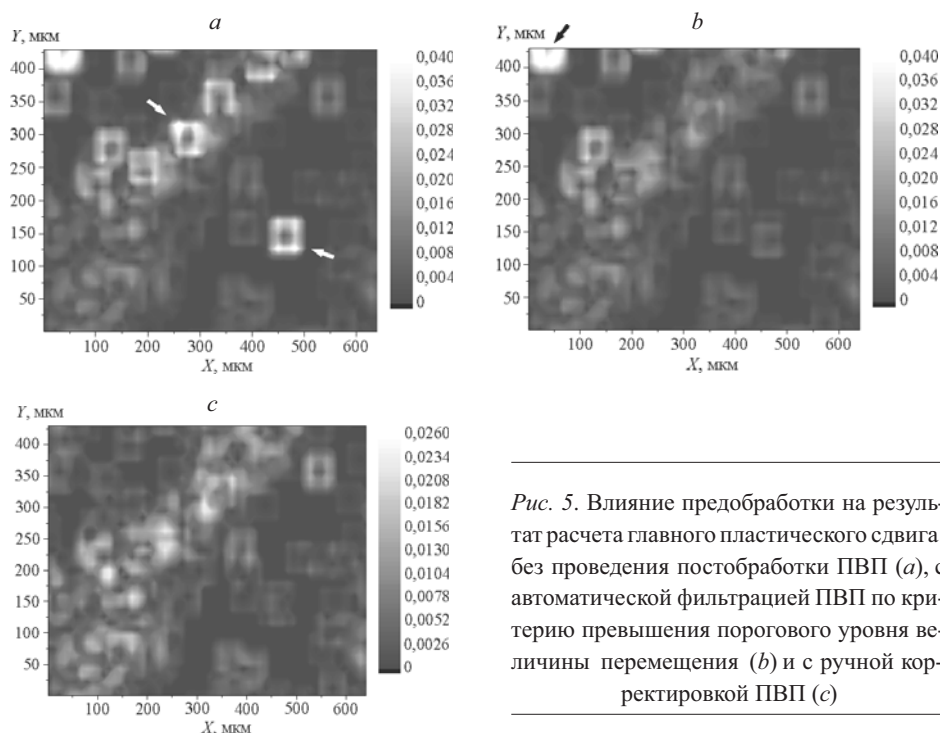


Рис. 5. Влияние предобработки на результат расчета главного пластического сдвига: без проведения постобработки ПВП (а), с автоматической фильтрацией ПВП по критерию превышения порогового уровня величины перемещения (b) и с ручной корректировкой ПВП (с)

$\gamma_{\max} = 2,6 \cdot 10^{-2}$ (увеличению динамического диапазона), что позволяет более детально наблюдать полезный сигнал (реальные максимумы).

Заключение. Разработаны и экспериментально протестированы алгоритмы построения векторов перемещений для последующего расчета компонент деформации. Реализованное программное обеспечение (ПО) позволяет проводить расчет как качественных показателей полей векторов перемещений, так и количественных результатов в виде компонент деформации с возможностью корректировки промежуточных результатов.

Проведенные экспериментальные исследования алгоритмов определения перемещений, а также влияния посткорректировки результатов промежуточных расчетов позволили сформулировать следующие выводы.

1. Наиболее эффективным с точки зрения помехоустойчивости при построении поля векторов перемещений является корреляционный алгоритм с заданием области расчета коэффициента корреляции, так как это наиболее точный метод (из реализованных в ПО) при приемлемых вычислительных затратах.

2. Во всех исследованных в работе алгоритмах, за исключением оптимизированных по времени расчета, при увеличении размера стороны элементарной площадки параметр Qm уменьшается (т. е. увеличивается помехоустойчивость построения ПВП). Алгоритмы, оптимизированные по времени расчета, могут быть использованы для быстрой предварительной оценки ПВП.

3. Предложенный алгоритм построения ПВП с субпиксельной точностью показал свою эффективность при расчете компонент тензора дисторсии как с точки зрения увеличения точности расчета, так и с позиции трактовки физического смысла наблюдаемых явлений. Повышение точности определе-

ния векторов перемещений до долей пикселя не приводит к значительному увеличению временных затрат на построение ПВП.

4. Проведение посткорректировки результатов построения поля векторов перемещений в автоматическом и ручном режимах является важным этапом при получении карт деформации поверхности и позволяет избежать ряда ошибок, связанных с плохим качеством обрабатываемых изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Буймов А. Г.** Корреляционно-экстремальная обработка изображений. Томск: Изд-во ТГУ, 1987.
2. **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, БИ № 5.
3. **Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов** /Под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1, 2.
4. **Панин С. В., Сырямкин В. И., Панин В. Е. и др.** Оптико-телевизионная измерительная система – приложение методов технического зрения к изучению закономерностей деформирования твердых тел и диагностике состояния нагруженных материалов // Изв. вузов. Физика. 2004. № 7. С. 13.
5. **Сырямкин В. И., Панин С. В.** Оптико-телевизионный метод исследования поведения и диагностики состояния нагруженных материалов и элементов конструкций // Вычислительные технологии. 2003. 8. С. 10.
6. **Сухарев И. П., Ушаков Б. Н.** Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. М.: Машиностроение, 1972.
7. **Franke E. A., Wenzel D. J., Davidson D. I.** Measurements of microdisplacements by machine photogrammetry (DISMAP) // Rev. Sci. Instrum. 1991. 62, N 5. P. 1270.
8. **Sutton M. A., Cheng M. Q., Peters W. H. et al.** Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis // Image and Vision Computing. 1986. 4, N 3. P. 143.
9. **McNeill S. R., Peters W. H., Sutton M. A.** Estimation of stress intensity factor by digital image correlation // Eng. Fract. Mech. 1987. 28, N 1. P. 101.
10. **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. Journ. Fract. 2001. 109. P. 285.
11. **Плешанов В. С., Кибиткин В. В., Панин В. Е.** Экспериментальная оценка типа разрушения и характеристик трещиностойкости поликристаллов оптико-телевизионным методом на мезоуровне при циклическом нагружении // Физическая мезомеханика. 1999. 2, № 4. С. 87.
12. **Clocksini W. F., Chivers K. F., Torr P. H. S. et al.** Inspection of surface strain in materials using dense displacement fields // Proc. Intern. Conf. on New Challenges in Mesomechanics. Denmark: Aalborg University, 2002. Vol. 2. P. 467.
13. **Кориков А. М., Сырямкин В. И., Титов В. С.** Корреляционные зрительные системы роботов. Томск: Радио и связь, 1990.
14. **Панин С. В.** Исследование пластической деформации и разрушения поликристаллических материалов на основе алюминия методами технического зрения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук /СО РАН. Ин-т физики прочности и материаловедения. Томск, 1998. 22 с.

15. **Sutton M. A., McNeill S. R., Jang J., Babai M.** Effect of subpixel image restoration on digital correlation error estimates // Opt. Eng. 1988. **27**, N 10. P. 870.
16. **Плешанов В. С., Панин В. Е., Кибиткин В. В., Лебедева Н. А.** Эволюция мезо-структуры и кинетика накопления усталостных повреждений в сварных соединениях конструкционной стали в условиях, близких к плоскому напряженному состоянию // Физическая мезомеханика. 2001. **4**, № 6. С. 105.
17. **Дервягина Л. С., Панин В. Е., Стрелкова И. Л.** Эволюция деформированного состояния в зоне надреза при растяжении поликристаллов NiTi в мартенситном состоянии // Физическая мезомеханика. 2000. **3**, № 5. С. 83.
18. **Быдзан А. Ю., Панин С. В., Дураков В. Г.** Исследование механизмов усталостного разрушения конструкционной стали 20X13 и ее композиций с наплавленными покрытиями // Физическая мезомеханика. 2002. **5**, № 6. С. 73.
19. **Панин С. В., Нойманн П., Байбулатов Ш. А.** Исследование развития деформации на мезоуровне интерметаллического сплава Ni₆₃Al₃₇ при сжатии // Физическая мезомеханика. 2000. **3**, № 1. С. 75.
20. **Панин С. В., Дураков В. Г., Прибытков Г. А.** Мезомеханика пластической деформации и разрушения низкоуглеродистой стали с высокопрочным деформируемым покрытием // Физическая мезомеханика. 1998. **1**, № 2. С. 51.
21. **Витязь П. А., Клименов В. А., Панин С. В. и др.** Влияние структуры и свойств покрытия и основы на поведение композиции «сталь 40X13 – малоуглеродистая сталь» в условиях деформации сжатием // Физическая мезомеханика. 2002. **5**, № 1. С. 37.

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

*Поступила в редакцию
18 августа 2004 г.*