

УДК 621.73.011:004.932

Федосов А. В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА ОБРАБОТКЕ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время большинство известных методов определения полей деформаций обладает существенным недостатком – высокой трудоемкостью процессов подготовки, проведения экспериментов и обработки данных. К таким методам относятся: методы муаровых полос и сеток, координатных сеток, поляризационно-оптические методы, и др. [1].

При современном уровне развития компьютерных технологий все больше внимания уделяется разработке средств автоматизации процесса проведения экспериментов, что позволяет снизить трудоемкость поставленных задач, повысить производительность и точность методов. В большинстве случаев компьютерные технологии применяются только для обработки результатов экспериментов. При этом первичные данные, как правило, определяются вручную [2]. Наличие человеческого фактора может заметно повлиять на точность результатов эксперимента, и представляется неблагоприятным, слабо контролируемым фактором. В связи с этим, разработка методов определения полей деформаций, в которых человеческий фактор сводится к минимуму за счет применения средств компьютеризации и автоматизации, на сегодняшний день является актуальной задачей.

Высокие темпы развития цифровой фототехники послужили причиной ее активного внедрения во многие сферы научной деятельности, в том числе и в экспериментальные методы определения полей деформаций. Для рассматриваемых методов фоточувствительный элемент применяется в качестве датчика перемещений отдельных участков деформируемой детали. Разнообразие способов применения фоточувствительных датчиков и алгоритмов обработки полученных изображений дает множество вариантов реализации экспериментальных методов построения полей деформаций. Так в работе [3] в качестве фоторегистрирующего устройства применялся сканер высокого разрешения. Преимуществами такого подхода являются:

- высокая детализация получаемых изображений, что позволяет повысить точность измерений и чувствительность метода;
- наличие определенной связи между физическими размерами визируемой поверхности и размерами ее виртуальной копии.

С другой стороны необходимость извлечения детали из инструмента не позволяет реализовать динамический эксперимент.

Более удобными являются методы, в основе которых лежит DIC (Digital Image Correlation) алгоритм обработки фотоснимков получаемых с цифровых фотокамер [4, 5]. Эти методы обладают высоким уровнем автоматизации процессов проведения экспериментов и обработки результатов. Также с помощью DIC методов возможна организация динамического эксперимента. Однако суть данного метода не позволяет привязывать результаты измерений к определенным областям плоскости детали. Таким образом, наличие определенных недостатков в существующих экспериментальных методах определения полей деформаций требует разработки новых улучшенных методов.

Целью работы является разработка полуавтоматического метода определения полей деформаций на плоскости детали, позволяющего широко применять средства автоматизации и компьютерной обработки данных с целью повышения точности результатов эксперимента.

В основе экспериментальных методов определения полей деформаций лежат измерения геометрических размеров отдельных объемов тела до и после процесса деформации. Известные способы измерений обладают ограниченной разрешающей способностью. Вследствие этого, фактически определяются характеристики только некоторых отдельных участков

поверхности детали, а не цельного поля деформации. Таким образом, задача определения полей деформаций включает в себя экспериментальную часть (определение перемещений) и математическую (определение поля деформации).

В основе предлагаемого метода лежит полуавтоматическая компьютерная обработка серии цифровых фотоснимков поверхности деформируемой детали. Параметры серийности фотосессии определяются условиями эксперимента и лимитируются только возможностями применяемого аппаратного обеспечения. Класс применяемых фотоаппаратов и оптики во многом определяет точность и возможности метода. При этом достаточно хороших результатов можно добиться при использовании бюджетных полупрофессиональных фотокамер. Результаты, представленные в данной работе, были получены с помощью камеры Canon 600D оснащенной 18-ти мегапиксельной CCD матрицей и оптики с фиксированным фокусным расстоянием 50 мм.

Регистрация перемещений отдельных площадей поверхности детали производится с помощью сетки точек (маркеров), нанесенной на исследуемую поверхность. Расположение сетки маркеров на первом снимке принимается за начальное, недеформированное состояние детали. По изменениям относительных положений маркеров на последующих снимках серии определяются относительные деформации детали.

Под маркером понимается контрастно выделенный участок поверхности детали, который в процессе деформации будет показывать перемещение данной поверхности. В отличие от IDC метода маркеры «привязаны» к поверхности испытуемого образца и изображают перемещение ее точечного участка, геометрическое место которого определяется как центр массы маркера.

Характеристики самих маркеров и их взаимное расположение оказывают значительное влияние на точность предлагаемого метода. Наиболее оптимальной формой маркера является круг. В этом случае минимизируются погрешности связанные с определением центра масс маркера, возникновение которых может быть вызвано искажениями формы маркера при деформации. Поскольку назначение маркера – это выражение геометрического места точки привязанной к поверхности образца, то его размеры должны быть минимальными, но при этом, с целью уменьшения влияния шумов матрицы фотоаппарата, дискретизированная площадь маркера должна занимать не менее 6 пикселей. Таким образом, физические размеры маркеров устанавливаются в зависимости от соотношения размеров анализируемого объекта к разрешающей способности ПЗС матрицы фотокамеры. С другой стороны размеры маркеров могут лимитироваться возможностями техники их нанесения.

В условиях проведения эксперимента при комнатной температуре, наилучших результатов можно добиться применением цветового контраста. Цвет маркера должен выбираться по принципу максимальной контрастности к цветам фона. В состав фона включается визируемая плоскость детали и элементы оборудования. Для обеспечения однотонного контрастного фона возможно применение различного рода экранов для ярких и в особенности пестрых поверхностей попадающих в кадр. В качестве искусственного освещения рекомендуется использовать источники, дающие монохромный рассеянный свет, что позволит избежать бликов на поверхности маркеров. Также для этих целей рекомендуется применять матовые краски. Наличие случайных бликов на поверхности маркера может существенно повлиять на процесс определения координат. Промежуток между моментом высыхания краски маркера и проведением эксперимента следует минимизировать с целью сохранения максимальной пластичности маркера.

Алгоритм выделения маркеров на цифровом снимке основан на определении узкого цветового диапазона соответствующего цвету маркера. Анализ цифровых снимков производится в HSL (Hue, Saturation, Lightness) цветовом пространстве, применение которого позволяет повысить точность выделения маркеров и является более удобной и интуитивно понятной системой в отличие от RGB, Lab и др. пространств. Окончательное выделение узкого цветового диапазона соответствующего цвету маркеров производится пользователем программного обеспечения на основе предложенных программой подсказок.

Объединение выделенного набора пикселей в маркеры производится автоматически на основе известного метода «волны». Встроенный фильтр выделенных элементов, позволяет дополнительно повысить устойчивость работы метода. Форма рабочего окна для определения маркеров представлена на рис. 1.

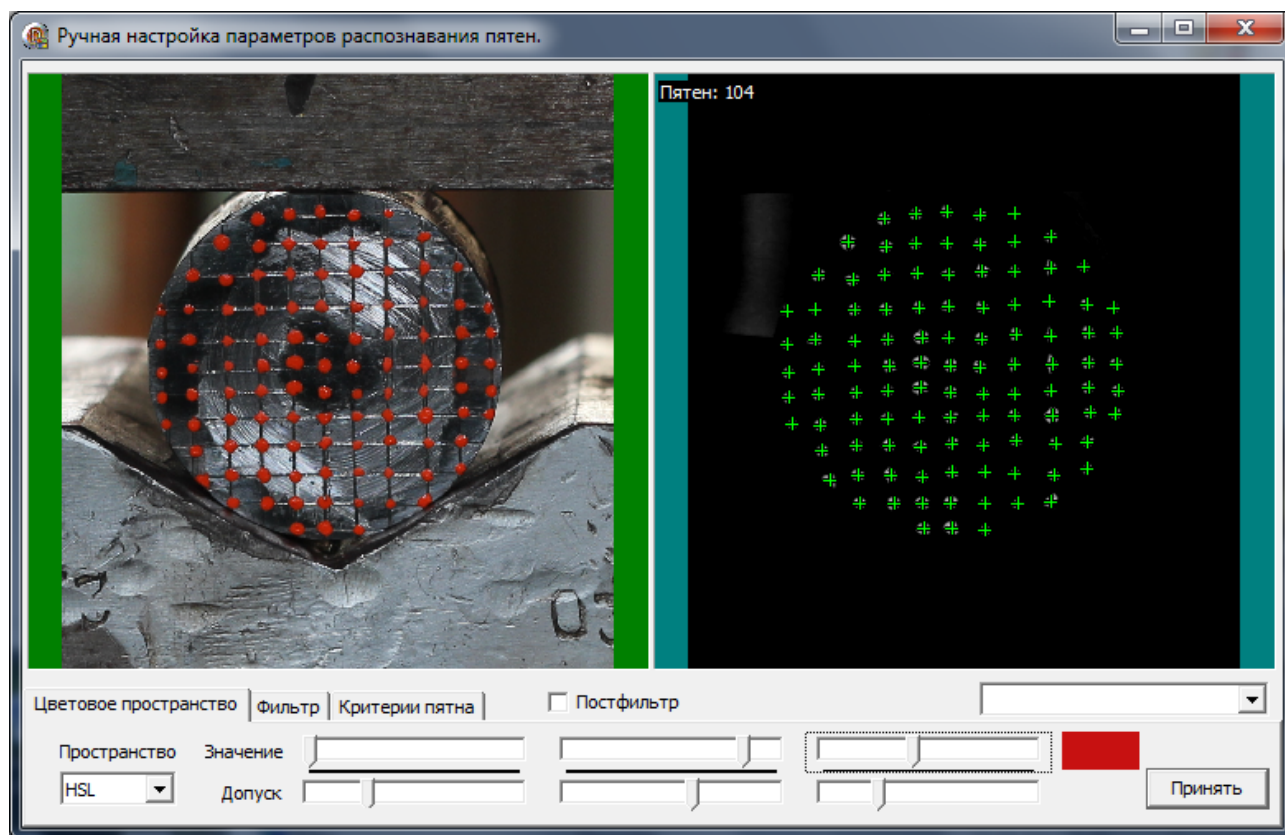


Рис. 1. Форма рабочего окна программного модуля по определению координат цветowych маркеров

Основная сложность метода состоит в выделении маркеров на снимке и построении на их основе сетки элементов (например, конечных элементов – симплекс-треугольников). Для повышения надежности этого этапа обработки следует принять во внимание следующие моменты.

Взаимное расположение маркеров должно максимально упрощать процесс построения расчетной сетки. С этой целью они наносятся по ортогональным параллельным направлениям (рис. 1). Большое количество маркеров на объекте позволяет увеличить точность метода, однако при этом расстояние между маркерами не должно быть меньше удвоенного размера наибольшего маркера, при деформации детали это уменьшает вероятность их слияния. Оптимальное расстояние между маркерами 10–15 диаметров маркера. Чем дальше расположены маркеры, тем точнее можно построить линию, соединяющую их центры, но при этом снижается точность самого метода.

В результате первого этапа обработки серии, для каждого снимка формируется описание сетки элементов. Эти данные сохраняются в промежуточном файле, который является источником входных данных для аналитической части метода (в дальнейшей работе исходная серия снимков не используется).

Задача аналитической части метода – определение состояния поля деформации в заданной области, то есть описание его функцией от координат. Для плоской деформации первичными данными о состоянии детали является поле перемещений маркеров. В зависимости от условий деформирования детали на ее поверхности могут получаться очень сложные конфигурации поля перемещений. Вывести общую функцию для произвольных условий

деформации детали представляется практически неразрешимой задачей. Применение сеточных методов позволяет разбить решение одной сложной задачи на множество простых задач. Объем расчетов в таком случае значительно увеличивается, но вследствие однотипности решаемых задач, в сеточных методах успешно применяются компьютерные технологии.

Применяемый в предложенном методе подход предполагает дискретизацию пространства детали на небольшие области простой формы – элементы. Описание поля в каждой такой области производится отдельно, собственной функцией координат. Чем меньше размер элемента, тем менее сложную функцию можно выбрать для описания поля без опасности значительного увеличения погрешности результатов.

На данном этапе развития предложенного метода, в качестве формы элементов выбраны треугольники. Применение треугольных элементов позволяет достаточно точно описывать сложные конфигурации формы детали.

На основе данных о перемещении узлов для элементов сетки рассчитывается вектор относительных деформаций, представленный в виде трех составляющих:

ε_x – производная компоненты x поля смещений по координате x ;

ε_y – производная компоненты y поля смещений по координате y ;

γ_{xy} – сумма производных от компонент поля смещений: x по координате y ; y по координате x .

Следующий этап аналитической части – проведение интерполяции найденных векторных величин по площади элемента при известных ее значениях в узлах, с помощью функций формы элемента. В качестве аппроксимирующей функции применяется линейная интерполяция. Для построения непрерывного поля по всей сетке применяется метод сопряженной аппроксимации, который предполагает определение значения в узле как среднее от всех элементов, содержащих данный узел, с учетом площади каждого элемента (то есть, взвешенное среднее).

Пример описания элементов треугольной сетки и построения полей деформаций, полученных в результате обработки цифровых изображений по предложенной методике, представлен на рис. 2.

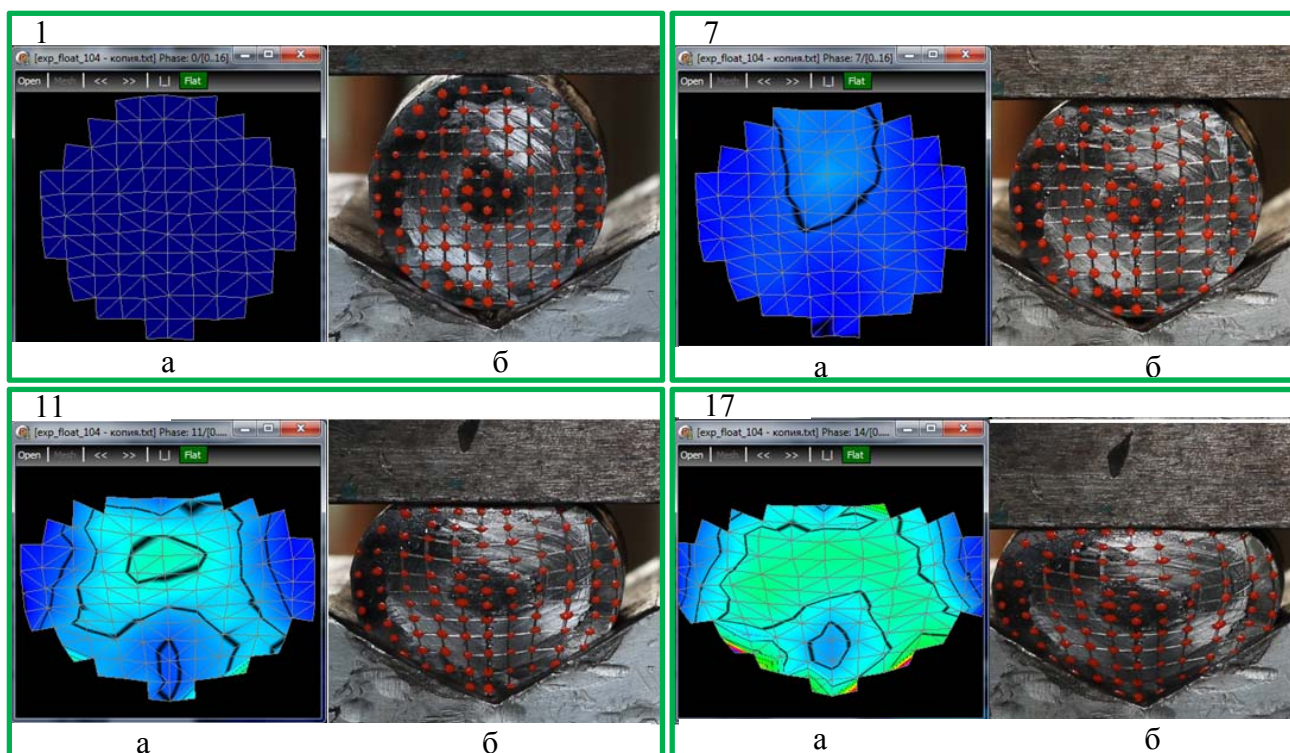


Рис. 2. Построение поля деформации (а) путем обработки серии снимков, (б) процесса деформации свинцового цилиндра (цифры – номер снимка в серии)

Визуализация полученных данных производится с применением средств OpenGL, что повышает наглядность метода. Результаты могут быть представлены как в виде плоской цветовой диаграммы, так и в виде объёмного графика поверхности.

Точность предложенного метода оценивалась по воспроизводимости результатов эксперимента. Применение такого подхода обосновано отсутствием в распоряжении автора альтернативных методов определения полей деформаций, обладающих высокой степенью автоматизации.

В экспериментах по оценке воспроизводимости результатов, условия их проведения намеренно ухудшались. Применялись некачественные источники освещения, в ходе эксперимента незначительно изменялось освещение, производились небольшие смещения фотоаппарата. В результате, колебания значений площадей треугольников, при условии отсутствия деформаций, не превышали 10 %.

Дальнейшее усовершенствование предложенного метода и увеличение точности получаемых результатов возможно путем применения более сложных аппроксимирующих функций. Так, применение квадратичных треугольников позволяет обойтись без сопряженной аппроксимации и заметно улучшить качество визуализации.

ВЫВОДЫ

Разработана общая схема нового метода по определению полей деформаций в плоскости рассматриваемого объекта, применение которой позволит произвести автоматизацию процессов сбора и обработки результатов эксперимента.

Предложены рекомендации к проведению экспериментальной части разрабатываемого метода, что позволит повысить точность процесса определения координат маркеров и соответственно адекватность результатов определения полей деформаций.

Разработаны приложения, реализующие два этапа разработанной методики: экспериментальный и аналитический. Первое включает в себя определение координат маркеров и построение отчета по пакетной обработке снимков эксперимента. Во втором приложении производится расчет векторных величин и их интерполяция по исследуемой поверхности. Применение этих приложений позволяет определить поля деформаций объекта в различные моменты эксперимента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригоровский Н. И. *Методы и средства определения полей деформаций и напряжений : справочник / Н. И. Пригоровский. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.*
2. *Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев, В. А. Бурко. – Мариуполь : ЗАО «Газета «Приазовский рабочий», 2011. – 336 с.*
3. *Использование цифровых технологий для развития геометрического метода исследований деформированного состояния металлов / Ю. А. Плеснецов, О. И. Тришевский, С. Ю. Плеснецов // Черные металлы. – 2011. – Апрель. – С. 22–25.*
4. Sutton M. A. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements / M. A. Sutton, J. J. Orteu, H. Schreier // University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.*
5. Вильдеман В. Э. *Экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при плоском напряженном состоянии / В. Э. Вильдеман, Т. В. Третьякова, М. П. Третьяков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 5. – С. 106–111.*

Федосов А. В. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: fedosov-sol@mail.ru