УДК 539.42
DOI: 10.18287/2541-7525-2019-25-2-75-91

Дата поступления статьи: 11/III/2019
Дата принятия статьи: 28/III/2019

А.Н. Косыгин, Л.Н. Косыгина

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ¹

© Косыгин Александр Николаевич — магистрант кафедры математического моделирования в механике, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

E-mail: kosalnik@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0776-7939>

Косыгина Лилия Николаевна — магистрант кафедры математического моделирования в механике, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

E-mail: fleur.lilia@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9831-0175>

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена цифровой обработке интерферограмм (картин интерференционных полос), полученных методом фотоупругости. Для расшифровки картин изохром разработано приложение, позволяющее практически полностью автоматизировать эту процедуру, избавив от рутинной и трудоемкой работы, которая практически полностью обычно выполняется вручную. На примере классической задачи о диске, сжатом диаметрально противоположными силами, подробно описан алгоритм работы разработанного программного комплекса, включающий в себя следующие основные этапы: предобработка изображения, локализация интерференционных полос, их трассировка. В результате работы приложения создается текстовый файл, содержащий все данные, необходимые для дальнейшего определения напряженно-деформированного состояния тела (номера изохроматических полос и координаты точек, принадлежащих данной полосе).

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, метод фотоупругости, интерферограмма изохром, интерференционная полоса, изохроматическая полоса, попиксельное сканирование, предобработка изображения, трассировка полос, локализация полос, скелетон картины полос, медианный фильтр, фильтр Гаусса, фильтр сверточного типа.

Цитирование. Косыгин А.Н., Косыгина Л.Н. Цифровая обработка экспериментальных интерферограмм, полученных методом фотоупругости // Вестник Самарского университета. Естественная серия. 2019. Т. 25. № 2. С. 75–91. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2019-25-2-75-91>.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

¹Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-01-00631.

UDC 539.42

DOI: 10.18287/2541-7525-2019-25-2-75-91

Submitted: 11/III/2019

Accepted: 28/III/2019

A.N. Kosygin, L.N. Kosygina

DIGITAL PROCESSING OF INTERFEROGRAMS OBTAINED BY THE PHOTOELASTICITY METHOD²

© Kosygin Alexandr Nikolaevich — Master's Degree student of the Department of Mathematical Modelling in Mechanics, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation.

E-mail: kosalnik@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0776-7939>

Kosygina Liliya Nikolaevna — Master's Degree student of the the Department of Mathematical Modelling in Mechanics, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation.

E-mail: fleur.lilia@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9831-0175>

ABSTRACT

The article is devoted to the digital processing interferograms (isochromatic fringe patterns) obtained by the photoelasticity method. An application to interpretate the isochromatic fringe patterns is developed. It allows us to automate this procedure, gets to avoid the routine and time-consuming work. The features of the developed software package are described in detail by means of the classic problem of a diametrically compressed disk. The application's algorithm includes following main steps: image pre-processing, localization interference fringe, fringe tracing. The application creates a text file containing all the necessary data to further determine the stress-strain state (isochromatic fringe's number and locus of fringes).

Key words: digital image processing, photoelasticity method, isochromatic interferogram, interference fringe pattern, isochromatic fringe, pixel-by-pixel scanning, preprocessing images, fringe tracing, fringe localization, fringe pattern's skeleton, median filter, Gaussian filter, convolutional type filter.

Citation. Kosygin A.N., Kosygina L.N. *Tsifrovaya obrabotka eksperimental'nykh interferogramm, poluchennykh metodom fotouprugosti* [Digital processing of interferograms obtained by the photoelasticity method]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya* [Vestnik of Samara University. Natural Science Series], 2019, no. 25, no. 2, pp. 75–91. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2019-25-2-75-91> [in Russian].

Введение

Метод фотоупругости — один из высокоточных экспериментальных методов механики деформируемого твердого тела, широко используемый в 60–80 гг. XX в. отечественными и зарубежными исследователями [1–6]. Метод фотоупругости позволяет воссоздать полную картину распределения напряжений внутри исследуемого объекта в зависимости от приложенных нагрузок. Однако для получения данных с помощью этого метода необходимо создать образец из оптически активного материала, провести серию испытаний, сфотографировать полученные интерференционные картины, затем обработать эти изображения, выписать точные координаты точек, принадлежащих интерференционной полосе. Процесс довольно долгий, требующий выделения и обработки большого массива точек, что неизбежно приводит к ошибкам измерений [1–3]. Таким образом, необходимость в выполнении множества рутинных и трудоемких действий, требующих высокой квалификации персонала, обрабатывающего полученные экспериментальные данные, наличие спецоборудования, проведение многочисленных экспериментов, невозможность получения высококачественных фотографий привели к тому, что на какое-то время этот метод был частично вытеснен другими, более простыми в исполнении экспериментальными (электронная корреляционная спекл-интерферометрия, голографическая интерферометрия) [7–10] и вычислительными методами [11–14].

В настоящее время публикуется большое количество новых работ, использующих для верификации данные, полученные с помощью метода фотоупругости [15; 16]. Появились работы, использующие по-

²This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research № 19-01-00631.

ляризационно-оптический метод для анализа и вычисления параметров механики разрушения [17–20]. Это связано с бурным развитием компьютерных технологий, произошедшим в конце XX в. и начале XXI в., а также с появлением цифровых изображений и программ для их обработки, что позволило автоматизировать процесс обработки и анализа полученных с помощью метода фотоупругости экспериментальных данных. Однако следует отметить, что в указанных выше публикациях описаны лишь отдельные шаги с краткими инструкциями по использованию.

Настоящая статья посвящена подробному описанию процедуры обработки всей совокупности экспериментальной информации и алгоритмизации программы, автоматизирующей трудоемкие процессы обработки изображений, получаемых методом фотоупругости.

1. Метод фотоупругости

Метод фотоупругости (поляризационно-оптический метод) — это метод определения внутренних напряжений в прозрачных телах, которые полагаются изотропными в ненапряженном состоянии. Он позволяет определять распределение напряжений (деформаций) без использования аппарата математической теории упругости в двумерных и пространственных упругих телах [1–3]. Метод фотоупругости основан на том, что прозрачные материалы, являющиеся в естественном ненагруженном состоянии изотропными, под действием нагрузки становятся оптически анизотропными. В результате поляризованный луч света, проходящий через такой образец, распадается на два луча, что приводит к появлению интерференционной картины полос, называемых изохромами. Это явление носит название двойного лучепреломления [1]. Изохроматическая полоса — геометрическое место точек, соответствующее одинаковой разности главных напряжений [2]. Получаемые в результате эксперимента фотоупругости данные используются для вычисления разности главных напряжений в точках модели по закону Вертгейма [3]

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N f_\sigma}{h}, \quad (1)$$

здесь σ_1, σ_2 — главные напряжения, N — порядковый номер изохроматической полосы, f_σ — цена полосы материала (материальная постоянная, определяемая в ходе тарировки), h — толщина испытуемого образца. Таким образом, необходимо знать в каждой экспериментальной точке ее координаты и номер изохромы, которой она принадлежит. Использование данного метода целесообразно и оправданно для задач механики разрушения, так как не требует процедуры разделения напряжений, необходимой для многих задач других разделов механики деформируемого твердого тела. Полученные данные позволяют определить параметры механики трещин — коэффициенты интенсивности K_I и K_{II} , T -напряжения, а также найти амплитудные коэффициенты высших приближений многопараметрических асимптотических разложений у вершины трещины [17–20].

Таким образом, для аккуратного определения параметров механики разрушения требуется цифровая обработка изображения с целью точного выделения точек, принадлежащих изохроматическим полосам.

2. Предобработка изображения

Перед обработкой изображения его нужно оцифровать. Это можно сделать, отсканировав фотографию наблюдаемой интерференционной картины или сразу сфотографировав на цифровой фотоаппарат. И в том, и в другом случае получается пиксельное изображение, особенностью которого является его дискретность. В общем случае изображение представляет собой прямоугольную матрицу, элементами которой являются числа, описывающие яркость одного или нескольких цветов регистрируемого камерой диапазона. Цветное изображение, как правило, представляется в виде смеси красного, синего и зеленого цветов (RGB формат) [21; 22].

Человеческий глаз по-разному воспринимает яркость этих цветов. Если интересует только интенсивность пикселя, то можно привести изображение к полутоновому (черно-белому) виду (рис. 1), применив к каждому пикселю формулу [23; 24]

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B, \quad (2)$$

где R, G, B — соответственно интенсивность красного, зеленого и синего цветов точки изображения (целые числа из диапазона 0–255), Y — общая интенсивность освещенности точки изображения.

По различным причинам на полученном цифровом изображении могут появляться артефакты, которых быть не должно (пузырьки в материале, из которого изготовлен экспериментальный образец, пыль или грязь на объективе камеры, дефекты фоточувствительной матрицы). Для того чтобы избавиться от них, можно использовать различные фильтры [21–25].

Рис. 1. Приведение к полутоновому виду интерферограммы изохром для диска, сжатого диаметрально противоположными силами $P = 210$ кГс

$P_{0,0}$ $K_{0,0}$	$P_{0,1}$ $K_{0,1}$	$P_{0,2}$ $K_{0,2}$	$P_{0,3}$	$P_{0,4}$
$P_{1,0}$ $K_{1,0}$	$P_{1,1}$ $K_{1,1}$	$P_{1,2}$ $K_{1,2}$	$P_{1,3}$	$P_{1,4}$
$P_{2,0}$ $K_{2,0}$	$P_{2,1}$ $K_{2,1}$	$P_{2,2}$ $K_{2,2}$	$P_{2,3}$	$P_{2,4}$
$P_{3,0}$	$P_{3,1}$	$P_{3,2}$	$P_{3,3}$	$P_{3,4}$
$P_{4,0}$	$P_{4,1}$	$P_{4,2}$	$P_{4,3}$	$P_{4,4}$

Рис. 2. Наложение ядра свертки на оригинальное изображение

Многие фильтры изображений основаны на свертке. Центральную роль здесь выполняет ядро свертки (рис. 2). Обычно ядро представляет собой квадратную матрицу нечетной размерности $(2n + 1) \times (2n + 1)$, $n = 1, 2, 3, \dots$. Центр матрицы ядра накладывается поочередно на каждый пиксель изображения. Далее вычисляется сумма произведений элементов ядра на соответствующие им пиксели. Это вычисленное значение становится новым значением пикселя. Соотношение для произвольного пикселя $P_{x,y}$ имеет вид

$$P_{x,y}^* = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n P_{x+i,y+j} K_{n+i,n+j},$$

здесь P — матрица исходного изображения, K — матрица ядра свертки, P^* — матрица полученного

Рис. 3. Пример применения фильтра Гаусса: *a* — оригинал изображения картины изохроматических полос; *б* — результат применения фильтра Гаусса при $n = 1$; *в* — результат применения фильтра Гаусса при $n = 3$; *г* — результат применения фильтра Гаусса при $n = 6$

изображения, x, y — координаты пикселя. Схематично наложение матрицы ядра на изображение для пикселя $P_{1,1}$ представлено на рис. 2.

В зависимости от вида ядра можно добиться различных эффектов на исходном изображении. Для улучшения интерференционных изображений удобны фильтры сглаживания (фильтр усреднения, фильтр Гаусса, медианный фильтр и др.) [26–28]. Рассмотрим применение фильтра Гаусса и медианного фильтра.

Фильтр Гаусса усредняет значение текущего пикселя с учетом значений в окрестности, но влияние окружающих пикселей уменьшается с удалением от центра ядра (рис. 3). Ядро фильтра Гаусса вычисляется из нормального закона распределения

$$K_{i,j}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

здесь i, j меняются в диапазоне $[0, 2n]$ для ядра K размерности $2n+1$, σ — радиус окрестности сглаживания, $x = \sqrt{(i-n)^2 + (j-n)^2}$ — удаление от центра окрестности. Фильтр применяется для каждой точки изображения. На рис. 3, *a* показано оригинальное полутоновое изображение, тогда как на рис. 3, *б*, *в*, *г*

приведены результаты применения фильтра Гаусса для $n = 1$, $n = 3$ и $n = 6$ соответственно. Видно, что при $n = 6$ полосы становятся более гладкими, однако дальнейшее увеличение размерности ядра не приводит к заметному изменению картины полос, но требует больше вычислительных ресурсов и возникает риск слияния соседних полос.

Рис. 4. Схема работы медианного фильтра

В отличие от матрицы свертки фильтра Гаусса размер матрицы медианного фильтра влияет только на количество рассматриваемых пикселей. Алгоритм работы этого фильтра следующий: окно матрицы ставится на текущий пиксель, выбираются все пиксели, накрытые ядром, сортируются, и среднее значение из отсортированного массива берется за новое значение текущего пикселя (рис. 4). С помощью этого фильтра удастся избавиться от мелких дефектов изображения, не нарушая общую картину (рис. 5).

Как отмечалось выше, фильтр Гаусса позволяет сгладить изображение (рис. 6, б), а медианный избавиться от мелких дефектов и выбросов, которые мешают при дальнейшей цифровой обработке изображения (рис. 6, в). Поэтому резонно последовательное применение медианного фильтра и фильтра Гаусса (рис. 6, г).

3. Алгоритм локализации интерференционных полос полутонового изображения

Для выделения остова интерференционной картины на полутоновом изображении используют фильтры несверточного типа [29]. Определяется матрица с критерием установления принадлежности пикселя интерференционной полосе. Затем эта матрица-окно перемещается попиксельно по всему изображению для определения точек скелета интерференционных полос.

Примером этого подхода является использование в качестве маски ядра размерности 5×5

$$K = \begin{pmatrix} k_{-2,-2} & k_{-2,-1} & k_{-2,0} & k_{-2,1} & k_{-2,2} \\ k_{-1,-2} & k_{-1,-1} & k_{-1,0} & k_{-1,1} & k_{-1,2} \\ k_{0,-2} & k_{0,-1} & k_{0,0} & k_{0,1} & k_{0,2} \\ k_{1,-2} & k_{1,-1} & k_{1,0} & k_{1,1} & k_{1,2} \\ k_{2,-2} & k_{2,-1} & k_{2,0} & k_{2,1} & k_{2,2} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для различных направлений распространения полосы используются разные маски, показанные на рис. 8.

Например, можно использовать условные маски для четырех направлений поиска экстремумов на изображении (рис. 8). Каждое отдельное направление сканирования находит локальные точки минимумов освещенности, пропуская полосы, направление которых перпендикулярно направлению сканирования. Для того чтобы картина получилась более полной, необходимо логически сложить результаты перпендикулярных направлений сканирования. Так как матриц четыре, и они попарно ортогональны, то в результате получается два изображения локализации минимумов освещенности. Логическое умножение друг на друга дает итоговую картину локализации интерференционных полос с минимумом шума (рис. 7).

Критерии нахождения минимума интенсивности в пикселе накрываемым элементом $k_{0,0}$ ядра будут следующими:

$$\begin{aligned} (k_{2,2} + k_{1,2} + k_{2,1}) &> (k_{1,-1} + k_{0,0} + k_{-1,1}) < (k_{-2,-2} + k_{-1,-2} + k_{-2,-1}), \\ (k_{2,-2} + k_{1,-2} + k_{2,-1}) &> (k_{-1,-1} + k_{0,0} + k_{1,1}) < (k_{-2,2} + k_{-1,2} + k_{-2,1}), \\ (k_{2,-1} + k_{2,0} + k_{2,1}) &> (k_{0,-1} + k_{0,0} + k_{0,1}) < (k_{-2,-1} + k_{-2,0} + k_{-2,1}), \\ (k_{-1,-2} + k_{0,-2} + k_{1,-2}) &> (k_{-1,0} + k_{0,0} + k_{1,0}) < (k_{-1,2} + k_{0,2} + k_{1,2}). \end{aligned} \quad (5)$$

Рис. 5. Применение медианного фильтра: *а* — оригинал полутонного изображения картины изохром; *б* — результат применения медианного фильтра при $n = 1$; *в* — результат применения медианного фильтра при $n = 2$; *г* — результат применения медианного фильтра при $n = 3$

4. Альтернативный алгоритм локализации полос полутонного изображения

Для локализации интерференционных полос полутонного изображения будем использовать два набора масок (рис. 9) и (рис. 10). При применении маски строится массив из пяти последовательных значений точек, через которые проходит вектор сканирования $[v_0, v_1, v_2, v_3, v_4]$.

Для определенности предположим, что P — это матрица значений освещенности исследуемого изображения, накрытого окном маски, сама маска представлена в виде (4). Оцениваемый пиксель находится в точке $P_{0,0}$. Тогда для первой маски (рис. 9) массив коэффициентов вектора сканирования будет $[P_{0,-2}, P_{0,-1}, P_{0,0}, P_{0,1}, P_{0,2}]$. Кругами помечены пиксели, через которые вектор сканирования проходит только частично, поэтому за интенсивность освещенности пикселя берется среднее значение освещенности соседних пикселей. Для второй маски (рис. 10) массив коэффициентов вектора сканирования имеет вид

Рис. 6. Применение фильтров для обработки изображений: *а* — оригинал полутонового изображения картины изохром; *б* — результат применения фильтра Гаусса; *в* — результат применения медианного фильтра; *г* — совместное применение медианного фильтра и фильтра Гаусса

$$\left[P_{1,-2}, \frac{P_{1,-1} + P_{0,-1}}{2}, P_{0,0}, \frac{P_{-1,1} + P_{0,1}}{2}, P_{-1,2} \right].$$

Критерием локализации минимума внутри этого списка является выполнение хотя бы двух из следующих условий:

$$\begin{aligned} & (v_0 > v_1 \wedge v_1 > v_2 \wedge v_2 < v_3 \wedge v_3 < v_4), \\ & (v_0 > v_1 \wedge v_1 > v_2 \wedge v_2 = v_3 \wedge v_3 < v_4), \\ & (v_0 > v_1 \wedge v_1 = v_2 \wedge v_2 < v_3 \wedge v_3 < v_4), \\ & (v_0 > v_1 \wedge v_1 = v_2 \wedge v_2 = v_3 \wedge v_3 < v_4), \\ & (v_0 = v_1 \wedge v_1 = v_2 \wedge v_2 = v_3 \wedge v_3 = v_4). \end{aligned} \tag{6}$$

Рис. 7. Алгоритм выявления полос на основе масок

Рис. 8. Маски по направлениям

5. Трассировка полос

Данные, полученные после первичной локализации интерференционных полос, не являются достаточно точными. Полосы имеют различную ширину, при этом неизвестно, принадлежат ли два случайно взятых пикселя одной полосе. Таким образом, необходимо разбить пиксели на отдельные группы по подходящему критерию [30]. Эта процедура называется трассировкой.

Рассмотрим один из способов разбиения изображения на группы пикселей, принадлежащих замкнутой области. Это и будет, в лучшем случае, отдельная интерференционная полоса или ее часть.

Для удобства будем считать, что есть функция $g(x, y)$, которая возвращает булево значение *false*, если точка с координатами (x, y) не принадлежит никакой полосе. В противном случае функция возвращает значение, равное интенсивности освещенности пикселя с координатами (x, y) .

Алгоритм трассировки (рис. 11) состоит из следующих шагов:

- 1) поиск начинается с любой точки изображения, но так как все они имеют одинаковую ценность, то удобнее всего начать с точки с координатами $(0, 0)$;
- 2) перебираем непроверенные пиксели. Если пиксель принадлежит полосе ($g(x, y) \neq false$) и не помечен использованным, то это новая полоса. Начинаем обход точек этой полосы: собираем все точки полосы, помечая все проверенные пиксели как проверенные, чтобы избежать бесконечного цикла;
- 3) если остались еще не проверенные пиксели, переходим к шагу 2.

На рис. 11 приведена схема работы волнового алгоритма трассировки полос. Как отмечалось ранее, обход начинается с левого верхнего угла (направление обхода осуществляется слева направо, сверху вниз). При попадании на пиксель, принадлежащий полосе, инициируется запуск сферической волны, центром которой является найденная точка [31]. Отслеживая фронт ее распространения, находим другие точки, принадлежащие полосе. На каждой итерации фронт распространяется на один пиксель. Пиксели, найденные на определенной итерации, отмечены соответствующими номеру итерации числами (рис. 11).

Рис. 9. Маски альтернативного алгоритма выявления полос полутонового изображения. Прямые направления сканирования

Рис. 10. Маски альтернативного алгоритма выявления полос полутонового изображения. Дополнительные направления сканирования

Рис. 11. Трассировка полос

6. Приложение локализации интерференционных полос на изображении

С использованием вышеизложенных алгоритмов было написано приложение по обработке интерференционных картин. Работа приложения состоит из нескольких этапов:

- выбор файла изображения для обработки;

- автоматическая обработка загруженного изображения. Этот этап включает в себя следующие шаги:
 - предобработка изображения, в процессе которой удаляется некоторая часть помех;
 - первичная локализация интерференционных полос (получаем приблизительные места расположения полос);
 - трассировка полос (получаем набор множеств точек, принадлежащих не пересекающимся полосам);
- нумерация полос. Этот этап довольно трудоемок для автоматической обработки, так как в общем случае требует рассмотрения последовательности изображений, получаемых при последовательном увеличении приложенной к образцу нагрузки. При увеличении нагрузки полосы плавно удаляются от вершин трещин. Поэтому процесс нумерации полос сделан вручную. Алгоритм указания номера полосы следующий:
 - выбрать с помощью мыши кусочки нужной полосы;
 - нажать кнопку *"SaveAsFringeUnion"*;
 - во всплывающем окне ввести номер полосы, нажать кнопку *"Ok"*;
- выгрузка результата в текстовый файл. В текстовый файл выгрузится список координат точек отмеченных интерференционных полос. Точки выгружаются в виде кортежей:

$$\{N, x_1, x_2\},$$

где N — номер полосы, x_1, x_2 — пиксельные координаты точки, принадлежащей этой полосе.

7. Задача о растяжении пластины с двумя трещинами

Рассмотрим применение разработанной программы на примере задачи о растяжении пластины с двумя коллинеарными трещинами.

Рис. 12. Выбор файла изображения

В разработанный комплекс загружается картина изохроматических полос (рис. 12, 13), полученная при растяжении силой $P = 175$ кГс пластины из эпоксидной смолы с двумя разрезами различной длины.

После запуска и работы программы поверх этой картины накладывается слой, содержащий скелетон данного изображения (рис. 14).

Рис. 13. Загрузка изображения

Рис. 14. Локализация и трассировка полос

Далее проводится процедура нумерации полос. Вручную выбираются множества точек, принадлежащие одной изохроме (рис. 15), и присваивается определенный порядковый номер изохроматической полосе (рис. 16).

Рис. 15. Выбор точек, принадлежащих одной изохроматической полосе

Рис. 16. Нумерация полос

В результате работы программы создается текстовый файл (рис. 17), содержащий определяемое пользователем программы число точек изохроматической картины. Полученные экспериментальные данные имеют наиболее удобный формат для определения параметров механики разрушения: коэффициентов

Рис. 17. Сохранение результатов

интенсивности напряжений, Т-напряжений и коэффициентов высших приближений асимптотического представления М. Уильямса поля напряжений.

Заключение

В статье описаны алгоритмы обработки результатов оптоэлектронных измерений, получаемых методом фотоупругости. Следует отметить, что применяемые для обработки интерференционных картин численные методы могут быть применены и для обработки изображений, получаемых другими методами, такими, например, как электронная корреляционная спекл-интерферометрия, голографическая интерферометрия. С использованием рассмотренных алгоритмов написано приложение, которое по изображению определяет координаты точек, лежащих на интерференционных полосах для последующей обработки этих координат в любой другой программе.

Приложение было написано на языке *JavaScript* с использованием синтаксиса *ES2015/ES6*, интерфейс приложения разрабатывался с использованием фреймворков *Bootstrap* и *AngularJS*.

Литература

- [1] Фрохт М.М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений: учеб. пособие. М.: Гостехиздат, 1948. Т. 2. 440 с. URL: <https://es.b-ok.cc/book/3226870/10c5fc>.
- [2] Хаимова-Малькова Р.И. Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. М.: Наука, 1970. 116 с. URL: <https://pl.b-ok.cc/book/3573106/fd4bf7>.
- [3] Александров А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35626697>.
- [4] Schemm J.B., Vest C.M. Fringe pattern recognition and interpretation using nonlinear regression analysis // Applied optics. 1983. Vol. 22. No. 18. P. 2850–2853. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.22.002850>.
- [5] Chen T.Y., Taylor C.E. Computerised fringe analysis in photomechanics // Experimental Mechanics. 1989. Vol. 29. No 3. P. 323–329. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02321416>.
- [6] Toh S.L., Tang S.H., Hovanesian J.D. Computerised photoelastic fringe multiplication // Experimental Techniques. 1990. V. 14. No 4. P. 21–23. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.1990.tb01108.x>.

- [7] Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 240 с. URL: <https://craterbook.xyz/books/interferentsionno-opticheskie>.
- [8] Bruno L. Full-field measurement with nanometric accuracy of 3D superficial displacements by digital profile correlation: A powerful tool for mechanics of materials // *Materials and Design*. 2018. V. 159. P. 170–185.
- [9] Weller D. et al. Self-restraint hot cracking test for aluminum alloys using digital image correlation // *Procedia CIRP*. 2018. V. 74. P. 430–433. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.165.
- [10] Speckle-interferometric phase fringe patterns de-noising by using fringes direction and curvature / H. Jiang [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. 2019. V. 119. P. 30–36. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00116-9.
- [11] Степанова Л.В., Росляков П.С. Полное асимптотическое разложение М. Уильямса у вершин двух коллинеарных трещин конечной длины в бесконечной пластине // *Вестник Пермского национального технического университета. Сер.: Механика*. 2015. № 4. С. 188–225. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.12.
- [12] Степанова Л.В., Адылина Е.М. Напряженно-деформированное состояние в окрестности вершины трещины в условиях смешанного нагружения // *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55. № 5. С. 181–194. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22318154>.
- [13] Косыгина Л.Н. Асимптотическое представление поля напряжений у вершины трещины для пластины с боковыми надрезами: теоретическое исследование и вычислительный эксперимент // *Вестник Самарского университета. Естественная серия*. 2018. № 2. С. 55–66. DOI: 10.18287/2541-7525-2018-24-2-55-66.
- [14] Степанова Л.В. Асимптотический анализ поля напряжений у вершины трещины (учет высших приближений) // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2019. Т. 22. № 3. С. 345–361.
- [15] Surendra K.V.N., Simha K.R.Y. Digital Image Analysis around isotropic points for photoelastic pattern recognition // *Optic Engineering*. 2015. V. 54(8). P. 081209. DOI: 10.1117/1.OE.54.8.081209.
- [16] Image Processing Algorithm for Fringe Analysis in Photoelasticity / S. Alsiya [et al.] // *Scholars Journal of Engineering and Technology*. 2016. V. 4(7). P. 325–328. DOI: 10.21276/sjet.2016.4.7.5.
- [17] Stepanova L.V., Roslyakov P.S., Lomakov P.N. A Photoelastic Study for Multiparametric Analysis of the Near Crack Tip Stress Field Under Mixed Mode Loading // *Procedia Structural Integrity*. 2016. V. 2. P. 1797–1804. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.226.
- [18] Степанова Л.В., Долгих В.С. Цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений. Метод фотоупругости и его применение для определения коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений // *Вестник Самарского технического университета. Сер.: Физико-математические науки*. 2017. Т. 21. № 4. С. 717–735. DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu1544>.
- [19] Stepanova L.V. Asymptotic analysis of the stress field at a crack tip in a linearly elastic material: experimental determination of williams expansion coefficients // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018. Issue 2. P. 29–41. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.2.029-041.
- [20] Vivekanandan A., Ramesh K. Study of interaction effects of asymmetric cracks under biaxial loading using digital photoelasticity // *Theoretical and Applied Fracture mechanics*. 2019. V. 99. P. 104–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.11.011>.
- [21] Костюк Ю.Л., Кон А.Б., Новиков Ю.Л. Алгоритмы векторизации цветных растровых изображений на основе триангуляции и их реализация // *Вестник Томского государственного университета*. 2003. № 280. С. 275–280.
- [22] Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с. URL: http://www.technosfera.ru/files/book_pdf/0/book_311_455.pdf.
- [23] Human Skin Detection Using RGB, HSV and YCbCr Color Models / S. Kolkur [et al.] // *International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016)*. Atlantis Press. 2016. P. 324–332. DOI: 10.2991/iccasp-16.2017.51.
- [24] Hu Y., Nan L. Method for Shadow Removal of Moving Object in YUV Color Space // *2nd International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology*. Atlantis Press. 2016. P. 662–666. DOI: 10.2991/iccia-17.2017.118.
- [25] Fringe pattern denoising based on deep learning / K. Yan [et al.] // *Optics Communications*. 2019. V. 437. P. 148–152. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.12.058.
- [26] Boyat A.K., Joshi B.K. Performance Evaluation of Adaptive Shrinkage Functions for Image Denoising // *International Conference on Advanced Computing Networking and Informatics*. 2019. P. 547–552. DOI: 10.1007/978-981-13-2673-8_58.
- [27] Burger W., Burge M.J. Digital image processing: an algorithmic introduction using Java. London: Springer, 2016. 810 p. URL: <https://ru.b-ok.cc/book/2096439/95bff5>.
- [28] Chen Q., Xu J., Koltun V. Fast image processing with fully-convolutional networks // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2017. P. 2497–2506.
- [29] Ramesh K. Digital photoelasticity. Advanced Techniques and Applications. Berlin: Springer, 2000. 424 p. DOI: 10.1115/1.1483353.

- [30] Baek T.H., Kim M.S., Hong D.P. Fringe analysis for photoelasticity using image processing techniques // International Journal of Software Engineering and its Applications. 2014. V. 8. No 4. P. 91–102. DOI: 10.14257/ijseia.2014.8.4.11.
- [31] Москаленко С.В. Волновой алгоритм векторизации линейных растровых изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 51. С. 16–21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/volnovoy-algoritm-vektORIZatsii-lineynyh-rastrovyh-izobrazheniy>.

References

- [1] Frocht M.M. Fotouprugost'. Polyarizatsionno-opticheskii metod issledovaniya napryazhenii: ucheb. posobie [Photoelasticity. Polarization-optical method for the study of stresses: training manual]. M.: Gostekhizdat, 1948, Vol. 2, 440 p. Available at: <https://es.b-ok.cc/book/3226870/10c5fc> [in Russian].
- [2] Khaimova-Malkova R.I. Metodika issledovaniya napryazhenii polyarizatsionno-opticheskim metodom [Method of studying stresses by the polarization-optical method]. M.: Nauka, 1970, 116 p. Available at: <https://pl.b-ok.cc/book/3573106/fd4bf7> [in Russian].
- [3] Alexandrov A.Ya. Polyarizatsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruemogo tela [Polarization-optical methods of mechanics of a deformable body]. M.: Nauka, 1973, 576 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35626697> [in Russian].
- [4] Schemm J.B., Vest C.M. Fringe pattern recognition and interpretation using nonlinear regression analysis. *Applied optics*, 1983, V. 22, no. 18, pp. 2850–2853. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.22.002850> [in English].
- [5] Chen T.Y., Taylor C.E. Computerised fringe analysis in photomechanics. *Experimental Mechanics*, 1989, V. 29, no 3, pp. 323–329. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02321416> [in English].
- [6] Toh S.L., Tang S.H., Hovanessian J.D. Computerised photoelastic fringe multiplication. *Experimental Techniques*, 1990, V. 14, Issue 4, pp. 21–23. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.1990.tb01108.x> [in English].
- [7] Razumovsky I.A. Interferentsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela [Optical interference methods of the mechanics of a deformable solid]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2007, 240 p. Available at: <https://craterbook.xyz/books/interferentsionno-opticheskie> [in Russian].
- [8] Bruno L. Full-field measurement with nanometric accuracy of 3D superficial displacements by digital profile correlation: A powerful tool for mechanics of materials. *Materials and Design*, 2018, V. 159, pp. 170–185 [in English].
- [9] Weller D. [et al.] Self-restraint hot cracking test for aluminum alloys using digital image correlation. *Procedia CIRP*, 2018, V. 74, pp. 430–433. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.165
- [10] Speckle-interferometric phase fringe patterns de-noising by using fringes direction and curvature. H. Jiang [et al.] *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, V. 119, pp. 30–36. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00116-9 [in Russian].
- [11] Stepanova L.V., Roslyakov P.S. Polnoe asimptoticheskoe razlozhenie M. Uil'yamsa u vershin dvukh kollinearnykh treshchin konechnoi dliny v beskonechnoi plastine [Complete asymptotic expansion M. Williams near the crack tips of collinear cracks of equal lengths in an infinite plane medium]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2015, no 4, pp. 188–225. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.12 [in Russian].
- [12] Stepanova L.V., Adylina E.M. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie v okrestnosti vershiny treshchiny v usloviyakh smeshannogo nagruzheniya [Stress-strain state in the vicinity of a crack tip under mixed loading]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 2014, V. 55, no 5, pp. 885–895. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22318154> [in Russian].
- [13] Kosygina L.N. Asimptoticheskoe predstavlenie polya napryazhenii u vershiny treshchiny dlya plastiny s bokovymi nadrezami: teoreticheskoe issledovanie i vychislitel'nyi eksperiment [Asymptotic representation of the stress field near the crack tip of an infinite plate with two semi-infinite symmetrical edge notches: theoretical study and computational experiment]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya* [Vestnik of Samara University. Natural Science Series], 2018, no. 2. pp. 55–66. DOI: 10.18287/2541-7525-2018-24-2-55-66 [in Russian].
- [14] Stepanova L.V. Asimptoticheskii analiz polya napryazhenii u vershiny treshchiny (uchet vysshikh priblizhenii) [Asymptotic analysis of the crack tip stress field (consideration of higher order terms)]. *Sibirskii zhurnal vychislitel'noi matematiki* [Siberian Journal of Numerical Mathematics], 2019, V. 22, no. 3, pp. 345–361. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJNM20190307> [in Russian].
- [15] Surendra K.V.N., Simha K.R.Y. Digital Image Analysis around isotropic points for photoelastic pattern recognition. *Optic Engineering*, 2015, V. 54, no 8, p. 081209. DOI: 10.1117/1.OE.54.8.081209 [in English].
- [16] Image Processing Algorithm for Fringe Analysis in Phototelasticity. S. Alsia [et al.] *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 2016, V. 4(7), pp. 325–328. DOI: 10.21276/sjet.2016.4.7.5 [in English].
- [17] Stepanova L.V., Roslyakov P.S., Lomakov P.N. A Photoelastic Study for Multiparametric Analysis of the Near Crack Tip Stress Field Under Mixed Mode Loading. *Procedia Structural Integrity*, 2016, V. 2, pp. 1797–1804. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.226 [in English].

- [18] Stepanova L.V., Dolgich V.S. *Tsifrovaya obrabotka rezul'tatov optoelektronnykh izmerenii. Metod fotouprugosti i ego primeneniye dlya opredeleniya koeffitsientov mnogoparametricheskogo asimptoticheskogo razlozheniya M. Uil'yamsa polya napryazhenii* [Digital processing of the results of optoelectronic measurements. The photoelasticity method and its application for determination of coefficients of the multiparameter asymptotic Williams expansion of the stress field]. *Vestnik Samarskogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Fiziko-matematicheskie nauki* [Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences], 2017, V. 221(4), pp. 717–735. DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu1544> [in Russian].
- [19] Stepanova L.V. Asymptotic analysis of the stress field at a crack tip in a linearly elastic material: experimental determination of williams expansion coefficients. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2018, no 2, pp. 29–41. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.2.029-041 [in English].
- [20] Vivekanandan A., Ramesh K. Study of interaction effects of asymmetric cracks under biaxial loading using digital photoelasticity. *Theoretical and Applied Fracture mechanics*, 2019, V. 99, pp. 104–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.11.011>
- [21] Kostyuk Yu.L., Kon A.B., Novikov Yu.L. *Algoritmy vektorizatsii tsvetnykh rastrovnykh izobrazhenii na osnove triangulyatsii i ikh realizatsiya* [Algorithms for vectorization of a multicolor raster image based on triangulation and their realization]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2003, no. 280, pp. 275–280. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16460252> [in Russian].
- [22] Gonzalez R.S., Woods R.E. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital image processing]. M.: Tekhnosfera, 2012, 1104 p. Available at: http://www.technosfera.ru/files/book_pdf/0/book_311_455.pdf [in Russian].
- [23] Kolkur S. [et al.] Human Skin Detection Using RGB, HSV and YCbCr Color Models. *International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016)*. Atlantis Press, 2016, pp. 324–332. DOI: 10.2991/iccasp-16.2017.51 [in English].
- [24] Hu Y., Nan L. Method for Shadow Removal of Moving Object in YUV Color Space. *2nd International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology (ICCIA 2017)*. Atlantis Press, 2016, pp. 662–666. DOI: 10.2991/iccia-17.2017.118 [in English].
- [25] Yan K. [et al.] Fringe pattern denoising based on deep learning. *Optics Communications*, 2019, V. 437, pp. 148–152. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.12.058
- [26] Boyat A.K., Joshi B.K. Performance Evaluation of Adaptive Shrinkage Functions for Image Denoising. *International Conference on Advanced Computing Networking and Informatics*, 2019, pp. 547–552. DOI: 10.1007/978-981-13-2673-8_58
- [27] Burger W., Burge M.J. Digital image processing: an algorithmic introduction using Java. London: Springer, 2016, 810 p. URL: <https://ru.b-ok.cc/book/2096439/95bff5> [in English].
- [28] Chen Q., Xu J., Koltun V. Fast image processing with fully-convolutional networks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2017, pp. 2497–2506. URL: <https://arxiv.org/pdf/1709.00643.pdf> [in English].
- [29] Ramesh K. Digital photoelasticity. Advanced Techniques and Applications. Berlin: Springer, 2000, 424 p. DOI: 10.1115/1.1483353
- [30] Baek T.H., Kim M.S., Hong D.P. Fringe analysis for photoelasticity using image processing techniques. *International Journal of Software Engineering and its Applications*, 2014, V. 8, no 4, pp. 91–102. DOI: 10.14257/ijseia.2014.8.4.11 [in English].
- [31] Moskalenko S.V. *Volnovoi algoritm vektorizatsii lineinykh rastrovnykh izobrazhenii* [Wave Algorithm for Vectorizing Linear Raster Images]. *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2008, no. 51, pp. 16–21. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/volnovoy-algoritm-vektORIZatsii-lineynyh-rastrovnyh-izobrazheniy> [in Russian].