

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ

© 2004 г. В. И. Смоляк; А. Л. Тхорук; Т. И. Вороняк, канд. техн. наук; О. Т. Олейник, канд. техн. наук

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, г. Львов, Украина  
E-mail: dep24@ah.ipm.lviv.ua

Предложен способ проверки достоверности количественной оценки продольных смещений для металлических балочных образцов при исследовании их методами электронной спекл-интерферометрии и фазосдвигающей спекл-интерферометрии. Приведены теоретические и экспериментальные результаты исследования продольных смещений поверхности образцов методами разностной электронной спекл-интерферометрии и фазосдвигающей спекл-интерферометрии.

Коды OCIS: 120.6160, 120.4290, 100.2000.

Поступила в редакцию 15.12.2003.

## Введение

Интерферометрические методы традиционно широко применяются при исследовании механической стойкости конструкционных материалов, в частности, для контроля поверхностных деформаций в статическом и динамическом режимах нагрузки. С нашей точки зрения, для задачи непрерывного мониторинга таких деформаций перспективны методы разностной электронной спекл-интерферометрии (РЭСИ) и фазосдвигающей спекл-интерферометрии (ФССИ).

Неконтактные методы РЭСИ и ФССИ позволяют исследовать упругие и упруго-пластические деформации конструктивных материалов. Эти методы имеют ряд преимуществ по сравнению с методами классической и голографической интерферометрии, а также другими классическими методами исследования поверхностных деформаций (рентгеноструктурный анализ). Прежде всего, с точки зрения практики, существенно то, что эти методы не требуют специальных мер по подготовке оптического качества отражающей поверхности образцов, как классическая интерферометрия, а также не нуждаются в высокой разрешающей способности фоторегистрирующих материалов, как голографическая интерферометрия.

## Описание методов

Метод РЭСИ заключается в регистрации спекл-изображений поверхности образцов в ненагруженном и нагруженном состояниях с последующей их обработкой. На фотоприемник, которым служит ПЗС-матрица видеокамеры, одновременно подаются два световых потока: опорный луч и излучение, рассеянное исследуемым образцом, которые созда-

ют сложную интерференционную картину, так называемую спекл-картину. С помощью видеокамеры и компьютера регистрируются изображения образца в разных нагруженных состояниях. В результате попиксельного вычитания с последующим возведением в квадрат пары таких изображений получается изображение поверхности образца, на котором наблюдаются разностные полосы одинакового смещения. По данным полосам определяются смещения поверхности.

При исследовании смещений поверхностей актуальной задачей является не только качественная, но и количественная их оценка. Для схем, которые регистрируют продольные смещения поверхности образца, чувствительность составляет  $\lambda/(1 + \cos\theta)$  на полосу (для интерферометра Маха-Цендера), где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения,  $\theta$  – угол между нормалью к поверхности образца и лучом, который освещает эту поверхность [1, 2]. По количеству разностных полос можно определить смещения и деформации исследуемой поверхности.

Для более точного определения перемещений и деформаций используются алгоритмы ФССИ [3]. Для ФССИ, в отличие от разностной спекл-интерферометрии, нужно сделать по три снимка для ненагруженного и нагруженного состояний. В схему вводится фазосдвигающий элемент, который изменяет разницу фаз между интерферирующими лучами для каждого следующего снимка на один и тот же угол (90°). В результате попиксельной обработки трех изображений ненагруженного состояния по формуле

$$\psi = \arctg[(S_3 - S_2)/(S_1 - S_2)], \quad (1)$$

где  $S_1, S_2, S_3$  – интенсивности пиксела соответственно для 1, 2 и 3-го изображений, получим распределение разности фаз по полю изображения. Для на-

груженного состояния проводили аналогичную операцию. Попиксельно отнимая фазовые поля, получили циклическую фазограмму.

Для получения непрерывного поля смещения поверхности (фазовых полей) используется алгоритм дециклизации [4]. Переход от фазовых полей к смещениям поверхности описывается уравнением

$$y = \lambda \Delta \phi / 4\pi, \quad (2)$$

которое связывает перемещения  $y$  поверхности образца с изменением разности фаз  $\Delta \phi$  [2].

### Экспериментальные результаты

Образцы конструктивных материалов подвергали статическим нагрузкам и исследовали продольные смещения их поверхности при помощи спекл-интерферометра, оптическая схема которого построена на базе классического интерферометра Маха-Цендера [5]. В такой схеме диффузно отражающий объект (исследуемый образец) установлен на место одного из поворотных зеркал.

Для исследования продольных деформаций использовали балочные образцы из дюралюминия Д16АТ размерами  $2 \times 20 \times 200$  мм. При экспериментах использовали He-Ne-лазер с  $\lambda_{\text{изл}} = 0,6328$  мкм, проектирующий объектив "Индустар100-У", ПЗС-видеокамеру модели Т-392С с разрешением  $600 \text{ лин}^{-1}$ . С помощью видеокамеры и компьютера регистрировали изображение образца в разных нагруженных состояниях. В результате обработки таких изображений получали изображения поверхности образца, на которой наблюдали разностные полосы.

Для проверки достоверности экспериментальных результатов провели исследования прогиба поверхности консольно-закрепленного балочного образца. Прогиб оси образца описывается выражением [6]

$$y(x) = Flx^2 / 2EJ - Fx^3 / 6EJ, \quad (3)$$

где  $F$  – сила нагрузки,  $x$  – расстояние от края крепления к точке измерения,  $l$  – расстояние от края крепления до точки нагрузки,  $E$  – модуль Юнга,  $J$  – момент инерции поперечного сечения балки. Прогиб оси балочного образца в точке нагрузки составляет:

$$y(l) = Fl^3 / 3EJ, \quad (4)$$

где  $y(l)$  – смещение точки нагрузки. При подстановке  $F$  из (4) в (3) получим выражение для прогиба оси

$$y(x) = \left( 3y(l)x^2 / 2l^3 \right) (l - x/3). \quad (5)$$

Прогиб (5) зависит только от смещения точки нагрузки  $y(l)$  и от расстояния от края крепления до точки нагрузки  $l$  и не зависит от приложенной силы  $F$ . Схема нагрузки образца, прогиб оси кото-

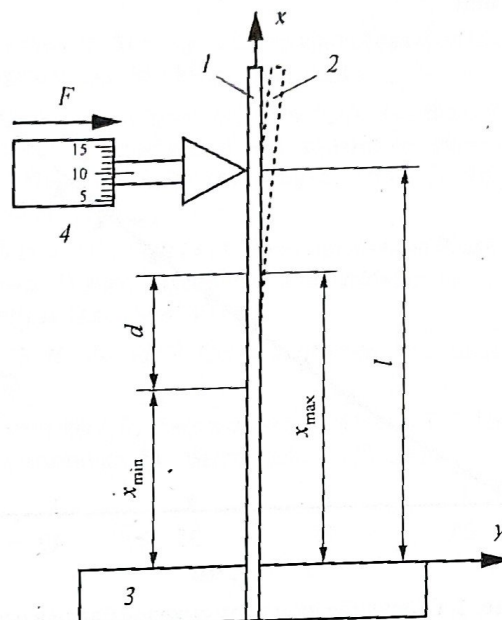


Рис. 1. Схема нагрузки исследуемого образца. 1 – ненагруженный образец, 2 – нагруженный образец, 3 – крепление, 4 – микрометрический винт,  $l$  – расстояние от края крепления до точки нагрузки,  $F$  – направление приложенной силы нагрузки,  $d$  – исследуемая область образца,  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  – расстояния от края крепления до нижнего и верхнего краев исследуемой области.

рого описывается уравнением (5), представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлены разностные полосы, полученные в результате обработки изображений образца, который нагружали по схеме на рис. 1. Прогиб образца в исследуемой области при перемещении в точке нагрузки на 10 мкм согласно расчетам по уравнению (5) составил 1,1 мкм. На рис. 3 представлены результаты сравнения теоретических расчетов с экспериментальными результатами.

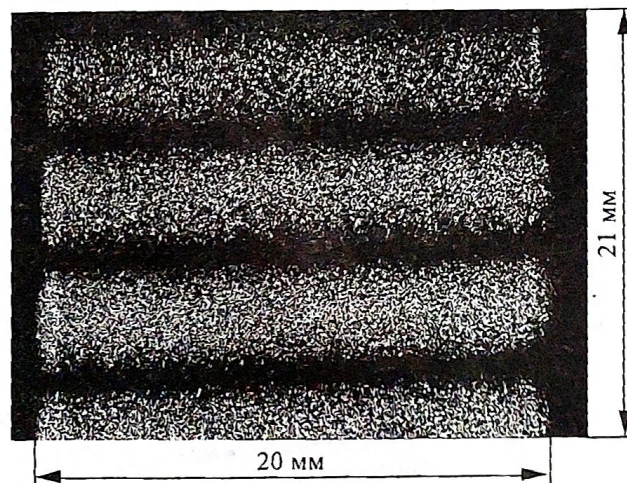


Рис. 2. Разностные полосы (смещение в точке нагрузки равно 10 мкм).

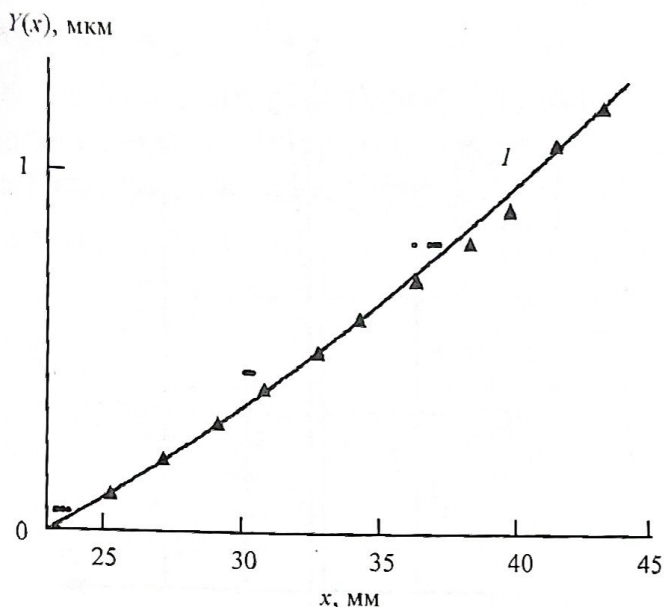


Рис. 3. Смещение дюралюминиевой балки в исследуемой области: смещение в точке нагрузки 10 мкм (I – теоретический расчет, • – экспериментальные результаты для РЭСИ, ▲ – экспериментальные результаты для ФССИ).

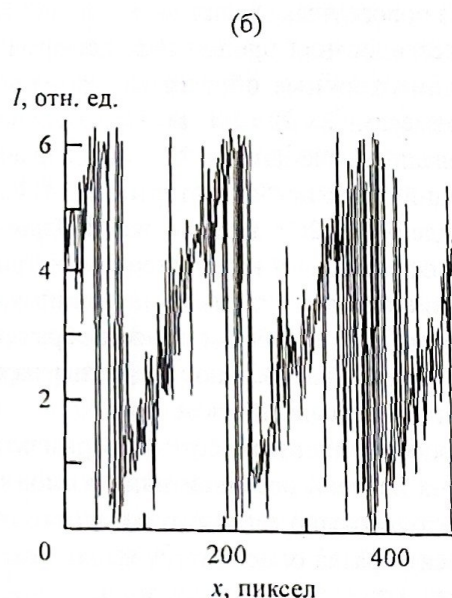
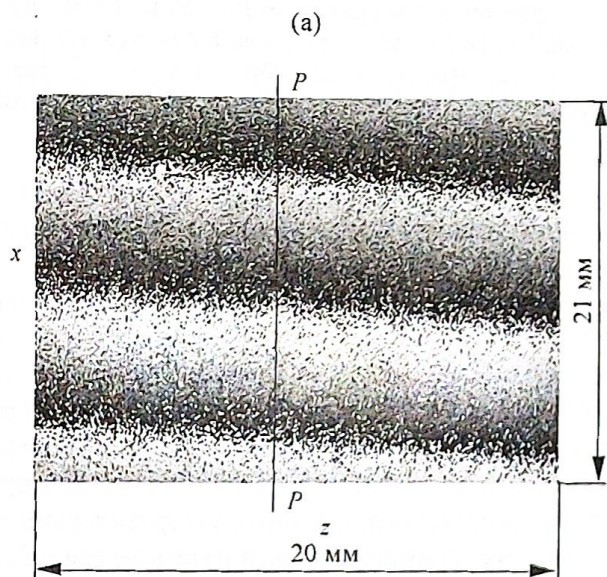


Рис. 4. Полученная фазограмма (а) и ее профиль по линии P-P (б).

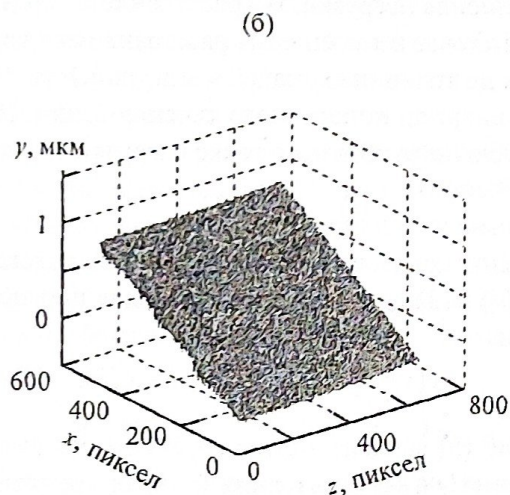
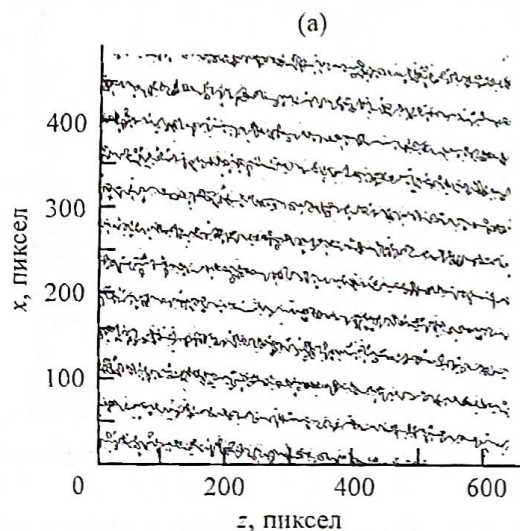


Рис. 5. Изотеты перемещений (а) и перемещение поверхности образца (б).

В эксперименте ФССИ использовали интерферометр Маха-Цендера, у которого одно из поворотных зеркал закреплено на фазосдвигающем элементе. В качестве фазосдвигающего элемента использовали пьезокерамический элемент цилиндрической формы. Разница фаз между интерферирующими лучами для каждого следующего снимка изменялась на  $90^\circ$ . В результате обработки снимков получаем циклическую фазовую картину, так называемую фазограмму (рис. 4а). На рис. 4б представлен профиль P-P циклической фазы, которая изменяется от 0 до  $4\pi$  радиан.

На рис. 5 представлены линии одинаковых перемещений (изотеты) через 0,1 мкм (а) и перемещение поверхности образца (б) с учетом знака перемещений. На рис. 3 приведено сравнение результатов исследований, полученных методами ФССИ (рис. 5а), РЭСИ (рис. 2), с теоретическими расчетами. Из рис. 3 видно, что метод ФССИ дает более точные результаты при описании процесса изгиба консоли, чем метод РЭСИ.

## Заключение

Таким образом, показана возможность использования методов РЭСИ и ФССИ для исследований процессов деформации и разрушения материалов. Представлена методика исследований поверхностных смещений на простом примере – изгиб консоли. В экспериментах достигнуты величины разрешения 0,37 мкм для РЭСИ и 0,1 мкм – для ФССИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
2. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 328 с.
3. Kim S.-W., Kang M.-G., Han G.-S. Accelerated phase-measuring algorithm of least squares for phase-shifting interferometry // Opt. Engin. 1997. V. 36. № 11. P. 3101–3105.
4. Ghiglia D.C., Pritt M.D. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software. N. Y.: Wiley-Interscience, 1998. 493 p.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
6. Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Маслов Г.С. Прикладная механика. М.: Высш. шк., 1989. 351 с.