

Исследование напряженно-деформированного состояния объектов методом структурированного освещения

Гужов В.И., Плешкевич А.А., Поздняков Г.А., Сажин И.А.
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: В статье рассматриваются способ определения деформаций объекта методом структурированного освещения.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние объекта, интерферометрия, структурированное освещение

ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационно-измерительных систем выводит промышленный контроль на новый уровень, делая его более точным, доступным, быстрым и дешёвым.

По характеру воздействия на объект различают разрушающий и неразрушающий контроль. Неразрушающий контроль позволяет определять соответствие различных агрегатов качественным и количественным показателям, не причиняя им ущерба в процессе измерений. При неразрушающем контроле изделия, в которых нет дефектов, сохраняют свои качества и свойства, несмотря на то, что на них было оказано определенное воздействие, т.е. такие изделия можно в дальнейшем использовать. Воздействием здесь может как избыточное давление, так и воздействие электромагнитных, в том числе оптических, полей.

Исследование и разработка новых методов неразрушающего контроля параметров и создание на основе этих методов информационно-измерительных систем является актуальной задачей современного приборостроения.

Среди множества методов неразрушающего контроля стоит выделить ряд методов, получивших название оптических. Эти методы основаны на использовании свойств волновых полей и позволяют проводить измерения с точностью до сотых и тысячных долей длины волны.

Если поверхность объекта является оптически гладкой, то можно использовать точные методы, такие как интерферометрия. При интерференционных измерениях в качестве эталона используется длина волны, которая является физической константой.

С появлением голографии появилась возможность проведения интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния объектов не только прозрачных и зеркальных (т.е. объектов

с оптически чистой поверхностью), но и диффузно отражающих объектов.

Деформацией называется изменение формы и размеров тела под действием некоторых нагрузок. В статье рассматривается способ определения профиля на основе проекционного метода структурированного освещения. Измеряя объект до и после воздействия на него некоторой силы можно найти деформацию объекта как разность профиля до и после нагружения.

Тензор деформации Коши-Грина в сплошной среде определяется как

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \sum_l \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \right), \quad (1)$$

где \vec{u} - вектор, описывающий смещение точки объекта в результате некоторой нагрузки. Его координаты определяются как разность между близкими координатами точек до и после деформации. Дифференцирование производится по координатам объекта до деформирования.

При малых \vec{u} можно пренебречь квадратичными слагаемыми, и пользоваться тензором деформации в виде:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (2)$$

Упругой называется деформация полностью исчезающая после снятия напряжений. Зависимость между упругой деформацией ε и напряжением σ выражается законом Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (3)$$

Поэтому, зная модуль упругости материала E и тензор деформаций можно определить и поле напряжений ε .

Голографическая интерферометрия, является одним из наиболее перспективных методов для контроля напряженно-деформированного состояния объектов [1, 2, 3]. Однако развитие методов голографической интерферометрии ограничивается необходимостью применения фотоматериалов с большим разрешением для регистрации промежуточных голограмм. Использование фотопластин связано со сложными химическими процессами при обработке. Поэтому измерительные системы на

основе этих методов используются в основном в лабораторных условиях.

Для оптически грубых поверхностей хорошо себя показывают проекционные методы и эффект Муара, так как они менее чувствительны к среде и диапазон их измерений существенно больше интерференционных методов. Однако точность этих методов значительно уступает методам голографической интерферометрии [4]. Поскольку для определения деформаций необходимо определять производные от поля смещений, использование подобных методов для исследования напряженно-деформированного состояния объектов не представлялось возможным.

Фазовые методы сканирования объектов при использовании структурированного освещения могут определить z-координату каждой точки (профиль) с большей точностью 0,01-0,005 от ширины проецируемой полосы [5, 6]. Потенциальные возможности этих методов позволяют определять поле смещений с точностью достаточной для определения деформаций.

В данной статье рассматривается возможность использования метода структурированного освещения с использованием пошагового фазового сдвига для определения деформаций. В качестве объекта рассматривается балка один конец которой закреплен, а на другой конец балки прилагается некоторая нагрузка. Этот объект хорошо изучен, поэтому можно сравнивать экспериментальные данные с теоретическими.

I. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения профиля объекта используются изображение объекта освещенного синусоидальными полосами.

В качестве объекта измерения, используем металлическую пластину из алюминиевого сплава, закрепленную с одной стороны и с нагруженной калиброванным подвешенным грузом, с другой стороны (Рис. 1).

Для определения профиля объекта используются изображение объекта освещенного синусоидальными полосами. Для формирования синусоидальных полос используется проектор BenQ MX507, для регистрации изображений фотокамера CANONEOS 600, управляемые компьютером.

На пластинку прикреплена линейка для фиксации размеров объекта (Рис. 2).

Для определения профиля по набору проецируемых полос определяется фазовое распределение поля отраженного от объекта, устраняется фазовая неоднозначность.

Для построения 3D модели профиля производится удаление фона, устранение шумов и компенсация геометрических искажений. При поиске смещений эти операции можно не

проводить, поскольку берется разность профиля по координатам объекта до деформирования.



Рис. 1. Фотография установки для регистрации профиля объектов



Рис. 2. Измеряемый объект (сверху пластина, подвергающаяся изгибу, снизу контрольная пластина)

Для получения поля смещений достаточно произвести определение попиксельной разницы восстановленной модели профиля до деформации и после.

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ СТРУКТУРИРОВАННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Фазовые методы основаны на проекции синусоидальных картин на измеряемую поверхность [5, 6, 7].

На Рис. 3 показан принцип измерения профиля рельефа.

На Рис. 4 показан набор синусоидальных картин с заданным сдвигом фаз.

На Рис. 5 показаны изображения объекта с проецируемыми полосами.

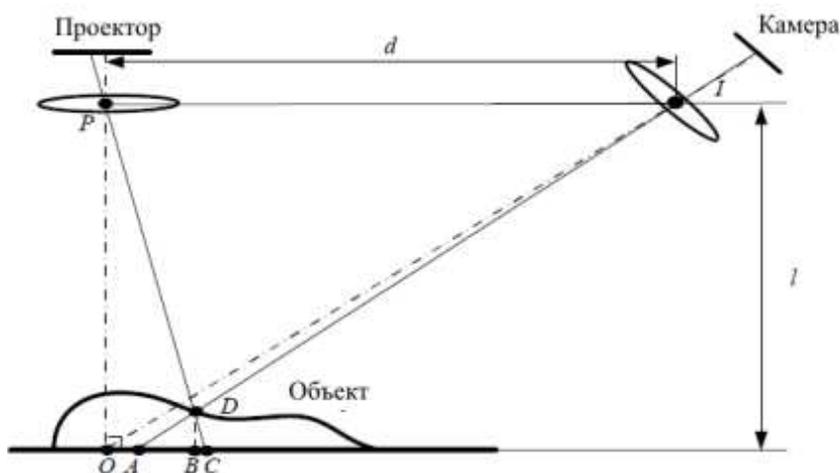


Рис. 3. Проекционный метод измерения рельефа



Рис. 4. Синусоидальные полосы с заданным сдвигом фаз

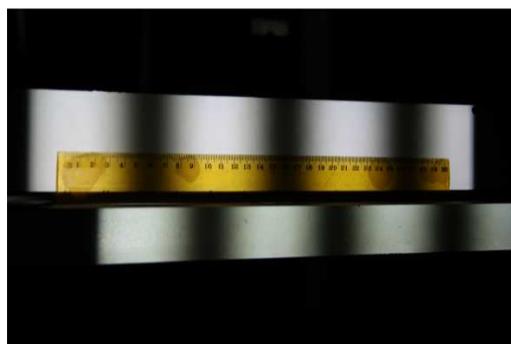


Рис. 5. Объект с проецируемыми полосами

При трех произвольных сдвигах можно получить следующее выражение для определения фазы:

$$\delta\varphi = \arctg \frac{(I_2 - I_3) \cdot \sin(\delta_1) + (I_3 - I_1) \cdot \sin(\delta_2) + (I_1 - I_2) \cdot \sin(\delta_3)}{(I_3 - I_2) \cdot \cos(\delta_1) + (I_1 - I_3) \cdot \cos(\delta_2) + (I_2 - I_1) \cdot \cos(\delta_3)} \quad (4)$$

При четырех фазовых сдвигах $\delta_1=0, \delta_2=\pi/2, \delta_3=\pi, \delta_4=3\pi/2$ получается простое выражение, которое наиболее часто встречается в литературе [8]:

$$\delta\varphi = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (5)$$

Высота рельефа описывается следующей формулой:

$$h = \beta \cdot \delta\varphi \quad (6)$$

где β - системный параметр, зависящий от параметров геометрии схемы показанной на Рис. 3.

По набору синусоидальных полос методом пошагового фазового сдвига определяется фазовое распределение поля, отраженного от объекта (Рис. 6).

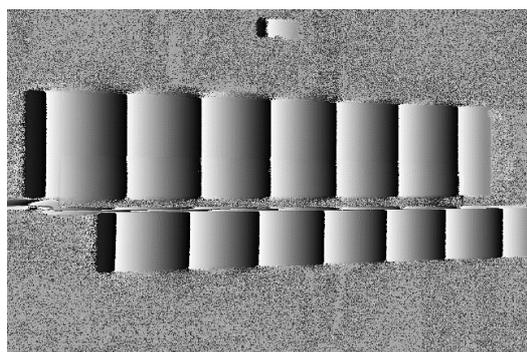


Рис. 6. Фазовые значения поля фаз

Как видно из (4) и (5) фазовое значение $\delta\varphi$ определяется с точностью до периода, т.е. через период значения повторяются. Анализируя знаки числителя и знаменателя область определения функции \arctan можно расширить от $-\pi$ до π .

Для определения полной фазы необходимо провести устранение фазовой неоднозначности.

Нами использовался метод устранения фазовой неоднозначности на основе модульной арифметики [9–12] (*G-S* - алгоритм).

В [13] приведен полностью автоматический алгоритм устранения фазовой неоднозначности на основе *G-S* алгоритма для определения рельефа объектов при проекции на поверхность объекта серии синусоидальных картин. Для этого на объект проецируются две системы полос с различными периодами. Для работы алгоритма необходимо, чтобы периоды полос соотносились как взаимно простые числа.

В нашем эксперименте использовались периоды полос с отношением 167 и 241. На *Рис. 7* показано измеренное фазовое распределение после устранения фазовой неоднозначности. На *Рис. 8* показан измеренный 3D-профиль объекта.

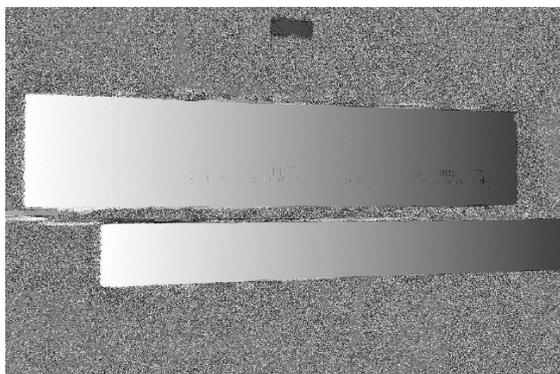


Рис. 7. Поле фаз после устранения фазовой неоднозначности

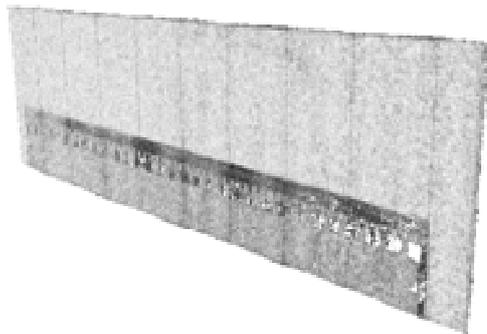


Рис. 8. Измеренный 3D-профиль объекта

Для нахождения поля смещений точек поверхности находится разность профиля двух состояний объекта: до деформации и после.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ СМЕЩЕНИЙ

Поскольку разность очень чувствительна к погрешностям получения исходных данных необходимо определить точностные характеристики метода. Наиболее важными являются следующие параметры: разрешение изображения и качество проецирования синусоидальных полос.

Искажения профиля синусоидальных полос приводит к искажению реальной восстановленной разности фаз. Этот тип искажений называют гамма искажениями.

Гамма-коррекция – коррекция нелинейности передачи уровней яркости. Цель гамма-коррекции – откорректировать входные уровни яркости таким образом, чтобы камера воспринимала эти уровни линейно. Профессиональные проекторы имеют специальный блок коррекции полутонных искажений, который может управляться программно. В трактах передачи цветного изображения гамма-коррекция осуществляется в каждом из трех каналов основных цветов. Однако большинство проекторов такой возможности не имеют. Поэтому необходимо рассмотреть специальные методы снижения нелинейных искажений [5].

В качестве передаточной функции при нелинейных искажениях чаще всего используется степенная функция в виде

$$I_{res}(x, y) = a \cdot I(x, y)^{\gamma} . \quad (7)$$

Необходимо учесть, что коэффициент гамма-коррекции меняется при изменении периода полос. Результаты построения профиля приведены на *Рис. 9*.

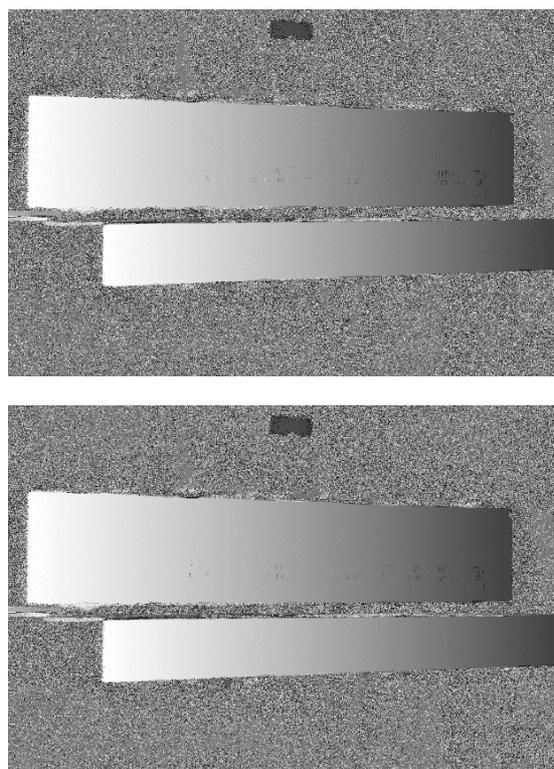


Рис. 9. Профиль пластины до и после нагрузки

Объект располагается под углом к камере. Откорректируем геометрические искажения, так чтобы каждая точка соответствовала 0,25 мм/пиксель по X координате. Из *Рис. 10* видно, что график по X координате имеет все же некоторые искажения и при использовании

гамма-коррекции, обусловленное искажением
профиля

синусоидальных полос.

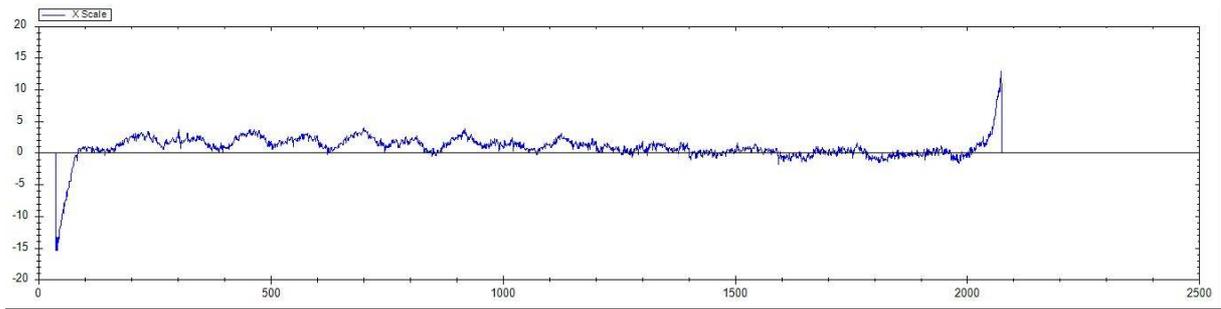


Рис. 10. График профиля по X координате

Этот график имеет шум синусоидального характера, максимальное значение смещения от среднего значения не превышает 0,8% от ширины полосы.

Для визуальной оценки возьмем усредненное значение смещения по оси X и выведем график.

Также выведем график производных (Рис. 12).

Поле смещений получаем как разность профиля до и после нагрузки (Рис. 11).



Рис. 11. Поле смещений пластины

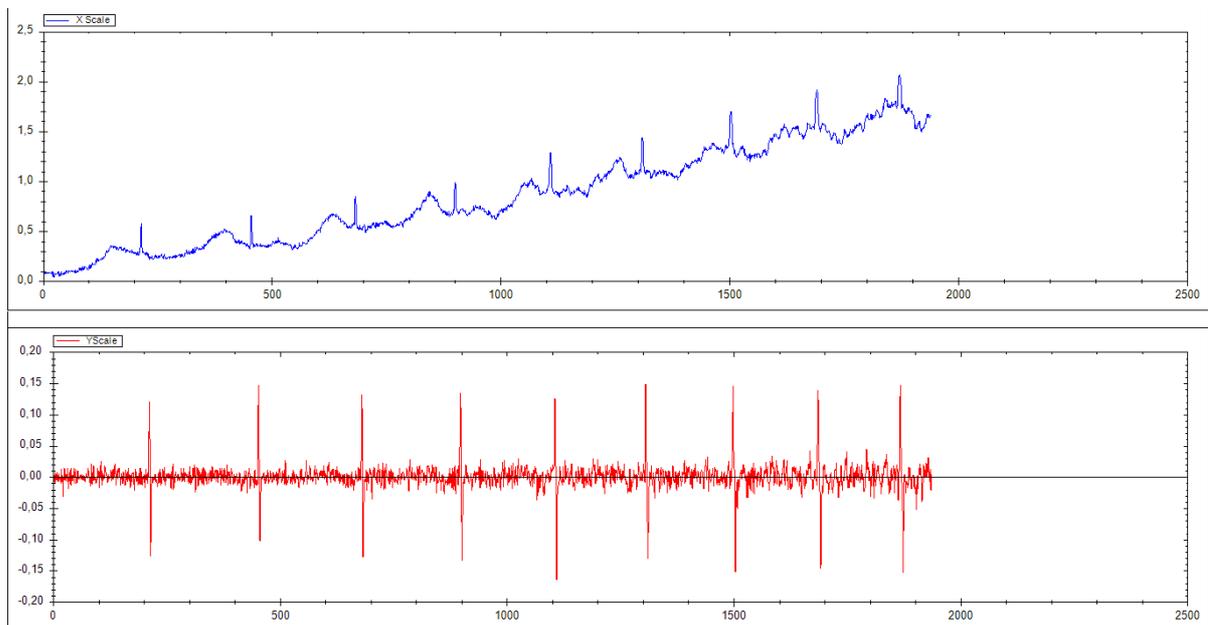


Рис. 12. График смещений (сверху) и график производных (снизу)

Как видно из рис. 12 график смещения имеет тренд в виде параболы с зашумлением в виде

синусоиды. Выявим чистый тренд путем аппроксимации данных (рис. 13).

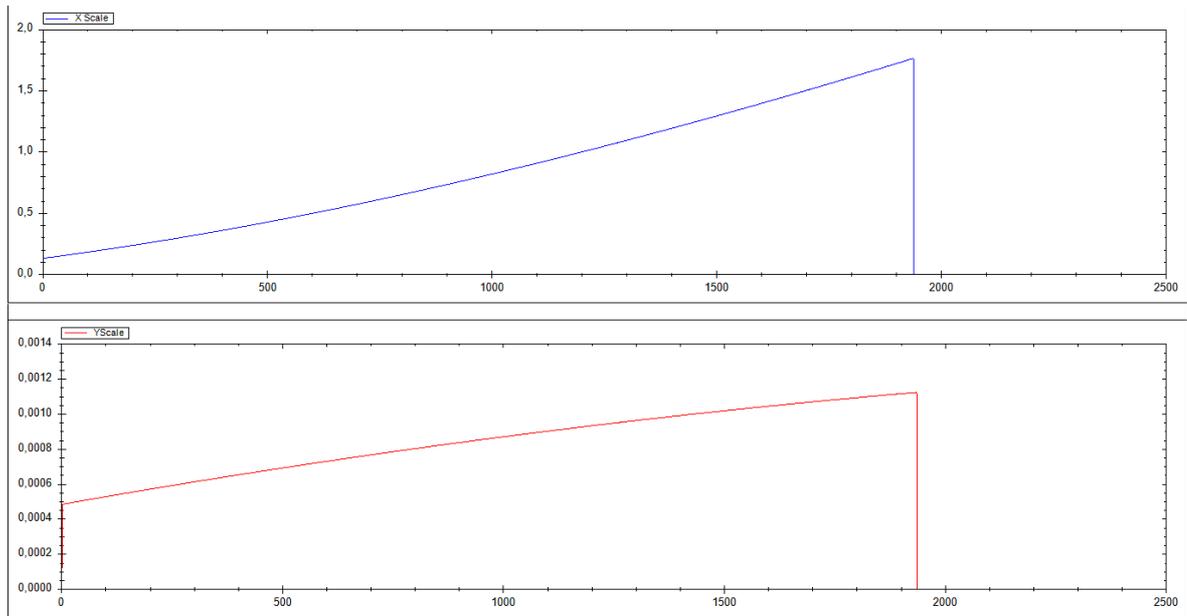


Рис. 13. Аппроксимация графика смещений (сверху) и графика деформаций (снизу)

Поскольку результаты измерений имеют достаточно большую погрешность, которая требует использования аппроксимации данных для получения производных, сравним их для оценки достоверности с результатами теоретических исследований.

IV. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ

Рассчитаем теоретическое отклонение балки при изгибе.

Элемент профиля прессованного из алюминиевых сплавов (Рис. 14) имеет следующие размеры: Высота $h = 65 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$, толщина профиля $\Delta = 1.2 \text{ мм}$. Модуль упругости материала балки $E = 7 \cdot 10^9 \text{ (Па)}$. Длина $L = 0.5 \text{ м}$. Момент инерции сечения $I = 5.194 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^4\text{)}$, величина сосредоточенной силы, приложенной на конце балки равна 4.5 (Н) , момент инерции сечения $I = 5.194 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^4\text{)}$.

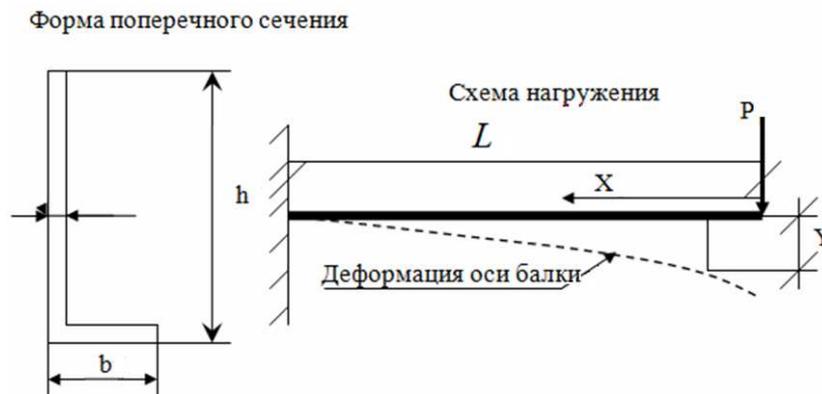


Рис. 14. Схема нагружения и форма сечения балки

Расчетное соотношения для вычисления величины прогиба балки: 1227,0825

$$Y = \left(\frac{P \cdot L^3}{6 \cdot E \cdot I} \right) (\xi^3 - 3\xi + 2) \text{ (м)}, \quad (8)$$

где $\xi = \frac{x}{L}$ - безразмерная продольная координата (Рис. 14), Y - прогиб балки.

На Рис. 15 показано сравнение результатов теоретических исследований с экспериментальными.

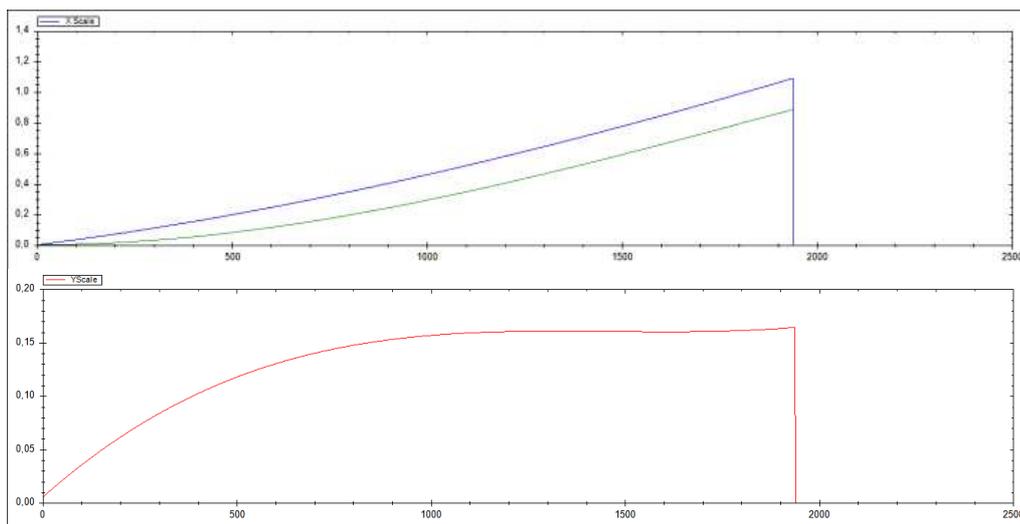


Рис. 15. График смещений (сверху) и графика деформаций (снизу)

Теоретическое отклонение балки:

- При $\xi = 20\%$, что соответствует правой освещенной точке: $Y = 1,804$;
- При $\xi = 90\%$, что соответствует левой освещенной точке: $Y = 0,373$;

Фактическое отклонения балки, измеренное микрометром:

- Отклонение в правой освещенной точке: $1,8 \text{ мм}$
- Отклонение в левой освещенной точке: $0,4 \text{ мм}$

На рис. 15 синим цветом показаны результаты измерений, зеленым – расчетные величины. Из графика видно, что левая часть измеренных значений графика начинается со значений $\sim 0,15 \text{ мм}$ и правая $\sim 1,7 \text{ мм}$. Это вызвано начальным сдвигом проецируемых синусоидальных полос. Однако тренд изгиба пластины соответствует ожидаемым результатам. Это говорит о соответствии измеренных результатов теоретических данным.

ВЫВОДЫ

В работе проведена попытка исследовать напряженно-деформированное состояние объекта с помощью методов структурированного освещения на примере изгиба балки с закрепленной концом.

Показано, что результаты экспериментальных исследований соответствуют теоретическим. Это подтверждает возможность использования метода для изучения напряженно-деформированного состояния объекта.

Для увеличения точностных характеристик метода необходимо исследовать и разработать методы проекции полос полностью соответствующих синусоидальным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект «Разработка методов сверхразрешения в

цифровой голографической интерферометрии» (Грант № 16-08-00565).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Борыняк Л.А., Герасимов С.И., Жилкин В.А. Практические способы записи и расшифровки интерферограмм, обеспечивающих необходимую точность определения компонент тензора деформаций. Автометрия. 1982. №1.
- [2] Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. М.: Машиностроение, 1984. 176 с.
- [3] Герасимов С.И., Гужов В.И., Жилкин В.А., Козачок А.Г. Автоматизация обработки интерференционных картин при исследовании полей деформаций. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1985. Т. 51. № 4. С. 77–80.
- [4] Гужов В.И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 82 с.
- [5] Гужов В.И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Фазовые методы. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016.-83с.
- [6] Гужов В.И., Ильиных С.П., Уберт А.И. Проекционный метод измерения рельефа. Научный вестник НГТУ. – 2012. – №1(46) – С. 23–28.
- [7] Guan C., Hassebrook L., and Lau D. Composite structured light pattern for three-dimensional video. Opt. Express 11, 406-417 (2003).
- [8] Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic system and principles. Laser Focus. – 1982. – P.65–67.
- [9] Gushov V.I., Solodkin Yu.N. Automatic Processing of Fringe Patterns in Integer Interferometers// Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol.14, Issues 4–5. P.311–324.
- [10] Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах// Автометрия.- 1992. – №6. – С.24–30. Также в: Gushov V.I., Solodkin Yu.N. The accuracy of determining the total phase difference in integer interferometers//

- Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 1992. – No.6. – P.23–28.
- [11] Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Использование свойств целых чисел для расшифровки интерферограмм. Оптика и спектроскопия. 1988. т.65. вып.5. С.1123-1128. (Guzhov V.I., Solodkin Yu.N. Using integer properties for interferogram analysis. Optica&Spectroscopia 65 (5) (1988) 1123-1228)
- [12] Гужов В.И., Ильиных С.П., Кузнецов Р.А., Вагизов А.Р. Решение проблемы фазовой неоднозначности методом целочисленной интерферометрии. Автотриметрия. – 2013. – Т. 49, №2.-С. 85-91.(V.I. Guzhov, S.P. Il'nykh, R.A. Kuznetsov, A.R. Vagizov /Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. March 2013, Volume 49, Issue 2, pp 178-183)
- [13] В.И. Гужов, А.А. Плешкевич. Устранение фазовой неоднозначности с использованием модулярной арифметики в системах измерения профиля объектов. НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 1 (19). – С. 58–64.
- [7] Guan C., Hassebrook L., and Lau D. Composite structured light pattern for three-dimensional video. Opt. Express 11, 406-417 (2003).
- [8] Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic system and principles. Laser Focus. – 1982. – P.65–67.
- [9] V.I. Guzhov, Yu.N. Solodkin Automatic Processing of Fringe Patterns in Integer Interferometers// Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol.14, Issues 4–5. P.311–324.
- [10] Guzhov V.I., Solodkin Yu.N. The accuracy of determining the total phase difference in integer interferometers// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 1992. – No.6. – P.23–28.
- [11] Guzhov V.I., Solodkin Ju.N. Ispol'zovanie svojstv celyh chisel dlja rasshifrovki interferogramm. Optika i spektroskopija. 1988. t.65. vyp.5. S.1123-1128. (Guzhov V.I., Solodkin Yu.N. Using integer properties for interferogram analysis. Optica&Spectroscopia 65 (5) (1988) 1123-1228)
- [12] Guzhov V.I., Il'nyh S.P., Kuznetsov R.A., Vagizov A.R. Reshenie problemy fazovoj neodnoznachnosti metodom celochislennoj interferometrii. Avtometrija. – 2013. – Т. 49, №2.-С. 85-91.(V.I. Guzhov, S.P. Il'nykh, R.A. Kuznetsov, A.R. Vagizov /Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. March 2013, Volume 49, Issue 2, pp 178-183)
- [13] Guzhov V.I., Pleshkevich A.A. Ustranenie fazovoj neodnoznachnosti s ispol'zovaniem moduljarnoj arifmetiki v sistemah izmerenija profilja ob'ektov. NGTU, Novosibirsk, Rossija. Avtomatika i programnaja inzhenerija. – 2017. – № 1 (19). – С. 58–64.

Measuring the Stress-Strain State of Objects by the Method of Structured Illumination

V.I. GUZHOV, A.A. PLESHKEVICH,
G.A. POZDNYAKOV, I.A. SAZHIN

Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia

Abstract: The article deals with the method of determining the deformations of an object using the method of structured illumination.

Key words: Stress-strain state of the object, interferometry, structured lighting

REFERENCES

- [1] Borynjak L.A., Gerasimov S.I., Zhilkin V.A. Prakticheskie sposoby zapisi i rasshifrovki interferogramm, obespechivajushih neobhodimuju tochnost' opredelenija komponent tenzora deformacij. Avtometrija. 1982. №1.
- [2] Kozachok A.G. Golograficheskie metody issledovanija v jeksperimental'noj mehanike. M.: Mashinostroenie, 1984. 176 s.
- [3] Gerasimov S.I., Guzhov V.I., Zhilkin V.A., Kozachok A.G. Avtomatizacija obrabotki interferencionnyh kartin pri issledovanii polej deformacij. Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 1985. T. 51. № 4. S. 77–80.
- [4] Guzhov V.I. Metody izmerenija 3D-profilja ob'ektov. Kontaktnye, trianguljacionnye sistemy i metody strukturirovannogo osveshhenija. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2015. 82 s.
- [5] Guzhov V.I. Metody izmerenija 3D-profilja ob'ektov. Fazovye metody. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016.-83s.
- [6] Guzhov V.I., Il'nyh S.P., Ubert A.I. Proekcionnyj metod izmerenija rel'efa. Nauchnyj vestnik NGTU. – 2012. – №1(46) – S. 23–28.



Владимир Гужов – профессор кафедры ССОД Новосибирского Государственного Технического университета, доктор технических наук. Является автором более 200 научных работ. Область научных интересов: высокоточные интерференционные измерения, безошибочные вычисления, теория чисел.
E-mail: vig@nstu.edu.ru



Александр Плешкевич – магистрант 2 курса каф. ВТНГТУ.
E-mail: plas42@mail.ru



Григорий Поздняков – магистрант 2 курса каф. ССОД НГТУ.
E-mail: worlaff@gmail.com



Игорь Сажин – доцент кафедры технической теплофизики Новосибирского Государственного Технического университета, кандидат технических наук. Является автором более 30 научных работ. Область научных интересов: теплофизика газожидкостных систем.
E-mail: sajinia@ngs.ru