

А. Г. ЛЕВИН, М. Н. ОСИПОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ОБЪЕДИНЕННЫМ МЕТОДОМ МУАРА И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В настоящее время среди оптических методов исследования смещений и деформаций особое место занимают методы когерентной оптики, в частности, метод спекл-интерферометрии, а также метод муаровых полос [1-7]. Оба этих метода, в основном, применяются раздельно и удачно дополняют друг друга. В работах [4-7] представлены результаты по объединению методов муара и спекл-интерферометрии, что позволяет производить измерения меньших размеров спеклов, а также выделять компоненты тензора деформаций. Однако, из-за наличия щелевых диафрагм, яркость регистрируемой спекл-структуры невелика. Это приводит к необходимости использовать мощные лазеры и высокочувствительные материалы при регистрации спекл-структур.

В данной работе, на основе объединения метода муара и спекл-интерферометрии, предлагается новый способ определения поля деформаций, который позволяет увеличить точность и пределы измерений.

В настоящее время среди оптических методов исследования смещений и деформаций особое место занимают методы голографии, в частности, метод спекл-интерферометрии, а также метод муаровых полос. Оба этих метода применяются раздельно и удачно дополняют друг друга. Объединения их позволяет увеличить пределы измерения и точность определения плоских деформаций.

Регистрация спекл-структуры диффузного объекта производилась по стандартной схеме методом двух экспозиций [1]. На одной и той же фотопластинке регистрировалось спекл-изображение объекта в нагруженном и ненагруженном состоянии.

При расшировке спекл-интерферограмм методом полос Юнга нерасширенным лучом лазера освещается определенная точка на негативном изображении объекта со спекл-структурой, при этом на экране образуются интерференционные полосы, которые характеризуют смещение в данной точке объекта. Распределение интенсивности в восстановленной волне в плоскости экрана, расположенного в зоне Фраунгофера, имеет вид

$$J = A^2 \cos^2 [\pi M (\lambda d)^{-1} (ux + vy)] \quad (1)$$

где коэффициент A^2 — описывает равномерный фон и образование спекл-картины, M — увеличение оптической системы при регистрации спекл-интерферограммы, λ — длина волны излучения лазера, d — расстояние от спекл-интерферограммы до экрана при восстановлении, u, v — компоненты смещения осей x и y соответственно, для произвольно выбранной системы координат в плоскости объекта. При таком распределении величина смещения $L = u + v$ в данной точке определяется следующим образом [4]:

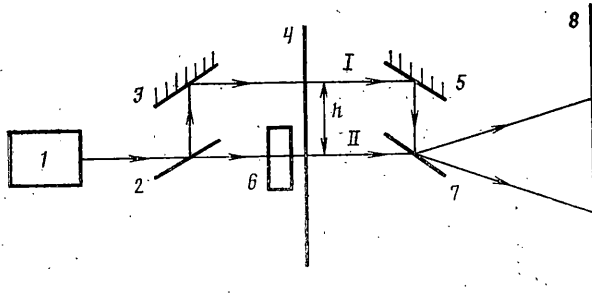
$$L = \lambda d / (MP) \quad (2)$$

где P — ширина полос Юнга.

Для реализации предлагаемого способа расшировки спекл-интерферограмм совмещение метода полос Юнга и муара, восстановление спекл-интерферограммы осуществляется на установке, оптическая схема которой изображена на фиг. 1 (1 — источник когерентного излучения; 2, 7 — светоделители; 3, 5 — зеркала; 4 — спекл-интерферограмма; 6 — полуволновая пластинка $\lambda/2$; 8 — экран; I, II — первый и второй лучи лазера; h — расстояние между двумя исследуемыми точками (база)).

При расшировке спекл-интерферограмма освещается двумя узкими лучами лазера, которые высвечивают две исследуемые точки, находящиеся на расстоянии h друг от друга. В один из этих пучков помещается полуволновая пластинка $\lambda/2$, которая поворачивает плоскость поляризации этого пучка на 90° [2]. В результате этого, после прохождения спекл-интерферограммы, сведенные лучи не интерферируют между собой, а складываются по интенсивности. Распределение интенсивности света от каждой высвечиваемой точки, дифрагированного на спекл-интерферограмме, в плоскости экрана определяется выражением (1). Информация о смещении в каждой высвечиваемой точке на экране представлена в виде системы полос Юнга, выгнутых в направлении перпендикулярном линии смещения в соответствующей точке на объекте. Сведенные на экране две системы полос от каждой точки геометрически интерферируют между собой, образуя муаровую картину. Шаг полос муара определяется через шаг полос Юнга от каждой высвечиваемой точки и углом между ними [3]:

$$P_3 = P_1 P_2 [P_1^2 \sin^2 \theta + (P_1 \cos \theta - P_2)^2]^{-1/2} \quad (3)$$



Фиг. 1

где P_1 и P_2 – шаг полос первой и второй системы полос Юнга; θ – угол между ними; P_3 – шаг полос муара. Из выражения (2) следует

$$P_1 = \lambda d / (ML_1), \quad P_2 = \lambda d / (ML_2) \quad (4)$$

где L_1 и L_2 – смещения в первой и второй высвечиваемой точке. Подставляя (4) в (3), получаем

$$P_3 = \lambda d / [M(L_2 - L_1)] = \lambda d / (M\Delta L)$$

Угол наклона γ линий муара к линиям первой системы полос Юнга определяется следующим выражением [3]: $\sin \gamma = P_1 \sin \theta [P_1^2 \sin^2 \theta + (P_1 \cos \theta - P_2)^2]^{-1/2}$.

При вычитании векторов смещений L_2 и L_1 , направление которых перпендикулярно линиям второй и первой системам полос Юнга соответственно [1], вектор разности смещений ΔL составляет с вектором смещений L_1 , угол равный γ , т. е. направление вектора разности смещений ΔL перпендикулярно линиям полос муара. Таким образом, картина полос муара позволяет определить величину и направление разности смещений в двух высвечиваемых точках.

Основные ограничения применимости данного метода связаны, во-первых, с процессом образования спекл-структур при записи и восстановлении спекл-интерферограмм, во-вторых, с процессом образования полос муара. Используя соотношения, определяющие размеры спекл-структур, полос Юнга и полос муара [1, 3], получим следующее ограничение в пределах которого можно проводить измерение величины разности смещений ΔL : $f\lambda a^{-1}(1+M^{-1}) \leq \Delta L \leq r/(1,22nM)$, где f – фокусное расстояние объектива, регистрирующего спекл-интерферограммы; $2a$ – диаметр входного зрачка объектива, $2r$ – диаметр нерасширенного лазерного луча при восстановлении спекл-интерферограмм, n – величина равная отношению ширины полосы Юнга к размеру спекла, которая выбирается из тех соображений, чтобы полосы Юнга были разрешимы на фоне спекл-структуры.

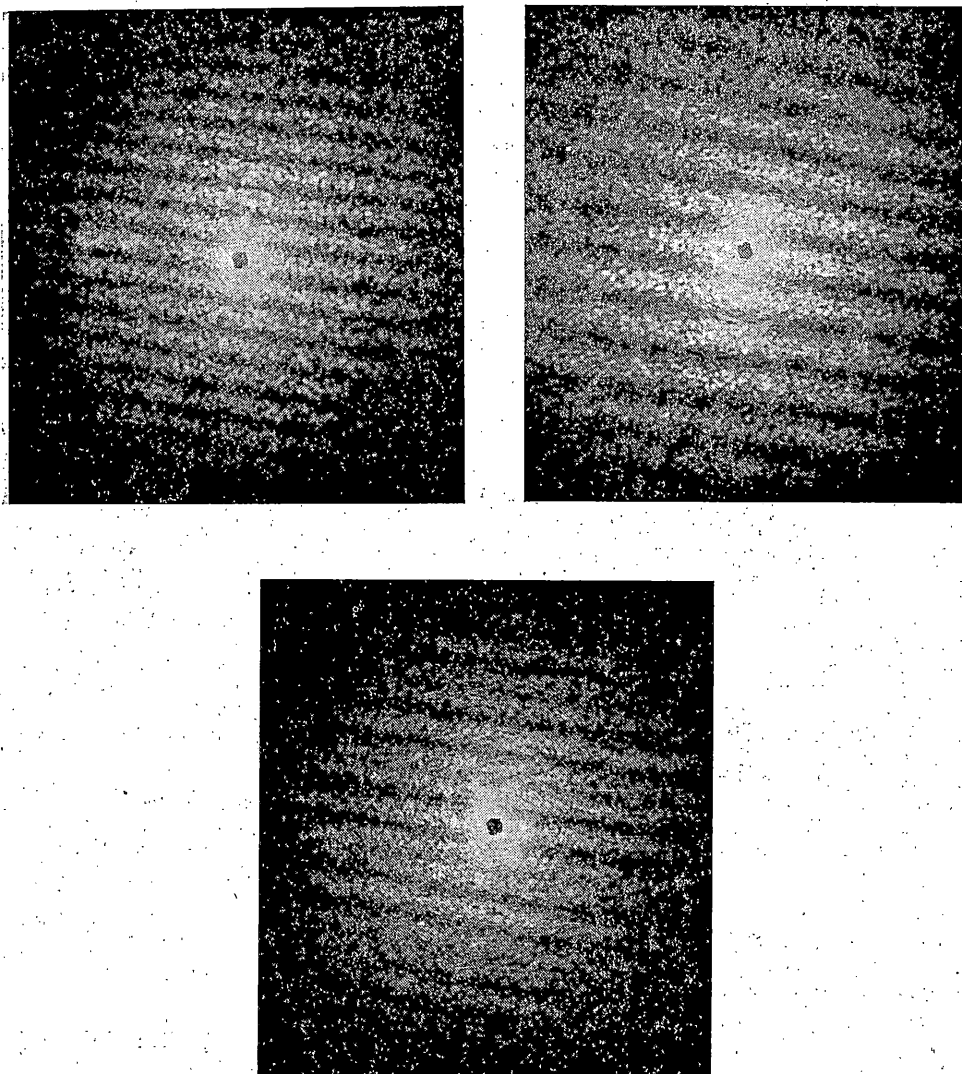
Рассмотрим методику определения компонент деформации по данному способу. Введем прямоугольную систему координат так, чтобы ось y была параллельна линии базы h , соединяющей две высвечиваемые точки, измеряем по муаровой картине угол наклона φ полос муара к оси x и определяем проекции разности смещений ΔL_x и ΔL_y в данных точках на оси координат. Разность смещений вдоль оси y совпадает по направлению с базой h для исследуемых точек, поэтому отношение величины ΔL_y к величине базы h дает относительное удлинение или деформацию в направлении оси y :

$$\Delta L_y / h = (\Delta L / h) \cos \varphi = dv / dy = \epsilon_{yy} \quad (5)$$

Отношение величины ΔL_x к величине базы h дает тангенс угла наклона вектора разности смещений ΔL к оси y :

$$\Delta L_x / h = (\Delta L / h) \sin \varphi = du / dy \quad (6)$$

Для определения деформации в направлении оси x и компоненты dv/dx , луч I в схеме (фиг. 1) поворачивает вокруг луча II на 90° и высвечивает новую точку III. При этом величина базы h может меняться в зависимости от градиента смещений, диаметра лазерного луча и требуемой точности определения деформаций. Для новой



Фиг. 2

пары точек (I, III) повторяем аналогичные рассуждения пары точек (I, II) и определяем недостающие компоненты тензора деформаций

$$\Delta L_x'/h' = (\Delta L'/h') \sin \varphi' = du/dx = \varepsilon_{xx} \quad (7)$$

$$\Delta L_y'/h' = (\Delta L'/h') \cos \varphi' = dv/dx \quad (8)$$

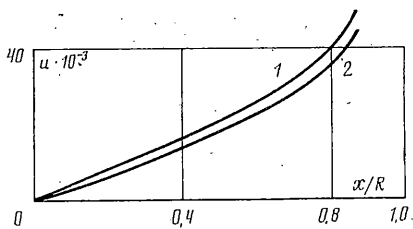
где $\Delta L'$ и φ' — разность смещений в точках I, III и угол наклона полос нового муара к оси x соответственно.

Объединение выражений (5–8) полностью определяет тензор деформаций в точке прохождения второго (II) луча:

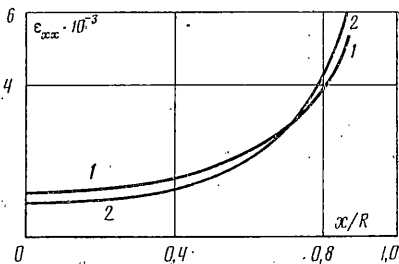
$$\varepsilon_{xx} = (\Delta L'/h') \sin \varphi', \quad \varepsilon_{yy} = (\Delta L/h) \cos \varphi \quad (9)$$

$$\varepsilon_{xy} = 1/2 [(\Delta L/h) \sin \varphi + (\Delta L'/h') \cos \varphi']$$

Производя поточечное сканирование по всему спекл-изображению объекта определяем все поле деформаций плоского объекта.



Фиг. 3



Фиг. 4

Для подтверждения предлагаемого способа был проведен эксперимент по определению поля перемещений и деформаций в круговом диске, находящемся под действием сосредоточенных сил, приложенных вдоль диаметра. На фиг. 2 а, б представлены фотографии полос Юнга, восстановленных со спекл-интерферограммы исследуемой модели первым и вторым нерасширенным, лазерным лучом соответственно. На фиг. 2 в представлена фотография полос муара полученных при наложении двух систем полос Юнга. На фиг. 3, 4 представлены результаты расшифровки спекл-интерферограмм нагруженного кругового диска по предлагаемому способу. На фиг. 3 представлены экспериментальные (кривая 1) и теоретические [8] (кривая 2) значения перемещений определенные по диаметру вдоль которого приложена нагрузка. Вдоль оси ординат отложена величина смещения в миллиметрах, вдоль оси абсцисс отложена безразмерная величина — отношение координаты исследуемой точки к радиусу диска. На фиг. 4 представлены вдоль этого же диаметра экспериментальные (кривая 1) и теоретические (кривая 2) значения компоненты деформации ϵ_{xx} .

В результате экспериментальных исследований выявлено, что отличие экспериментальных и расчетных значений перемещений и деформаций составляет не более 10%.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определять поле деформаций, без дополнительных численных расчетов, что приводит к увеличению точности измерений и сокращению времени обработки с сохранением всех достоинств методов муара и спекл-интерферометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
2. Калигеевский Н. И. Волновая оптика. М.: Наука, 1971. 376 с.
3. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара. М.: Мир, 1974. 359 с.
4. Duffy D. E. Moiré gauging of in-plane displacement using double aperture imaging // Appl. Opt. 1972. V. 11. № 8. P. 1778–1781.
5. Волков И. В. Применение метода спекл-голографии двойной апертуры для выделения компонента деформации вблизи концентраторов напряжений. Уч. зап. ЦАГИ. 1976. Т. 7. С. 168–173.
6. Власов Н. Г., Смирнов С. Н., Пресняков Ю. П. Выделение отдельных компонентов вектора деформации в интерференционных измерениях // ЖТФ. 1973. Т. 43. № 5. С. 1104–1106.
7. Hung Y. Y., Rowlands R. E., Daniel I. M. Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge // Appl. Opt. 1975. V. 14. No. 3. P. 618–622.
8. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.

Куйбышев .

Поступила в редакцию
8.VI.1988