

Р. Родригес-Вера, А. Мартинес, Дж. А. Райяс, Х. Дж. Пуга

(Туанахуато, Мексика)

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МУАРОВЫХ ПОЛОС*

Произведена оценка вклада перемещений, нормальных к поверхности объекта, в картину изменения фазы интерференционных полос, получаемых методами муара и спекл-интерферометрии при определении деформаций в плоскости объекта. Анализ выполнен на основе исследования неопределенности (uncertainty – неопределенность, зарубежный стандарт погрешности) вектора чувствительности, связанного с положением точки на поверхности объекта. Выполнен численный анализ изменения вектора чувствительности как функции небольших смещений ортогонально поверхности объекта и формы его поверхности. В результате показано, что пренебрежение этими факторами может привести к серьезным ошибкам измерения и что при использовании неколлимированного освещения в интерферометрии муаровых полос с решеткой можно до начала измерения оценить его возможную ошибку. Предложена обобщенная функция коррекции картины изменения фазы для любой интерферометрической схемы, чувствительной к деформациям в плоскости, при использовании освещения сферической волной.

Введение. Оптический неразрушающий контроль широко применяется для анализа дефектов инженерных сооружений. Ценность методов такого контроля заключается в получении с их помощью информации по всему полю, кроме того, можно с высокой точностью определить микросмещения, обусловленные различными нагрузками. Среди наиболее широко используемых методов неразрушающего контроля отметим голографические, интерферометрию муаровых полос и спекл-интерферометрию. Можно создать устройства для измерения смещений как в плоскости исследуемой поверхности, так и ортогонально этой плоскости. Обычно при измерении смещений в плоскости в спекл-интерферометрии и методе муаровых полос для освещения объектов используют коллимированные пучки. Однако если для освещения применяются сферические волны, то при обработке интерферограмм возникает ряд ошибок. Это обусловлено вкладом в интерферограмму сдвигов, ортогональных плоскости объекта. Такие погрешности возникают, когда исследуемый объект имеет значительные размеры.

* Работа выполнена при поддержке Совета по науке и технологиям Муниципалитета Туанахуато (CONCYTEG) (грант № 03-04-K118-039 Приложение 04) и Национального совета по науке и технологиям (CONACYT) (грант № 33106-E).

В интерферометрии муаровых полос применяют эталоны в виде решетки с тонкой дифракционной структурой (как правило, с шагом 1200 лин./мм). Решетки обычно экспонируются в фоторезист. Однако анализ инженерных сооружений с неполированной поверхностью показал, что шероховатость при сферическом освещении существенным образом влияет на результат. Для такого случая авторами впервые проанализирована видность муаровых полос в процессе изготовления решетки как функция шероховатости поверхности объекта.

Оптические методы голографии, муаровых полос и спекл-интерферометрии [1–3] являются наиболее распространенными экспериментальными методами неразрушающего контроля деформаций объектов в диапазоне от долей длины волны до нескольких микрон. Эти методы являются бесконтактными, позволяют получать данные по всему контролируемому полю и обеспечивают высокую точность при измерении смещений, вызванных деформациями, а также могут быть успешно использованы для измерения смещений как в плоскости исследуемой поверхности, так и ортогонально к ней. При измерении перемещений в плоскости объекта обычно находят применение модель с двумя симметричными коллимированными пучками, освещающими исследуемую поверхность. Такая модель применяется для анализа всех точек поверхности и обеспечивает соответствующее отображение реальной картины деформаций. Однако при сферических волновых фронтах эта модель оказывается справедливой лишь вблизи центра освещенной поверхности.

Методы муаровых полос, электронной спекл-интерферометрии и голографической интерферометрии, использующие неколлимированные пучки, описаны в [4–8]. Разработан метод анализа aberrаций третьего порядка для интерферометра муаровых полос с решеткой, работающего в схеме с неколлимированным освещением [4].

В работе [5] рассчитана ошибка в определении смещения для различных интерференционных схем при освещении сферической волной. Показано, что при этом возникают ошибки измерения перемещений в плоскости. Данное исследование основано на геометрическом подходе. Проанализирована зависимость изменения вектора чувствительности от углов освещения и наблюдения, а также от формы и положения объекта, но не исследовались системы электронной спекл-интерферометрии, фиксирующие деформации в плоскости. В работе [6] использовался векторный подход, подтверждающий зависимость полного изменения фазы картины полос $\Delta\phi$ от длины волны λ , единичного вектора освещения в случае чувствительности прибора к деформациям в плоскости или от векторов освещения и наблюдения в случае чувствительности прибора к деформациям ортогонально плоскости. Для системы, чувствительной к деформациям в плоскости, экспериментальная установка [6] использует два зеркала при получении двух сферических волновых фронтов освещения. В этом случае возникает одно математическое соображение: если ввести линейную функцию, то можно поточечно рассчитать поверхность зеркал и ошибку в картине изменения фазы. Общая модель расчета и коррекции ошибки определения смещений в электронной спекл-интерферометрии была предложена в [7]. В работе [8] описан метод получения голограмм с помощью точечного источника. Эта работа является, по существу, повторением эксперимента Юнга, поскольку при любом смещении голограммы возникают два сферических пучка, соответствующие точечным виртуальному и реальному источникам. Авторы описали некоторые приме-

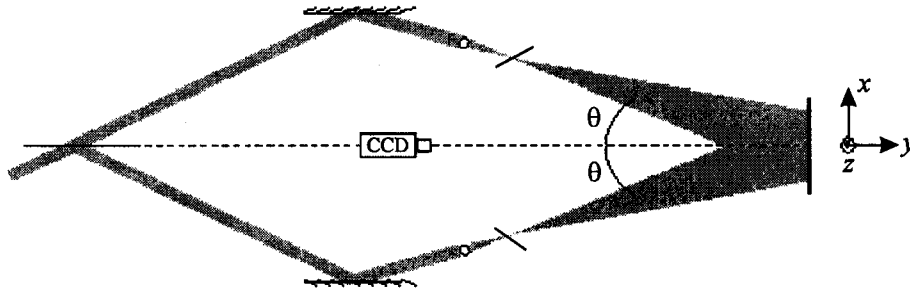


Рис. 1. Экспериментальная схема интерферометрии муаровых полос для измерений в плоскости

нения такой схемы, но не привели ни процедуры калибровки системы, ни анализа ее чувствительности.

В предлагаемой работе дан анализ формирования интерференционных муаровых полос при освещении поверхности объекта сферической волной (рис. 1). Численный анализ показал, что благодаря такому освещению схема измерения оказывается чувствительной к деформациям в плоскости и обладает небольшой чувствительностью в направлении, ортогональном поверхности объекта. Рассчитана неопределенность (в процентах) для каждой из компонент вектора смещения. При расчете использован векторный подход, не требующий дополнительных упрощений. Поскольку векторы чувствительности определяют направления компонент смещения, измеряемых при максимальной чувствительности, то они могут быть определены на стадии планирования эксперимента. По результатам вычисления можно установить источники ошибок и точность измерения смещений. Предложена функция коррекции картины изменения фазы, обусловленного смещением, ортогональным поверхности. Она необходима при оценке смещения в плоскости. Интерферометрия муаровых полос использует решетки с тонкой дифракционной структурой (как правило, с шагом 1200 лин./мм). Для анализа инженерных сооружений, имеющих неполированную поверхность, шероховатость при сферическом освещении является важнейшим из определяемых параметров. Поэтому в процессе изготовления решетки сначала анализируется видность муаровой картины в зависимости от шероховатости поверхности объекта.

Вектор чувствительности и анализ его неопределенности. В двухлучевом интерферометре пучок когерентного лазерного излучения расщепляется на два расходящихся пучка, используемых для освещения исследуемой поверхности (рис. 2). Соотношение между измеренной разностью фаз $\Delta\varphi(x, y)$ и вектором смещения $\mathbf{d} = \mathbf{d}(u, v, w)$ в точке $P = P(x, y)$ представляется уравнением

$$\Delta\varphi(P) = \mathbf{d}(P)\mathbf{e}(P), \quad (1)$$

где $\mathbf{e}(P)$ – вектор чувствительности, определяемый уравнением

$$\mathbf{e}(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{n}_1(P) - \hat{n}_2(P)]. \quad (2)$$

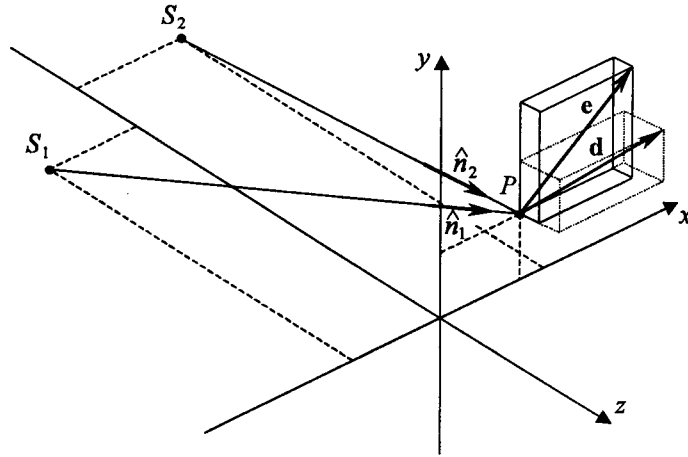


Рис. 2. Схема определения вектора чувствительности

Здесь \hat{n}_1 и \hat{n}_2 — единичные векторы, описывающие векторные характеристики освещающих пучков, выходящих из S_1 и S_2 . Следует заметить, что \hat{n}_1 и \hat{n}_2 меняют свое направление в каждой из точек исследуемой поверхности. Из уравнения (2) видно, что чувствительность схемы не зависит от направления наблюдения. Компоненты вектора чувствительности рассчитываются по формулам:

$$e_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{x_p - x_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{x_p - x_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right], \quad (3a)$$

$$e_y = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{y_p - y_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{y_p - y_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right], \quad (36)$$

$$e_z = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{z_p - z_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{z_p - z_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right]$$

$$\left. - \frac{z_p - z_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right], \quad (3в)$$

в которых модуль вектора чувствительности определяется уравнением

$$|\mathbf{e}(P)| = (e_x^2 + e_y^2 + e_z^2)^{1/2}, \quad (4)$$

а квадрат модуля представлен как

$$|\mathbf{e}(P)|^2 = e_x^2 + e_y^2 + e_z^2. \quad (5)$$

Если взять $|\mathbf{e}(P)|^2$ в качестве референтного значения для любой из соответствующих точек $P(x, y)$ и разделить на него каждый член e_x^2, e_y^2, e_z^2 уравнения (5), а затем умножить на 100:

$$\frac{|\mathbf{e}(P)|^2}{|\mathbf{e}(P)|^2} \cdot 100 = \frac{e_x^2}{|\mathbf{e}(P)|^2} \cdot 100 + \frac{e_y^2}{|\mathbf{e}(P)|^2} \cdot 100 + \frac{e_z^2}{|\mathbf{e}(P)|^2} \cdot 100, \quad (6)$$

тогда можно определить нормированные коэффициенты чувствительности в виде

$$S_x = \left(\frac{e_x^2}{|\mathbf{e}(P)|^2} \right) \cdot 100, \quad (7а)$$

$$S_y = \left(\frac{e_y^2}{|\mathbf{e}(P)|^2} \right) \cdot 100, \quad (7б)$$

$$S_z = \left(\frac{e_z^2}{|\mathbf{e}(P)|^2} \right) \cdot 100. \quad (7в)$$

Эти коэффициенты должны быть определены на стадии планирования эксперимента по интерферометрическому измерению. Число переменных, входящих в уравнение расчета смещения, велико. Для количественной оценки неопределенности можно первоначально проанализировать простейший случай: рассчитать трехмерное перемещение без деформации. Поскольку каждая переменная должна быть определена экспериментально, то ошибка каждой из них входит в смещение

$$dx = \Delta\varphi_x / e_x, \quad (8а)$$

$$dy = \Delta\varphi_y / e_y, \quad (8б)$$

$$dz = \Delta\varphi_z / e_z. \quad (8в)$$

Используя представления о вычислении значения неопределенности перемещения [9] и полагая $U_\varphi = 0$, можно оценить неопределенности вносимого смещения U_{dx} , U_{dy} , U_{dz} по формулам:

$$U_{dx} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial dx}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (9а)$$

$$U_{dy} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial dy}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (9б)$$

$$U_{dz} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial dz}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (9в)$$

где $x_1 = \Delta\varphi_x$, $x_2 = e_x$ в (9а), $x_1 = \Delta\varphi_y$, $x_2 = e_y$ в (9б) и $x_1 = \Delta\varphi_z$, $x_2 = e_z$ в (9в). Коэффициент $u^2(x_i)$ – ошибка, связанная с соответствующей переменной.

На рис. 3 показана пространственная фигура, представляющая функцию, выраженную уравнениями (9) для поля зрения 6×6 см, когда расстояние от источника равно 13 см (относительно начала координат), а угол падения равен 15° . Данная картина получена для плоской поверхности. На рис. 4 и 5 представлены вогнутая и выпуклая поверхности для таких же параметров. Вогнутая форма поверхности, соответствующая части сферы радиусом

5 см, определяется уравнением $z = \sqrt{25 - x^2 - y^2}$ и выпуклая форма поверхности $-z = -\sqrt{25 - x^2 - y^2}$. Из уравнений (9) видно, что привнесенная неопределенность для каждой из неопределенностей смещения увеличивается, если величина соответствующей компоненты вектора чувствительности уменьшается. Анализируя результаты, представленные на рис. 3–5, можно отметить, что компонента неопределенности x смещения в плоскости увеличивается для плоской поверхности и уменьшается для вогнутой. Геометрия

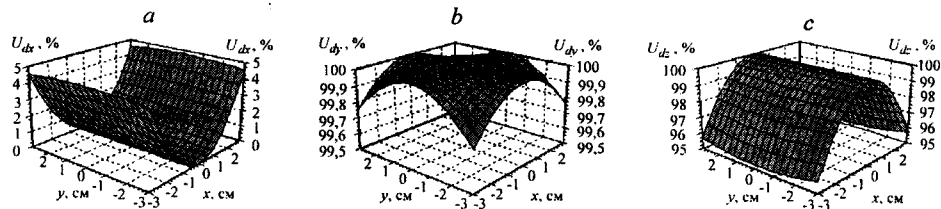


Рис. 3. Неопределенность, связанная с каждой компонентой смещения для плоского объекта:

U_{dx} (а), U_{dy} (б), U_{dz} (с)

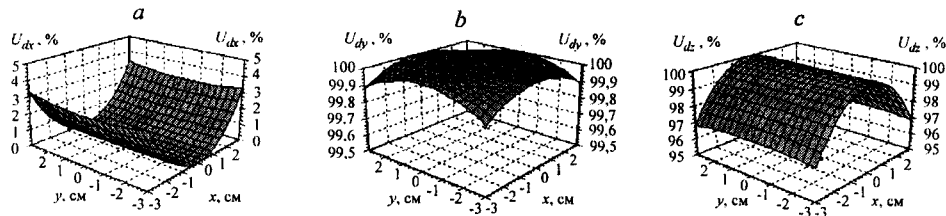


Рис. 4. Неопределенность, связанная с каждой компонентой смещения для объекта вогнутой формы: U_{dx} (a), U_{dy} (b), U_{dz} (c)

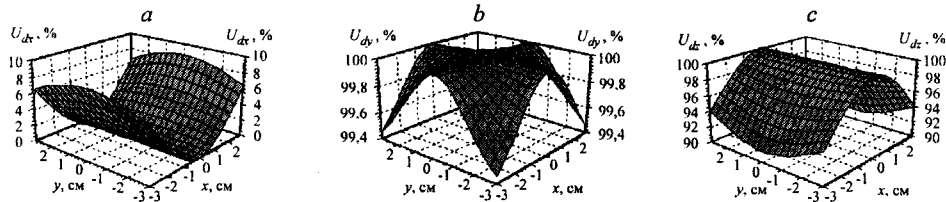


Рис. 5. Неопределенность, связанная с каждой компонентой смещения для объекта выпуклой формы: U_{dx} (a), U_{dy} (b), U_{dz} (c)

подобного типа создает чрезвычайно большую ошибку для чувствительности к перемещениям ортогонально плоскости. Слишком велика также и y -компонента при горизонтальном положении источника. Для такого случая она может быть минимизирована за счет перепозиционирования точечного источника в вертикальном направлении.

Коррекция фазы для количественных измерений. В общем случае, когда входной зрачок ПЗС-камеры и источник освещения фиксированы (см. рис. 2), полное изменение оптической фазы в каждой точке P уравнения (1) задается формулой

$$\Delta\varphi(P) = e_x(P)dx + e_y(P)dy + e_z(P)dz. \quad (10)$$

По аналогии с анализом спекл-интерферометрии ортогонально плоскости [7] для измерения процентной ошибки в случае интерпретации картины изменения фазы в предположении, что вектор чувствительности содержит лишь компоненту $e_x(P)$, функция ошибки $E_p(P)$ может быть определена как

$$E_p(P) = \left(1 - \frac{\Delta\varphi_0(P)}{\Delta\varphi(P)}\right) \cdot 100, \quad (11)$$

где $\Delta\varphi_0(P) = e_x(P)dx$. Очевидно, что если вектор чувствительности не имеет компонент e_y , e_z , то ошибка интерпретации равна нулю.

Если на рис. 1 освещающие пучки коллимированы, а объект плоский, то $e_x(P)$ и ось x декартовой системы координат параллельны. В этом случае функция $E_p(P)$ является мерой процентной ошибки измерения смещений в плоскости по отношению к общему изменению фазы.

Для показанного на рис. 1 случая (с учетом того, что вектор чувствительности $e = ((4\pi/\lambda)\sin\theta, 0, 0)$ постоянен по поверхности) член $\Delta\varphi_0(P) = \frac{4\pi}{\lambda} dx \sin\theta$. Вводя соотношения

$$p_1 = dy/dx, \quad p_2 = dz/dx, \quad (12)$$

получаем функцию ошибки изменения фазы

$$E(P) = \left(1 - \frac{(4\pi/\lambda)\sin\theta}{e_x(P) + e_y(P)p_1 + e_z(P)p_2} \right) \cdot 100. \quad (13)$$

Из рис. 2 видно, что координата $z = z(x, y)$ в точке $P = P(x, y)$ является функцией формы объекта. Уравнение (13) вводит весовые коэффициенты p_1 и p_2 , которые зависят от соотношения между смещениями в плоскости и ортогонально плоскости в направлениях y и z соответственно. Следствием этого является то, что $E(P)$ зависит от формы объекта и смещения в ортогональном направлении. Подставляя уравнение (12) в уравнение (1), формулу расчета смещения в плоскости dx представим уравнением

$$dx(P) = S(P)\varphi(P), \quad (14)$$

где

$$S(P) = \frac{1}{e_x(P) + e_y(P)p_1 + e_z(P)p_2}. \quad (15)$$

Тогда из уравнений (11), (14) и (15) имеем

$$dx_0(P) = \frac{\varphi(P)}{e_x(0, 0, 0)}. \quad (16)$$

Ошибка смещения (в процентах) в плоскости относительно $u_0(P)$ описывается как

$$\frac{dx_0(P) - dx(P)}{dx_0(P)} \cdot 100 = \left(1 - \frac{e_x(0, 0, 0)}{e_x(P) + e_y(P)p_1 + e_z(P)p_2} \right) \cdot 100. \quad (17)$$

Теперь из уравнения (17)

$$dx(P) = \left(1 - \frac{E(P)}{100} \right) dx_0(P) = C(P) dx_0(P), \quad (18)$$

где

$$C(P) = \frac{(4\pi/\lambda)\sin\theta}{e_x(P) + e_y(P)p_1 + e_z(P)p_2}. \quad (19)$$

В соответствии с уравнением (18) функция $C(P)$ вносит коррекцию для dx_0 -смещения в плоскости, полученного с использованием постоянного вектора $\mathbf{s} = ((4\pi/\lambda)\sin\theta, 0, 0)$ по поверхности объекта. Уравнения (14) и (15) дают общее выражение, связывающее фазу и смещение. Функция коррекции (уравнение (19)) может быть использована в тех случаях, когда смещения рассчитываются при постоянном векторе чувствительности. В обоих случаях уравнения (15) и (19) требуют информации о смещениях в ортогональном направлении.

Экспериментальные результаты. Электронная спекл-интерферометрия контроля разрушений представлена в [10]. Далее рассмотрен новый подход для интерферометрии муаровых полос. В качестве первого шага осуществляется запись решетки на поверхности эталона (стеклянная пластинка). Поверхность пластинки покрывается слоем фоторезиста (марки S1822 Shipley), который наносится посредством центрифугирования на скорости 4000 об./мин. Толщина получаемого слоя фоторезиста составляет 2,7 мкм. После нанесения пленки осуществляется ее дублирование при температуре 70° в течение 10 мин для удаления остаточной влаги. После этого на заднюю поверхность пластинки наносится черная краска с целью исключения внутреннего отражения. Фоточувствительная пластинка помещается в зону интерференции точечного источника (см. рис. 1). В качестве источника освещения используется гелий-кадмиевый лазер мощностью 80 мВт с длиной волны $\lambda = 440$ нм. Мощность излучения в месте размещения исследуемого образца составляет 4,93 мВт/см². Время экспозиции равно 30 с, что соответствует 148 мДж/см². Угол падения $\theta = 15^\circ$, что дает частоту линий решетки 1,15 лин./мкм ($T = 0,87$ мкм). Расстояние от источников до начала координат равно 13 см. Проявление осуществлялось в проявителе типа Microposit Shipley MF-319 в течение 1,5 мин с обдувкой воздухом при нормальной температуре. После просушки образец отверждался УФ-излучением в течение

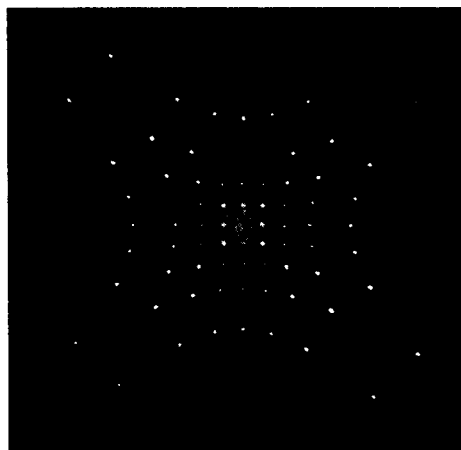


Рис. 6. Дифракционные порядки эталонной решетки при использовании сферических волновых фронтов

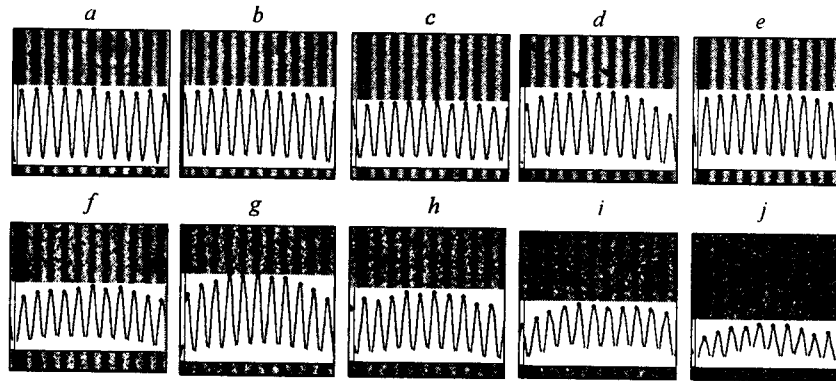


Рис. 7. Видность полос в зависимости от шероховатости поверхности

2 мин (1956 мДж/см^2). На последнем этапе выполнялась химическая стабилизация для улучшения дифракционной эффективности [11]. На рис. 6 показаны дифракционные порядки, формируемые решеткой. Можно отметить, что линии решетки (гиперболической формы) записаны с использованием сферических фронтов, являющихся причиной неоднородной чувствительности метода при измерении в плоскости и малой чувствительности при измерении деформаций ортогонально плоскости.

Рис. 7 показывает видность полос, которая уменьшается с увеличением шероховатости. Полная утрата видности происходит, когда шероховатость становится больше периода образцовой решетки. Установлено [12], что дифракционная эффективность низкочастотных решеток по сравнению с высокочастотными решетками выше. В случае высокого разрешения системы требуются высокочастотные решетки и, естественно, уменьшение периода. Это обстоятельство ограничивает анализ поверхностей с малой шероховатостью. Значимость данной работы определяется ее возможным применением для анализа механических поверхностей, имеющих естественную шероховатость.

Аналогичная система используется для получения виртуальной решетки (см. рис. 1). Для калибровки оптической системы перед образцовой решеткой был установлен фазовый объект, в качестве которого служила тонкая пленка двуокиси титана, нанесенная на половинку стеклянной пластинки. Толщина этой пленки $d = 73 \pm 3 \text{ нм}$ и определена методом инверсного синтеза [13], основанного на измерении пропускания образца как функции длины волны. При помещении такого объекта в какой-либо из пучков изменение фазы картины прямо связано с толщиной пленки. Таким образом, было определено соответствие между уровнем серого и числом длин волн для графика развертки фазы. В результате калибровки были получены муаровые полосы, фиксирующие смещения ортогонально плоскости. Картина полос регистрировалась с помощью ПЗС-камеры с разрешением 640×480 пиксел с 255 уровнями серой шкалы. На рис. 8 показаны результаты измерения смещения в плоскости и ортогонально плоскости с использованием метода квантования фазы в виде четырех ступеней [14]. Видно, что при одном и том же изменении фазы компоненты смещения равны: $dx = 0,25$ (I), $dy = 6,0$ (II) и $dz =$

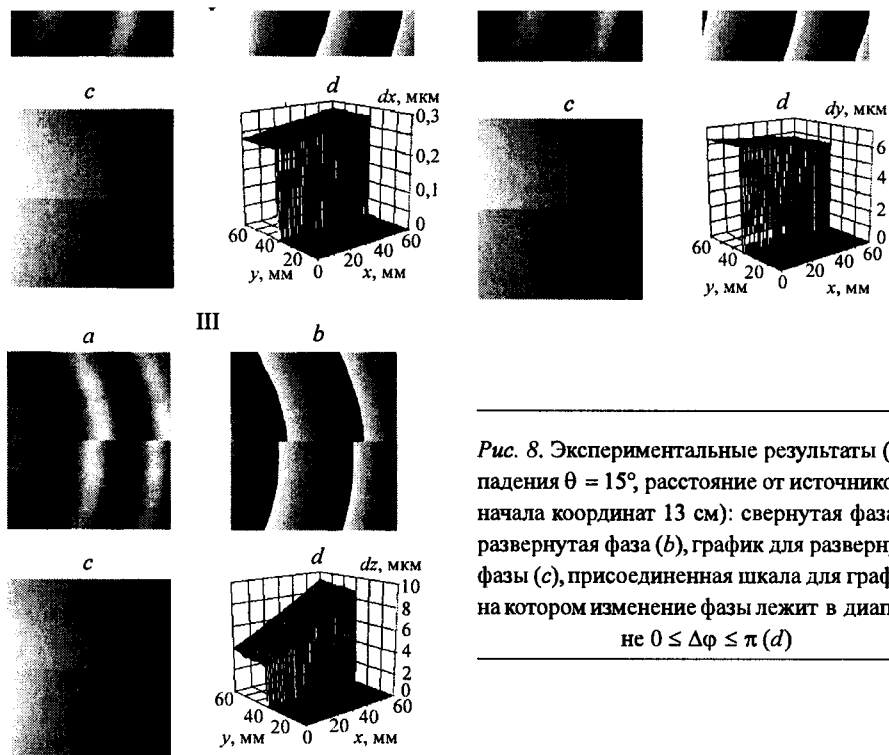


Рис. 8. Экспериментальные результаты (угол падения $\theta = 15^\circ$, расстояние от источников до начала координат 13 см): свернутая фаза (а), развернутая фаза (б), график для развернутой фазы (с), присоединенная шкала для графика, на котором изменение фазы лежит в диапазоне $0 \leq \Delta\varphi \leq \pi$ (d)

= 5,8 мкм (III), что свидетельствует о высокой чувствительности по x -компоненте.

Закключение. Оптическая интерферометрическая система, чувствительная к деформациям в плоскости и использующая неколлимированные волновые фронты, является простым и удобным методом для измерения смещений с хорошей чувствительностью, но при этом следует отметить, что в некоторых схемах неопределенность измерения перемещений может быть большой. Для расчета неопределенности каждой компоненты вектора смещения была рассчитана компонента вектора чувствительности. Эта процедура должна быть выполнена на стадии планирования эксперимента по интерферометрическому измерению. Приведенный анализ выполнен для плоской и сферической форм поверхности объекта. При этом имели место вариации чувствительности в различных точках объекта. Освещение расходящимися пучками приводит к появлению чувствительности в ортогональном направлении для схемы интерферометра, измеряющего перемещения в плоскости, что позволило исследовать большие объекты. Этот факт подтвержден экспериментальными и теоретическими результатами. Введена общая функция коррекции картины изменения фазы для схемы интерферометра, чувстви-

тельного к внутриплоскостным перемещениям при сферическом освещении, которая позволяет выполнять реальные измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kreis T.** Holographic Interferometry – Principles and Methods. Berlin: Akademic Verlag, 1996.
2. **Post D., Han B., Ifju P.** High Sensitivity Moiré // Experimental Analysis for Mechanics and Materials. N. Y.: Springer-Verlag, 1994.
3. **Jones R., Wykes C.** Holographic and Speckle Interferometry. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
4. **Ferraro P., De Nicola S., Finizio A., Pierattini G.** Reflective grating interferometer in a non-collimated configuration // Appl. Opt. 2000. **39**, N 13. P. 2116.
5. **De Veuster Ch., Slinger P., Renotte Y. et al.** Influence of the geometry of illumination and viewing beams on displacement measurement errors in interferometric metrology // Opt. Commun. 1997. **143**, N 1–3. P. 95.
6. **Albrecht D.** Estimation of the measurement error introduced by in-plane and out-of-plane electronic speckle pattern interferometry instruments // Opt. Lasers Eng. 1999. **31**. P. 63.
7. **Puga H. J., Rodriguez-Vera R., Martinez A.** General model to predict and correct errors in phase map interpretation and measurement for out-of-plane ESPI interferometers // Opt. Laser Technol. 2002. **34**, N 1. P. 81.
8. **Ojeda-Castañeda J., Jara E., Ibarra J.** Holographic interferometer with tunable radial and lateral displacement // Appl. Opt. 1990. **29**, N 7. P. 949.
9. **Deming W. E.** Statistical Adjustment of Data. Dover Publications, Inc., 1943.
10. **Rodriguez-Vera R., Rayas J. A., Marroquin J. L. et al.** Real discontinuity preservation algorithm for ESPI fracture measuring // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Experimental Mechanics ICEM2001. Beijing, China, 2001.
11. **Iwata F., Tsujiuchi J.** Characteristics of a photoresist hologram and its replica // Appl. Opt. 1974. **13**. P. 1327.
12. **Martinez A., Rodriguez-Vera R., Rayas J. A., Vazquez J. F.** Influence of object roughness on specimen gratings for moiré interferometry // Opt. Eng. 2001. **40**, N 9. P. 1978.
13. **Dobrowolski J. A., Ho F. C., Waldorf A.** Determination of optical constants of thin film coating materials based on inverse synthesis // Appl. Opt. 1983. **22**, N 22. P. 3191.
14. **Malacara D.** Optical Shop Testing. N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1992.

*Центр оптических исследований
Департамента метрологической оптики,
E-mail: rarove@cio.mx*

*Поступила в редакцию
10 июня 2003 г.*