

УДК 681.7

Л. А. Борыняк, Е. А. Краснопевцев

(Новосибирск)

ПАНОРАМНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Рассматриваются методы исследования деформаций поверхности объектов цилиндрической формы с использованием панорамного голографического интерферометра и панорамного спекл-интерферометра. Для изучения напряженного состояния оптически прозрачных объектов, и в частности цилиндрических оболочек, предлагается использовать панорамный интерференционный голографический томограф. Приводятся результаты экспериментальных исследований.

Введение. При изучении тел осесимметричной формы со светорассеивающей поверхностью панорамные интерферометры дают возможность наблюдать характер деформированного состояния всей поверхности и определять величину перемещения любых ее точек. Для объектов цилиндрической формы измерения смещений осуществляются с одинаковой для всех точек чувствительностью. Панорамная интерферометрия оптически прозрачных объектов позволяет установить характер напряженного состояния во всех точках объекта. Главным элементом таких приборов является коническое зеркало, устанавливаемое соосно с объектом и предназначенное для освещения и наблюдения объекта под определенными ракурсами. Процесс измерения складывается из трех этапов: а) создание двухэкспозиционной голограммы или спеклограммы объекта; б) получение на ее основе набора интерферограмм, позволяющих по картине полос сделать заключение о характере деформированного состояния; в) количественный анализ интерферограмм и вычисление полей проекций перемещений или напряжений.

Панорамный голографический интерферометр для исследования объектов со светорассеивающей цилиндрической поверхностью. Для получения панорамной голограммы цилиндрической поверхности объекта B используется коническое зеркало M с углом θ при вершине (рис. 1, a). Когерентный

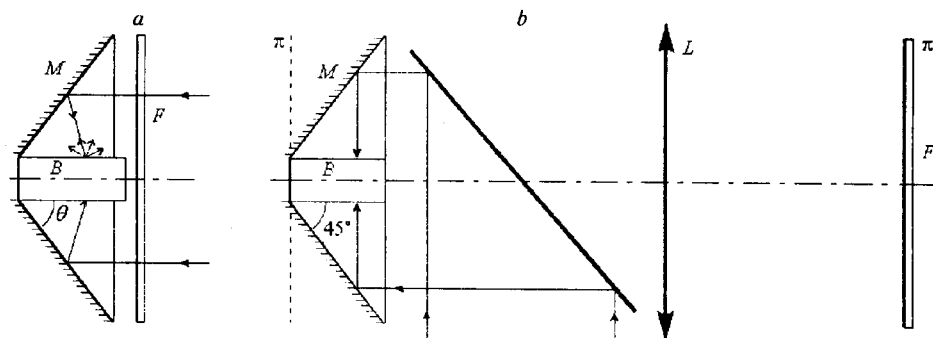


Рис. 1. Панорамный голографический (a) и спекл (b)-интерферометры

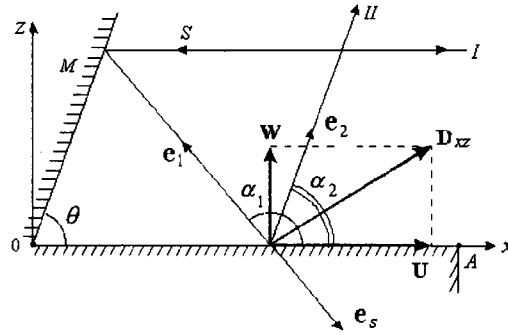


Рис. 2. Компоненты W , U вектора перемещения; единичный вектор освещения e_s ; единичные векторы наблюдения e_1 , e_2 для лучей I , II

коллимированный пучок вначале проходит через фотопластинку F , далее отражается от зеркала и освещает все точки соосно расположенного объекта B под одинаковым углом. Излучение, диффузно рассеянное поверхностью объекта, попадает на фотопластинку F . Затем точки поверхности перемещаются, фотопластинка экспонируется вторично. Получается двухэкспозиционная голограмма поверхности объекта во встречных пучках. Можно использовать метод реального времени, проведя одну экспозицию, проявив фотопластинку и установив голограмму в исходное положение. При освещении двухэкспозиционной голограммы копией опорного пучка возникают два мнимых изображения исследуемой поверхности: до и после деформации. В результате их интерференции на фоне видимой поверхности объекта наблюдается система интерференционных полос, положение которых зависит от угла наблюдения α (рис. 2). Фотопластинка на рис. 1, a ставится вблизи объекта, поэтому угловая апертура велика и угол α можно менять в достаточно широких пределах, получая интерферограммы, соответствующие выделению разных проекций вектора перемещения. При этом угол наблюдения интерферограммы необходимо сделать одинаковым для всех точек исследуемой поверхности, чтобы чувствительность измерения была для них равной. На рис. 3 представлены различные схемы получения интерферограмм, удовлетворяющие этому требованию. На рис. 3, a приведены схемы выделения лучей наблюдения I (см. рис. 2), идущих параллельно оптической оси, для которых выполняется условие $\alpha_1 = 2\theta$. На рис. 3, b , c представлены варианты использования конических кольцевых зеркал C для выделения лучей наблюдения II (см. рис. 2) [1]. Схема на рис. 3, b дает интерферограмму с углом наблюдения $\alpha \leq \theta$, а схема на рис. 3, c позволяет получить сразу две интерферограммы с углами $\alpha_1 = 2\theta$ и $\alpha_2 \leq \theta$.

Количественный анализ интерферограммы начинается с установления абсолютного порядка интерференционной полосы m , проходящей через исследуемую точку. Связь между m и величиной перемещения устанавливается на основе геометрической модели. При $|D| \ll l$, где l — характерный размер объекта, условие интерференции имеет вид

$$(\mathbf{e}_k - \mathbf{e}_s)D = m_k \lambda, \quad k = 1, 2, \quad (1)$$

где \mathbf{e}_s , \mathbf{e}_k — единичные векторы освещения и наблюдения для лучей I , II . Уравнение (1) можно выразить через параметры, представленные на рис. 2, и получить выражения для компонент вектора перемещения $D(W, U, V)$ [2]:

$$W = \lambda f(\alpha, \theta) \left[-(m_1/2)(\cos\alpha + \cos 2\theta) + m_2 \cos 2\theta \right], \quad (2)$$

$$U = \lambda f(\alpha, \theta) \left[(m_1/2)(\sin\alpha + \sin 2\theta) - m_2 \sin 2\theta \right].$$

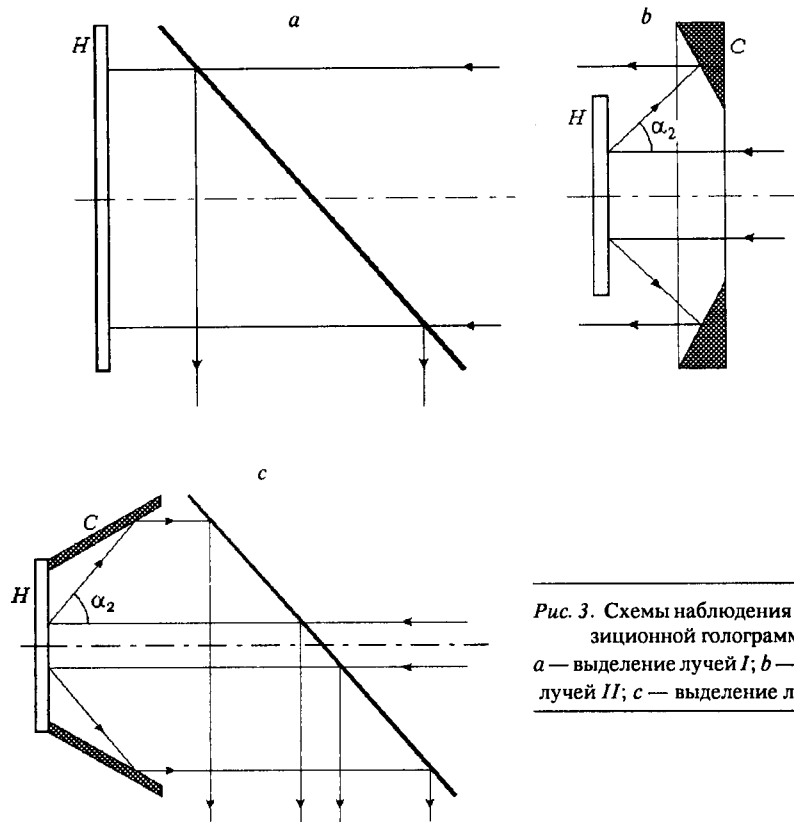


Рис. 3. Схемы наблюдения двухэкспозиционной голограммы H :
 а — выделение лучей I ; б — выделение лучей II ; с — выделение лучей I и II

Здесь $f(\alpha, \theta) = [\sin\alpha \cdot \cos 2\theta - \cos\alpha \cdot \sin 2\theta]^{-1}$; m_1, m_2 — порядки интерференционных полос в одной и той же точке для лучей наблюдения I и II соответственно; $\theta \geq \alpha$ — условие видимости всей поверхности. Для $\theta = 45^\circ$ получаем из (2)

$$W = \lambda m_1 / 2, \quad (3)$$

$$U = \lambda (1 / \cos\alpha) [(-m_1 / 2)(1 + \sin\alpha) + m_2].$$

Анализ методических погрешностей показал [2, 3], что их величина связана в основном с отсчетом порядка интерференционных полос и при $\theta = 45^\circ$ она минимальна, если $\alpha = 45^\circ$. В этом случае $|U|/|W| = 5,3$, следовательно, представленный голографический интерферометр позволяет измерить компоненту W с существенно большей точностью, чем U .

Рассмотренный интерферометр модифицировался путем изменения положения и формы экспонируемой голограммы. Соосно коническому зеркалу с углом $\theta = 45^\circ$ и объекту устанавливается стеклянная цилиндрическая трубка. Ее внутренний диаметр несколько превышает диаметр объекта. Внешняя поверхность трубки покрывается эмульсией ЛОИ-2 с добавлением дубильного вещества (формалина). После двух экспозиций эмульсия проявляется, разворачивается и переносится в воде на плоскую стеклянную пластинку. Путем фотографирования этой голограммы в параллельных лучах разных направлений получают интерферограммы развертки исследуемой поверхности. Этот метод позволяет получить голограмму с максимальной апертурой и тем самым измерить с высокой точностью не только компоненту W вектора перемещений, но и компоненты U, V , касательные к поверхности объекта.

Панорамный спекл-интерферометр для исследования объектов со светорассеивающей цилиндрической поверхностью. Для получения панорамной двухэкспозиционной сфокусированной спеклограммы поверхности цилиндрического объекта B (рис. 1, b) используется коническое зеркало M с углом 45° при вершине, создающее в плоскости π изображение исследуемой поверхности в виде кольцевой полосы. Плоскость π отображается линзой L в плоскость спеклограммы π' , где устанавливается фотопластинка F . Сфокусированная спеклограмма регистрирует те смещения, которые происходят в ее плоскости, т. е. компоненты U и V вектора перемещения. Их локальную величину можно определить, просвечивая спеклограмму лазерным пучком. Пары идентичных точек двух изображений создают интерферограмму в виде полос Юнга с периодом P , наблюдаемых в пределах дифракционного конуса. Направление полос ортогонально направлению перемещения точки на спеклограмме. В результате получаем

$$U = \lambda(1/\beta)(L/P)\sin\gamma, \quad (4)$$

$$V = \lambda(1/\beta)(L/P)\cos\gamma,$$

где β — увеличение линзы спекл-интерферометра на рис. 1, b ; L — расстояние от спеклограммы до спекл-интерферограммы; γ — угол между направлением полос и плоскостью, проходящей через оптическую ось спеклограммы и исследуемую точку.

Для установления степени однородности всего деформированного состояния и измерения параметров поля перемещения можно использовать схему на рис. 4. Плоская когерентная волна, освещающая двухэкспозиционную спеклограмму S , дифрагирует на спекл-структуре, в пределах дифракционного конуса наблюдаются панорамное изображение исследуемой поверхности, расположенное в плоскости S , и система интерференционных полос P . Экран D устраняет засветку от прямого освещения, перекрывая изображение торца объекта. Дифрагированные лучи от идентичных точек двух изображений создают интерференционную картину в плоскости P , отстоящей от линзы K на расстоянии $L_x \sim F_1/2$, где F_1 — фокусное расстояние линзы K .

На основе геометрической модели получено уравнение интерференционных полос [4, 5], при этом смещение V в первом порядке мало, а для смещения U имеем выражение

$$U = \lambda\eta(m/r), \quad (5)$$

где $\eta^{-1} = \beta^2(1/F_1 - 1/L)$; β — увеличение фокусирующей системы в схеме на рис. 1, b ; r — расстояние от оптической оси до изображения изучаемой точки

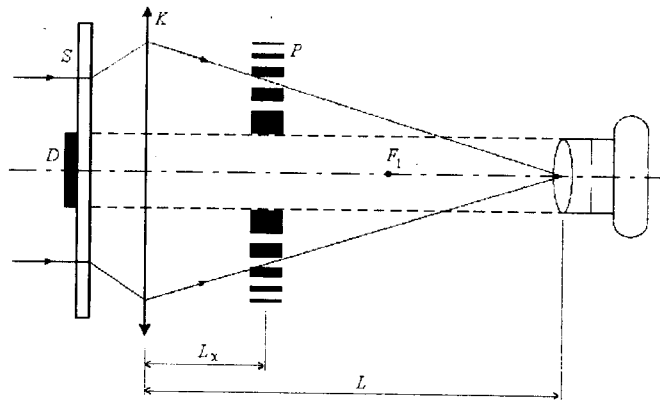


Рис. 4. Схема получения спекл-интерферограммы

на спеклограмме; m — порядок интерференционной полосы, проходящей через эту точку. Погрешность определения смещений рассматриваемым методом связана главным образом с неточностью отсчета порядка интерференционных полос. Оценка диапазона измеряемых смещений дает $U^{\min} \sim \lambda/2$, $U^{\max} \sim 200\lambda$. Эмпирическая оценка максимальных измеряемых перемещений показывает, что для панорамного спекл-интерферометра она на порядок выше, чем для панорамного голографического интерферометра.

Панорамные томографы для изучения оптически прозрачных объектов. Оптическая томография исследует объекты при прохождении через которые с помощью панорамного интерференционного томографа восстанавливается распределение изменения показателя преломления, вызванного внешними факторами, во всех точках объекта, имеющего произвольную форму.

Классическая томография дает информацию о значениях скалярной функции в точках сечения объекта в виде низкочастотной составляющей суммарного изображения. Последнее складывается из совокупности просвечиваний объекта вдоль нескольких направлений, линии которых пересекаются между собой в точках изучаемого сечения и лежат в плоскости, перпендикулярной этому сечению. В рамках томографической интерферометрии для медленно меняющихся пространственно низкочастотных объектов суммарное изображение дает удовлетворительное совпадение с истинным распределением при трех и более ракурсах просвечивания [6]. Изложенный в работах [7, 8] метод фильтрации суммарного изображения, основанный на преобразовании Радона, приводит к очевидному с позиций классической томографии алгоритму получения томограммы. Для объекта, просвечиваемого до и после внешнего воздействия, на интерферограмме регистрируется изменение оптической длины пути $\delta\Delta_K(x, y, \varphi)$ для луча света, проходящего через точку объекта (x, y) , принадлежащую плоскости, ориентированной под углом φ к некоторому произвольно выбранному направлению; K — ракурс просвечивания. Изменение низкочастотной составляющей показателя преломления в точке (x, y, φ) определяется выражением

$$\delta n^{(n)}(x, y, \varphi) = (1/N) \sum_K [\delta\Delta_K(x, y, \varphi)/L_K], \quad (6)$$

где L_K — длина пути луча через объект; N — число ракурсов просвечивания. Суммирование производится по всем ракурсам просвечивания. Последние выбираются из соображений симметрии.

Для осуществления многоракурсного просвечивания предлагается применить конические зеркала. На рис. 5 представлена компактная ($D = 3d$) оптическая схема трехракурсного томографа на основе конического зеркала C с углом 60° . Через точку P оптически прозрачного объекта B размером порядка d проходят лучи 1—3, лежащие в плоскости рисунка. Зеркало C возвращает лучи, и фотопластинка F экспонируется во встречных пучках, образуя двухэкспозиционную голограмму. Интерферограмма получается в лучах, идущих по нормали к голограмме. Интерференционные полосы на отрезке m — n несут информацию об изменении показателя преломления в сечении объекта плоскостью, совпадающей с плоскостью рисунка. Этот отрезок складывается из трех участков, представляющих интерференцию лучей соответственно 1—3. Вводя для этих участков координаты z_1, z_2, z_3 , находим их связь с координатами x, y точки P в линейном случае, когда можно пренебречь

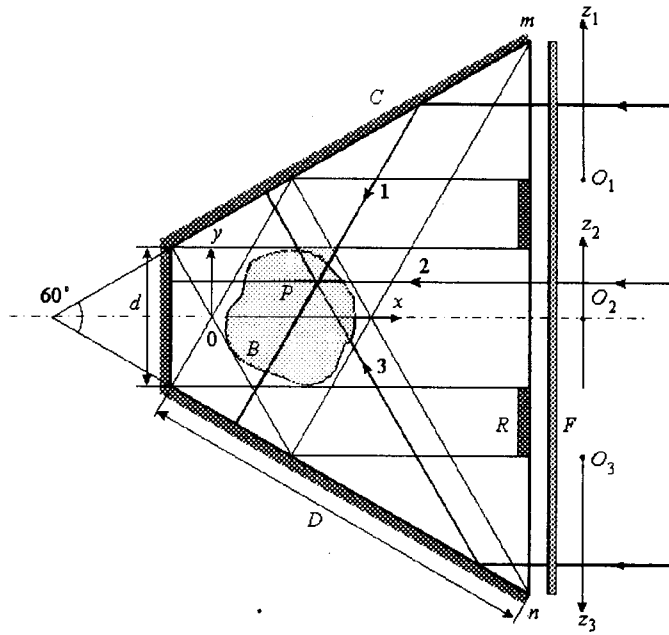


Рис. 5. Панорамный трехракурсный томограф:
 С — коническое зеркало; В — объект; Р — точка объекта; R — кольцевая диафрагма; F — фото-
 пластинка; 1—3 — просвечивающие лучи

рефракцией света или когда рабочее пространство заполнено иммерсионной жидкостью:

$$z_1 = x(\sqrt{3})/2 - y/2, \quad z_2 = y, \quad z_3 = x(\sqrt{3})/2 + y/2. \quad (7)$$

Из уравнения (6) находим

$$\delta n^{(n)}(x, y) = (\lambda/6) \sum_K (m_K/L_K), \quad (8)$$

где $K = 1, 2, 3$; m_K — номер интерференционной полосы на интерферограмме в точке z_K ; L_K — протяженность объекта вдоль луча, относящегося к ракурсу K . Здесь учтено, что каждый луч дважды проходит через объект.

Если считать, что при измерениях $m_K^{\min} \sim 1/4$, то получаем из (8) минимальное измеряемое значение $(\delta n)^{\min} \sim \lambda/(8d)$.

На рис. 6 представлен панорамный пятиракурсный томограф, в основе конструкции которого лежат три кольцевых конических зеркала. Кольцевая фазовая дифракционная решетка Z, имеющая только первый порядок дифракции, отклоняет пучки света 2 и 4 на угол 36° . Пять пучков одинаковой ширины, направленные под углом 36° друг к другу, проходят через объект 2 раза. Фотопластинка F образует двухэкспозиционную голограмму во встречных пучках. На каждом из пяти участков голограммы отображены начальное и конечное фазовые состояния объекта, рассматриваемые под соответствующим углом. Величина δn в любой точке объекта может быть найдена по формуле, аналогичной (8), где K изменяется от 1 до 5.

Панорамный томограф для изучения цилиндрических оболочек. Исследование цилиндрических оболочек, изготовленных из оптически прозрачного материала, обладающего слабой оптической анизотропией, возможно с помощью интерференционного томографа, представленного на рис. 7. Освещающие лучи A плоскополяризованы в плоскости падения или перпендикулярно к ней. После отражения от конического зеркала C с углом $\theta = 60^\circ$ они проходят через исследуемый объект B и рассеиваются коаксиальной цилиндрической

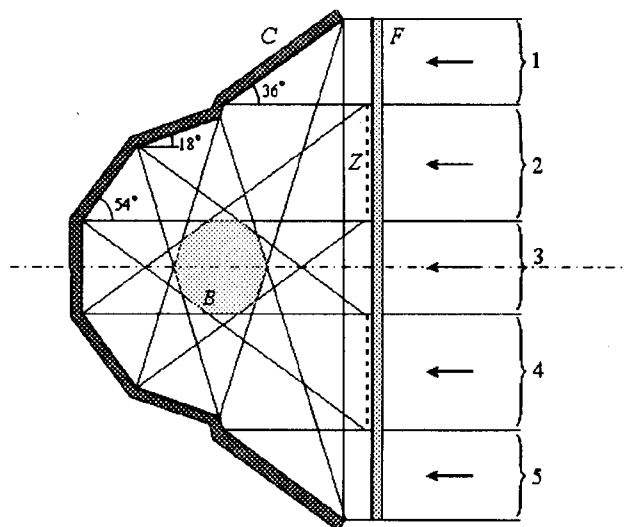


Рис. 6. Панорамный пятикурсный томограф:

C — зеркало, составленное из конических элементов; *B* — область расположения объекта; *Z* — кольцевая фазовая решетка, отклоняющая пучки 2 и 4; *F* — фотопластинка; 1—5 — просвечивающие световые пучки

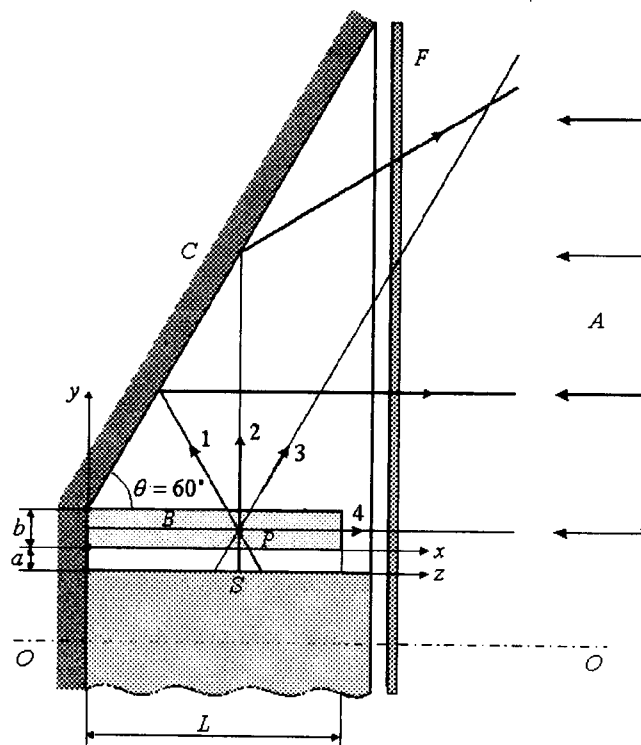


Рис. 7. Панорамный томограф для исследования цилиндрических оболочек:

C — коническое зеркало; *B* — объект (цилиндрическая оболочка); *P* — точка объекта; *S* — светорассеивающая цилиндрическая поверхность; *F* — фотопластинка; *A* — освещающие лучи; 1—4 — просвечивающие лучи

неподвижной поверхностью S . Множество лучей, идущих под разными углами к поверхности S наблюдается система интерференционных полос, положение которых зависит от направления просвечивающих лучей и от их поляризации. Для фиксации местоположения полос на поверхность S наносится координатная сетка (z, φ) .

В расчетной формуле (6) вклад ракурса 1 имеет вид

$$\delta\Delta_1(x, y, \varphi) = \lambda m_1(z_1, \varphi), \quad (9)$$

где $m_1(z_1, \varphi)$ — номер интерференционной полосы на интерферограмме, полученной в лучах 1, в точке с координатами z_1, φ , определяемыми по координатной сетке на поверхности S . В нулевом приближении можно считать известным показатель преломления n объекта, тогда с учетом рефракции получаем

$$z_1 = x + y \cdot \operatorname{tg}\alpha_1 + a \cdot \operatorname{tg}30^\circ, \quad (10)$$

$$L_1 = 2b/\cos\alpha_1,$$

где α_1 — угол преломления луча 1; $\operatorname{tg}\alpha_1 = 1/[2(n^2 - 0,25)^{1/2}]$, $\cos\alpha_1 = (n^2 - 0,25)^{1/2}/n$. Для ракурса 2 находим

$$\delta\Delta_2(x, y, \varphi) = \lambda [m_2(x, \varphi) - m_1(x, \varphi)(\cos\alpha_1)/2], \quad (11)$$

$$L_2 = b,$$

для ракурса 3 —

$$\delta\Delta_3(x, y, \varphi) = \lambda [m_3(z_3, \varphi) - m_1(z_3, \varphi)/2], \quad (12)$$

$$z_3 = x - y \cdot \operatorname{tg}\alpha_1 - a \cdot \operatorname{tg}30^\circ, \quad L_3 = b/\cos\alpha_1,$$

для ракурса 4 —

$$\delta\Delta_4(x, y, \varphi) = \lambda m_4(y, \varphi), \quad (13)$$

$$L_4 = 2L.$$

Подставляя (9)—(13) в (6), находим

$$\begin{aligned} \delta n^{(n)}(x, y) = \lambda/(4b) \{ [m_1(z_1) - m_1(x) - m_1(z_3)](\cos\alpha_1)/2 + \\ + m_2(x) + m_3(z_3)\cos\alpha_1 + m_4(y)b/2L \}. \end{aligned} \quad (14)$$

При условиях $m_K^{\min} \sim 1/4$ и $2L \gg b$ получаем из (14) оценку величины минимально измеряемого изменения показателя преломления $(\delta n)^{\min} \sim \lambda/(4b)$.

Оптическая схема на рис. 7 допускает увеличение числа ракурсов просвечивания: можно дополнительно учесть на интерферограмме лучи, расположенные между лучами 3 и 4.

Модификацией описанной схемы является панорамный голографический томограф с максимальной апертурой. Соосно коническому зеркалу с углом $\theta = 45^\circ$ и исследуемой оболочке вблизи нее устанавливается цилиндрическая

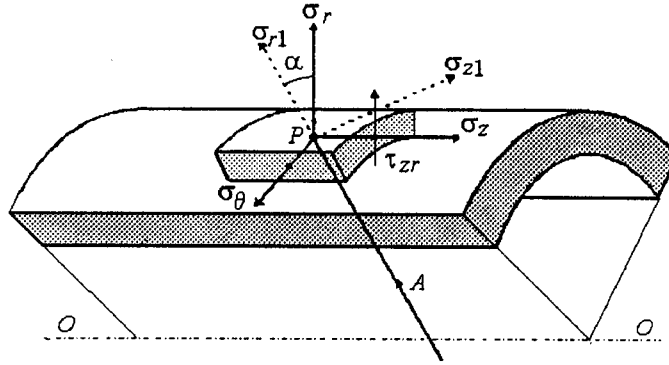


Рис. 8. Параметры напряженного состояния цилиндрической оболочки в точке P :
 A — просвечивающий луч, лежащий в плоскости, проходящей через ось OO оболочки; $\sigma_\theta, \sigma_r, \sigma_z,$
 τ_{zr} — окружное, радиальное, продольное, касательное напряжения

стеклянная трубка. На ее внешнюю поверхность наносится фотоэмульсия, которая после двух экспозиций переносится на плоскую стеклянную поверхность. Полученную голограмму можно исследовать под многими ракурсами не только в плоскости, проходящей через ось OO объекта, но и, например, в плоскости, ортогональной этой оси. Тем самым будут учтены такие ракурсы просвечивания, которые недоступны для схемы рис. 7.

Необходимую для работы рассматриваемого томографа осесимметричную поляризацию освещающего пучка можно получить следующим образом: плоскополяризованный луч He—Ne-лазера пропускается через четвертьволновую пластинку; полученный луч с круговой поляризацией направляется на расширитель; расходящийся пучок лучей, вышедших из расширителя, проходит через пленку-поляризатор, свернутую в цилиндрическую трубку и расположенную соосно оптической оси расширителя. Один такой поляризатор пропускает колебания, лежащие в плоскости, проведенной через луч и оптическую ось расширителя. При установке другого поляризатора проходят азимутальные колебания. Далее собирающая линза создает коллимированный пучок. Преломление лучей этой линзой и последующее отражение их от зеркала (см. рис. 7) не меняет осесимметричной поляризации.

Изменение показателя преломления в некоторой точке тела P может быть вызвано действием напряжений. Локальные параметры напряженного состояния цилиндрической оболочки в цилиндрической системе координат представлены на рис. 8. Для луча A , лежащего в плоскости (σ_r, σ_z) и идущего под углом α к направлению σ_r , показатель преломления зависит от напряжений, действующих вдоль луча σ_{r1} и вдоль ортогональных к нему направлений σ_θ и σ_{z1} . Для нахождения σ_{r1}, σ_{z1} повернем систему координат на угол α . При этом тензор напряжений преобразуется [9], и для нормальных напряжений получаем

$$\begin{aligned}\sigma_{z1} &= \sigma_z \cos^2 \alpha + \sigma_r \sin^2 \alpha + \tau_{zr} \sin 2\alpha, \\ \sigma_{r1} &= \sigma_z \sin^2 \alpha + \sigma_r \cos^2 \alpha - \tau_{zr} \sin 2\alpha.\end{aligned}\quad (15)$$

В напряженной среде колебания поляризованной волны распадаются на две составляющие, параллельные квазиглавному напряжениям. На рис. 8 квазиглавные напряжения лежат в плоскости $(\sigma_\theta, \sigma_{z1})$, и по определению имеем $\tau_{\theta, z1} = 0$. Используя известные выражения для квазиглавных напряжений $\sigma_K^{(r1)}$, получаем

$$\sigma_1^{(r1)} = \sigma_\theta, \quad \sigma_2^{(r1)} = \sigma_{z1}, \quad \sigma_3^{(r1)} = \sigma_{r1}.\quad (16)$$

Для волны с колебаниями, перпендикулярными плоскости, проходящей через ось OO оболочки и точку P , при осесимметричной нагрузке имеем

$$n_{\perp} \equiv n_{\theta}^{(r1)} = n_0 + C_1 \sigma_1^{(r1)} + C_2 [\sigma_2^{(r1)} + \sigma_3^{(r1)}],$$

где C_1, C_2 — оптические постоянные материала тела. Используя (15), (16) и $\delta n_{\perp} = n_{\perp} - n_0$, получаем

$$\delta n_{\perp} = C_1 \sigma_{\theta} + C_2 (\sigma_z + \sigma_r). \quad (17)$$

Для волны с колебаниями, лежащими в плоскости, проходящей через ось OO оболочки, имеем

$$n_{\parallel} \equiv n_{z1}^{(r1)} = n_0 + C_1 \sigma_2^{(r1)} + C_2 [\sigma_1^{(r1)} + \sigma_3^{(r1)}].$$

Из (15), (16) и $\delta n_{\parallel} = n_{\parallel} - n_0$ находим

$$\begin{aligned} \delta n_{\parallel} = & C_2 \sigma_{\theta} + (C_1 \cos^2 \alpha + C_2 \sin^2 \alpha) \sigma_z + (C_1 \sin^2 \alpha + C_2 \cos^2 \alpha) \sigma_r + \\ & + (C_1 - C_2) \sin 2\alpha \cdot \tau_{zr}. \end{aligned} \quad (18)$$

Величина δn_{\parallel} является функцией угла просвечивания α . Изменение низкочастотной составляющей показателя преломления в точке P складывается из слагаемых, вносимых всеми ракурсами просвечивания:

$$\delta n^{(h)} = (1/N) \sum_K \delta n_K, \quad (19)$$

где N — число ракурсов просвечивания. Оптическая схема томографа на рис. 7 построена так, что просвечивающие лучи идут симметрично относительно нормали к оболочке, и поэтому равны вклады с углами α_1 и $-\alpha_1$ в суммарном изображении низкочастотной составляющей $\delta n^{(h)}$. В результате выпадает нечетное по α слагаемое в (18) и величины $\delta n_{\perp}^{(h)}(x, y, \varphi)$, $\delta n_{\parallel}^{(h)}(x, y, \varphi)$, измеряемые по схеме на рис. 7, выражаются лишь через нормальные компоненты тензора напряжений $\sigma_{\theta}(x, y, \varphi)$, $\sigma_z(x, y, \varphi)$, $\sigma_r(x, y, \varphi)$:

$$\delta n_{\perp}^{(h)} = C_1 \sigma_{\theta} + C_2 (\sigma_z + \sigma_r), \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \delta n_{\parallel}^{(h)} = & C_2 \sigma_{\theta} + (1/2) [(C_1 + C_2)/2 + C_1 \cos^2 \alpha_1 + C_2 \sin^2 \alpha_1] \sigma_z + \\ & + (1/2) [(C_1 + C_2)/2 + C_1 \sin^2 \alpha_1 + C_2 \cos^2 \alpha_1] \sigma_r. \end{aligned} \quad (21)$$

Для тонкостенных оболочек в случае осесимметричной нагрузки, включающей одностороннее давление, а также действие краевых поперечных сил и изгибающих моментов, можно считать, что в любой точке объема $\sigma_r \ll \ll \sigma_{\theta}, \sigma_z$. Для такого плоского напряженного состояния получаем из (20), (21)

$$\sigma_z = [C_1 \delta n_{\parallel} - C_2 \delta n_{\perp}] / [C_1 C(\alpha_1) - C_2^2], \quad (22)$$

$$\sigma_{\theta} = [C(\alpha_1) \delta n_{\perp} - C_2 \delta n_{\parallel}] / [C_1 C(\alpha_1) - C_2^2], \quad (23)$$

где $C(\alpha_1) = (1/2) [(C_1 + C_2)/2 + C_1 \cos^2 \alpha_1 + C_2 \sin^2 \alpha_1]$.

Эксперимент. Панорамные интерферометры использовались для качественного и количественного исследования деформированного состояния промышленных изделий. Ниже приводятся некоторые примеры.

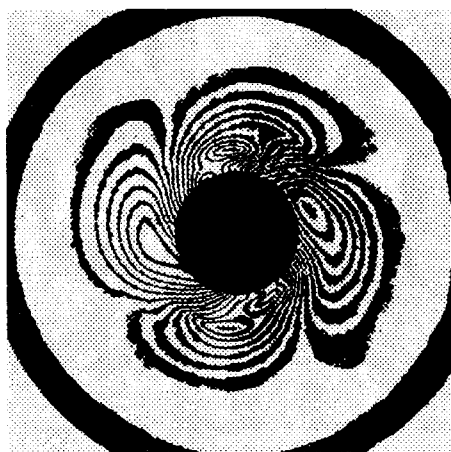


Рис. 9. Интерференграмма поверхности цилиндрического фиксатора при сжатии пружины

Анализ влияния установленных в оболочке пружин переменного радиуса. В цилиндрической оболочке, изготовленной из циркония, с внутренним диаметром 8 мм и толщиной стенок 0,5 мм сжимался пружинный фиксатор. Пружина имела переменный радиус. Диаметр широкой цилиндрической части равнялся внутреннему диаметру оболочки. Расчет фиксатора был сделан на основе предположения, что радиальная нагрузка оболочки в кольцевом сечении постоянна. С помощью панорамного голографического интерферометра с углом $\theta = 45^\circ$ изучалось поле компоненты W вектора перемещений, т. е. величина прогиба стенок оболочки, при сжатии пружины. Полученная интерференграмма представлена на рис. 9. Картина полос показывает, что пружина действует на стенки оболочки в каждом кольцевом сечении неравномерно, ее усилие концентрируется в четырех точках. Исследование прогибов стенок оболочки при циклической нагрузке пружинного фиксатора позволило установить, что пружина поворачивается относительно стенок оболочки. Проведенное исследование способствовало уточнению расчетной модели и выработке определенных требований к технологии производства.

Исследование сварных оболочек. Панорамный голографический интерферометр использовался для изучения тонкостенных цилиндрических оболочек, нагружаемых внутренним давлением. Исследовался ТВЭЛ, изготовленный из циркония, с внутренним диаметром 8 мм и толщиной стенок 0,5 мм. К краю оболочки приваривалось днище, выточенное из металла и исполненное в двух вариантах. Оболочки, изготовленные по первой и второй технологиям, закреплялись цапговым зажимом интерферометра, у которого коническое зеркало имело угол $\theta = 45^\circ$. Предметом исследования служила область сварного шва. Положение оболочки относительно зажима изменялось для изучения его влияния. Анализ интерферограмм показал, что если расстояние от границы заделки до сварного шва превышает пять диаметров оболочки, то влияние зажима на деформированное состояние оболочки в области сварного шва пренебрежимо мало. На рис. 10, а представлена типичная интерференграмма области сварного шва, выполненного по первой технологии, для внутреннего давления 40 атм. На участках 1—3 присутствуют локальные интерференционные полосы, что означает наличие зон аномального прогиба поверхности оболочки. Эта картина наблюдается при различных уровнях нагрузки. На рис. 10, б представлена типичная интерференграмма деформированного состояния оболочки, сварной шов которой выполнен по второй технологии. На всех оболочках этого типа поверхность в области сварного шва деформируется симметрично, распределение интерференционных полос в зоне сварного шва достаточно однородно и не обнаруживает аномальных зон.

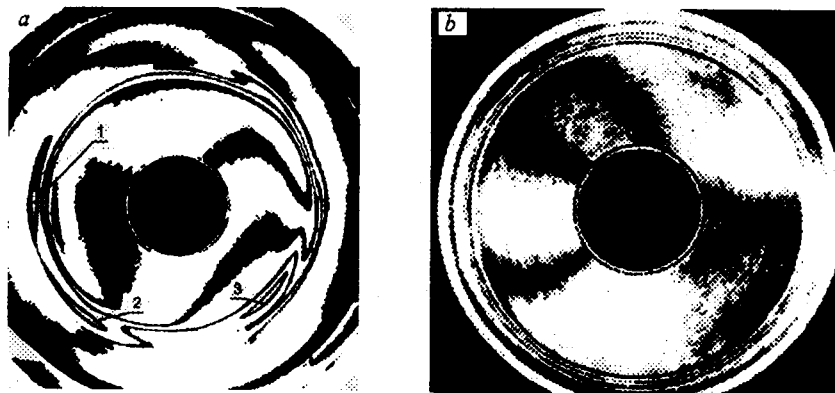


Рис. 10. Интерферограммы поверхности оболочек, нагружаемых внутренним давлением $P = 40$ атм, изготовленных: по первой (а) и по второй (б) технологиям, 1—3 — зоны аномальных прогибов

Аналогичным методом были обнаружены остаточные изменения формы поверхности оболочки в области сварного шва, выполненного по первой технологии, после создания внутреннего давления 100 атм. Отжиг оболочки не устранял дефектов шва. Для второй технологии подобные эффекты не обнаружены.

Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что сварной шов, выполненный по второй технологии, приводит к меньшим неоднородностям деформированного состояния по сравнению со сварным швом, выполненным по первой технологии.

Исследование цилиндрических оболочек с концентраторами деформаций. Для изучения возможностей метода панорамной голографической интерферометрии проводилось качественное и количественное исследование деформированного состояния цилиндрической оболочки с отверстиями. Оболочка

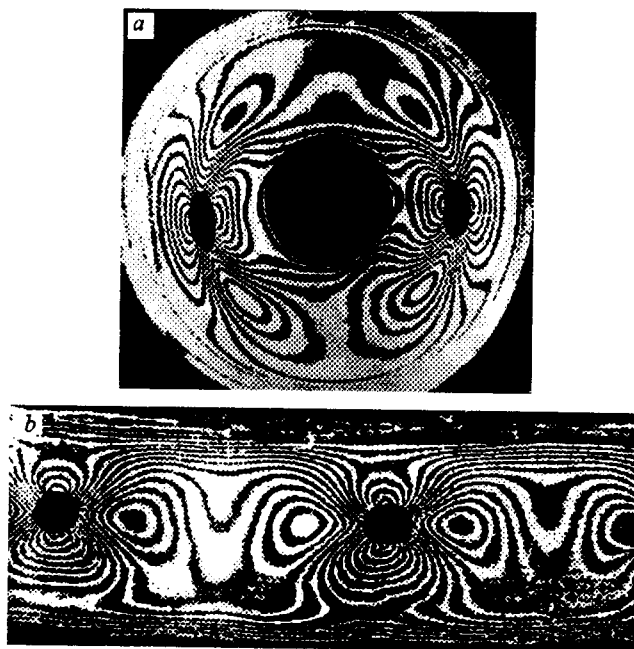


Рис. 11. Панорамная (а) и развернутая (б) интерферограммы поверхности оболочки с круглыми отверстиями, сжимаемой осевой силой

вытачивалась из оргстекла и имела диаметр 27 мм, толщину стенок 1 мм. В боковой стенке оболочки прорезывались симметрично два круглых отверстия диаметром 6 мм. Одно из дний оболочки жестко закреплялось в панорамном интерферометре, другое закрывалось стальной крышкой, к которой прикладывалась осевая сжимающая сила 50 Н. Полученная панорамная интерферограмма, несущая информацию о прогибах поверхности оболочки, представлена на рис. 11, а. На рис. 11, б приведена развернутая интерферограмма той же оболочки, нагруженной осевой сжимающей силой 100 Н. Она получена с помощью панорамного голографического интерферометра с максимальной апертурой.

Проведенные экспериментальные исследования показали достоверность результатов, получаемых методами панорамной интерферометрии, и возможность применения рассмотренных приборов в заводских условиях.

Заключение. Изложены основы и принципы реализации панорамных интерферометров — нового класса измерительных приборов, предназначенных для исследования деформированного состояния осесимметричных объектов диаметром, меньшим 0,1 м. В этом классе представлены три направления: голографическая интерферометрия, спекл-интерферометрия, голографическая томография. Первое направление было разработано теоретически и экспериментально и эффективно применялось в промышленности, второе направление прошло лабораторную проверку, третье — разработано теоретически. Высокочувствительная панорамная интерферометрия свободна от ряда принципиальных метрологических и технических ограничений, которые неустранимы в традиционных методах экспериментальной механики. Панорамные интерферометры просты, компактны, сокращают трудозатраты тем, что на одной голограмме фиксируют несколько ракурсов наблюдения объекта, их конструкции многообразны, и для каждой задачи можно подобрать оптимальный вариант ее решения, сочетающий параллельное использование нескольких типов панорамных интерферометров при изучении одного объекта. Рассматриваемые приборы позволяют по одной голограмме получить компоненты вектора перемещения всех точек деформируемой поверхности с одинаковой чувствительностью, а также компоненты тензора напряжений во всех точках объекта. В силу своей универсальности и уникальных возможностей разработанные методы панорамной интерферометрии эффективны при проведении качественного и количественного контроля промышленных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борыняк Л. А., Краснопевцев Е. А., Логинов А. В., Штыгашев А. А. Панорамные интерферометры для исследования деформаций объектов осесимметричной формы // Автометрия. 1992. № 2. С. 41.
2. Борыняк Л. А., Краснопевцев Е. А., Логинов А. В., Штыгашев А. А. Точность определения перемещений в голографических интерферометрах // Автометрия. 1992. № 6. С. 62.
3. Борыняк Л. А., Краснопевцев Е. А., Логинов А. В. Методические аспекты исследования деформаций в панорамных интерферометрах // Автометрия. 1993. № 1. С. 48.
4. Борыняк Л. А., Краснопевцев Е. А., Логинов А. В. Панорамный спекл-интерферометр для исследования перемещений деформируемых объектов // Автометрия. 1994. № 3. С. 22.
5. Вогунуак Л. А., Краснопевцев Е. А., Логинов А. В. Panoramic interferometers for investigating deformations of the axisymmetric objects // Proc. SPIE. 1996. 2791. P. 136.
6. Ауслендер А. Л., Вишняков Г. Н., Левин Г. Г. О восстановлении изображений поперечных сечений объектов по их проекциям // Оптика и спектроскопия. 1981. 50, вып. 2.
7. Вайнштейн Б. К. Трехмерная электронная микроскопия биологических макромолекул // УФН. 1973. 109, вып. 3.
8. Левин Г. Г., Вишняков Г. Н. Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989.
9. Александров А. Я., Ахмедзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 13 января 1998 г.