

УДК 535.317.1

КОНТАКТНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ МАЛОЙ КРИВИЗНЫ

С. И. Герасимов, В. А. Жилкин*

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049 Новосибирск

* Челябинский государственный агроинженерный университет, 454080 Челябинск

E-mails: gerasimov@stu.ru, vaz@mail.ru

Метод голографической интерферометрии применен для определения деформаций исследуемой криволинейной поверхности. Выведены уравнения расшифровки интерференционных полос для случая оболочки вращения.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, оболочка вращения, измерение деформаций поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные оптические методы применяются при анализе деформированного состояния тонкостенных конструкций значительной площади. Однако в известных вариантах они имеют определенные недостатки: низкую чувствительность в методе муаровых полос [1] и зависимость деформированного состояния изделия от механических и упругих характеристик преобразователя в методе фотоупругих покрытий [2]. В последние годы предпринимаются попытки применить для решения подобных задач современные высокочувствительные оптические методы, основанные на голографических способах записи информации [3]. Голографические методы, в отличие от классических, позволяют компенсировать аберрации оптических элементов интерферометра, а также регулировать чувствительность к перемещениям на стадии оптической обработки голограммы. Одним из недостатков этих методов является необходимость виброизоляции элементов экспериментальных установок, что затрудняет их использование в условиях заводских лабораторий. Требования, предъявляемые к виброизоляции, можно существенно снизить, если регистрирующую среду закрепить на исследуемом изделии [4, 5].

В данной работе изучаются деформации оболочек вращения с использованием накладного (контактного) голографического интерферометра [6].

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Расшифровка голографической интерферограммы. Плоская монохроматическая волна освещает исследуемую поверхность (рис. 1). Направления освещения и наблюдения определяются углами γ^o и γ^H , лежащими в плоскости yOz (рассматривается плоский случай). Регистрируются только параллельные диффузно отраженные от поверхности объекта световые лучи.

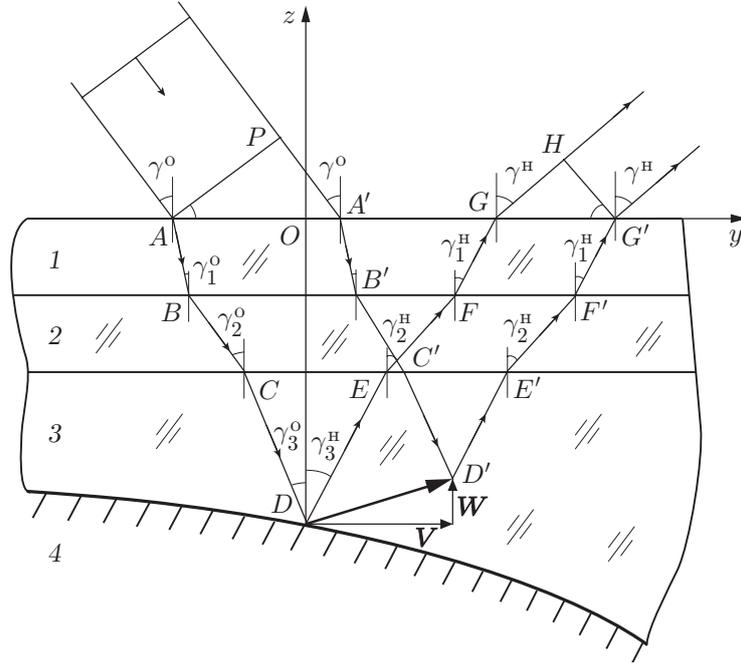


Рис. 1. Схема контактного голографического интерферометра:
 1 — голографическая регистрирующая среда; 2 — стеклянная подложка; 3 — воздушный зазор; 4 — исследуемая поверхность

Во время первой экспозиции оптическая длина пути света $ABCDEFHG$ равна

$$L_1 = \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma_i^o} + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma_i^H} + (V - W \operatorname{tg} \gamma_3^H) \sin \gamma^H,$$

где h_i, n_i — толщина и показатель преломления i -го слоя ($i = 1, 2, 3$); V, W — перемещения точки вдоль координатных осей x, z соответственно; γ_i — углы преломления света в i -м слое.

После приложения к оболочке внешней нагрузки точка D переместилась в точку D' . В этом случае оптическая длина пути, пройденного лучом света, равна

$$L_2 = \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma_i^o} + \sum_{i=1}^3 \frac{h_i n_i}{\cos \gamma_i^H} - W n_3 \left(\frac{1}{\cos \gamma_3^o} + \frac{1}{\cos \gamma_3^H} \right) + (V + W \operatorname{tg} \gamma_3^o) \sin \gamma^o.$$

Интенсивность света в интерференционной картине зависит от разности хода $L = L_2 - L_1$.

Для независимого определения компонент V и W регистрация восстановленной интерференционной картины проводится в двух симметричных относительно оси z направлениях в плоскости yOz . В этом случае

$$\begin{aligned} V &= \frac{(N_1 - N_2)\lambda}{2 \sin \gamma^H}; \\ W &= \frac{(N_1 + N_2)\lambda}{2(\cos \gamma^o + \cos \gamma^H)} + \frac{(N_1 - N_2) \sin \gamma^o \lambda}{2(\cos \gamma^o + \cos \gamma^H) \sin \gamma^H} = \\ &= \frac{N_2 \lambda}{2(\cos \gamma^o + \cos \gamma^H)} \left(-\frac{\sin \gamma^o}{\sin \gamma^H} + 1 \right) + \frac{N_1 \lambda}{2(\cos \gamma^o + \cos \gamma^H)} \left(\frac{\sin \gamma^o}{\sin \gamma^H} + 1 \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $N_k(x, y) = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ($k = 1, 2$) — номера интерференционных полос при различных направлениях наблюдения; λ — длина волны лазера.

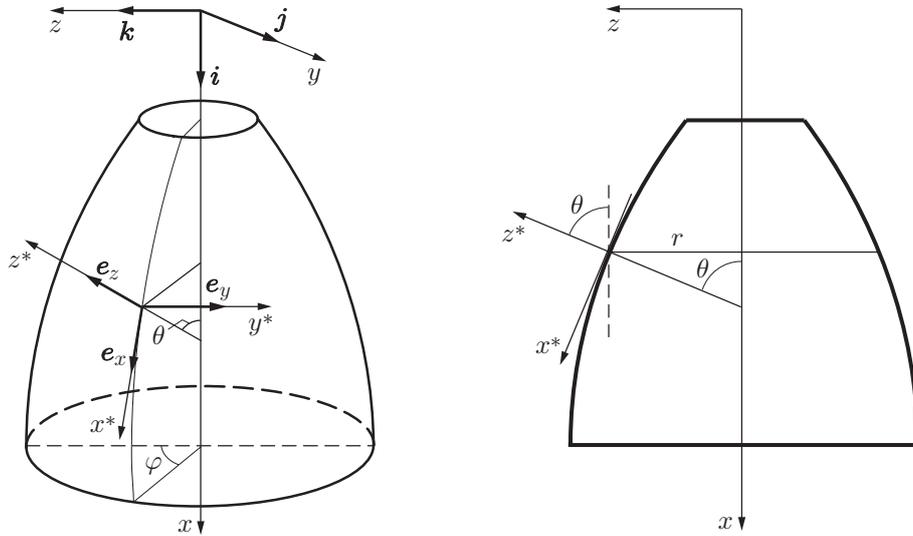
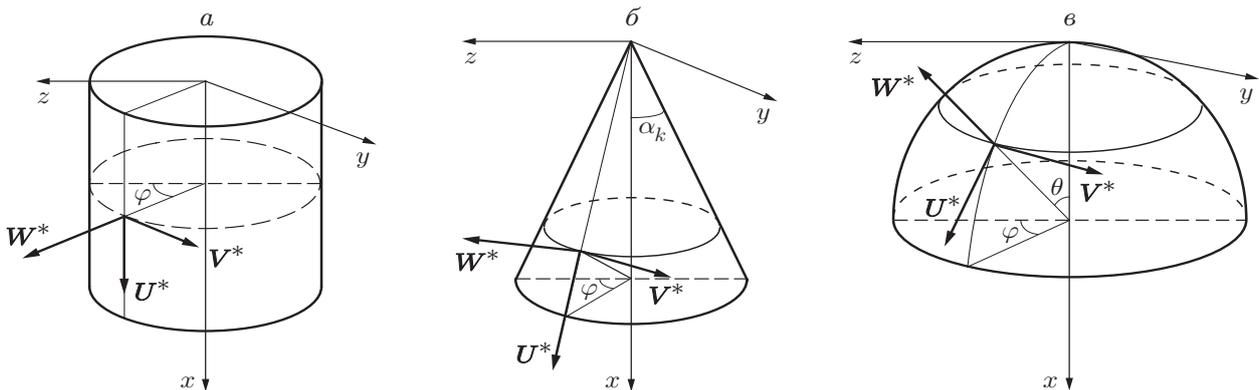


Рис. 2. Элементы геометрии оболочек вращения

Рис. 3. Частные случаи оболочек вращения:
а — цилиндр; б — конус; в — сфера

Аналогично находится компонента U ($k = 3, 4$). Определив перемещения U, V, W в системе координат (x, y, z) , связанной с плоскостью фотопластинки, необходимо перейти к компонентам U^*, V^*, W^* в подвижной системе координат, отслеживающей форму поверхности. Для этого рассмотрим общий случай оболочки вращения (рис. 2). Выразим единичные орты e_x, e_y, e_z подвижной системы координат через неподвижные орты i, j, k :

$$\begin{aligned} e_x &= \sin \theta \cdot i + \cos \theta \sin \varphi \cdot j + \cos \theta \cos \varphi \cdot k, \\ e_y &= 0 + \cos \varphi \cdot j - \sin \varphi \cdot k, \\ e_z &= -\cos \theta \cdot i + \sin \theta \sin \varphi \cdot j + \sin \theta \cos \varphi \cdot k \end{aligned}$$

(θ, φ — координатные углы для рассматриваемой точки).

В дальнейшем будем полагать, что нормаль фотопластинки совпадает с осью z , а определять компоненты U, V, W нужно в точке поверхности, которой соответствует подвижная система координат (x^*, y^*, z^*) . Если направляющие косинусы известны, то для трех частных случаев искомые перемещения определяются следующим образом:

1) круговой цилиндр (рис. 3,а):

$$\begin{aligned}U^* &= U, \\V^* &= V \cos \varphi - W \sin \varphi, \\W^* &= V \sin \varphi + W \cos \varphi;\end{aligned}$$

2) круговой конус (рис. 3,б):

$$\begin{aligned}U^* &= U \cos \alpha + V \sin \alpha \sin \varphi + W \cos \varphi \sin \alpha, \\V^* &= V \cos \varphi + W \sin \varphi, \\W^* &= -U \sin \alpha + V \cos \alpha \sin \varphi + W \cos \alpha \cos \varphi;\end{aligned}$$

3) сфера (рис. 3,в):

$$\begin{aligned}U^* &= U \sin \theta + V \cos \theta \sin \varphi + W \cos \theta \cos \varphi, \\V^* &= V \cos \varphi + W \sin \varphi, \\W^* &= -U \cos \theta + V \sin \theta \sin \varphi + W \sin \theta \cos \varphi.\end{aligned}$$

Вычисление поверхностных деформаций. Деформации срединной поверхности оболочки вращения описываются шестью компонентами [7]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_\theta &= \frac{1}{R} \left(\frac{\partial U}{\partial \theta} + W \right), & \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{R_\varphi \sin \theta} \left(\frac{\partial V}{\partial \varphi} + U \cos \theta + W \sin \theta \right), \\ \gamma &= \frac{1}{R_\theta} \frac{\partial V}{\partial \theta} - \frac{\cos \theta}{R_\varphi \sin \theta} V - \frac{1}{R_\varphi \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi}, & \chi_\theta &= -\frac{1}{R_\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{R_\theta} \left(\frac{\partial W}{\partial \theta} - U \right) \right], \\ \chi_\varphi &= -\frac{1}{(R_\varphi \sin \theta)^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} - \sin \theta \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - \frac{\cos \theta}{R_\theta R_\varphi \sin \theta} \left(\frac{\partial W}{\partial \theta} - U \right), \\ \tau &= -\frac{1}{R_\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{R_\varphi \sin \theta} \left(\frac{\partial W}{\partial \varphi} - V \sin \theta \right) \right] + \frac{1}{R_\theta R_\varphi \sin \theta} \left(\frac{\partial U}{\partial \varphi} - V \cos \theta \right).\end{aligned}\tag{2}$$

Выражения (2) содержат абсолютные значения U , V , W , а контактный голографический интерферометр способен зарегистрировать лишь относительные перемещения (в системе координат фотопластинки). В связи с этим необходимо производить дополнительные прямые измерения указанных компонент вблизи внешнего края интерферометра (например, индикатором часового типа), а затем учитывать их при построении поля $U(x, y)$, $V(x, y)$, $W(x, y)$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования служила оболочка в виде усеченного конуса высотой 120 см с радиусом основания 85 см и углом наклона образующей $2,5^\circ$. На внутренней поверхности оболочки имелись периодически расположенные ребра жесткости. Так как площадь исследуемой области превышала 1000 см^2 , использовался составной (мозаичный) интерферометр (рис. 4). Нагружение осуществлялось через стрингер сосредоточенной силой P . Для контроля перемещений W точек поверхности оболочки использовались индикаторы часового типа, а уровень деформаций на ее внутренней поверхности контролировался тензодатчиками типа КФ-5Р4.

Голограммы записывались методом двух экспозиций. Картина полос W , зарегистрированная центральной фотопластинкой (см. рис. 4), приведена на рис. 5. Расшифровка голограммы проводилась по формуле (1) с учетом того, что в эксперименте выполнялось

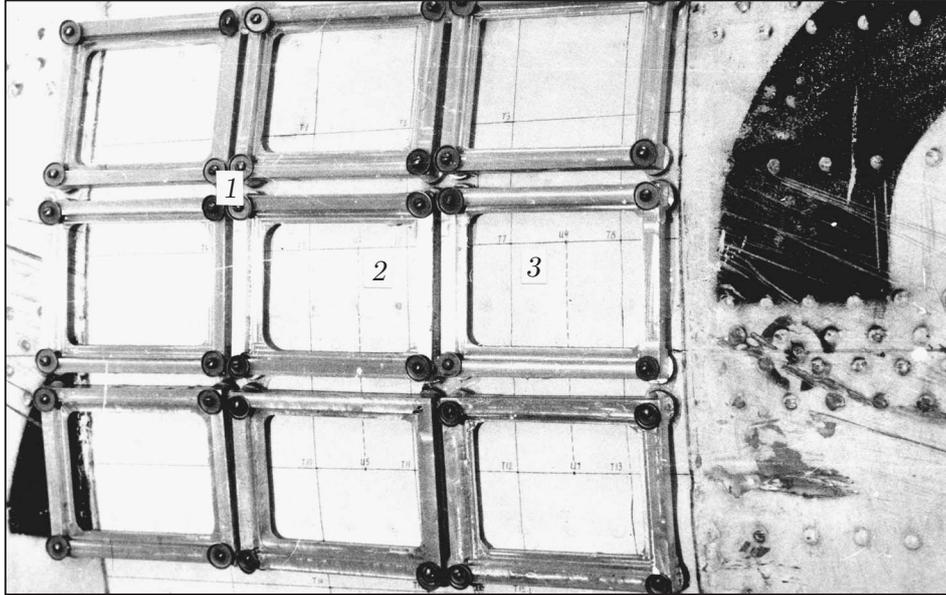


Рис. 4. Конструкция мозаичного интерферометра:

1 — кассеты для крепления фотопластинок; 2 — точка приложения сжимающей силы;
3 — координатная сетка

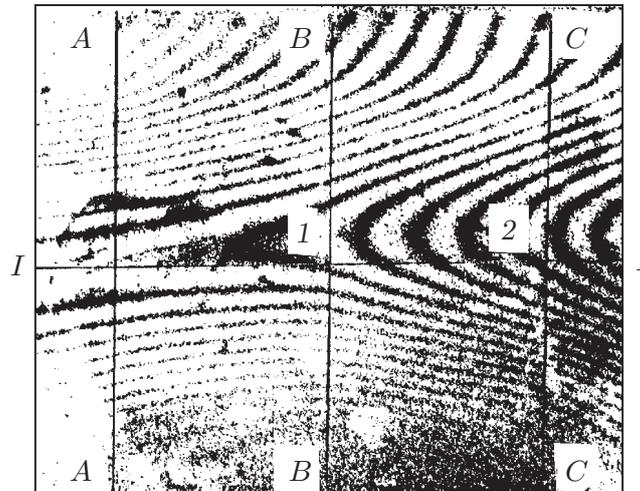


Рис. 5. Интерферограмма, полученная при действии сжимающей силы $P = 50$ Н

условие $\gamma^H = \gamma^0 = 0$. Вдоль сечений $I-I$, $A-A$, $B-B$, $C-C$ строились эпюры $N(x, y)$, с помощью специализированной программы USMI53 проводилась локальная параболическая аппроксимация функции $N(x, y)$ в узлах неравномерной сетки и вычислялись производные $\partial^2 W / \partial x^2$, $\partial^2 W / \partial y^2$. Программа USMI55 позволяла создавать линейную комбинацию полей $N(x, y)$ для различных направлений наблюдения [8].

Для исследованной оболочки отношение линейных размеров одной голограммы к радиусу кривизны было таким, что в первом приближении можно считать справедливыми соотношения, соответствующие гипотезе прямых нормалей:

$$\varepsilon_x = -z \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right), \quad \varepsilon_y = -z \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right).$$

Точка на рис. 5	Значение ε_x по данным	
	голографии	тензометрии
1	$1,90 \cdot 10^{-5}$	$2,32 \cdot 10^{-5}$
2	$0,96 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$

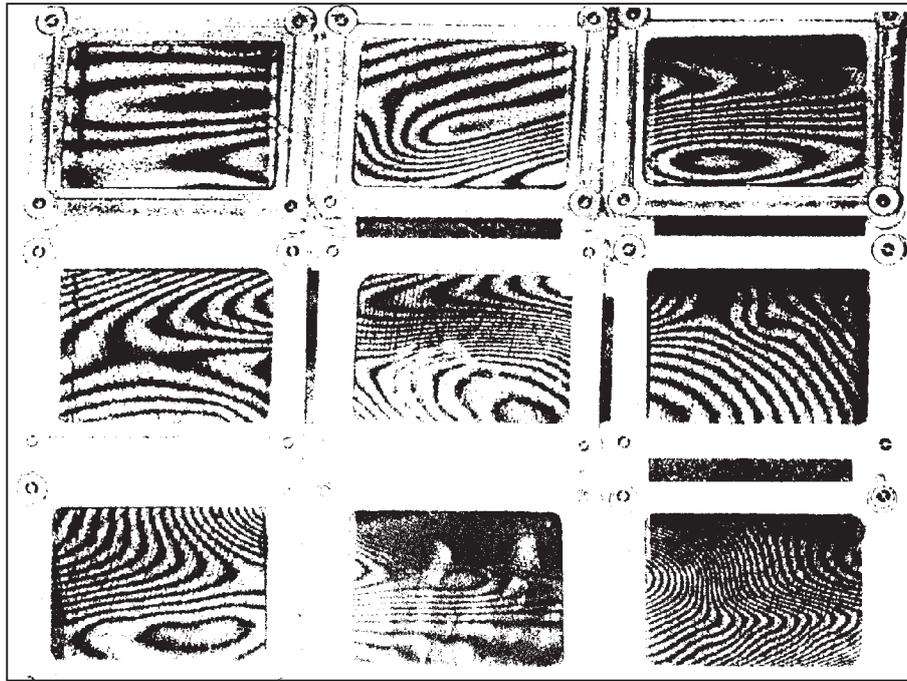


Рис. 6. Интерферограммы участка поверхности оболочки, полученные при $P = 40$ Н

Здесь $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ — деформации поверхности оболочки; $z = h/2$ — расстояние от данной точки до срединной плоскости; h — толщина оболочки; ν — коэффициент Пуассона.

Для точек 1 и 2 (см. рис. 5) получены значения ε_x , приведенные в таблице. Различие результатов измерений методами голографии и тензометрии составляет приблизительно 20 %.

Интерференционные картины, полученные при нагрузке $P = 40$ Н, представлены на рис. 6. Расположение фотопластинок соответствует рис. 4.

3. ВЫВОДЫ

Впервые экспериментально подтверждена возможность проведения внестеновых испытаний оболочки малой кривизны с использованием голографической интерферометрии. Получены разрешающие уравнения для компонент вектора перемещения точек исследуемой поверхности в подвижной и неподвижной системах координат. Сопоставлены результаты обработки интерференционных картин и тензометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара. М.: Мир, 1974.
2. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973.

3. **Островский Ю. И., Щепинов В. П., Яковлев В. В.** Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988.
4. **Post D., Han B., Iju P.** High-sensitivity moire: experimental analysis for mechanics and materials. N. Y.: Springer-Verlag, 1997.
5. **Neumann D. B., Penn R. C.** Object motion compensation using reflection holography // J. Opt. Soc. Amer. 1972. V. 62, N 12. P. 1373.
6. **Жилкин В. А., Герасимов С. И.** О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // Журн. техн. физики. 1982. Т. 52, № 10. С. 2079–2085.
7. **Прочность, устойчивость, колебания:** Справ. / Под ред. И. А. Биргера. М.: Машиностроение, 1968. Т. 1.
8. **Устименко А. П.** Численное исследование погрешности алгоритмов обработки экспериментальных данных // Применение лазеров в народном хозяйстве. Челябинск: Урал. дом науч.-техн. пропаганды, 1989. С. 43.

Поступила в редакцию 24/VI 2005 г.
