

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 621.378 : 681.33

Л. А. Борняк, Е. А. Краснопевцев, А. В. Логинов
(Новосибирск)

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ
В ПАНОРАМНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

Рассмотрены схемы панорамных интерферометров, допускающие увеличение габаритов исследуемых объектов. Исследовано деформированное состояние цилиндрической оболочки, подвергнутой осевому сжатию. Представлены результаты машинной обработки интерферограмм.

Экспериментальное исследование деформированного состояния изделий в панорамных интерферометрах связано с регистрацией интерферограмм, алгоритмом их обработки, метрологией и автоматизацией данных процессов. В работах [1—3] рассмотрены схемы панорамных интерферометров, отдельные алгоритмы расшифровки интерферограмм, приведены примеры измерения перемещений и деформаций для осесимметричных объектов. Однако методическим аспектам определения деформаций должного внимания не уделено. Ниже на примере исследования однородных деформаций цилиндрической оболочки, подвергнутой осевому сжатию, восполнен этот пробел. Для расширения диапазона измеряемых величин предложены вариации угла конического зеркала при регистрации голограмм и наблюдении интерферограмм. Анализируется проблема выделения деформаций на фоне общего смещения при наклонах оболочки по отношению к оси симметрии, когда она подвергается силовому воздействию. Предлагается один из способов определения порядка интерференционной полосы. Представлены результаты машинной обработки интерферограмм, пригодные для расшифровки оптической информации.

Схемное решение для панорамных интерферометров. Известно несколько схем интерферометров, позволяющих осуществлять одновременно круговую регистрацию информации о трехмерном объекте. В некоторых из них используются зеркальный конус и несколько голограмм [4]. Основные технические решения, позволяющие регистрировать перемещения деформируемой поверхности на одной плоской голограмме, приведены в [1—3]. В данных интерферометрах объект соосно прикрепляется к малому основанию конуса, а голограмма — к большому основанию. При наблюдении интерферограмм выделяют информацию о перемещениях, нормальных к исследуемой поверхности. Когда регистрируются перемещения вдоль исследуемой поверхности, то на нее наносится эмульсия и внутри конуса вокруг объекта размещается растр, который экспонируется на эмульсию. Муаровая картина полос несет информацию о внутриплоскостных перемещениях объекта.

Следует отметить, что разработанные методы имеют ограниченную область применения, так как габариты конуса растут пропорционально длине объекта, а конус диаметром 300 мм практически является предельным по интерферометрическим и техническим критериям.

Нарушение условий Брэгга при разворачивании эмульсии из цилиндра в плоскость также ограничивает точность определения внутриплоскостных перемещений.

Ниже рассмотрены методы, позволяющие устранить перечисленные ограничения для более широкого использования панорамных интерферометров в практических исследованиях.

На рис. 1, а представлена схема интерферометра (1 — исследуемый объект (цилиндрическая оболочка), 2 — коническое зеркало, 3 — голограмма). Способ освещения объекта понятен из рисунка. Вектор перемещения D можно разложить на составляющие u, v, w , направленные вдоль осей x, y, z . В методе двух экспозиций голограмму 3 дважды экспонируют в поле когерентного излучения He—Ne-лазера. На нее со стороны зеркала 2 попадает излучение, рассеянное поверхностью оболочки 1, а также отраженное коническим зеркалом 2. Это позволяет организовать несколько схем для записи и наблюдения интерферограмм. Опорной волной во всех схемах является излучение, падающее на голограмму со стороны лазера. После проявления голограммы, при освещении ее нормально падающим излучением, в отраженном свете наблюдается мнимое изображение конического зеркала и оболочки, на поверхности которой видна система полос. Последние, согласно геометрической модели, возникают из-за интерференции излучения, рассеянного каждой точкой поверхности до и после деформации. При $|D| \ll l$, где l — характерный размер оболочки, условие наблюдения интерференционных полос имеет вид

$$(e_k - e_s)D = n_k \lambda, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где e_k, e_s — единичные векторы наблюдения и освещения некоторой точки поверхности оболочки (рис. 1, б). Здесь I — луч, идущий после отражения от зеркала параллельно оптической оси; II — луч, идущий под углом наблюдения α к оптической оси; III — луч, освещающий оболочку; 2Θ — угол раствора конического зеркала; A, A — линия образующей оболочки. Абсолютный порядок n_k интерференционной полосы, наблюдаемой в той же точке, принимает целое значение, если полоса светлая, и полуцелое, если полоса темная. Изменение угла наблюдения α приводит, согласно (1), к изменению n_k и, следовательно, к перемещению полос по поверхности оболочки. Уравнение (1) для лучей I и II можно представить в виде

$$2w \cdot \sin 2\Theta + 2u \cdot \cos 2\Theta = n_1 \lambda, \quad (2)$$

$$w(\sin \alpha + \sin 2\Theta) + u(\cos \alpha + \cos 2\Theta) = n_2 \lambda. \quad (3)$$

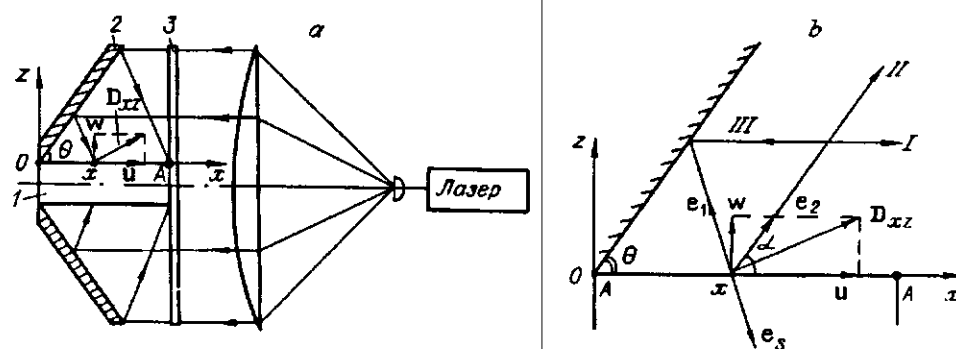


Рис. 1

При $\alpha = 2\Theta$ луч II переходит в луч I , а уравнение (3) — в (2). Из (2) и (3) определяем w и u :

$$w = \lambda \frac{-\frac{n_1}{2}(\cos\alpha + \cos 2\Theta) + n_2 \cdot \cos 2\Theta}{\sin\alpha \cdot \cos 2\Theta - \cos\alpha \cdot \sin 2\Theta}, \quad (4)$$

$= 0$, т. е. при $\alpha = \pi - 2\Theta$, в этом случае $w = \frac{n_2}{2\sin 2\Theta} \lambda$, например, если $\Theta = \pi/3$, то $\alpha = \pi/3$, $w = \frac{n_2}{\sqrt{3}} \lambda$. Величина u ни при каких α и Θ ($0 < \alpha$, $2\Theta < \pi$) не может быть представлена как функция только n_1 или n_2 .

При $\alpha \neq 2\Theta$ система (4) позволяет найти w и u для любой точки исследуемой поверхности, если для нее известны n_1 и n_2 . Для определения последних необходимо произвести фотографирование голограммы в лучах I и II . Для получения изображения голограммы в лучах I используют схему рис. 2, а, где 1 — голограмма, 2 — полупрозрачное зеркало. Фотографию голограммы в лучах II можно получить по схемам рис. 2, б, где 1 — голограмма, 2 — кольцевое коническое зеркало. Другим вариантом является схема, представленная на рис. 2, с, где 1 — голограмма, 2 — кольцевое коническое зеркало, 3 — полупрозрачное зеркало, $\gamma = \alpha/2$, $R_1 = R(1 + \cos\alpha)$, $S = R(1 + \cos\alpha)/\sin\alpha$. При этом боковая поверхность цилиндра преобразуется кольцевым коническим зеркалом в кольцевую полосу. При определении на фотографиях абсолютных порядков интерференционных полос следует использовать следующие правила:

1. Для закрепленного основания оболочки $D = 0$. Тогда из (1) следует, что для любого угла наблюдения $n = 0$, поэтому по основанию оболочки проходит светлая полоса $n = 0$.

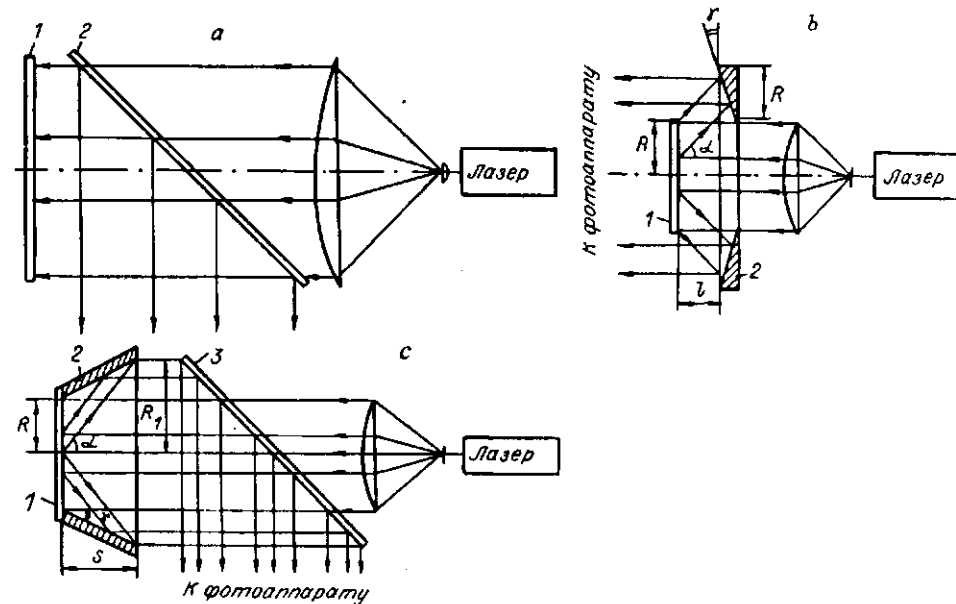


Рис. 2

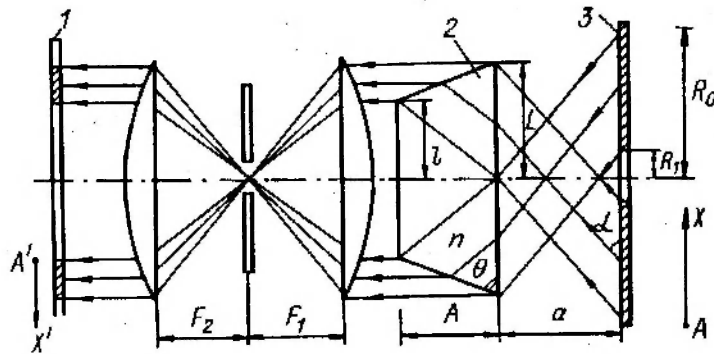


Рис. 3

2. Полосы образуют замкнутые кривые, при этом они могут оказаться в пределах самой оболочки или выходить и на ее торец. Номера полос должны быть согласованы между собой на всем протяжении этих полос, что возможно только при наличии панорамной фотографии.

3. При сжатии оболочки $u < 0$, на ее краю, где $|u| \gg |w|$, при $\alpha < \pi - 2\Theta$ из (3) получаем $n_2 < 0$.

4. Соседние полосы, имеющие ширину одного порядка, соответствуют монотонному изменению n .

5. Появление полосы, которая на всем протяжении имеет ширину на порядок большую, чем у соседних полос, означает наличие экстремума n вдоль широкой полосы. Если это соотношение наблюдается не на всем протяжении полос, то имеет место точка перегиба.

6. Возможность согласования между оцифровками полос для разных углов наблюдения α (в частности, для лучей I и II) вытекает из правила: изменение угла наблюдения, приводящее к перемещению полос по поверхности оболочки, сохраняет номера этих полос. Из (3) получаем $dn/d\alpha = w \cdot \cos\alpha - u \cdot \sin\alpha$, тогда для сжатия на конце оболочки $dn/d\alpha > 0$. Следовательно, в рассматриваемых случаях при переходе от лучей II к лучам I, когда угол α растет, n также растет от отрицательных значений к положительным, проходя через нуль, однако не одновременно во всех точках. При этом полосы вначале отодвигаются от основания оболочки, сходя с нее и/или редуцируя, и их число уменьшается, а затем число полос начинает расти.

На рис. 3 представлен еще один вариант оптической схемы, предназначенной для определения компоненты u , проекции вектора перемещения \vec{D}_x в плоскости XZ и угла наклона этой проекции δ к оси X. Здесь 1 — фотопластинка, 2 — коническая линза, 3 — голограмма. Схема позволяет выделить лучи, рассеянные голограммой 3 под одним и тем же углом α и лежащие в плоскостях, проходящих через оптическую ось системы. Это достигается применением пространственной фильтрации. Через отверстие диафрагмы проходят только те лучи, которые падают на коническую линзу под определенным углом. Эти лучи соответствуют вектору наблюдения e_1 , составляющему угол α с осью z (рис. 4, a) и лежащему в плоскости, проходящей через ось системы. Из рисунка следует выражение для разности хода:

$$\begin{aligned} \Delta &= (e_1 - e_2) \cdot \vec{r} = r \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} - \left(\frac{\alpha}{2} + \delta \right) \right] \cos \frac{\alpha}{2} = \\ &= D_x [\sin \delta + \sin(\alpha + \delta)] = D_x [\sin \alpha \cdot \cos \delta + (1 + \cos \alpha) \sin \delta]. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение светлых полос $\Delta = n' \lambda$ можно записать в виде

$$D_x(x) [\sin \alpha \cdot \cos \delta(x) + (1 + \cos \alpha) \sin \delta(x)] = \lambda n'(x), \quad (6)$$

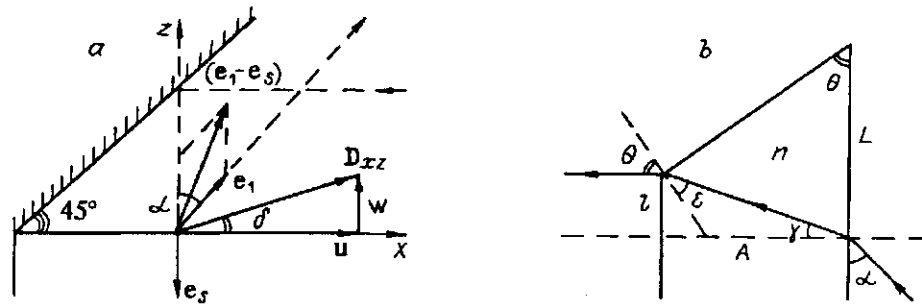


Рис. 4

где угол α ($\alpha \geq 45^\circ$) задается параметрами установки (рис. 4, б), $n'(x)$ — номер светлой полосы на фотопластинке в точке X . Поскольку $w(x) = D_{xz}(x) \times \sin \delta(x)$, то из (1) имеем

$$D_{xz}(x) \cdot \sin \delta(x) = \frac{\lambda}{2} n(x). \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (6) и (7) позволяет найти D_{xz} и δ :

$$\operatorname{tg} \delta(x) = \frac{\sin \alpha}{2 \frac{n'(x)}{n(x)} - (1 + \cos \alpha)}. \quad (8)$$

Зная угол δ , можно найти $D_{xz}(x)$ по формуле (7). Поскольку $u(x) = D_{xz}(x) \times \cos \delta(x)$, то

$$u(x) = [n'(x) - \cos^2 \frac{\alpha}{2} n(x)] \lambda / \sin \alpha. \quad (9)$$

Точность измерения возрастает, когда n'/n достигает максимума по переменной α . Это будет, если $\alpha = 90^\circ - \delta$. Угол α задается параметрами Θ и показателем преломления n материала конической линзы.

В соответствии с рис. 3 и 4, б параметры конической линзы определяются следующими выражениями:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha} - 1}, \quad (10)$$

$$L = R_0 - R_1, \quad A = L \frac{\cos \alpha \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}}{n^2 - \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}}, \quad l = L \frac{\cos^2 \alpha}{n^2 - \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}}.$$

Другая оптическая схема, выделяющая лучи, идущие от голограммы параллельно друг другу под углом α и лежащие в плоскостях, проходящих через оптическую ось системы, приведена на рис. 5 (1 — экран, 5 — зонная пластинка, 7 — голограмма). Диафрагма 6 задерживает лучи, идущие от рабочей части голограммы параллельно оптической оси. Зонная пластинка с постоянным периодом d направляет лучи, дифрагированные в порядке m , на линзу 4. Система 2—4 пропускает на фотопластинку только те лучи, которые падают на линзу 4 параллельно оптической оси. В результате на фотопластинку попадают только те из лучей, рассеянных голограммой, которые лежат в плоскости оптической оси и идут под углом α к голограмме.

На рис. 6 изображена принципиальная схема голографического панорамного интерферометра, используемого для увеличения длины контролируемых цилиндрических оболочек. Интерферометр содержит последовательно расположенные источник излучения — лазер 1, коллиматор 2, носитель записи в

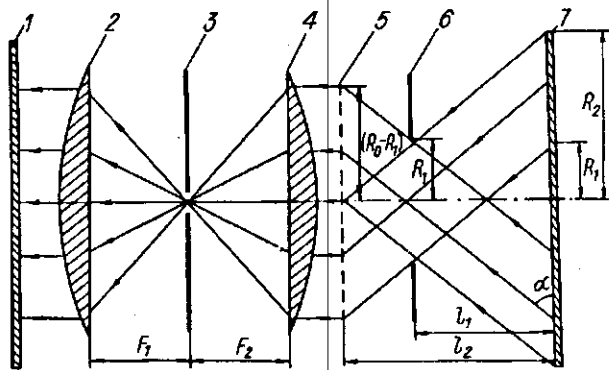


Рис. 5

виде фотолампы 3, коническое зеркало 4 с отражающей внутренней поверхностью, корпус 5, в котором закреплено меньшим основанием зеркало 4, держатель объекта, выполненный в виде цангового зажима 6, дифракционную решетку 7 и объект исследования 8. Коническое зеркало изготовлено с углом при вершине усеченного конуса, меньшим чем 90° . Ось зеркала совмещена с осью цангового зажима. Дифракционная решетка с окружной ориентацией штрихов, перпендикулярных в каждой точке образующей конического зеркала, предназначена для освещения поверхности объекта по нормали и выделения отраженного излучения под требуемым углом. Условия максимумов отраженного излучения для отражательной решетки могут быть представлены в виде [5]

$$d(\sin\psi + \sin\varphi) = m\lambda, \quad (11)$$

где ψ — угол падения излучения на поверхность решетки, φ — угол отражения излучения, λ — длина волны излучения, d — период решетки, m — порядок дифракции. Между углом конического зеркала при вершине конуса 2α и параметрами решетки в соответствии с уравнением (11) существует прямая связь:

$$\alpha + \psi = \varphi + \psi = 90^\circ, \quad d(\sin\psi + \sin\varphi) = \sqrt{2}d \cdot \cos(45^\circ - \alpha), \quad (12)$$

$$N = \frac{1}{d} = \frac{\sqrt{2} \cdot \cos(45^\circ - \alpha)}{m\lambda},$$

где N — число штрихов решетки на единицу длины вдоль образующей конического зеркала. Задав длину исследуемого объекта L , диаметр большего основания конуса D_1 и диаметр исследуемого объекта D_2 , определяем угол конического зеркала α в виде

$$\alpha = \arctg \frac{D_1 - D_2}{2L}. \quad (13)$$

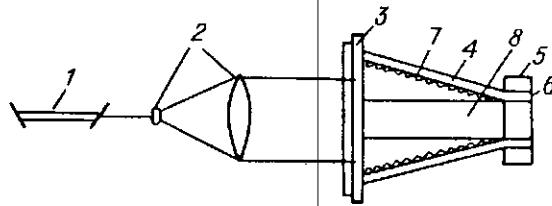


Рис. 6

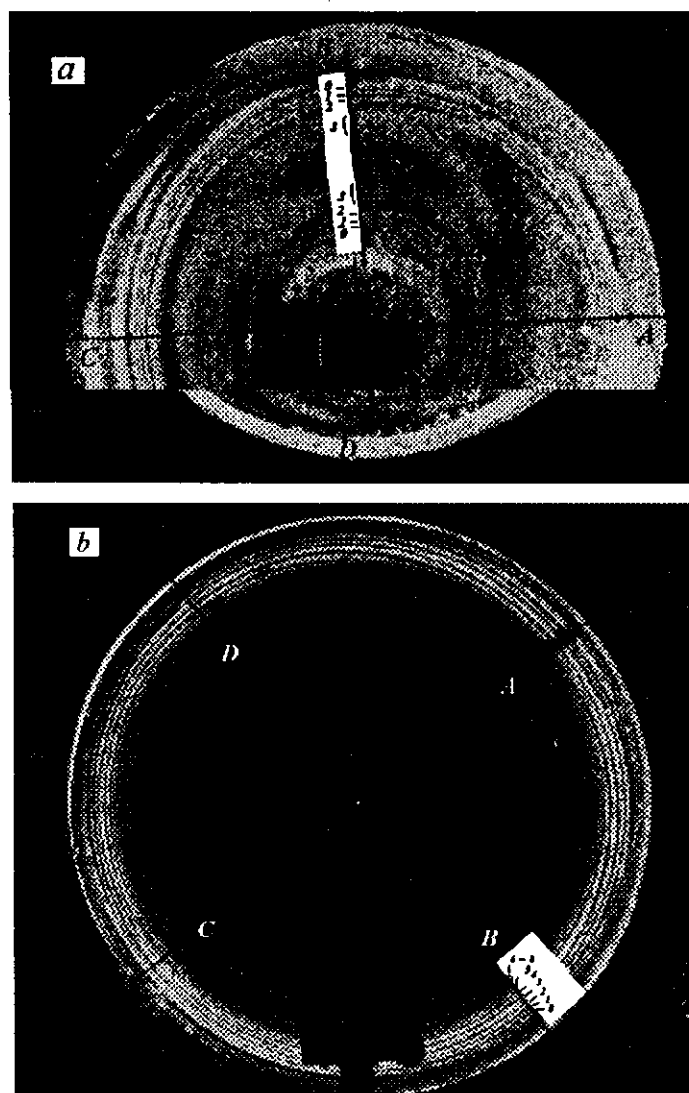
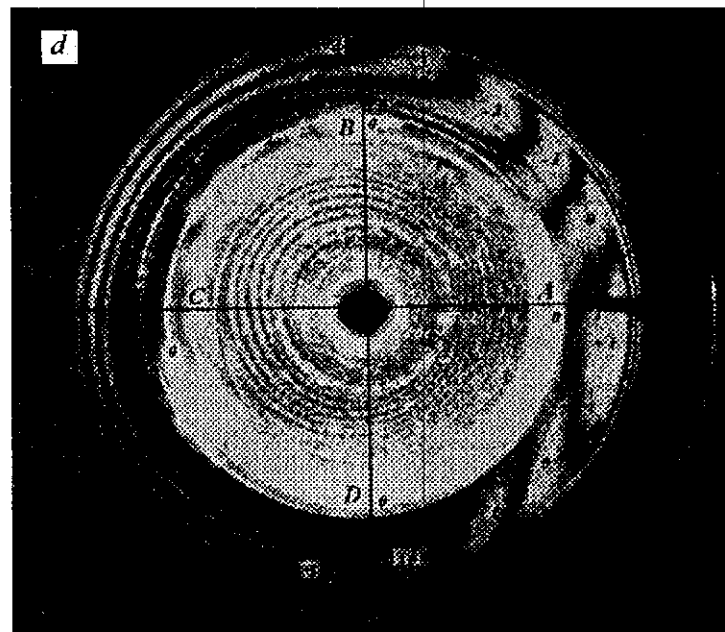
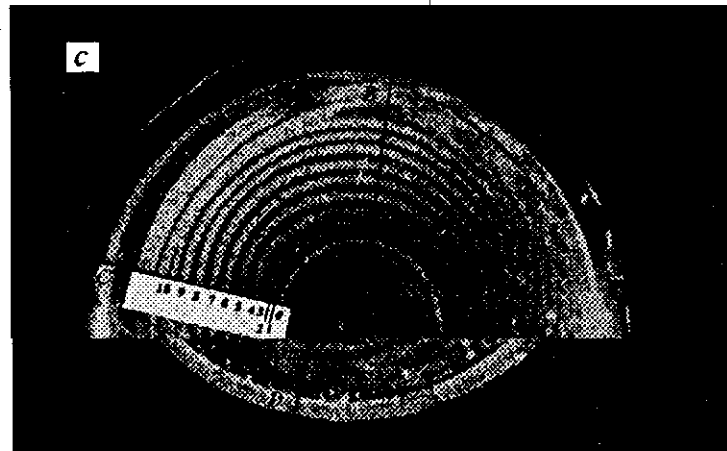


Рис. 7

Выражения (11)—(13) полностью определяют параметры элементов устройства, в частности, угол и длину конического зеркала, частоту штрихов дифракционной решетки.

Эксперимент. Исследовались цилиндрические оболочки из оргстекла диаметром 26 мм, толщиной стенок 1 мм. Для повышения коэффициента отражения света поверхность была покрыта белой матовой краской, а вдоль одной из образующих на поверхности оболочки проведена линия начального отсчета полярного угла (линия A_0A). Оболочка сжималась с помощью спицы, завинченной в торец, изготовленной из стальной пластины толщиной 5 мм. Голограммы диаметром 110 мм получены методом двух экспозиций в панорамном интерферометре с $\Theta_1 = 45^\circ$ и $\Theta_2 = 60^\circ$. При этом фотопластинки ПФГ-03



проявлялись в течение 30 мин в проявителе ГП-8. Для определения перемещений u и w производилось фотографирование голограмм по схемам рис. 2, $a-c$ при $\alpha = 45^\circ$. Часть результатов с указанием абсолютного порядка полос представлена на рис. 7, $a-d$, где a — фотография голограммы для $\Theta = 45^\circ$ в лучах I по схеме рис. 2, a ; b — в лучах II с $\alpha = 45^\circ$ по схеме рис. 2, b ; c — фотография голограммы для $\Theta = 60^\circ$ в лучах I по схеме рис. 2, a ; d — в лучах II с $\alpha = 45^\circ$ по схеме рис. 2, c .

Численно определялись смещения оболочки в точках, лежащих на четырех образующих A, B, C, D , соответствующих полярному углу: $0, 90, 180, 270^\circ$. После нумерации на фотографиях всех полос исследуемые участки переводились в цифровое изображение на видеотерминале IBM PC/AT. Исходное изображение (рис. 8, a) пропусклось через фильтр низких частот для устранения спеклов (рис. 8, b). В некоторых случаях производилось также вы-

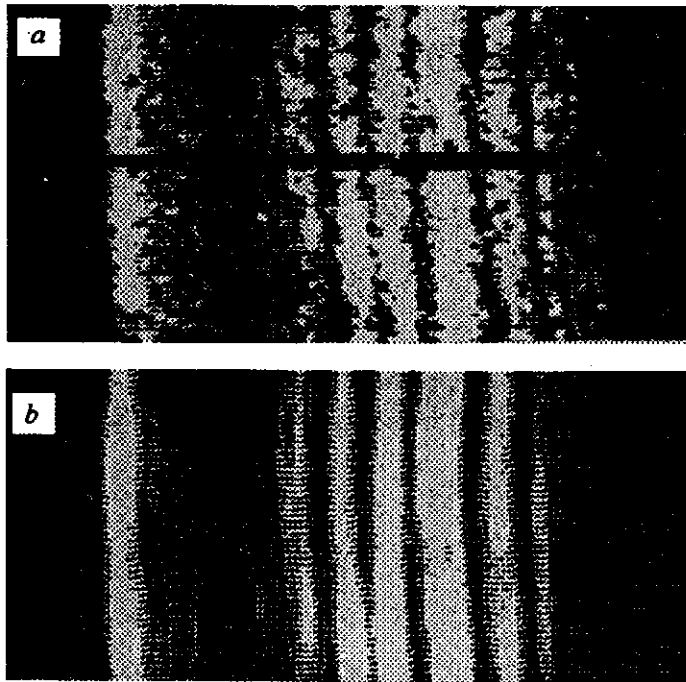


Рис. 8

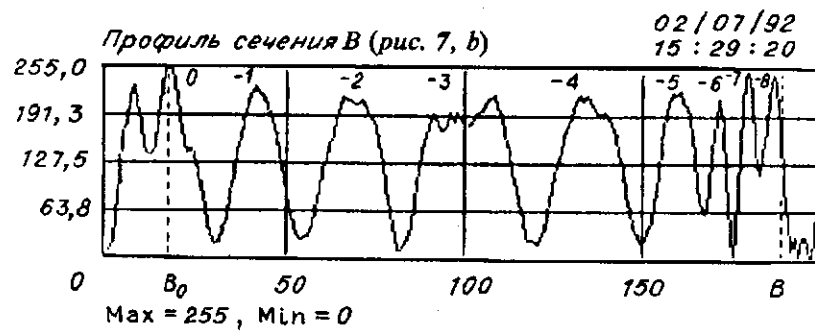


Рис. 9

равнивание контраста средних и верхних частот. Затем на ЭВМ строились графики оптической плотности изображения вдоль исследуемой образующей (рис. 9). После обработки всех участков по полученным результатам построены графики $n_k(x)$ положений светлых и темных полос и по формулам (4) определены w и u (рис. 10). Форма образцов до и после сжатия качественно представлена на рис. 11, a, b , где $F_1 = 9, F_2 = 5$ кГ.

ВЫВОДЫ

Анализ методических особенностей работы панорамных интерферометров, представленный выше, показывает, что существуют возможности расширения диапазона габаритных размеров исследуемых объектов за счет вариации угла конического зеркала. Кроме того, открываются новые возможности одновременной регистрации с регулируемой чувствительностью нескольких проекций вектора перемещения. Процесс исследования деформаций

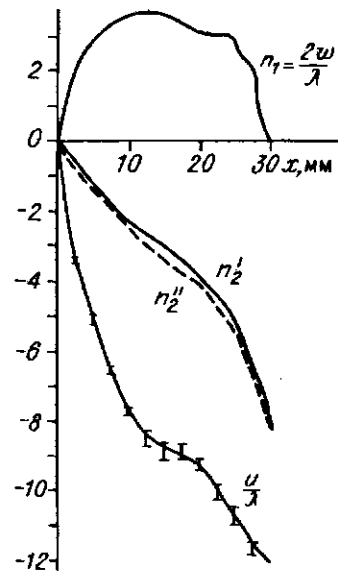


Рис. 10

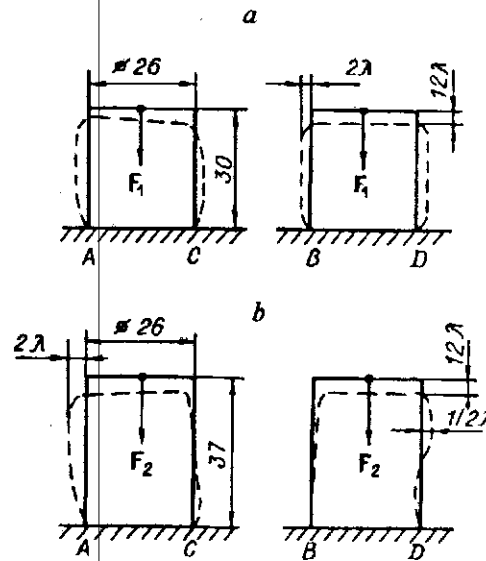


Рис. 11

оболочек в панорамных интерферометрах может быть автоматизирован, что демонстрирует тестовый эксперимент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жилкин В. А., Борыняк Л. А. Исследование деформированного состояния замкнутой круговой цилиндрической оболочки методом голографической интерферометрии // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений: Межвуз. сб. науч. тр.—Новосибирск, 1982.
2. Жилкин В. А., Устименко А. П., Борыняк Л. А. Исследование деформированного состояния тонкостенных круговых цилиндрических оболочек с помощью панорамного интерферометра // Прикладная механика.—1986.—№ 12.
3. Борыняк Л. А., Краснопецев Е. А., Логинов А. В., Штыгашев А. А. Панорамные интерферометры для исследования деформаций объектов осесимметричной формы // Автометрия.—1992.—№ 2.
4. Оптическая голография. Практические применения /Под ред. В. М. Гинзбурга, Б. М. Степанова.—М.: Сов. радио, 1978.
5. Нагибина И. М. Интерференция и дифракция света.—Л.: Машиностроение, 1974.

Поступила в редакцию 15 октября 1992 г.