

УДК 621.378 : 681.33

Л. А. Борыняк, Е. А. Краснопевцев, А. В. Логинов
(Новосибирск)**ПАНОРАМНЫЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ**

Представлена схема панорамного спекл-интерферометра для исследования деформированного состояния объектов осесимметричной формы. Обсуждаются параметры спекл-структуры и особенности квазисевого изображения диффузно рассеивающего предмета, образуемого сфокусированной спеклограммой, отраженной зеркальным конусом. На основе геометрической модели рассмотрен алгоритм расшифровки интерферограмм. Проведен метрологический анализ получаемых результатов. Представлен результат определения перемещений цилиндрической оболочки, подвергнутой осевому сжатию.

Введение. Определение перемещений поверхности тел вращения, подвергнутых деформациям традиционными оптическими методами, сопряжено с рядом трудностей, возникающих при стыковке фрагментов, получаемых с отдельных направлений наблюдения, и изменением чувствительности вдоль исследуемой поверхности. В [1—5] описаны интерферометры, при помощи которых можно устранить эти трудности. Круговые интерферограммы цилиндрических оболочек регистрируются во встречных пучках по схеме Ю. Н. Денисюка с использованием зеркального конуса. Для регистрации информации используется одна плоская голограмма. Оболочка помещается внутри конуса. В [3, 4] указывается на принципиальную возможность реализации панорамного спекл-интерферометра.

Предлагаемая работа посвящена результатам исследований панорамного спекл-интерферометра. Она является естественным продолжением [3, 4].

Схема регистрации спеклограммы. Наложение когерентного излучения, идущего от разных участков диффузно рассеивающей поверхности предмета, приводит к образованию хаотической интерференционной картины, называемой спекл-структурой. Если рассеивающий участок имеет характерный размер d , то интерференция от его крайних точек в направлении нормали к поверхности, на расстоянии z от нее, создает интерференционные полосы, характерное расстояние между которыми определяется формулой Юнга $\Delta x = \lambda \frac{z}{d}$. Вклад остальных точек приводит к образованию в пространстве сигарообразных областей с наибольшей плотностью световой энергии — спеклов. Их поперечный размер [6]

$$\Delta x = 1,22\lambda \frac{z}{d}, \quad (1)$$

продольный —

$$\Delta z = 4\lambda \left(\frac{z}{d}\right)^2. \quad (2)$$

Если тот же участок отображается линзой диаметром d_n в плоскость изображения, отстоящую от линзы на расстоянии z_n , то размер спеклов определяется параметрами линзы:

$$\Delta x = 1,22\lambda \frac{z_n}{d_n} = 1,22\lambda F(1 + \beta)d_n, \quad \Delta z = 4\lambda F^2(1 + \beta)^2/d_n^2, \quad (3)$$

где r — фокусное расстояние, β — увеличение линзы. При $F/d_n = 4$, $\beta \approx 1$ продольный размер спекла на один-два порядка превышает его поперечный размер. Если на диффузно рассеянную предметную волну наложить плоскую когерентную волну, то можно осуществить голографический способ регистрации и восстановления предметной спекл-структуры. Когда на голограмму проецируется сфокусированное линзой изображение диффузно рассеивающего предмета, фиксируется также его спекл-структура. При освещении спеклограммы опорной волной восстанавливается действительное и мнимое изображения образа предмета, созданного линзой. В плоскости голограммы возникает также квазисеовое, по отношению к опорной волне, позитивное изображение, вызванное дифракцией опорной волны на спекл-структуре [7]. Если предметная волна представляет собой пучок со слабо выраженным диффузным рассеянием, то квазисеового изображения не возникает. Следовательно, диффузное рассеяние света предметом является необходимым условием формирования таких изображений. Для получения квазисеовых изображений нет необходимости в обязательном формировании опорного пучка. Изображающая спеклограмма может быть получена простым фотографированием сфокусированного изображения предмета в диффузно рассеянном когерентном свете. Однако следует отметить, что восстановленное при этом квазисеовое изображение объекта обладает пониженным контрастом.

Спекл-интерферометрия состоит в регистрации на спеклограмме двух световых полей, соответствующих двум положениям точек исследуемого предмета. Спеклограмма регистрирует и воспроизводит вариации фазовой информации, обусловленные смещением точек в поперечных к оптической оси направлениях. К смещениям вдоль оптической оси спеклограмма малочувствительна, так как смещение спеклов в этом направлении незначительно изменяет спеклограмму из-за больших продольных размеров спеклов. Изменение увеличения изображения при продольных смещениях точек и вызванное этим поперечное смещение спеклов пренебрежимо мало для параксиальных лучей. По этой причине спекл-интерферометрия практически нечувствительна к нормальным смещениям, она позволяет изучать смещения точек предмета лишь в плоскости, параллельной той, в которой расположена фотопластинка. При дифракции освещающей волны на полученных спекл-структурах и наложении этих волн возникает интерференционная картина, видимая на фоне изображения предмета.

Панорамный спекл-интерферометр содержит (рис. 1): освещающую систему, коническое зеркало с цилиндрическим исследуемым предметом, фокусирующую систему, создающую на фотопластинке изображение цилиндрической поверхности в коническом зеркале. Экспозиция производится дважды:

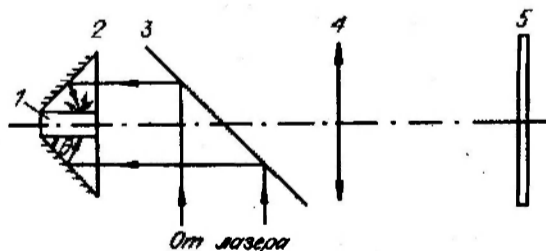


Рис. 1. Схема панорамного интерферометра:

1 — цилиндрический предмет, 2 — коническое зеркало, 3 — полупрозрачное зеркало, 4 — объектив, 5 — фотопластинка (спеклограмма)

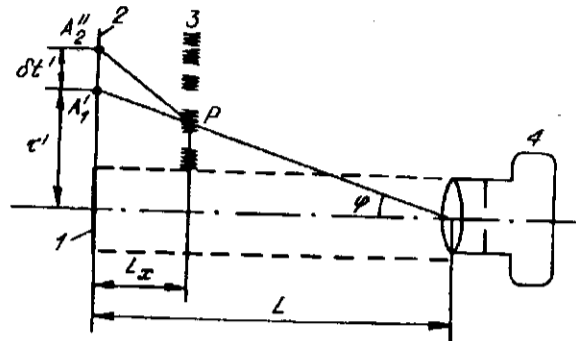


Рис. 2. Схема наблюдения I:

1 — круглый экран, 2 — спеклограмма, 3 — область локализации интерференционных полос, 4 — фотоаппарат

в исходном состоянии предмета и при механической нагрузке. На спеклограмме образуются два сфокусированных панорамных изображения поверхности предмета, идентичные точки которых смещены друг относительно друга в плоскости фотопластины.

Схемы наблюдения интерферограмм. Наблюдение спеклограммы следует производить так, чтобы устранить засветку от прямого изображения. В рассматриваемом случае, когда имеется цилиндрическая поверхность, можно поставить перед спеклограммой на пути плоской освещающей волны круглый экран, перекрывающий изображение торца цилиндра. Фотоаппарат, находящийся на оптической оси, следует диафрагмировать настолько, чтобы исчезли блики на квазиосевом изображении развертки боковой поверхности цилиндра. Это изображение локализовано в плоскости спеклограммы. Наложение излучения, приходящего от идентичных точек изображения на двухэкспозиционной спеклограмме, создает интерференционную картину. Она локализована там, где вариация разности хода по направлению наблюдения оказывается минимальной. Пусть область локализации полос находится на расстоянии L_x от спеклограммы. Для одновременного наблюдения изображения исследуемой поверхности и картины интерференционных полос следует выбрать достаточно малую апертуру фотоаппарата. Возможная схема наблюдения представлена на рис. 2, где A_1' и A_2'' — изображения на спеклограмме двух идентичных точек объекта A_1 и A_2 , причем A_2 есть положение точки A_1 после смещения. Поскольку $\delta r' \ll L_x$, то разность хода, возникающая между точками A_1' , A_2'' и местом интерференции P , определяется выражением $\Delta_1^{\text{набл}} = \delta r' \cdot \sin \varphi$. При $r' \ll L$ имеем $\sin \varphi = r'/L$, тогда

$$\Delta_1^{\text{набл}} = \frac{r'}{L} \delta r'. \quad (4)$$

Угол φ должен быть достаточно малым $\varphi < d_n/F$, чтобы возникло квазиосевое изображение, где d_n/F — апертурный угол фокусирующей системы, используемой при получении спеклограммы. Поскольку $\varphi^{\text{max}} = (\beta r^{\text{max}})/L$, то

$$L > \frac{\beta r^{\text{max}}}{d_n} F, \quad (5)$$

где β — увеличение фокусирующей системы.

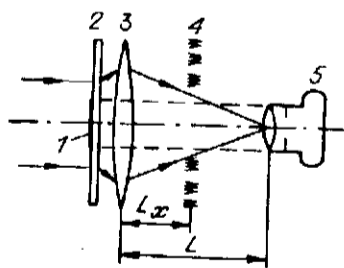


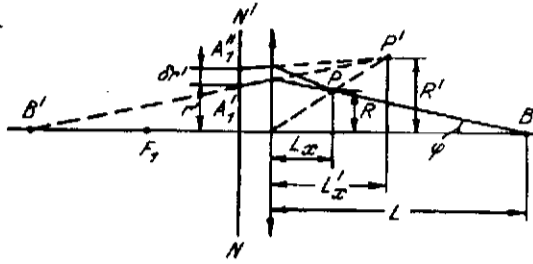
Рис. 3. Схема наблюдения II:

1 — круглый экран, 2 — спеклограмма, 3 — линза, 4 — область локализации интерференционных полос, 5 — фотоаппарат

Рис. 4. Схема хода лучей:

NN' — плоскость спеклограммы

Для наблюдения можно использовать также схему рис. 3, где спеклограмма находится рядом с линзой. Схема хода лучей для рис. 3 приведена на рис. 4, где точки B' и B , P' и P являются взаимно сопряженными. В силу таутохронизма линзы разность хода между точками A_1' , A_2'' на спеклограмме и местом интерференции P равна разности хода между A_1' , A_2 и сопряженной к P точкой P' . Считая, что спеклограмма находится достаточно близко от линзы, получаем выражение для разности хода:



$$\Delta_{\text{II}}^{\text{набл}} = (A_2''P') - (A_1'P') = \sqrt{(L_x')^2 + (R' - r' - \delta r')^2} - \sqrt{(L_x')^2 + (R' - r')^2} = -\frac{\delta r'(R' - r')}{\sqrt{(L_x')^2 + (R' - r')^2}}$$

При $(R' - r')^2 \ll (L_x')^2$ с учетом формулы линзы $\frac{1}{L_x} - \frac{1}{L_x'} = \frac{1}{F_1}$ и соотношения

$$\frac{r' - R}{L_x} = \frac{r'}{L}, \text{ получаем}$$

$$\Delta_{\text{II}}^{\text{набл}} = \delta r'(R' - r') \left(\frac{1}{F_1} - \frac{1}{L_x} \right) = \delta r' \left[r' \left(\frac{1}{L_x} - \frac{1}{F_1} \right) - \frac{R}{L_x} \right],$$

или

$$\Delta_{\text{II}}^{\text{набл}} = \delta r' \cdot r' \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{F_1} \right). \quad (6)$$

При $F_1 = \infty$ выражение (6) переходит в (4). Преимущество схемы наблюдения II в том, что она дает больший размер изображения, чем схема наблюдения I.

Расшифровка интерферограмм. Для расшифровки интерферограммы, полученной при фотографировании спеклограммы, удобно параметризовать вектор смещения D . Для точки цилиндрической поверхности введем компоненты D : в направлении нормали — W , в направлении образующей — U и нормальную к ним — V (рис. 5).

При сжатии цилиндрической оболочки путем создания осевой механической нагрузки на ее торце присутствует смещение $D = W + U$, при этом $l_2 - l_1 = -W$, $r_2 - r_1 = -U$. На рис. 6 A_1 и A_2 — положения точки изображения цилиндрической поверхности в коническом зеркале до и после ее смещения, происходящего в результате сжатия, NN' — плоскость спеклограммы. Поскольку спеклы сильно вытянуты в продольном направлении и ориентированы вдоль соответствующих им оптических осей линзы, то изображение точки A_2 оказывается зарегистрированным в плоскости спеклограммы в точке A_2'' . Тогда смещение изображения на спеклограмме $\delta r' = \Delta r' + \Delta l' \frac{r_2}{l_2}$, где r_2, l_2 — координаты поло-

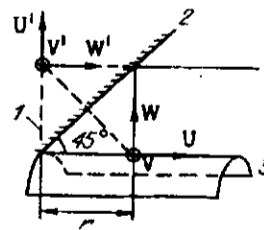


Рис. 5. Компоненты вектора смещения U, V, W и их преобразование коническим зеркалом с $\theta = 45^\circ$:

1 — плоскость изображения, 2 — коническое зеркало, 3 — цилиндрическая поверхность

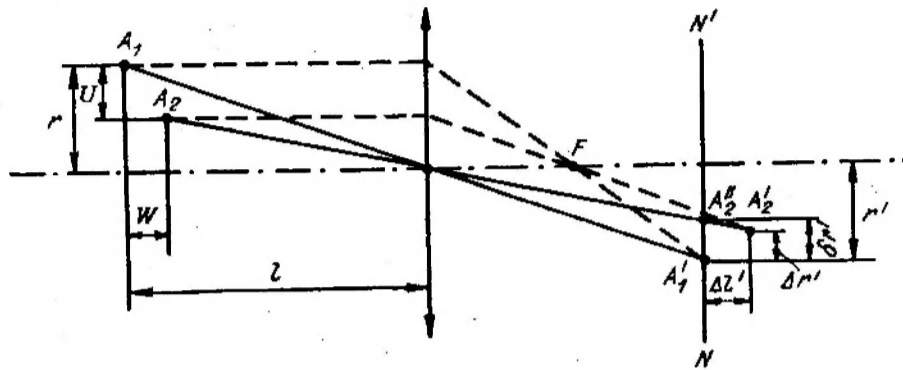


Рис. 6. Преобразование изображения линзой при сжатии

жения точки A_2 относительно оптического центра линзы. Поскольку $U \ll r$, $W \ll l$, $\Delta l' = -\beta^2 W$, $\Delta r' = -\beta U$, получаем

$$\delta r' = -\beta U - \beta^2 \frac{r}{l} W, \quad (7)$$

где β — поперечное увеличение линзы.

При использовании параксиальных лучей $r^2 \ll lL$, lF_1 можно пренебречь вторым слагаемым, тогда смещение W никак себя не проявляет и

$$\delta r' = -\beta U. \quad (8)$$

Для схемы наблюдения I из (4), (8) получаем

$$\Delta_1^{\text{набл}} = -\beta^2 \frac{z}{L} U. \quad (9)$$

Схема наблюдения II, исходя из (4), (8), приводит к разности хода

$$\Delta_{\text{II}}^{\text{набл}} = -\beta^2 r \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{F_1} \right) U. \quad (10)$$

Из (10) получаем уравнения для интерференционных полос

$$\beta^2 \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{F_1} \right) r_m U = m\lambda. \quad (11)$$

В месте закрепления оболочки при $r = r_0$ имеем $W = 0$, $U = 0$ и $m = 0$. При сжатии однородной оболочки будем считать, что выполняется условие

$$U = -\lambda K(r - r_0). \quad (12)$$

Обозначая

$$\beta^2 \left(\frac{1}{F_1} - \frac{1}{L} \right) = \eta^{-1}, \quad (13)$$

получаем из (11), (12)

$$\left(r_m - \frac{r_0}{2} \right)^2 - \frac{m}{K\eta} = \frac{r_0^2}{4}. \quad (14)$$

Таким образом, ширина образующихся колец уменьшается с увеличением и радиуса. Радиусы колец связаны между собой соотношением

$$\left(r_{m-1} - \frac{r_0}{2}\right)^2 + \left(r_{m+1} - \frac{r_0}{2}\right)^2 = 2\left(r_m - \frac{r_0}{2}\right)^2. \quad (15)$$

Постоянную K можно определить при $m > 1$ из формулы

$$K = \frac{\eta(m-1)}{(r_m - r_1)(r_m + r_1 - r_0)}. \quad (16)$$

Для нахождения места локализации интерференционных полос приравняем нулю вариацию разности хода по направлению наблюдения, выразив переменные r , U , L через параметры места локализации полос R , L_x и угол наблюдения φ . Из рис. 4 находим

$$r' = R + L_x \sin \varphi, \quad L = L_x + \frac{R}{\sin \varphi} = \frac{r'}{\sin \varphi}, \quad U = -\frac{\lambda K}{\beta} r' = -\frac{\lambda K}{\beta} (R + L_x \sin \varphi) \quad (17)$$

при $r \gg r_0$, тогда из (10)

$$\frac{\partial \Delta_{\text{набл}}}{\partial \varphi} = -\beta \left[\frac{\partial r'}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{F_1} \right) U - r' \frac{1}{L^2} \frac{\partial L}{\partial \varphi} U + r' \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{F_1} \right) \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right] = 0. \quad (18)$$

Дифференцируя выражения (17), имеем

$$\frac{\partial r'}{\partial \varphi} = L_x \cdot \cos \varphi, \quad \frac{\partial L}{\partial \varphi} = -\frac{R \cdot \cos \varphi}{\sin^2 \varphi}, \quad \frac{\partial U}{\partial \varphi} = \frac{U}{r'} \cdot \cos \varphi. \quad (19)$$

Из (18) после преобразований получаем

$$\frac{2L_x}{F_1} = \frac{1}{1 + \frac{L_x}{R} \sin \varphi} + \frac{2L_x}{r'} \sin \varphi. \quad (20)$$

При малых углах наблюдения, когда $L \gg r'$, $\varphi \approx 0$, область локализации полос является плоскостью, отстоящей от спеклограммы или линзы на рис. 3 на расстояние

$$L_x = \frac{1}{2} F_1. \quad (21)$$

Для схемы наблюдения I (см. рис. 2) получаем, что область локализации полос бесконечно удалена и наблюдается в параллельных лучах.

По двухэкспозиционной спеклограмме можно определить также локальную величину смещения. Для этого малый участок спеклограммы освещают нерасширенным лазерным пучком. В результате дифракции этого пучка на спекл-структуре образуется дифракционный конус с углом расхождения

$$\alpha \approx d_n / F, \quad (22)$$

где d_n / F — относительное отверстие линзы, используемой при получении спеклограммы. Если в пределах малого участка, освещаемого лазерным пучком, идентичные точки смещены относительно друг друга на величину $\delta r'$, то в пределах дифракционного конуса возникнут интерференционные полосы Юнга с пространственным периодом $d = \lambda \frac{L}{\delta r'}$, где L — расстояние от спеклограммы до интерферограммы. Измерив d , найдем $\delta r'$:

$$\delta r' = \lambda \frac{L}{d}. \quad (23)$$

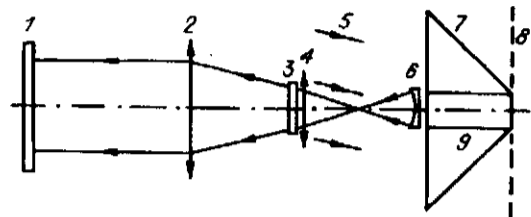


Рис. 7. Схема формирования осевой плоской волны в панорамном спекл-интерферометре (предметная волна не показана):

1 — спеклограмма, 2 — линза с $F = 300$ мм, создающая сфокусированное изображение оболочки, 3 — поляризационный фильтр, 4 — линза с $F = 35$ мм, 5 — плоская когерентная волна, 6 — вогнутое зеркало с $F = 250$ мм, 7 — коническое зеркало, 8 — плоскость изображения конического зеркала, 9 — исследуемая цилиндрическая оболочка

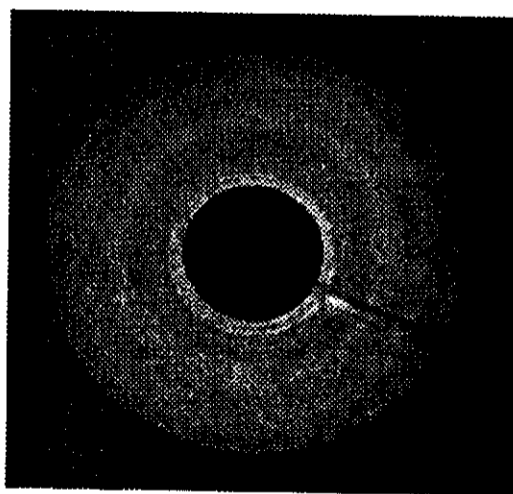
Направление полос ортогонально к смещению $\delta r'$ на спеклограмме. Из (3), (23) находим

$$|U| = \frac{\lambda L}{\beta d}. \quad (24)$$

Для определения коэффициента смещения вдоль образующей цилиндрической оболочки K можно исследовать два малых участка, отстоящих от оси спеклограммы на расстоянии r'_1 и r'_2 . Измерив пространственный период интерференционных полос d_1 и d_2 для каждого участка, определим K по формуле, следующей из (12), (24):

$$K = \frac{L}{r'_2 - r'_1} \frac{d_1 - d_2}{d_1 d_2}. \quad (25)$$

Эксперимент. Для получения спеклограммы использовалось коническое зеркало с углом $\Theta = 45^\circ$ при вершине с диаметром большого основания, равным 110 мм. На оси зеркала устанавливалась цилиндрическая оболочка из оргстекла радиусом 13 мм, длиной образующей 32 мм и толщиной стенок 0,8 мм. Основание оболочки закреплялось в малом основании зеркала с помощью стальной втулки. В другой конец оболочки клеивалась стальная крышка толщиной 5 мм со стальной спицей, посредством которой производилось сжатие оболочки. Для повышения коэффициента отражения света поверхность покрывалась белой матовой краской. С целью увеличения значений смещения U , измеряемых панорамным спекл-интерферометром, спеклограмма дополнительно к предметной волне освещалась плоской когерентной волной. Схема формирования осевой плоской волны представлена на рис. 7. Сфокусированное изображение оболочки в плоскости спеклограммы создавалось объективом $F = 300$ мм, $F/d_n = 4$ с увеличением $\beta = 0,63$. В промежутке между экс-



позициями оболочка сжималась силой $F = 40$ кгс. Полученная интерферограмма приведена на рис. 8. Малый контраст интерференционной картины связан с достаточно большой апертурой линзы. С ростом последней уменьшается поперечный размер спеклов. Контраст интерференционной картины уменьшается, если смещение спеклов превышает их размер. Достаточно большая апертура, необходимая для получения спеклограммы на фотопластинке с высокой разрешающей способно-

Рис. 8. Спеклограмма

стью и малой светочувствительностью, приводит к падению контраста интерференционных полос.

Радиусы светлых колец равны $r_0 = 13$, $r_1 = 24$, $r_2 = 32$, $r_3 = 38$ мм и удовлетворяют соотношению (21) с точностью 5%. Постоянная $\eta = 952$ мм, тогда из (22) получаем $K = 2,77 (\pm 10\%)$, $c = 0,23 (\pm 15\%)$. В результате $U^{\max} = 88\lambda$, $W \approx 0,1\lambda$.

Двухэкспозиционная спеклограмма просвечивалась нерасширенным лазерным пучком. На расстоянии $L = 10^3$ мм от спеклограммы наблюдалась интерференционная картина в виде системы параллельных эквидистантных полос. На двух взаимно перпендикулярных осях спеклограммы получены следующие значения наименьших расстояний между полосами: $d_1 = 18,7$, $d_2 = 20,5$, $d_3 = 21$, $d_4 = 22$ мм. По формуле (25) найдены значения наибольших смещений $U_1^{\max} = 84\lambda$, $U_2^{\max} = 77\lambda$, $U_3^{\max} = 75\lambda$, $U_4^{\max} = 72\lambda$, что близко к значению $U = 88\lambda$, полученному выше.

Метрологические характеристики спекл-интерферометра. Чувствительность и диапазон измеряемых перемещений. Из выражения (11) при использовании конического зеркала с углом $\Theta = 45^\circ$ имеем

$$K_w = 0, \quad K_U = \beta^2 \frac{r}{F_1} \left(1 - \frac{F_1}{L}\right), \quad (26)$$

следовательно, панорамный интерферометр не чувствителен к смещениям по нормали к исследуемой поверхности при использовании параксиальных лучей. Чувствительность к внутривоскостным перемещениям растет с удалением точки от места закрепления оболочки и с ростом увеличения оптической системы.

Наибольшее смещение, которое можно измерить спекл-интерферометром, оценим также из выражения (11). Максимальное число видимых колец равно

$$m^{\max} = \frac{\beta^2 l}{F_1} \left(1 - \frac{F_1}{L}\right) \frac{U^{\max}}{\lambda}, \quad (27)$$

тогда

$$U^{\max} = \frac{F_1}{\rho' \beta^2 (1 - (F_1/L))} \lambda, \quad (28)$$

где $\rho' = l/m^{\max}$ — величина, обратная плотности интерференционных полос на линейном размере поверхности. При $\rho' \sim 6$ мм/полосу, $\beta = 0,5$, $F_1 = 300$ мм, $L \gg F_1$, получаем оценку максимально измеряемого внутривоскостного перемещения $U^{\max} \sim 200\lambda$.

Более жесткое ограничение на величину наибольшего смещения дает оптическая система, используемая для регистрации спеклограммы. Корреляция двух спекл-картин, ответственных за смещение и начальное положение точек поверхности, обеспечивается тогда, когда спеклы во взаимно смещенных полях хотя бы частично перекрываются. Следовательно, должно выполняться условие

$$\beta^2 U^{\max} \sim \Delta x, \quad (29)$$

где Δx — поперечный размер спекла, определяемый выражением (1). Подставляя (1) в (29), получаем

$$U^{\max} \sim 1,22 \frac{1 + \beta}{\beta} \frac{F}{d_n} \lambda, \quad (30)$$

где d_n — рабочий диаметр линзы.

Погрешность измерения. Точность определения перемещений оценивалась методической и систематической погрешностью измерений посредством анализа зависимости между входными и выходными параметрами спекл-интерферометра.

Погрешности метода, связанные с преобразованием координат цилиндрической поверхности оптической системой интерферометра, оценивались ранее в [8]. Было установлено, что погрешность угловой координаты равна приборной погрешности, а погрешности радиальной и осевой координат уменьшаются с ростом увеличения линзы. Погрешность осевой координаты минимальна для зеркала с $\Theta = 45^\circ$.

Погрешность, возникающая из-за неточности отсчета порядка интерференционной полосы, существенно усугубляется из-за спекл-структуры восстановленного изображения. Требуется дополнительная машинная обработка интерферограммы с целью подавления шума. Систематические погрешности измерения, возникающие из-за отклонений от условий, при выполнении которых справедливы методы расшифровки интерферограмм, как показано в [8], поддаются оценке и по порядку величины соизмеримы с приборной погрешностью.

ВЫВОДЫ

Разработанный панорамный спекл-интерферометр для получения сфокусированной двухэкспозиционной спеклограммы позволяет с одного направления одновременно получать информацию о внутриплоскостных перемещениях деформируемых объектов осесимметричной формы. Эмпирические оценки максимально измеряемых перемещений показывают, что они на порядок выше, чем в голографическом интерферометре. Максимальный вклад в погрешность измерений перемещений вносит погрешность определения порядка интерференционной полосы.

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 голографические интерферометры // Мат-лы 14 Международной конф. по когерентной и нелинейной оптике (КиНО 91).—Л., 1991, РВ130.
4. Борыняк Л. А., Краснопецев Е. А., Логинов А. В., Штыгашев А. А. Панорамные интерферометры для исследования деформаций объектов осесимметричной формы // Автометрия.—1992.—№ 2.
5. Борыняк Л. А., Краснопецев Е. А., Логинов А. В. Методические аспекты исследования деформаций в панорамных интерферометрах // Автометрия.—1993.—№ 1.
6. Франсон М. Оптика спеклов.—М., 1980.
7. Клименко И. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия.—М., 1985.
8. Борыняк Л. А., Краснопецев Е. А., Логинов А. В., Штыгашев А. А. Точность определения перемещений в голографических интерферометрах // Автометрия.—1992.—№ 6.

Поступила в редакцию 14 марта 1994 г.