

Сдвиговая спекл-интерферометрия с использованием метода фазовых шагов

Г.Н.Вишняков, А.Д.Иванов, Г.Г.Левин, В.Л.Минаев

Проведено численное моделирование процесса измерения напряженно-деформированных состояний методом сдвиговой спекл-интерферометрии с использованием метода фазовых шагов. Разработана компьютерная модель с возможностью задания ее деформации и шероховатости, в которую входит модель диффузно отражающего тест-объекта, соответствующая по характеристикам реальной мембране, а также модель спекл-интерферометра, позволяющая получать спекл-интерферограммы при различных размерах спеклов и углах между интерферирующими пучками. Реализован процесс восстановления топограммы поверхности объекта по модельным спекл-интерферограммам методом фазовых шагов. С помощью разработанных моделей получена двумерная шерограмма, представляющая собой производную от поля деформации круглой мембраны. Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными показало, что различия (среднеквадратичные отклонения) не превышают 0.02 мкм. Также показано, что погрешность реконструкции интерферограмм методом фазовых шагов значительно возрастает при деформациях тест-объекта более 12 мкм.

Ключевые слова: спекл-интерферометрия, шерография, метод фазовых шагов, напряженно-деформированные состояния, моделирование.

1. Введение

Методы цифровой, или электронной спекл-интерферометрии широко используются для неразрушающего контроля в различных производственных областях, например в аэрокосмической промышленности, машиностроении, где активно применяются композитные материалы и изделия аддитивных технологий [1]. Посредством данного бесконтактного метода исследуются микроперемещения отдельных участков поверхности изделий в процессе их деформации при различных видах нагрузок – механических, тепловых и т. п.

Одной из разновидностей спекл-интерферометрии является сдвиговая спекл-интерферометрия, или шерография (от «shear» – сдвиг) [2, 3]. В этом методе используется интерференция двух смещенных относительно друг друга спекл-полей. Шерографы относятся к классу интерферометров с совмещенными предметным и опорным пучками, к так называемым common-path интерферометрам, или интерферометрам общего пути. В таких интерферометрах опорный пучок формируется из предметного. Отсюда вытекает важное свойство сдвиговой спекл-интерферометрии – малая чувствительность к вибрациям объекта, что позволяет проводить шерографию в реальных производственных условиях, без какой-либо защиты от вибраций.

Г.Н.Вишняков. Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Россия, 119361 Москва, ул. Озерная, 46; Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; e-mail: academi@ya.ru

А.Д.Иванов, Г.Г.Левин, В.Л.Минаев. Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Россия, 119361 Москва, ул. Озерная, 46

Поступила в редакцию 18 февраля 2020 г., после доработки – 29 марта 2020 г.

Для получения количественной информации об объекте необходимо использовать различные методы реконструкции фазы из интерферограмм. Расшифровка спекл-интерферограмм осуществляется обычными для современной интерферометрии методами, которые в цифровой шерографии принято делить на две категории: цифровая шерография с временным фазовым сдвигом (temporal phase-shift digital shearography, TPS-DS) и с пространственным фазовым сдвигом (spatial phase-shift digital shearography, SPS-DS) [4]. Метод временного фазового сдвига, или метод фазовых шагов имеет более высокую точность реконструкции фазы из интерферограмм [4], поэтому в настоящей работе мы будем использовать именно его. Восстановленное фазовое изображение связано с производной по направлению смещения от поля перемещений, т. е. с градиентом поля перемещений.

При практической реализации сдвиговой спекл-интерферометрии методом фазовых шагов возникает ряд вопросов, на которые можно получить ответ только после предварительного математического моделирования. Так, важную роль играет выбор алгоритма последовательной обработки спекл-интерферограмм, выбор метода фильтрации промежуточного результата реконструкции в виде «несшитой» фазы и т. п. Разработка математической модели шерографа позволит установить границы применимости метода и оценить погрешности измерений, а кроме того, выявить зависимости результата реконструкции от характеристик объекта. Моделирование оптической системы спекл-интерферометра позволит также найти ее оптимальные параметры. Разработка компьютерной модели тест-объекта необходима для проверки работы алгоритма реконструкции фазы и последующего компьютерного моделирования процесса измерения напряженно-деформированных состояний с использованием шерографии. Компьютерное моделирование шерограммы позволяет заранее устанавливать необходимое значение сдвига изображений в оптической схеме для получения предсказуемого ре-

зультата и погрешности измерений при регулировке и настройке прибора. Такой подход дает возможность использовать спекл-интерферометр без калибровочного устройства (эталоны).

Таким образом, цель настоящей работы – создание компьютерной модели измерений деформации объектов посредством сдвиговой спекл-интерферометрии с расшифровкой интерферограмм методом фазовых шагов, а также оптимизация алгоритма обработки спекл-интерферограмм с использованием метода фазовых шагов и сопоставление результатов моделирования и эксперимента.

2. Оптическая схема шерографа и уравнения сдвиговых интерферограмм

Для реализации сдвиговой спекл-интерферометрии используются различные оптические схемы, но чаще всего – схема интерферометра Майкельсона [5]. Это, в первую очередь, обусловлено простотой достижения сдвига изображений путем наклона одного из зеркал – 5 (рис. 1). Во-вторых, в интерферометре Майкельсона легко реализовать количественную расшифровку спекл-интерферограмм методом фазовых шагов (Phase Shifting Interferometry) [1, 2]. Действительно, суть этого метода состоит в регистрации набора интерферограмм с различными фазовыми сдвигами между интерферирующими пучками. Для создания необходимого фазового сдвига изменяется оптическая длина пути одного из пучков. Это можно сделать, например, с помощью микросмещения вдоль оптической оси одного из зеркал интерферометра, закрепленного на пьезоэлементе 6 (рис. 1).

На регистраторе 9 формируются два перекрывающихся изображения объекта, смещенных относительно друг друга в поперечном оптической оси направлении. В качестве регистратора 9 используются матричные электронные приборы типа ПЗС- или КМОП-камер. Зарегистрированные изображения оцифровываются и вводятся для дальнейшей цифровой обработки в компьютер.

Сдвиговые спекл-интерферограммы до и после нагрузки можно записать в следующем обобщенном виде:

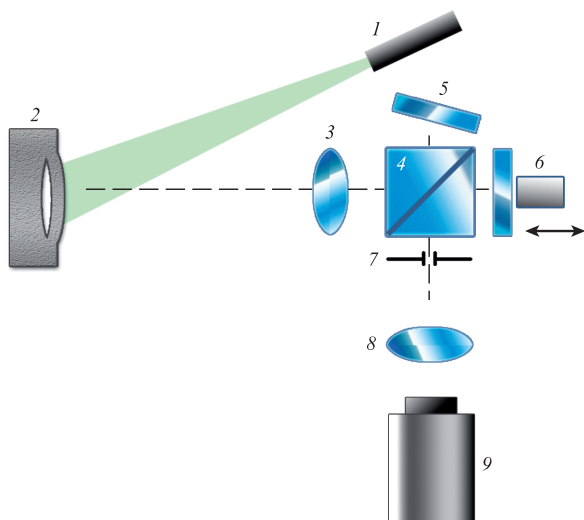


Рис. 1. Шерограф на базе интерферометра Майкельсона: 1 – лазер; 2 – объект, содержащий дефект; 3 – объектив; 4 – светоделитель; 5 – поворотное зеркало; 6 – зеркало, закрепленное на пьезоприводе; 7 – диафрагма; 8 – объектив; 9 – камера.

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Phi_n(x, y)], \quad (1)$$

где a – амплитудный фон; b – видимость интерференционных полос; $n = 1, 2$.

Фаза Φ_1 описывает состояние объекта до нагрузки и равна разности фаз в двух соседних точках, x и $x + \Delta x$, разделенных на величину сдвига Δx :

$$\Phi_1(x, y) = \varphi(x, y) - \varphi(x + \Delta x, y). \quad (2)$$

Фаза Φ_2 описывает состояние объекта после нагрузки. Она также равна разности фаз в точках x и $x + \Delta x$, но с добавкой $\Delta\varphi$, вызванной деформацией объекта:

$$\Phi_2(x, y) = \varphi(x, y) - \varphi(x + \Delta x, y) + \Delta\varphi(x, y) - \Delta\varphi(x + \Delta x, y). \quad (3)$$

Для восстановления фазы $\Phi_n(x, y)$ из обобщенной интерферограммы (1) в настоящей работе используется метод пяти фазовых шагов, предложенный в [6]. Алгоритм, применяемый для реализации данного метода, устойчив к небольшой «раскалибровке» фазосдвигающего устройства, а также хорошо подавляет артефакты в виде второй гармоники. Для его осуществления регистрируется серия из пяти интерферограмм со сдвигом фазы на $\pi/2$:

$$I_n^k(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Phi_n(x, y) + k\pi/2], \quad (4)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, 4$. Восстановленная фаза вычисляется по формуле [6]

$$\Phi_n(x, y) = \arctan \left[2 \frac{I_n^1(x, y) - I_n^3(x, y)}{2I_n^2(x, y) - I_n^4(x, y) - I_n^0(x, y)} \right]. \quad (5)$$

Поскольку функция \arctan определена в интервале значений $[-\pi, +\pi]$, по формуле (5) вычисляется так называемая «несшитая фаза» (wrapped phase), и поэтому далее требуется дополнительная операция «сшивки фазы» (phase unwrapping) [7].

В настоящей работе для восстановления градиента поля перемещений из сдвиговых спекл-интерферограмм реализуется следующая последовательность обработки изображений:

1. Получение пяти сдвиговых спекл-интерферограмм, по которым реконструируется фазовое изображение («несшитая фаза») $\Phi_1(x, y)$ в исходном (ненагруженном) состоянии.

2. Получение пяти сдвиговых спекл-интерферограмм, по которым реконструируется фазовое изображение («несшитая фаза») $\Phi_2(x, y)$ в нагруженном состоянии.

3. Вычитание «несшитых» фазовых изображений в нагруженном и исходном состояниях и получение разностного «несшитого» фазового изображения

$$\Delta\Phi(x, y) = |\Phi_1(x, y) - \Phi_2(x, y)| = |\Delta\varphi(x, y) - \Delta\varphi(x + \Delta x, y)|. \quad (6)$$

«Несшитое» фазовое изображение (6), восстановленное из спекл-интерферограмм, как правило, сильно зашумлено. Поэтому перед его «сшивкой» необходимо снизить уровень шумов. Наиболее подходящим для этого методом является синус-косинусная фильтрация в комбинации с

усредняющим фильтром [8]. Хороший результат достигается при использовании итерационной процедуры фильтрации с числом повторений 20–30. Таким образом, третьим этапом обработки изображения является синус-косинусная фильтрация.

4. Последний этап обработки – «сшивка» разностного фазового изображения после его фильтрации и пересчет в градиент поля перемещений по следующей формуле [8]:

$$\Delta\Phi(x, y) = \mathbf{k} \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x} \Delta x = \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial v}{\partial x} + k_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Delta x, \quad (7)$$

где $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ – вектор чувствительности, равный разности волновых векторов освещающего и отраженного от объекта пучков излучения; $\mathbf{d} = (u, v, w)$ – вектор смещения поверхности в исследуемой точке [8, 9].

Чувствительность измерений сдвигового спекл-интерферометра можно перестраивать, изменяя величину сдвига Δx .

3. Моделирование оптической схемы и спекл-интерферограмм диффузно рассеивающего тест-объекта

На первом этапе было проведено моделирование процесса формирования интерферограммы диффузно отражающего объекта для монохроматического (лазерного) излучения. Это моделирование было необходимо для выяснения требований к параметрам шероховатости объекта 2 и размеру диафрагмы 3 в схеме шерографа на рис.1, а также к углу между опорным и объектным пучками. Моделирование и исследование спекл-полей является актуальной задачей и описано в ряде работ [10–12].

Поле, отраженное от диффузно рассеивающего объекта, может быть представлено в виде комплексной амплитуды с фазой $\varphi_{\text{rnd}}(x, y)$, которая изменяется случайным образом по равномерному закону в пределах $[-\pi; +\pi]$ [13]:

$$U_{\text{rnd}}(x, y) = \exp[-i\varphi_{\text{rnd}}(x, y)]. \quad (8)$$

В качестве компьютерной модели объекта была выбрана деформируемая в центре мембрана круглой формы, жестко закрепленная по краям. При малых нагрузках форма мембраны может быть хорошо аппроксимирована сферой [14]. Тогда поле, отраженное от такого сферического объекта, может быть записано следующим образом:

$$U_{\text{mir}}(x, y) = \exp\left[-i\left(\frac{2\pi m}{R}\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}\right)\right], \quad (9)$$

где R – радиус сферы; m – множитель, определяющий максимальный фазовый набег на объекте (при $m = 1$ фазовый набег будет равен 2π).

Учитывая, что объект диффузно отражающий, из (8) и (9) получаем выражение для комплексной амплитуды поля, отраженного от такого объекта:

$$U(x, y) = U_{\text{rnd}}(x, y)U_{\text{mir}}(x, y) = \exp\left[-i\left(\frac{2\pi m}{R}\sqrt{R^2 - x^2 - y^2} + \varphi_{\text{rnd}}(x, y)\right)\right]. \quad (10)$$

Для моделирования оптической системы спекл-интерферометра была использована классическая оптическая 4*f*-система, изображенная на рис.2. Она содержит два софокусных фурие-объектива 2 и 4, в общем фокусе которых находится диафрагма 3.

Эта диафрагма по сути является низкочастотным фильтром, осуществляющим пространственную фильтрацию фурие-спектра отраженного от объекта излучения, который формируется с помощью первого фурие-объектива. Изменяя диаметр диафрагмы, можно изменять размер спеклов в плоскости регистрации. Интенсивность излучения I в выходной плоскости 5, получаемого с помощью такой 4*f*-системы, может быть представлена следующим выражением [15]:

$$I(x, y) = |F^{-1}\{H(x, y)F\{U(x, y)\}\}|^2, \quad (11)$$

где $H(x, y)$ – когерентная передаточная функция оптической системы, равная амплитудному пропусканию диафрагмы 3; $F\{\cdot\}$ и $F^{-1}\{\cdot\}$ – операторы прямого и обратного преобразований Фурье соответственно.

Для получения спекл-интерферограмм используется наклонная плоская опорная волна, комплексная амплитуда которой может быть записана следующим образом:

$$r(x, y, k) = \exp[-i(z(x, y) + k\pi/2)], \quad (12)$$

где $z(x, y)$ – уравнение плоскости падения волны; $k\pi/2$ – дискретный фазовый сдвиг ($k = 0, 1, 2, 3, 4$), необходимый для получения серии из пяти спекл-интерферограмм с целью дальнейшего вычисления по ним фазового распределения методом фазовых шагов.

Спекл-интерферограмма получается путем квадратичной регистрации суммы комплексных амплитуд полей излучения предметного и опорного пучков:

$$I_{\text{sh}}(x, y, k) = |F^{-1}\{H(x, y)F\{U(x, y)\}\} + r(x, y, k)|^2. \quad (13)$$

Варьируя параметр k от 0 до 4, можно получить набор из пяти спекл-интерферограмм и восстановить по ним фазовое распределение с помощью описанного выше метода фазовых шагов. Используемая математическая модель не учитывает особенности дифракции света на диффузно отражающей поверхности в зависимости от параметров шероховатости и локальных наклонов участков поверхности. Дополнение модели является предметом

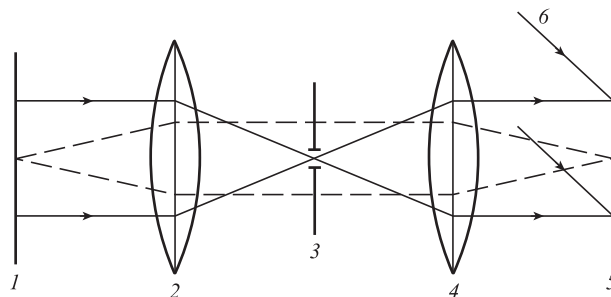


Рис.2. Оптическая 4*f*-система: 1 – плоскость объекта; 2, 4 – фурие-объективы; 3 – диафрагма; 5 – плоскость регистрации; 6 – плоский опорный пучок.

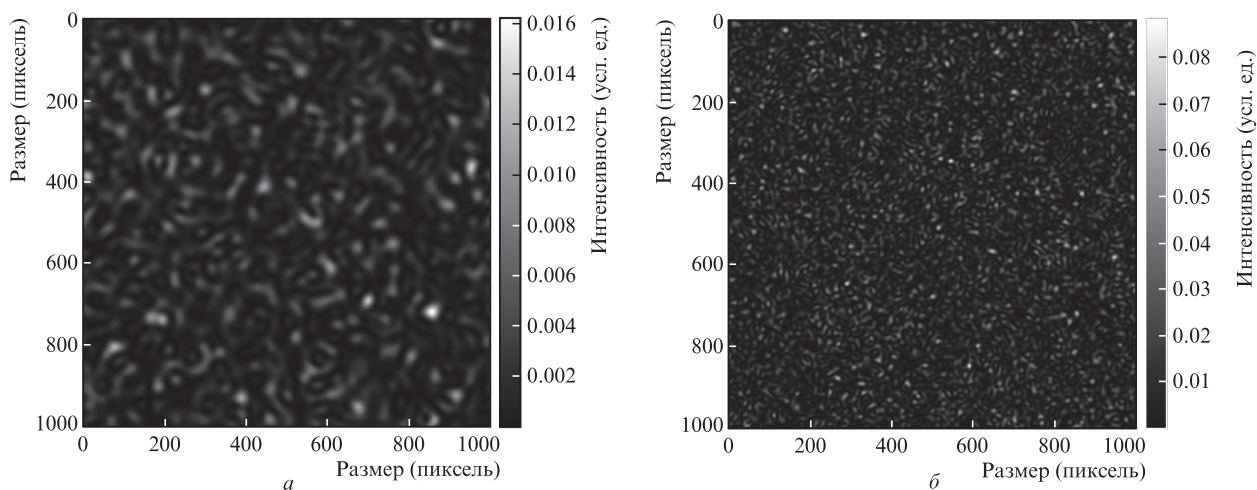


Рис.3. Изображения мембраны с параметром шероховатости $R_a = 20$ мкм, полученные с помощью когерентной оптической системы при радиусах диафрагмы 20 (а) и 50 пикселей (б).

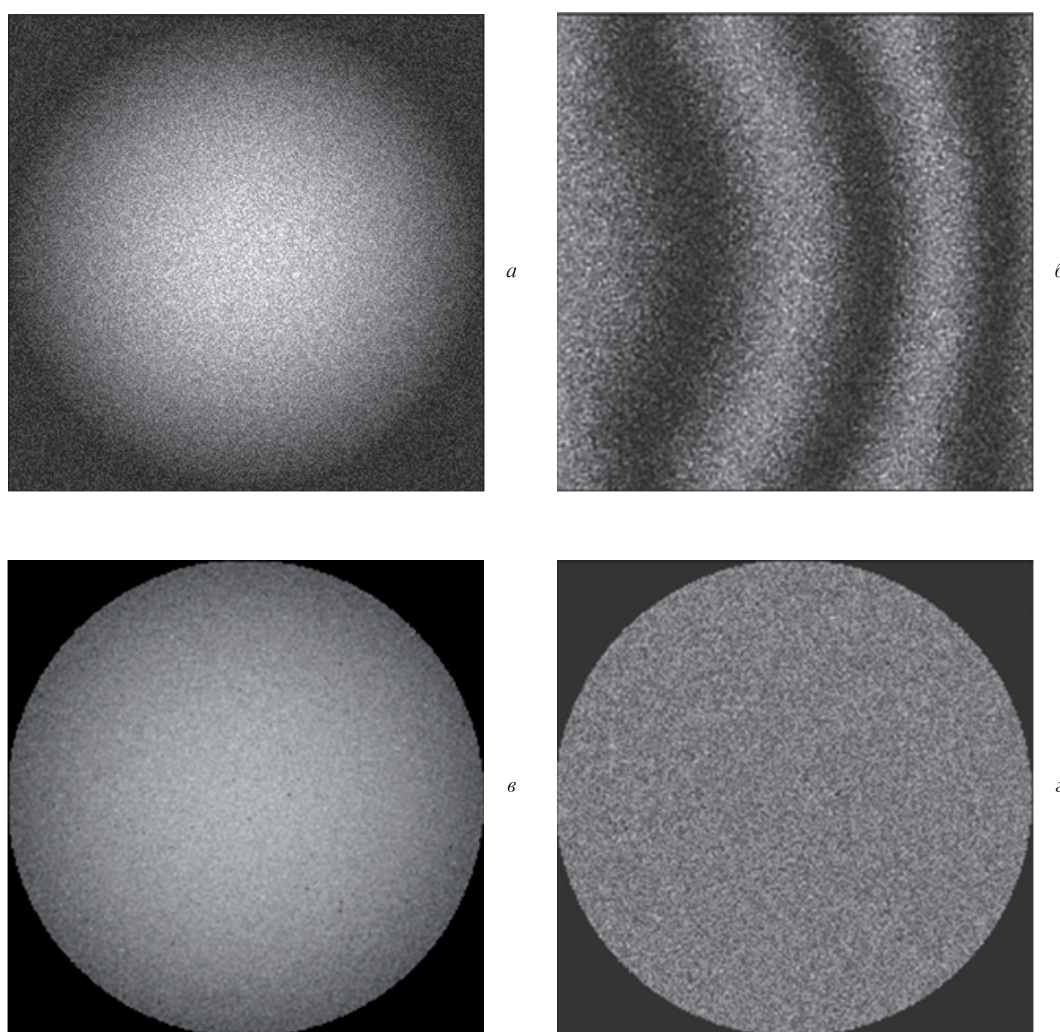


Рис.4. Топограмма мембраны (а), изображение спекл-интерферограммы мембраны (б), результат восстановления топограммы мембраны (в) и поле ошибок восстановления (г) при стрелке прогиба 1.0 мкм.

дальнейшей работы по улучшению алгоритма генерации спекл-интерферограмм.

При компьютерном моделировании тест-объект имитировал прогиб мембраны и задавался в виде сферического сегмента определенной высоты (стрелки прогиба)

и радиуса основания. При этом размер стрелки прогиба определял величину деформации мембраны.

Для моделирования были выбраны следующие геометрические параметры тест-объекта (мембраны): размер изображения 1000×1000 пикселей; радиус основания 500

пикселей; стрелка прогиба варьируется в интервале 0.1–100 мкм и принимает значения 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 25, 50, 100 мкм; длина волны освещения 0.5 мкм.

Шероховатость поверхности мембраны задавалась случайной функцией с равномерным распределением, при этом параметр шероховатости R_a выбирался из диапазона 0.1–20 мкм.

Для проверки влияния радиуса диафрагмы на размер спеклов по формуле (11) была рассчитана интенсивность изображения мембраны с параметром шероховатости $R_a = 20$ мкм при стрелке прогиба 0.2 мкм и различных радиусах диафрагмы. Из рис.3 видно, что при увеличении размеров диафрагмы уменьшается размер спекл-структур.

Для оценки погрешности реконструкции фазы из спекл-интерферограмм вначале надо было научиться синтезировать эти интерферограммы. Расчет спекл-интерферограмм проводился по формуле (13), которая описывает когерентное сложение волнового поля, отраженного от объекта, поля, прошедшего через оптическую систему, и плоской волны, направленной под углом к плоскости регистрации с последующей квадратичной регистрацией.

Начальное моделирование было направлено на выяснение вопроса о выборе угла между объектным и опорным пучками, т. к. он определяет число полос на интерферограмме. Большой угол ведет к увеличению числа полос, которые могут уже не разрешаться оптической системой. Моделирование показало, что при угле между интерферирующими пучками 1° полос на интерферограмме не больше пяти. Результаты моделирования также показали, что контрастные интерференционные полосы на спекл-интерферограмме возможны в том случае, когда параметр шероховатости мембраны меньше длины волны используемого излучения.

В связи с этим для дальнейшего моделирования была выбрана мембрана с шероховатостью $R_a = 0.1$ мкм, меньшей длины волны 0.5 мкм, при этом угол между интерферирующими пучками составил 1° , а радиус диафрагмы – 100 пикселей.

Далее было проведено исследование восстановления топограммы мембраны по набору из пяти синтезированных спекл-интерферограмм с использованием описанного выше метода фазовых шагов. На рис.4 приведены результаты этого исследования и представлены исходная топограмма деформированной мембраны как сферического сегмента со стрелкой прогиба 1.0 мкм, одна из синтезированных спекл-интерферограмм, результат восстановления топограммы шероховатой поверхности мембраны и двумерная карта разности между восстановленной и исходной топограммами. По сути, такая разность представляет собой плоскость, но вследствие шумов имеются отклонения от нее. Поэтому мерой ошибки восстановления является среднеквадратичное отклонение (СКО) данной разности от плоскости, составившее 0.08 мкм.

С использованием созданной математической модели были проведены вычислительные эксперименты по оценке СКО результата реконструкции топограммы мембраны при разных значениях стрелки прогиба, т. е. при различной деформации. Из рис.5 видно, что с увеличением стрелки прогиба возрастает ошибка реконструкции, что связано с увеличением градиента на краю (рис.5,в) и, как следствие, с падением способности разрешать интерференционные полосы матрицей видеокамеры.

Таким образом, мы получили зависимость ошибки реконструкции от деформации упругой шероховатой мем-

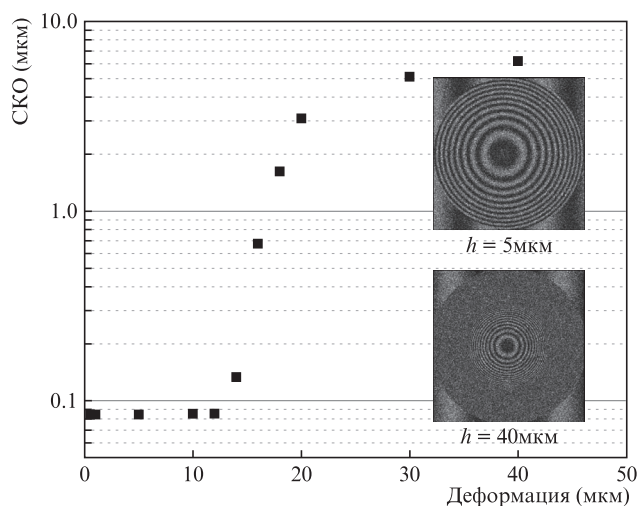


Рис.5. Зависимость СКО результата реконструкции топограммы от величины деформации. На вставках – спекл-интерферограммы тест-объекта при деформациях 5 и 40 мкм.

браны в оптической $4f$ -схеме с использованием алгоритма фазовых шагов, из которой следует, что верхний предел диапазона возможных деформаций ограничен значением 12 мкм.

4. Моделирование деформации объекта и получение шерограммы

В настоящем разделе описаны результаты компьютерного моделирования сдвиговой спекл-интерферометрии (шерографии). Была разработана компьютерная модель (КМ) объекта, необходимая для последующего моделирования процесса измерения напряженно-деформированных состояний с использованием цифровой шерографии. Цель самого компьютерного моделирования состояла в сопоставлении результатов моделирования с экспериментальными измерениями деформации физического объекта, имеющего те же параметры, что и компьютерная модель, и оценка точности таких измерений.

Основное требование к выбору КМ заключается в том, чтобы для нее можно было теоретически, с использованием известных формул теории сопротивления материалов, рассчитать поле перемещений при деформации. Такой моделью может служить упругая мембрана, жестко прикрепленная по окружности к основе (рис.6). В центре мембраны по нормали к ее поверхности, с тыльной стороны, создается сосредоточенная сила, под действием которой точки поверхности мембраны претерпевают микроперемещения, поле которых и является предметом исследования.

В ряде монографий [16, 17] поле перемещений для такой модели описывается формулой

$$W(R) = \frac{F}{16\pi D} \left[(a^2 - R^2) + 2R^2 \ln\left(\frac{R}{a}\right) \right], \quad (14)$$

где W – смещение вдоль нормали (оси z) к поверхности мембраны; F – приложенная сила; D – жесткость мембраны; a – радиус мембраны; R – расстояние от центра мембраны.

Была разработана компьютерная версия этой модели, использованная для моделирования процесса измерения напряженно-деформированных состояний. Исходными данными служили спекл-интерферограммы КМ этого тест-

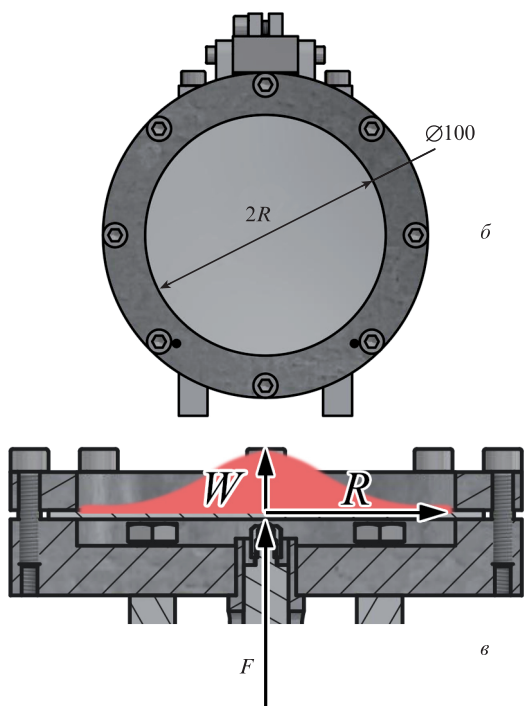


Рис.6. Калибровочное устройство (а), мембрана (вид спереди) (б), калибровочное устройство в разрезе (в).

объекта, синтезированные по методике, изложенной в разд.3. По исходным спекл-интерферограммам вначале восстанавливалась топограмма объекта для определенной нагрузки, а для получения градиента поля перемещений выполнялось вычитание двух сдвинутых относительно друг друга топограмм. Практическое значение данного моделирования состоит в том, что оно позволяет заранее устанавливать необходимое значение сдвига изображений в шерографе для настройки его чувствительности.

Для сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными было разработано и изготовлено калибровочное устройство, описанное в нашей статье [18] и использованное для калибровки разработанного во ФГУП ВНИИОФИ макета шерографа. Это устройство представляет собой шероховатую круглую мембрану, прикрепленную к массивному основанию по окружности при помощи винтов (рис.6), оно имеет нормированные метрологические характеристики и является рабочим эталоном деформации.

В центре мембраны по нормали к ее поверхности, с тыльной стороны, создается сосредоточенная сила F , под



Рис.7. Экспериментальный макет шерографа.

действием которой мембрана испытывает изгибные деформации. Величина перемещения точки приложения силы измерялась с помощью индикаторной головки 01ИМПЦ с погрешностью ± 0.3 мкм.

Экспериментальное исследование деформации мембраны калибровочного устройства проводилось на макете шерографа, внешний вид которого приведен на рис.7.

В качестве источника излучения использовался лазер с длиной волны излучения $\lambda = 532$ нм. Угол обзора камеры и угол освещения обеспечивали съемку мембраны диаметром 100 мм.

Полутонное изображение восстановленного поля перемещений мембраны, полученное при компьютерном моделировании, и аналогичное экспериментальное изображение приведены на рис.8. Деформация мембраны (по индикатору) составляла 1 мкм.

Сопоставление результатов физического и компьютерного эксперимента проводилось по сравнению центральных горизонтальных сечений этих изображений.

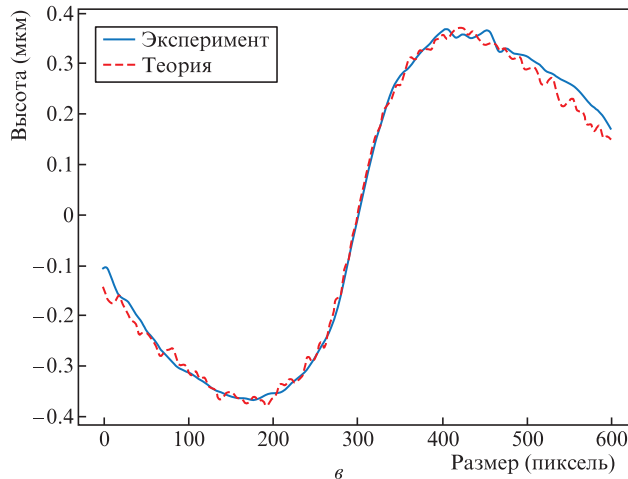
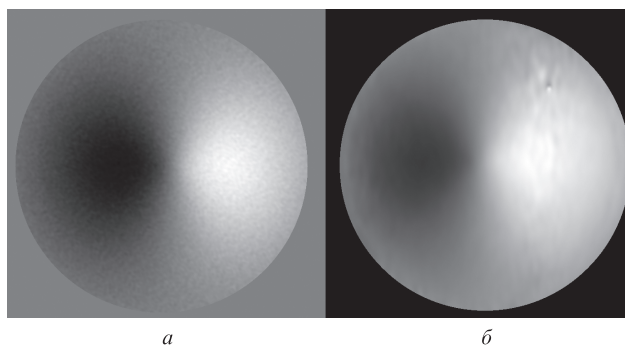


Рис.8. Теоретическая (а) и экспериментальная (б) шерограммы, а также профили поперечных сечений шерограмм (в).

Критерием сравнения этих данных было СКО разности между ними, которое составило 0.02 мкм.

5. Выводы

Создана компьютерная (виртуальная) модель тест-объекта и оптической схемы спекл-интерферометра, по сути представляющая собой его цифровой двойник (digital twin). Результаты моделирования показали хорошее совпадение с результатами экспериментов. Представленный метод численного моделирования дает возможность задания любых объектов, в том числе идеальных, для проверки работы системы. Данный подход позволяет совершенствовать алгоритмы и оптимизировать оптическую схему для получения точных результатов измерений напряженно-деформированных состояний. Разработанная модель дает возможность прогнозировать результат работы спекл-интерферометра с объектами, имеющими различные параметры. Данная компьютерная модель является «цифровым эталоном» и может быть использована для оценки метрологических характеристик средств измерений. Ее дальнейшее усовершенствование позволит отказаться от применения материального эталона в процессе измерений методом сдвиговой спекл-интерферометрии.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддерживаемого Минобрнауки России

в рамках выполнения соглашения №05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

1. Schars U., Jueptner W. *Digital Holography. Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques* (Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 2005).
2. Steinchen W., Yang L. *Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry* (SPIE Press, 2003).
3. Zhao Q., Dan X., Sun F., et al. *Appl. Sci.*, **8**, 2662 (2018).
4. Xie X., Yang L., Chena X., Xua N., Wang Y. *Proc. SPIE*, **8916**, 89160D-1 (2013).
5. Xie X., Yang L., Xu N., Chen X. *Appl. Opt.*, **52**, 4063 (2013).
6. Hariharan P., Oreb B.F., Eiju T. *Appl. Opt.*, **26**, 2504 (1987).
7. Malacara D., Servin M., Malacara Z. *Interferogram Analysis for Optical Testing* (Boca Raton: CRC Press, 2005).
8. Waldner S.P. *Phd Thesis* (Zurich, 2000).
9. Вест. Ч. *Голографическая интерферометрия* (М.: Мир, 1982).
10. Бадалян Н.П., Кийко В.В., Кислов В.И., Козлов А.Б. *Квантовая электроника*, **38**, 477 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 477 (2008)].
11. Мысина Н.Ю., Максимова Л.А., Горбатенко Б.Б., Рябухо В.П. *Квантовая электроника*, **45**, 979 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 979 (2015)].
12. Гужов В.И., Турунтаев Д.А. *Автометрия*, **5**, 116 (2000).
13. Song L., Zhou Z., et al. *Opt. Express*, **7**, 798 (2016).
14. Савонин С.А. *Канд. дис.* (Саратов, 2016).
15. Гудмен Дж. *Введение в фурье-оптику* (М.: Мир, 1970).
16. Биргер И.А. *Расчет на прочность деталей машин* (М: Машиностроение, 1959).
17. Бажанов В.Л. и др. *Расчет конструкций на тепловые воздействия* (М.: Машиностроение, 1969).
18. Ivanov A.D., Minaev V.L., Vishnyakov G.N., et al. *Meas. Tech.*, **62**, 795 (2019).