

УДК 535.412

*И. В. Волков¹, В. В. Вышинский^{1,2}, А. О. Кисловский¹*¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского

Теоретические основы метода спекл-голографии в экспериментальной механике

Представлена математическая модель физического явления голографической и спекл-интерферометрии, объединяющая существующие теории геометрической и дифракционной оптики. Эта модель используется в экспериментальной механике при анализе пространственных перемещений и деформаций натуральных конструкций. Открываются новые возможности исследования широкого спектра задач.

Ключевые слова: спекл-голография, спекл-структура, дифракционная и компьютерная оптика, дифракционные решетки, дифракционное гало, преобразование Фурье, оптическая фильтрация, оптическое дифференцирование, экспериментальная механика.

*I. V. Volkov¹, V. V. Vyshinsky^{1,2}, A. O. Kislovskiy¹*¹ Moscow Institute of Physics and Technology (State University)² Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI)

Theoretical bases of the speckle-holography method in experimental mechanics

The paper presents a mathematical model of the holographic and speckle-interferometry physical phenomena combining geometric and diffraction optics theories. The model is used in experimental mechanics for space displacement and deformation full-scale construction analysis. A new possibility to investigate a wide range of problems is offered.

Key words: speckleholography, specklestructure, diffracted and computer's optics, diffractive grids, diffraction halo, Fourier transformation, optical filtration, optical differentiation, experimental mechanics.

1. Введение

Спекл-интерферометрия используется сравнительно недавно, но общепризнанной теории пока не существует. Однако результаты использования ее впечатляют и обещают широкое использование этого явления в технике. В частности, компьютерная спекл-интерферометрия [1, 2] уже используется как альтернатива мокрому голографическому бесконтактному процессу. Представленная в статье теория спекл-интерферометрии объединяет существующие модели голографической интерферометрии диффузно отражающих объектов при их деформировании. Использование представленной теории при анализе деформаций позволяет получать компоненты тензора пространственных перемещений и деформаций, используемые в механике деформированного тела. Обобщение голографических принципов в спекл-голографии и спекл-интерферометрии открывает новые возможности исследования в различных областях науки и техники.

2. Физика спекл-структур

При освещении диффузной поверхности когерентным светом лазера каждая точка ее рассеивает в окружающее пространство сложную, присущую только ей волну когерентного света. Эта волна несет информацию о структуре, материале, обработке его поверхности, шероховатости и других свойствах. В результате интерференционного сложения волн всех точек освещенной поверхности в пространстве формируется рассеянное когерентное сложное спекл-поле, несущее полную информацию о поверхности освещенного объекта. Явление останется тем же самым, если заменить глаз фотоаппаратом или видеокамерой. На изображении будут наблюдаться субъектные спеклы, которые определяются апертурой объектива. Чем больше апертура, тем тоньше структура спеклов, т.к. диаметр дифракционной картины, создаваемой объективом, убывает с увеличением его апертуры (отверстия). Чтобы получить спеклы, достаточно поместить фотопластинку на каком-либо расстоянии от объекта, и на ней будут зарегистрированы объектные спеклы. По аналогии с явлением дифракции можно назвать эти спеклы в ближней зоне спеклами Френеля или объектными спеклами, а в дальней зоне при сфокусированном изображении – спеклами Фраунгофера или субъектными спеклами. При регистрации голограммы спеклы будут наблюдаться и в восстановленном изображении, это затрудняет наблюдение объекта, его качество, однако эти спеклы можно использовать в экспериментальной механике при измерении пространственных перемещений и деформаций поверхности объекта. Природу образования спекл-структуры разные авторы представляют по-разному [2, 3]. Примеров объяснения дифракционной природы образования спекл-структуры много [5, 6, 7, 8]. Дифракция когерентного освещения на регулярной дифракционной решетке имеет строго определенную пространственную частоту, определяемую формулой Брэгга:

$$\sin(\alpha) = \frac{\lambda}{D}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, D – период решетки, α – угол дифракции.

При дифракции на шероховатостях диффузной поверхности образуется спектр пространственных частот, несущий информацию об объекте. Спекл-поле можно рассматривать как результат дифракции на совокупности решеток с изменяющимися пространственными частотами (периодами) их пространственной ориентацией и типами. Поэтому при анализе спекл-полей при оптической фильтрации может быть использован аппарат фурье-преобразования, обладающий математической полнотой функционального анализа и простотой его реализации в оптике. При использовании оптической схемы (рис. 1) [5] для регистрации спекл-голограмм сфокусированного изображения двойной апертурой пучки, опорные друг другу, создают несущую пространственную частоту по всему изображению. При оптической фильтрации дифракционных порядков спекл-голограмм по классической схеме (рис. 2) на фоне спеклов образуется регулярная решетка.

При интерференции по интенсивности в каждой точке голографического изображения регистрируется информация о пространственных частотах по всему полю объекта. Таким образом, в каждой точке геометрического изображения имеется множество опорных пространственных частот по полю объекта. Это объясняет наличие сплошного спектра в дифракционном гало в частотной плоскости при фильтрации спекл-голограмм.

При использовании дополнительного опорного пучка по полю спекл-голограммы образуется регулярная несущая решетка, которая и наблюдается на фоне спеклов. Наличие дополнительного опорного пучка увеличивает чувствительность к вибрациям, поэтому при внестеновой спекл-голографии наличие вибраций размывает эти полосы и ухудшает запись спекл-голограмм. Аналогично происходит в сендвич-голографии [8]. Данное свойство применяется в оптоэлектронике и в радиоастрономии.

Спекл-голограмма (Sg) рассматривается как свертка \odot аппаратной функции (A) используемой оптики и регистратора с объектной волной (S): $Sg = S \odot A$. Можно представить спекл-голограмму как свертку различных видов сигналов в поле регистратора с его

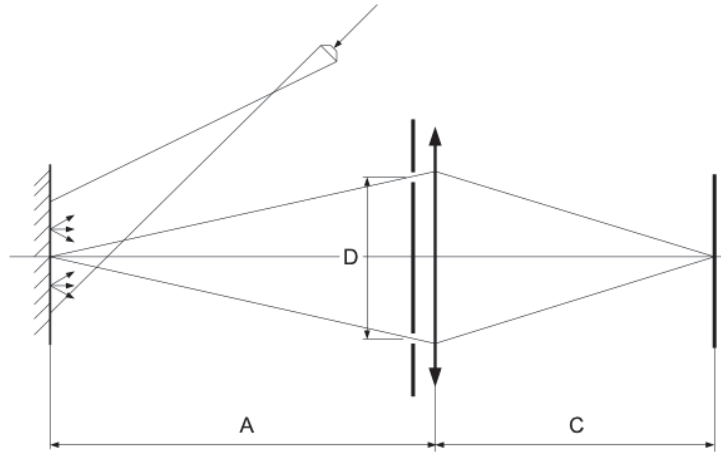


Рис. 1. Измерение деформаций с помощью изображающей системы двойной апертуры

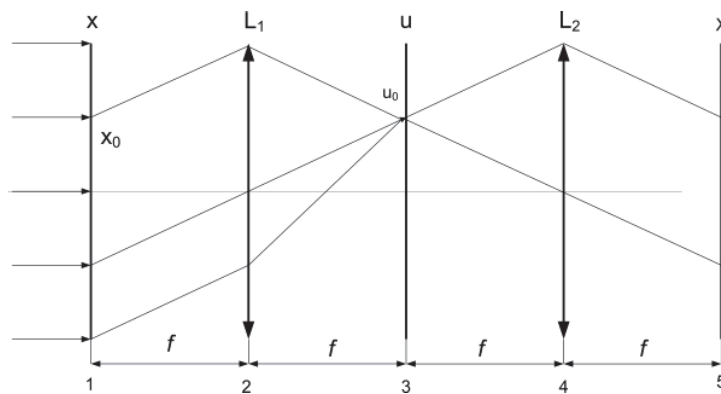


Рис. 2. Классическая схема фильтрации: фурье-преобразования $L1$, 3 – частотная плоскость линзы $L1$, 4 – линза обратного фурье-преобразования $L2$, 5 – плоскость производной спекл-интерферограммы

аппаратной функцией. Это обобщение значительно расширяет области применения методов спекл-голографии и приводит к тензорному аппарату булевой алгебры, что может быть использовано в медицине и нейрофизиологии, а также в астрофизике.

3. Использование спеклов в экспериментальной механике

На рис. 3 представлены оптические схемы хода лучей когерентного источника при освещении диффузно отражающей поверхности объекта и получения интерференционной спекл-структуры. Слева показано образование объектной спекл-структуры, регистрируемой при получении голограмм во встречных пучках, справа – оптическая схема образования субъектной спекл-структуры, регистрируемой при получении голограмм сфокусированного изображения.

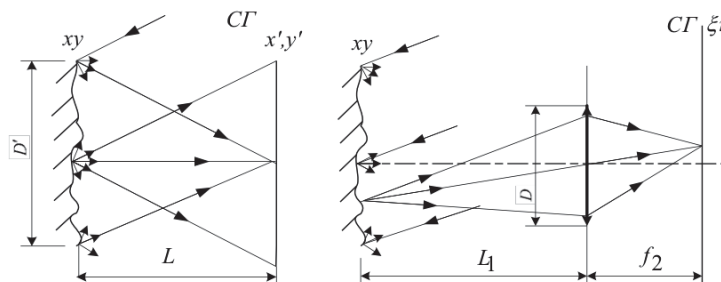


Рис. 3. Схемы хода лучей при образовании спекл-полей диффузно отражающей поверхности

Средние размеры получаемых спеклов δ_s определяются первым интерференционным максимумом диска Эйри (2а), пределом разрешения оптической системы по Релею [2, 3]:

$$\delta_s^A = 1,22 \frac{\lambda}{D'}, \quad (2a)$$

$$\delta_s^R = 1,22M \frac{\lambda \cdot f}{D}, \quad (2b)$$

где λ – длина волны, L – расстояние между объектом и плоскостью регистрации, D' – размер регистрируемого (освещенного) поля объекта, D – диаметр апертуры линзы (объектива), M – коэффициент увеличения, f – фокусное расстояние линзы (объектива).

Комплексная амплитуда рассеянного света в произвольной точке пространства равна сумме амплитуд волн по всем пространственным частотам, рассеянных каждой точкой поверхности, являющихся источником сферических волн.

Волновой фронт излучения рассеянного диффузно отражающим объектом, расположенным в плоскости (x, y) , падает на регистрирующую плоскость (x', y') (рис. 3). Комплексную амплитуду $\alpha(x, y)$ n -го точечного излучателя, его координаты (x_n, y_n) , $n = 1 \dots N$, согласно принципу Гюйгенса–Френеля, можно представить в виде функции

$$\alpha(x_n, y_n) = \delta(x - x_n, y - y_n), \quad (3)$$

где $\delta(x - x_n, y - y_n)$ – дельта-функция Дирака, $\alpha(x, y)$ – непрерывная функция.

$$\delta(x - x_n, y - y_n) = \iint \delta_n(x - x_n, y - y_n) dx dy = \begin{cases} 1 & \text{при } (x = x_n, y = y_n); \\ 0 & \text{при } (x \neq x_n, y \neq y_n). \end{cases}$$

Тогда выражение для суммы пространственных волн вблизи объекта, представляющее распределение комплексных амплитуд, будет иметь вид

$$U_0(x, y) = \sum_{n=1}^N \delta(x - x_n, y - y_n) \alpha(x, y) \exp(i\varphi_n), \quad (4)$$

где φ_n – относительная фаза волны от n -го излучателя.

Поле в дальней зоне можно связать преобразованием Фурье:

$$U(x', y') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{n=1}^N \delta(x - x_n, y - y_n) \alpha(x, y) \cdot \exp(i\varphi_n) \exp\left(\frac{i \cdot 2\pi}{\lambda L} (xx' + yy')\right) dx dy, \quad (5)$$

где λ – длина волны когерентного излучения, L – расстояние между плоскостями (x, y) , (x', y') .

После преобразования выражение (5) приводится к виду

$$U(x', y') = \sum_{n=1}^N \alpha_n(x_n, y_n) \exp\left[i\left(\varphi_n + \frac{2\pi}{\lambda L} (x_n x' + y_n y')\right)\right]. \quad (6)$$

Выражение (6) есть сумма диффузно отражённых от объекта волн, регистрируемых спекл-голограммой во встречных пучках. Описанную этим выражением спекл-структуру рассеянного объектом излучения легко наблюдать в дальней зоне. Эта спекл-структура используется при выделении отдельных компонент тензора деформаций. Таким образом, спекл-интерферограмму можно рассматривать как суперпозицию двух световых полей, диффузно рассеянных двукратно-экспонированной спекл-голограммой. Полагая, что после экспонирования и обработки голограммы ее амплитудное пропускание пропорционально распределению интенсивности в плоскости спекл-голограммы $I(x, y)$, запишем результат

двукратно-экспонированной голограммы объекта, испытывающего одновременно деформацию ε_x , ε_y и смещение x_0 в плоскости объекта (x, y) [7, 13]:

$$\tau(x, y) = t_0 - kI(x, y) \odot [\delta(x, y) + \delta(x - \varepsilon_x x - x_0, y - \varepsilon_y y)], \quad (7)$$

где $\tau(x, y)$ – комплексная функция амплитудного пропускания спекл-голограммы двойной экспозиции, t_0 – пропускание неэкспонированной фотопластинки, k – коэффициент пропорциональности, $I(x, y)$ – зарегистрированное распределение интенсивности в плоскости спекл-голограммы, x, y – координаты в плоскости объекта, x_0 – величина смещения объекта как жесткого целого по оси x , $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – относительные деформации удлинения объекта по осям x, y , \odot – операция свертки сигналов.

Таким образом, на спекл-голограмме регистрируются деформации и смещения объекта. При фильтрации таких голограмм наблюдается изменение пространственных частот в фурье-плоскости и формируется определённый спектр в виде дифракционного гало. Фильтрация внечастотной плоскости связана с выделением отдельных областей этого спектра.

Поле наблюдения при проведении оптической фильтрации на расстоянии l от фокальной плоскости [10] можно представить в виде

$$U_H(\mu, \nu) = k \left(-\exp\left(\frac{i\pi l}{\lambda f^2}(\mu^2 + \nu^2)\right) \right) \cdot \left(1 + \exp\left(\frac{2\pi i l}{\lambda f^2}(\mu^2 \varepsilon_x + \nu^2 \varepsilon_y)\right) \exp\left(\frac{2\pi i l}{\lambda f^2} \mu x_0\right) \right), \quad (8)$$

где μ, ν – координаты в плоскости фильтрации, f – фокусное расстояние линзы, λ – длина волны монохроматического плоского пучка.

Регистрируемое распределение интенсивности может быть получено возведением в квадрат выражения (8):

$$I_H(\mu, \nu) \sim \cos^2 \left(\frac{\pi l}{\lambda f^2} \left((\mu^2 \varepsilon_x + \nu^2 \varepsilon_y) + \mu x_0 \right) \right). \quad (9)$$

Получаемая спекл-интерферограмма содержит компоненты деформаций и смещений. Преобразование Фурье волнового поля линзой запишется следующим образом:

$$U_f(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{n=1}^N U_0(x, y) \exp(-i2\pi \cdot (\xi x + \eta y)) dx dy, \quad (10)$$

где $\xi = \frac{x_f}{\lambda_f}$ и $\eta = \frac{y_f}{\lambda_f}$ – пространственные частоты волнового поля, x_f и y_f – координаты точки в частотной плоскости.

Чем больше пространственный угол θ (рис. 4) индикатрисы рассеяния, тем большие пространственные частоты записываются на спекл-голограмму.

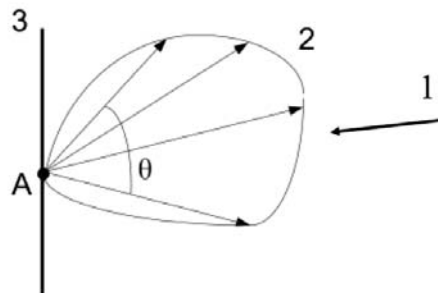


Рис. 4. Индикатриса рассеяния – 2 в точке А диффузно отражающего объекта – 3 при освещении по стрелке – 1

При оптическом дифференцировании, осуществляемом с помощью оптической фильтрации по пространственным частотам, имеется возможность регистрировать большой диапазон плоских компонент деформаций. Диффузная часть рассеяния излучения точками поверхности используется для регистрации плоских компонент пространственных деформаций, а зеркальная составляющая, имеющая большую интенсивность, используется для регистрации нормальной или изгибной составляющей деформаций.

В силу линейности преобразования Фурье уравнение (8) можно записать в одномерном виде. И в дальнейшем использовать для анализа деформаций объекта.

В плоскости голографирования осуществляется регистрация стационарного поля суперпозиции волн с распределением амплитуд (для простоты математических выражений по одной компоненте $\tau(x)$ [12]), которое соответствует пространственной структуре диффузного рассеяния объекта. После фотохимической обработки амплитудное пропускание спекл-голограммы $\tau(x)$ пропорционально зарегистрированной ею интенсивности. В плоскости голограммы объектный пучок интерферирует с каждой из пространственных составляющих волн. Поэтому на спекл-голограмме регистрируется соответствующая совокупность интерференционных решеток, периоды которых определяются углами интерференции.

Для простоты сумму пространственных составляющих частот поля спекл-структуры можно записать покомпонентно:

$$\tau(x) = T_0 - K|t(x)|^2 - k \sum_{n,m} |t(x)|^2 \exp\left(\frac{i2\pi x}{d_{nm}}\right) - k \sum_{n,m} |t(x)|^2 \exp\left(\frac{-i2\pi x}{d_{nm}}\right). \quad (11)$$

Результат фильтрации в фурье-плоскости может быть записан в следующем виде:

$$U(\xi) = F\left(\tau(x)\right) = T_0\delta(\xi) - KF\left(|t(x)|^2\right) - k \sum_{n,m} T(\xi) \oplus T^*(\xi + \xi_{nm}) - k \sum_{n,m} T(\xi) \oplus T^*(\xi - \xi_{nm}), \quad (12)$$

где $\xi_{nm} = \frac{1}{d_{nm}}$ – пространственная частота спекл-структуры n -го и m -го излучателей, используемая при определении цены полосы спекл-интерферограммы поля производной перемещений по полю спекл-голограммы, $T(\xi)$ – фурье-образ функции $t(x)$, K, k – постоянные процесса регистрации (проявления), F, \oplus – соответственно операторы фурье-преобразования и автокорреляции, $*$ – знак комплексно-сопряженной функции.

Распределение амплитуд для изображения спекл-поля после фильтрации и обратного фурье-преобразования в фотоизображении можно записать в виде [9, 11]:

$$U(x') = k \sum_{n,m} |t(x')|^2 \exp\left(i\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)x' \sin \theta_{nm}\right) + k \sum_{n,m} |t(x')|^2 \exp\left(-i\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)x' \sin \theta_{nm}\right), \quad (13)$$

где $\sin \theta_{nm} = \lambda \xi_{nm}$.

Формула (13) для пространственных частот при фильтрации в частотной плоскости используется при расшифровке спекл-голограмм для выделения плоских компонент деформации объекта. Анализ пропуска спекл-голограмм двойной экспозиции при наличии деформации и смещения как целого был опубликован в работах [7, 10]. Впервые этот подход изложен в работах [4, 6, 10], дальнейшее его развитие отражено в работах [7, 12].

4. Измерение плоских компонент тензора деформаций

Смещению в плоскости изображений соответствует изменение пространственной частоты в фурье-плоскости, а в случае неоднородного смещения формируется определенный спектр пространственных частот, соответствующий деформациям. Способ оптического дифференцирования спекл-голограмм заключается в их оптической фильтрации. Выделяются отдельные пространственные частоты и на них строится оптическое изображение, отражающее производную по полю перемещений:

$$\varepsilon_\psi = \frac{\partial \vec{U}}{\partial u_\psi} \quad (14)$$

где ψ – азимут угла фильтрации поля пространственных перемещений \vec{U} по направлению плоской компоненты u_ψ . Таким образом, при оптической фильтрации выделяются квази-регулярные структуры, соответствующие несущей пространственной частоте, по которой определяется u_ψ^λ :

$$u_\psi^\lambda = \frac{\lambda}{\sin \alpha}, \quad (15)$$

где λ – длина волны излучения, α – пространственный угол фильтрации, равный для малых углов (до 10°).

$$\alpha = \frac{a}{f}, \quad (16)$$

где a – расстояние от фильтрующего отверстия до оптической оси линзы, f – фокусное расстояние линзы.

По интерферограмме вычисляется деформация объекта. Вторая производная оптического поля (перемещения) выделяется путем двойной фильтрации оптического поля спекл-голограммы (рис. 5).

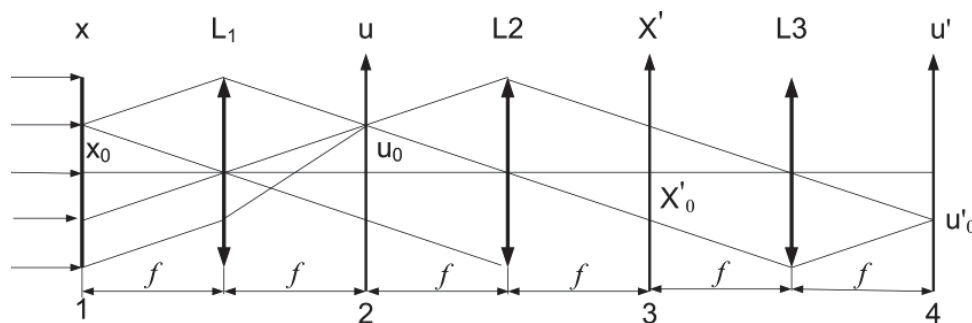


Рис. 5. Оптическая схема фильтрации: 1 – спекл-голограмма с функцией пропускания $\tau(x)$, 2 – частотная плоскость линзы $L1$ $g(u) = F[A\tau(x)]$ с выделенной пространственной частотой u_0 , 3 – плоскость интерферограммы $\tau'(x') = F[g(u)]$, 4 – частотная плоскость линзы $L3$ $g'(u') = F[\tau'(x')]$, где выделяется вторая производная $\tau(x)$ с пространственной частотой u'_0

Аналогично выделяются остальные производные и по ним определяются главные деформации.

5. Практическое использование спекл-голографии

Возможная схема испытания натурной конструкции самолета с помощью регистрирующей голографической установки приведена на рис. 6.

В качестве тестовой задачи был выбран плоский образец с отверстием. Конфигурации полос трех ортогональных компонент перемещений u, v, w (рис. 7) испытанного на растяжение образца полностью совпадают с аналогичными картинами полос, полученными методами Муара (геометрической и дифракционной оптики) для плоских компонент. Картина полос нормальной компоненты w (рис. 7а) согласуется с аналогичными результатами других авторов. Главная компонента деформации приведена на рис. 7б, по которой указанным ранее способом вычисляется деформация по всему полю интерферограммы и коэффициент концентрации напряжений в упругой зоне. Погрешность измерений составила 2–5%.

На рисунке 8 приведены интерферограммы исследования влияния коррозионного повреждения (1) в образце из алюминиевого сплава.

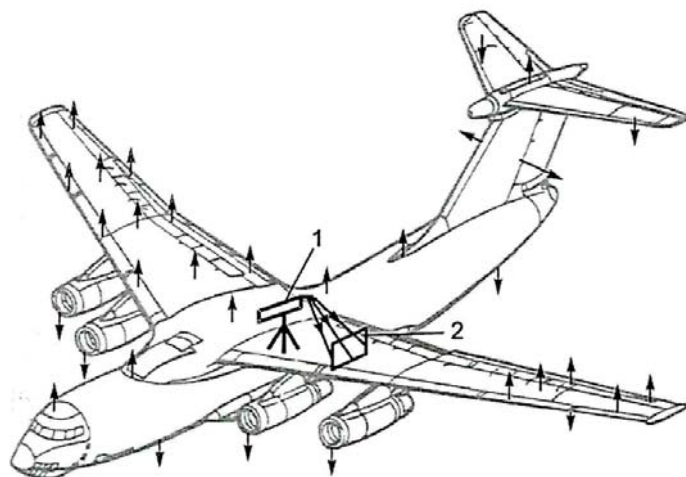


Рис. 6. Схема испытания: 1 – лазер; 2 – стекл-голограмма; стрелками показано направление нагружения

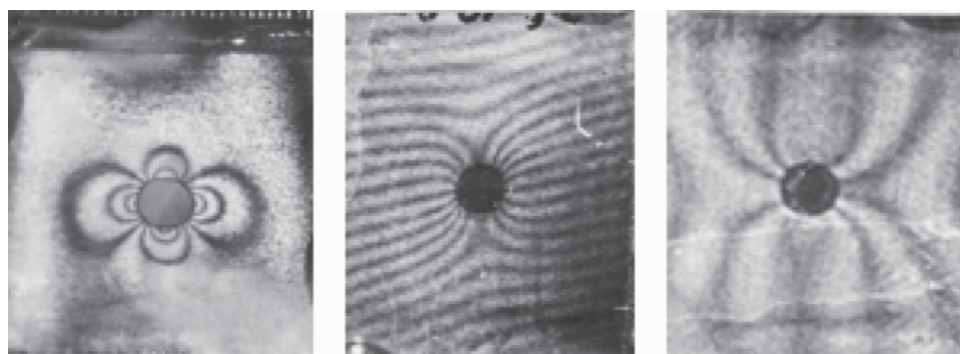


Рис. 7. Интерферограммы пространственных компонент деформаций образца с отверстием
а) $\omega_\lambda = 0,3$ мкм; б) $u_\lambda = 3,0$ мкм; в) $v_\lambda = 5,2$ мкм

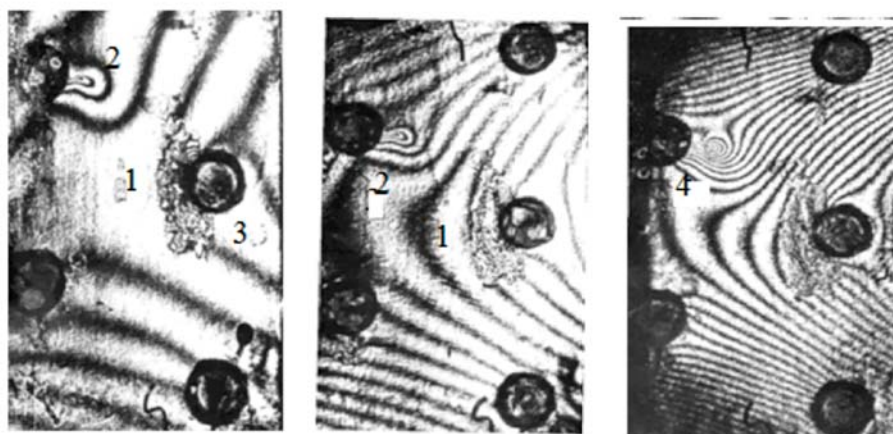


Рис. 8. Выявление зон трещинообразования в элементе лонжерона: 1 – зона коррозионного повреждения, 2 – поверхностная трещина, 3 – болтовое соединение лонжерона, 4 – выход трещины на поверхность лонжерона

6. Заключение и выводы

Успешное сочетание методов стекл-интерферометрии и обычной классической голоинтерферометрии, подтверждающее общность физического механизма классической гологра-

фии и оптики спеклов, позволяет существенно повысить информативность голографической интерферометрии и более конкретно говорить о связи голографии и оптики спеклов, расширяющих практическое применение спекл-голографии в различных областях науки и техники.

Разработан метод оптической фильтрации спекл-голограмм, который позволяет выделять отдельные компоненты пространственных перемещений и определять компоненты тензора деформаций.

Литература

1. Журавлев О.А., Комаров С.Ю., Попов К.Н., Прокофьев А.Б. Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок // Компьютерная оптика. 2001. Вып. 21. С. 143–149.
2. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986.
3. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985.
4. Волков И.В. Исследование механики деформаций натуральных образцов с концентраторами напряжений методом спекле голографии // Материалы 6-ой Всесоюзной Школы по голографии АН СССР. Л.: ЛИЯФ, 1974. С. 369–382.
5. Волков И.В. Применение метода спекл-голографии двойной апертуры для выделения плоского компонента деформации вблизи концентраторов напряжений // Ученые записки ЦАГИ. 1976. Т. VII, N 4. С.168–173.
6. Волков И.В., Клименко И.С. О некоторых особенностях получения и интерпретации спекл-интерферограмм деформируемых объектов // Журнал Технической Физики. 1980. Т. 50, вып. 5. С.1038–1048.
7. Волков И.В. Спекл-голография в экспериментальной механике. Пенза: ПГТА, 2010.
8. Abramson N. Sandwich hologram interferometry: a new dimension in holographic comparison // Applied Optics. 1974. V. 13(9). P. 2019–2025.
9. Волков И.В. Приложения голографической и спекл-интерферометрии в экспериментальной механике. Части 1, 2 // Новые промышленные технологии, Минатом России. 2006. N 3. С. 44–52; N 4. С. 45–51.
10. Волков И.В., Клименко И.С., Кварацхелия Т.Г., Голикова Н.А. К интерпретации спекл-интерферограмм деформируемых объектов // Журнал Технической Физики. 1981. Т. 51, вып. 10. С.2080–2085.
11. Волков И.В., Жебракова Г.В., Короленко, Т.И. Использование когерентно-оптических методов в анализе деформаций конструкций // М.: ЦАГИ, ОНТИ. Обзор N 707. 1990.
12. Волков И.В. Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натуральных конструкций // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, N 1. С. 82–89.

References

1. Juravlev O.A., Komarov S.J., Popov K.N., Prokofiev A.B. Development of an automated method for studying the vibration characteristics of power plants. Computer optics. 2001. V. 21. P.143–149. (in Russian).
2. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. M.:Mir, 1986. (in Russian).
3. Klimentko I.S. Holography of focused-images and speckle interferometry. M.: Science, 1985. (in Russian).

4. *Volkov I.V.* Investigation of the deformation mechanics of full-scale samples with stress concentrators by speckle holography. Materials of 6th All-union School on holography USSR Academy of Science. L.: LINP, 1974. P.369–382. (in Russian).
5. *Volkov I.V.* Application of the double-aperture speckle holography method for isolating the flat strain component near the stress concentrators // *Uchenye zapiski TsAGI*. 1976. V. VII, N 4. P. 168–173. —(in Russian).
6. *Volkov I.V., Klimenko I.S.* Some features of obtaining and interpreting speckle interferograms of deformable objects. *Journal of Theoretical Physics*. 1980. V. 50, N 5. P.1038–1048. (in Russian).
7. *Volkov I.V.* Speckle holography in experimental mechanics. Penza: PGTA. 2010. (in Russian).
8. *Abramson N.* Sandwich hologram interferometry: a new dimension in holographic comparison. *Applied Optics*. 1974. V. 13(9). P. 2019–2025.
9. *Volkov I.V.* Applications of holographic and speckle interferometry in experimental mechanics. Part 1, 2. New industrial technologies, Minatom of Russia. 2006. N 3. С. 44–52; N 4. P. 45–51. (in Russian).
10. *Volkov I.V., Klimenko I.S., Kvarazhelia T.G., Golikova N.A.* Interpretation of speckle interferograms of deformable objects. *Journal of Technical Physics*. 1981. V. 51, N 10. С. 2080–2085. (in Russian).
11. *Volkov I.V., Jebrakova G.V., Korolenko T.I.* Application of coherent-optical methods in structural deformations analysis. Moscow: TsAGI, ONTI. Review N 707. 1990. (in Russian).
12. *Volkov I.V.* Off-stage speckle-holography. Holographic and speckle interferometry in the full-scale constructions measurments. *Computer optics*. 2010. V. 34, N 1. P. 82–89. (in Russian).

Поступила в редакцию 23.05.2017