

К ВОПРОСУ О РАСШИФРОВКЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ, ПОЛУЧЕННЫХ В МНОГОЛУЧЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Предложены методы расшифровки голографических интерферограмм, полученных методом двух экспозиций, в оптических схемах с двумя опорными пучками. Показана возможность определения трехмерного поля перемещений исследуемого объекта по одной голограмме. Представлены экспериментальные результаты по определению профиля изгиба пластины, которые подтверждают предложенные методы расшифровки голографических интерферограмм.

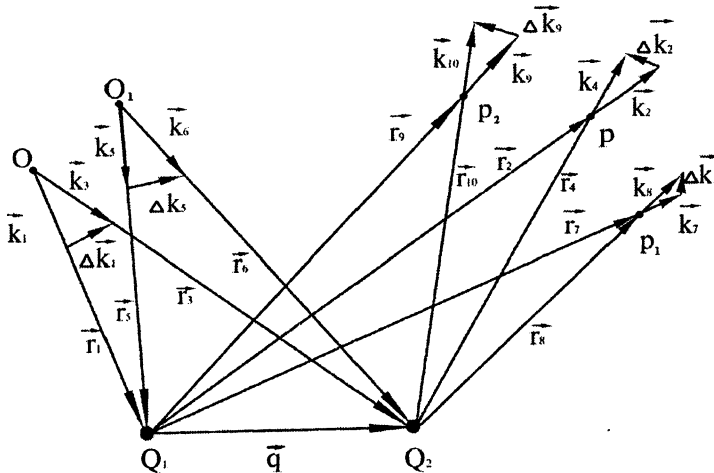
Экспериментальные методы исследований, интенсивно развивающиеся в последние годы, позволяют находить действительные значения деформаций, возникающих в деталях машин и конструкциях, при различных условиях их работы. В настоящее время особое место среди экспериментальных методов занимают оптические методы, позволяющие получать полную информацию о напряженно-деформированном состоянии конструкции. Среди оптических методов следует выделить методы голографической интерферометрии. Голографическая интерферометрия – высокочувствительный метод, позволяющий исследовать предметы сложной формы; не предъявляющий строгих требований к качеству оптики и к исследуемой поверхности, позволяющий сравнивать световые волны, рассеянные объектом в разные моменты времени и в разных направлениях в пределах телесного угла, который охватывает голограмма.

Однако существуют проблемы, связанные с расшифровкой голографических интерферограмм. Для количественной расшифровки интерферограмм необходимо проведение определенного объема экспериментальных и расчетных операций. В связи с этим проблема расшифровки голографических интерферограмм и разработки новых методов, позволяющих упростить процесс расшифровки, является актуальной [1-7]. В данной работе предлагаются методы расшифровки голографических интерферограмм, которые позволяют по одной голограмме определить трехмерное распределение поля перемещений исследуемого объекта.

Рассмотрим метод расшифровки двухэкспозиционных голографических интерферограмм по трехлучевой схеме с двумя произвольно расположенными в пространстве предметными пучками, которые имеют линейную поляризацию с взаимно ортогональным расположением плоскостей поляризации. Распределение интенсивности в интерференционной картине в этом случае определяется выражением

$$I \approx I_0 [\cos^2 \varphi + \cos^2 \varphi'], \quad (1)$$

где I_0 – суммарная интенсивность света; φ – разность фаз между двумя восстановленными волнами, несущими информацию о смещении поверхности между экспозициями и связанными с первым предметным пучком; φ' – разность фаз между двумя восстановленными волнами, связанными со вторым предметным пучком. Из физических соображений, а также предварительного теоретического анализа следует, что для определения полной информации о смещении поверхности необходимо также иметь и несколько направлений наблюдения. Для определения разности фаз рассмотрим ход световых лучей (рис.1) для произвольно выбранной точки на исследуемой поверхности и произвольно выбранных точек освещения и наблюдения. В точках O и O_1 располагаются источники освещения, в точках P и P_1 исследуется образование интерференцион-



Р и с. 1. Схема пространственного расположения векторов

образования интерференцион-

ной картины, а с другой стороны эти точки являются точками наблюдения. Предположим, что исследуемый элемент поверхности между экспозициями смещается из точки Q_1 в точку Q_2 на величину \vec{q} , тогда $Q_1Q_2 = \vec{q}$. Волновые векторы световых лучей, представляющие направление освещения и наблюдения, для данной оптической схемы согласно рис.1 обозначим как \vec{k}_i , $|\vec{k}_i| = 2\pi/\lambda$, где λ – длина волны лазерного излучения, используемого для записи голограмм.

Расстояние от источника освещения до исследуемой точки и далее до точки наблюдения обозначим как \vec{r}_i . Используя введенные обозначения, определим величину фазового набега лучей, интерферирующих в точках P и P_1 :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \vec{k}_1\vec{r}_1 + \vec{k}_2\vec{r}_2 + \varphi_0; \quad \varphi_3 = \vec{k}_1\vec{r}_1 + \vec{k}_7\vec{r}_7 + \varphi_0; \quad \varphi_5 = \vec{k}_5\vec{r}_5 + \vec{k}_2\vec{r}_2 + \varphi_0; \quad \varphi_7 = \vec{k}_3\vec{r}_3 + \vec{k}_7\vec{r}_7 + \varphi_0; \\ \varphi_2 &= \vec{k}_3\vec{r}_3 + \vec{k}_4\vec{r}_4 + \varphi_0; \quad \varphi_4 = \vec{k}_8\vec{r}_8 + \vec{k}_3\vec{r}_3 + \varphi_0; \quad \varphi_6 = \vec{k}_6\vec{r}_6 + \vec{k}_4\vec{r}_4 + \varphi_0; \quad \varphi_8 = \vec{k}_6\vec{r}_6 + \vec{k}_8\vec{r}_8 + \varphi_0. \end{aligned} \quad (2)$$

При изменении направлений наблюдения и освещения между волновыми векторами \vec{k}_i выполняются следующие соотношения:

$$\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}_1; \quad \vec{k}_4 = \vec{k}_2 + \Delta\vec{k}_2; \quad \vec{k}_6 = \vec{k}_5 + \Delta\vec{k}_5; \quad \vec{k}_8 = \vec{k}_7 + \Delta\vec{k}_7. \quad (3)$$

Тогда, используя уравнения (2) и (3), разности фаз двух интерферирующих лучей в точках P и P_1 запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_1 - \varphi_2 = \vec{k}_1(\vec{r}_3 - \vec{r}_1) - \vec{k}_2(\vec{r}_4 - \vec{r}_2) + \Delta\vec{k}_1\vec{r}_3 + \Delta\vec{k}_2\vec{r}_4; \\ \varphi' &= \varphi_4 - \varphi_3 = \vec{k}_1(\vec{r}_3 - \vec{r}_1) - \vec{k}_7(\vec{r}_7 - \vec{r}_8) + \Delta\vec{k}_1\vec{r}_3 + \Delta\vec{k}_7\vec{r}_8; \\ \varphi'' &= \varphi_6 - \varphi_5 = \vec{k}_5(\vec{r}_6 - \vec{r}_5) - \vec{k}_2(\vec{r}_2 - \vec{r}_4) + \Delta\vec{k}_5\vec{r}_6 + \Delta\vec{k}_2\vec{r}_4; \\ \varphi''' &= \varphi_8 - \varphi_7 = \vec{k}_5(\vec{r}_6 - \vec{r}_5) - \vec{k}_7(\vec{r}_7 - \vec{r}_8) + \Delta\vec{k}_5\vec{r}_6 + \Delta\vec{k}_7\vec{r}_8; \end{aligned} \quad (4)$$

В реальных экспериментальных исследованиях обычно выполняются следующие условия:

$$|\vec{q}| = |\vec{r}_3 - \vec{r}_1| = |\vec{r}_6 - \vec{r}_5| = |\vec{r}_2 - \vec{r}_4| = |\vec{r}_7 - \vec{r}_8| \ll |\vec{r}_i|. \quad (5)$$

Тогда с большой степенью точности можно считать, что $\Delta\vec{k}_1 \perp \vec{r}_3$, $\Delta\vec{k}_5 \perp \vec{r}_6$, $\Delta\vec{k}_2 \perp \vec{r}_4$, $\Delta\vec{k}_7 \perp \vec{r}_8$. Поэтому (4) можно записать в следующем виде:

$$\varphi = (\vec{k}_1 - \vec{k}_2)\vec{q}, \quad \varphi' = (\vec{k}_1 - \vec{k}_7)\vec{q}, \quad \varphi'' = (\vec{k}_5 - \vec{k}_2)\vec{q}, \quad \varphi''' = (\vec{k}_5 - \vec{k}_7)\vec{q}. \quad (6)$$

Рассмотрим расшифровку интерферограмм для двух обобщенных случаев: когда номер интерференционной полосы при восстановлении интерферограммы известен и когда номер интерференционной полосы неизвестен.

Пусть номер интерференционной полосы известен. В этом случае из выражения (1) следует, что светлые полосы в интерференционных картинах, наблюдаемых в точках P и P_1 для двух предметных лучей освещения, будут образованы при разности фаз, удовлетворяющих следующим соотношениям:

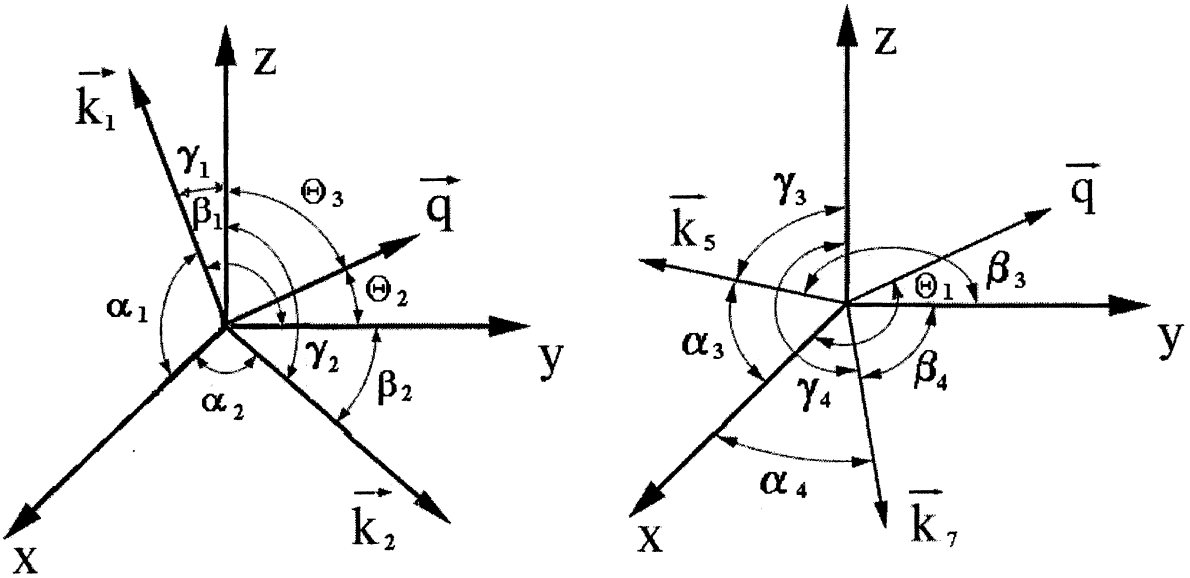
$$\varphi = 2\pi N_1; \quad \varphi' = 2\pi N_2; \quad \varphi'' = 2\pi N_3; \quad \varphi''' = 2\pi N_4, \quad (7)$$

где N_1, N_2 – номера интерференционных полос, наблюдаемых в точках P и P_1 соответственно для первого предметного пучка; N_3, N_4 – номера интерференционных полос, наблюдаемых в точках P и P_1 соответственно для второго предметного пучка.

Тогда систему уравнений (6) перепишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} 2\pi N_1 &= |\vec{k}_1||\vec{q}|\cos(\vec{k}_1, \vec{q}) - |\vec{k}_2||\vec{q}|\cos(\vec{k}_2, \vec{q}); \\ 2\pi N_2 &= |\vec{k}_1||\vec{q}|\cos(\vec{k}_1, \vec{q}) - |\vec{k}_7||\vec{q}|\cos(\vec{k}_7, \vec{q}); \\ 2\pi N_3 &= |\vec{k}_5||\vec{q}|\cos(\vec{k}_5, \vec{q}) - |\vec{k}_2||\vec{q}|\cos(\vec{k}_2, \vec{q}); \\ 2\pi N_4 &= |\vec{k}_5||\vec{q}|\cos(\vec{k}_5, \vec{q}) - |\vec{k}_7||\vec{q}|\cos(\vec{k}_7, \vec{q}). \end{aligned} \quad (8)$$

Введем произвольную систему координат (рис.2), которая связана с исследуемой точкой поверхности, и относительно нее расположим векторы наблюдения, освещения и перемещения. Используя угловые обозначения (см. рис.2), введенные для расположения указанных векторов относительно координатных осей (x, y, z) , для $\cos(\vec{k}_i, \vec{q})$ получим следующие соотношения:



Р и с. 2. Схема углового расположения векторов

$$\begin{aligned}
 \cos(\vec{k}_1, \vec{q}) &= \cos\alpha_1 \cos\theta_1 + \cos\beta_1 \cos\theta_2 + \cos\gamma_1 \cos\theta_3; \\
 \cos(\vec{k}_2, \vec{q}) &= \cos\alpha_2 \cos\theta_1 + \cos\beta_2 \cos\theta_2 + \cos\gamma_2 \cos\theta_3; \\
 \cos(\vec{k}_5, \vec{q}) &= \cos\alpha_3 \cos\theta_1 + \cos\beta_3 \cos\theta_2 + \cos\gamma_3 \cos\theta_3; \\
 \cos(\vec{k}_7, \vec{q}) &= \cos\alpha_4 \cos\theta_1 + \cos\beta_4 \cos\theta_2 + \cos\gamma_4 \cos\theta_3,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ – значения углов расположения вектора освещения \vec{k}_1 относительно координатных осей (x, y, z) соответственно; $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ – значения углов расположения вектора наблюдения \vec{k}_2 относительно координатных осей (x, y, z) соответственно; $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ – значения углов расположения вектора освещения \vec{k}_5 относительно координатных осей (x, y, z) соответственно; $\alpha_4, \beta_4, \gamma_4$ – значения углов расположения вектора наблюдения \vec{k}_7 относительно координатных осей (x, y, z) соответственно; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – значения углов расположения вектора смещения \vec{q} относительно координатных осей (x, y, z) соответственно.

Отметим также, что

$$q_x = |\vec{q}| \cos\theta_1; \quad q_y = |\vec{q}| \cos\theta_2; \quad q_z = |\vec{q}| \cos\theta_3. \tag{10}$$

Тогда, используя соотношения (9) (10) и учитывая, что $|\vec{k}_i| = 2\pi/\lambda$, систему уравнений (8) представим в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 q_x (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) + q_y (\cos\beta_1 - \cos\beta_2) + q_z (\cos\gamma_1 - \cos\gamma_2) &= N_1 \lambda; \\
 q_x (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_4) + q_y (\cos\beta_1 - \cos\beta_4) + q_z (\cos\gamma_1 - \cos\gamma_4) &= N_2 \lambda; \\
 q_x (\cos\alpha_3 - \cos\alpha_2) + q_y (\cos\beta_3 - \cos\beta_2) + q_z (\cos\gamma_3 - \cos\gamma_2) &= N_3 \lambda; \\
 q_x (\cos\alpha_3 - \cos\alpha_4) + q_y (\cos\beta_3 - \cos\beta_4) + q_z (\cos\gamma_3 - \cos\gamma_4) &= N_4 \lambda.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Решение системы уравнений (9) позволяет найти компоненты q_x, q_y, q_z вектора смещения \vec{q} . Следовательно, используя соотношения (8), можно определить величину и направляющие косинусы вектора смещения \vec{q} :

$$|\vec{q}| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}, \quad \cos\theta_1 = q_x/|\vec{q}|, \quad \cos\theta_2 = q_y/|\vec{q}|, \quad \cos\theta_3 = q_z/|\vec{q}|. \tag{12}$$

Система уравнений (9) переопределена, однако это условие необходимо для однозначного определения вектора смещения \vec{q} . Кроме того, отметим, что знак вектора смещения \vec{q} по дан-

ному методу определить нельзя. Знак вектора смещения \vec{q} обычно определяется из хода эксперимента и физических соображений.

Пусть теперь номер интерференционной полосы неизвестен. Этот случай основан на методе Александра – Бонч-Бруевича расшифровки голографических интерферограмм [2]. Рассмотрим физические основы метода. Так как номер интерференционной полосы неизвестен, то предлагается определять изменение порядка интерференционной полосы при изменении направления наблюдения и изменении направления освещения. Теоретический анализ, проведенный аналогично первому случаю, показывает, что при освещении исследуемой поверхности одним пучком необходимо произвести измерения изменения порядка интерференционной полосы в трех различных направлениях относительно выбранного направления наблюдения. При освещении исследуемой поверхности двумя пучками под различными направлениями необходимо произвести измерения изменения порядка интерференционной полосы только в двух различных направлениях относительно выбранного направления наблюдения. Выполняя аналогичные расчеты, как и в первом случае, запишем систему уравнений, которая описывает изменение порядка интерференционных полос при изменении направления наблюдения. Эта система уравнений имеет вид, аналогичный системе уравнений (9):

$$\begin{aligned} q_x(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) + q_y(\cos \beta_1 - \cos \beta_2) + q_z(\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2) &= \Delta N_{11} \lambda; \\ q_x(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_4) + q_y(\cos \beta_1 - \cos \beta_4) + q_z(\cos \gamma_1 - \cos \gamma_4) &= \Delta N_{21} \lambda; \\ q_x(\cos \alpha_3 - \cos \alpha_2) + q_y(\cos \beta_3 - \cos \beta_2) + q_z(\cos \gamma_3 - \cos \gamma_2) &= \Delta N_{12} \lambda; \\ q_x(\cos \alpha_3 - \cos \alpha_4) + q_y(\cos \beta_3 - \cos \beta_4) + q_z(\cos \gamma_3 - \cos \gamma_4) &= \Delta N_{22} \lambda, \end{aligned} \quad (13)$$

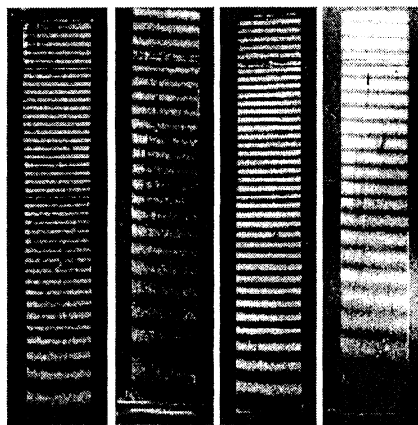
где $\Delta N_{11}, \Delta N_{21}$ – изменение порядка интерференционных полос при изменении направления наблюдения из точки P в точки P_1 и P_2 (соответственно) для первого предметного пучка; $\Delta N_{12}, \Delta N_{22}$ – изменение порядка интерференционных полос при изменении направления наблюдения из точки P в точки P_1 и P_2 (соответственно) для второго предметного пучка; значения углов $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ и $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ сохраняют свои обозначения, как и в первом случае; $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ – значения углов расположения вектора наблюдения \vec{k} из точки P_1 относительно координатных осей (x, y, z) соответственно; $\alpha_4, \beta_4, \gamma_4$ – значения углов расположения вектора наблюдения \vec{k} из точки P_2 относительно координатных осей (x, y, z) соответственно.

Таким образом, решая систему уравнений (13) и используя соотношение (12), можно определить величину и направляющие косинусы вектора смещения \vec{q} , как и в первом случае. Замечания, сделанные относительно переопределенности системы уравнений и знака вектора смещения \vec{q} , остаются в силе.

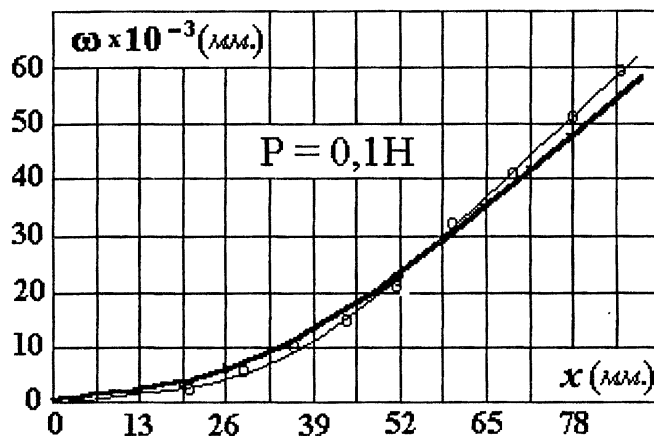
Для подтверждения предложенного метода и правильности теоретических расчетов проведен эксперимент по исследованию изгиба пластинки при воздействии на нее сосредоточенной нагрузки. Двухэкспозиционные голографические интерферограммы исследуемого образца получены с использованием трехлучевой оптической схемы с двумя предметными пучками, которые имели линейную поляризацию и взаимно ортогональное расположение плоскостей поляризации. Состояние поляризации опорного пучка должно быть круговым или линейным с расположением плоскости поляризации под углом $\pm 45^\circ$ к одной из плоскостей поляризации предметных пучков. Это позволяет при восстановлении голографических интерферограмм выбирать необходимую систему интерференционных полос. Восстановление интерферограмм проводится по схеме с узким опорным пучком. Восстанавливающий пучок направляется на голограмму в направлении, обратном направлению опорного пучка при регистрации голограммы. При этом за голограммой, в области регистрации интерференционной картины, восстанавливается действительное изображение образца, покрытого интерференционными полосами. Восстановление узким пучком при освещении какой-либо точки на голограмме соответствует определенному углу наблюдения интерференционной картины. Поскольку при регистрации голограммы принимали участие два предметных пучка, то при восстановлении интерференционной картины получаем изображение образца, покрытого двумя системами полос. Этот эффект мешает наблюдению, но от него можно избавиться, так как при регистрации голограмм были использованы предметные пучки с взаимно ортогональной поляризацией. Если при восстановлении интерференционной картины восстанавливающий пучок пропустить через поляризатор, то,

вращая поляризатор, можно добиться того, что на изображении объекта будет наложена или система полос от одного предметного пучка, или система полос от другого предметного пучка. Такая схема восстановления интерференционных картин позволяет упростить процесс счета полос, что позволит автоматизировать его с последующей компьютерной обработкой.

На рис. 3 представлены фотографии восстановленных интерферограмм при различных углах наблюдений. На рис. 4 представлены экспериментальные значения (кривая, представленная тонкой линией) изгиба пластины, полученные по предложенной методике при



Р и с. 3. Фотографии восстановленных интерферограмм



Р и с. 4. Зависимость величины прогиба пластины

расшифровке интерферограмм, которые представлены на фотографиях (см. рис.3). На этом же рисунке жирная линия представляет теоретические значения изгиба пластинки. Эксперимент проводился с пластинкой, один конец которой зашпелен, а другой свободен. На расстоянии 10мм от свободного конца действовала сосредоточенная сила ($P = 0,1Н$). Пластина изготовлена из дюралюминия Д – 16Т с размерами: длина – 85мм; ширина – 15мм; толщина – 1,5мм. Экспериментальные и теоретические значения, представленные на рис. 4, имеют совпадение с точностью порядка $\pm 7 \div 10\%$, что подтверждает возможность применения предложенных методик для исследования напряженно-деформируемого состояния конструкций.

Отметим также дополнительные преимущества, которые появляются при применении данных методик. Использование данной схемы расширяет диапазон изменения углов наблюдения. Трехлучевая схема позволяет отчетливо видеть интерференционные полосы, в то время как в двухлучевых схемах при изменении угла наблюдения в определенных направлениях интерференционные полосы становятся неразличимыми. Не требуется применения “многоголограммного” метода для получения необходимых экспериментальных данных по определению поля перемещений. Эти преимущества дают возможность сделать заключение, что данная методика позволяет повысить точность измерений, уменьшить время расшифровки интерферограмм, а также провести автоматизацию процесса записи и обработки информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григоровский Н.Н. Развитие экспериментальных методов исследования деформаций и напряжении // Расчеты на прочность. М.: Наука, 1983. С. 3-32.
2. Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М. Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голографической техники // ЖТФ. 1967. Т.37. С. 360-365.
3. Индисов В.О., Писарев В.С., Щетиков В.П., Яковлев В.В. Сравнение способов интерпретации голографических интерферограмм по абсолютным и относительным порядкам полос при измерении деформаций // Деформация и разрушение материалов и конструкций атомной техники. М.: Наука, 1983. С.45-54.
4. Писарев В.С., Яковлев В.В., Щетиков В.П., Индисов В.О. Использование критерия С - оптимальности при выборе схемы голографического интерферометра для определения деформаций // ЖТФ. 1981. Т.51. Вып.4..С.869-871.
5. Грузь А.Н., Воложанинов С.И. Определение напряжений на основе ограниченного объема экспериментальных измерений // Докл. АН СССР. 1984. 277. № 3. С.563-565.
6. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977.
7. McKenzie W.M.C., Kermani A., Leifer I. Study of deformation of bolted timber connections using single-beam reflection holographic interferometry // Proc. 10 th. Int. Conf. on Experimental Mechanics. Portugal, 1994. С. 299-304.