

## ВНЕСТЕНДОВАЯ СПЕКЛ-ГОЛОГРАФИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЕФОРМАЦИЙ НАТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Игорь Валентинович Волков (доцент, e-mail: volkoviv39@mail.ru)*

*Пензенская технологическая академия*

### *Аннотация*

В работе представлено методическое обеспечение работ с использованием разработанных автором новых методов спекл-голографии, внедренных в практику промышленных испытаний натуральных авиаконструкций. Представлены новые методы регистрации спекл-голограмм сфокусированного изображения и во встречных пучках, а также способы расшифровки спекл-голограмм для измерения отдельных плоских и нормальных пространственных компонент деформаций и перемещений в промышленных испытаниях материалов и элементов натуральных авиаконструкций при исследовании широкого спектра задач прочности и долговечности.

*Ключевые слова:* спекл-голография, спекл-интерферометрия, внестендовая голография, измерение деформаций, натурные конструкции.

### *Введение*

Количество и сложность проблем, которые практика проектирования и эксплуатации конструкций выдвигает перед исследователями-экспериментаторами, только увеличивается. Это обусловлено ростом требований к надежности элементов конструкций при одновременном повышении уровней их рабочих параметров и снижении веса, а также появлением новых материалов, включая многослойные и композиционные. Появление мощных методов голографической и особенно спекл-интерферометрии открыли широкие возможности анализа работы натуральных конструкций и решения важных научно-практических задач прочности.

Открывшиеся широкие возможности для расчетного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности конструкций на базе вычислительной техники с использованием метода конечных элементов и конечных разностей, а также вариационных методов механики, основанных на вариационных принципах общей аналитической механики, оказали существенное влияние на эффективное применение методов экспериментальной механики. Широкие возможности численного анализа НДС позволили вывести эксперимент на новый качественный уровень. Это касается как возможностей более корректной постановки задачи экспериментального исследования, так и интерпретации его результатов.

Новые возможности открывают современные компьютерные технологии наиболее перспективного направления в области экспериментального анализа НДС-метода электронной корреляционной спекл-интерферометрии [1-2].

### *Измерение деформаций методом голографии*

Первые работы по регистрации деформаций диффузно отражающих объектов выявили проблемы расшифровки наблюдаемых голографических интерферограмм. Дело в том, что само наблюдение и регистрация картин полос связаны с проблемой локализации их в пространстве, параллаксом их наблюдения, а также новым явлением псевдоскопиче-

ских мнимых и действительных изображений. Появилась новая трактовка в теории дифракции – оптических фокусировок. Эти явления до сих пор остаются в плане серьезных исследований.

В настоящее время при расшифровке голограмм используется в основном векторное уравнение Александрова-Бонч-Бруевича [3].

$$\vec{U}(\vec{\rho}_o + \vec{\rho}_n) = \lambda n, \quad (1)$$

где  $\vec{U}$  - вектор перемещения точки объекта,  $\vec{\rho}_o$ ,  $\vec{\rho}_n$  - векторы освещения и наблюдения,  $\lambda$  - длина волны лазера,  $n$  - порядок полос.

В этом уравнении регистрируемые на голографической интерферограмме векторы перемещений точек объекта связаны с векторами освещения и наблюдения, объясняющими явление подвижности картин полос по поверхности трехмерных диффузно отражающих объектов.

При попытке его использования при измерении деформаций возникают трудности вследствие слабой определенности получаемых уравнений пространственных измерений. Многими авторами исследований не всегда правильно понимается различие в перемещениях и деформациях – их производных в пространстве, наблюдаемых при том или ином методе расшифровки картин полос.

В этой работе излагается альтернативный метод, позволяющий регистрировать и расшифровывать деформации и перемещения натуральных объектов при испытании их в промышленных условиях.

Наилучшим способом получения интерферограмм (картин полос) с помощью голограмм является способ регистрации голограмм двойной экспозиции. Этим способом сначала регистрируется голограмма начального либо промежуточного состояния объекта. После этого, сохраняя неподвижной на микронном уровне оптическую схему, включая объект и голограмму, производят нагружение объекта либо другие воздействия на него, затем, останавливая это воздействие, на полочке или этапе нагружения, после малого приращения нагрузки  $\Delta P$ , производят вторую экспозицию на ту же голограмму.

Поэтому она и называется голограммой двойной экспозиции. После фотообработки такой голограммы, при ее просмотре на восстановленном изображении можно изучать произошедшие изменения объекта, его напряженно-деформированное состояние. Причем, что очень важно, можно менять чувствительность при расшифровке необходимых компонент деформаций. Кроме того, такую голограмму двойной экспозиции удобно фильтровать, производя оптическое дифференцирование в оптической схеме фильтрации отдельных плоских компонент. Это происходит сразу по всему полю изображения объекта, однако мешает локализация полос в пространстве и нерегулярность дифракционного гало.

### **Метод спекл-голографии сфокусированного изображения**

В этом методе регистрация спекл-голограмм осуществляется путем фотографирования либо видеозаписи изображения объекта в диффузном рассеянном когерентном излучении (рис. 1) [5].

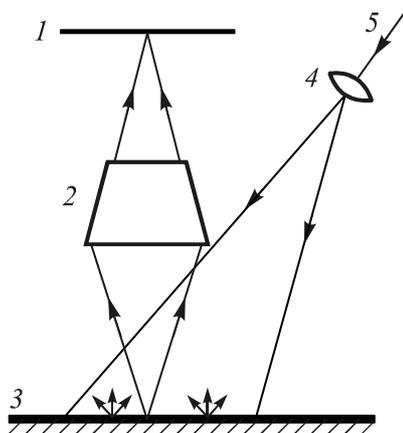


Рис. 1. Оптическая схема регистрации спекл-голограмм сфокусированного изображения:

1 - спекл-голограмма, 2 - фотообъектив, 3 - объект исследования, 4 - расширитель пучка, 5 - луч лазера

Локальный характер регистрации информации голограммами сфокусированных изображений в плоскости фотопластинки существенно снижает требования к монохроматичности излучения при регистрации и позволяет проводить восстановление такого рода голограмм полихроматическим излучением.

Данный метод использует зернистость сфокусированного изображения (спеклы), освещенного когерентным светом диффузно отражающего объекта. Спеклы имеют дифракционную природу и существуют благодаря диффузной составляющей освещаемого когерентным излучением объекта, рассеивающего лучи на шероховатостях точек поверхности, а также в результате ограниченного предела разрешения используемых оптических элементов – линз (объективов).

Предельная разрешающая способность линзы определяется по условию Рэлея формулой:

$$\delta = 1,22 \lambda f/d, \quad (2)$$

где  $\lambda$  - длина волны используемого излучения;  $f$  - фокусное расстояние линзы (объектива);  $d$  - диаметр используемого отверстия линзы (апертура объектива). Этой же формулой определяется средний размер спеклов на изображении.

В этом методе для каждого элементарного изображения точки роль протяженной опорной волны играет совокупность всех остальных изображений точек, которые вследствие таутохронизма линзы, накладываясь друг на друга без смещения, образуют зернистую структуру сфокусированного изображения объекта. Таким образом, элементарное сфокусированное изображение точки промодулировано интенсивностью объектной волны с сохранением фазы огибающей, а не амплитудой опорной, как в обычной голографии. Эксперименты показывают, что диффузное рассеяние света объектом является необходимым условием получения спекл-голограмм, причем наилучшие результаты достигаются тогда, когда в рассеянном излучении отсутствует зеркальная составляющая. В каждой точке сфокусированного изображения сходятся лучи, дифрагированные на диффузной поверхности под разными углами, и вследствие когерентности используемого освещения объекта эти лучи интерферируют, образуя темные или светлые узоры – точки. Это обуславливает наличие множества опорных источников по сравнению с одним в обычной голографии. Поэтому в литературе существуют другие названия: спекл-голограммы интенсивности и спекл-фотографии.

Локализация информации на этих голограммах приводит к тому, что качество восстанавливаемого изображения практически не зависит от длины волны и направления восстанавливаемого пучка световых лучей, что позволяет применять при голографировании протяженные источники света, а при реконструкции изображения к тому же еще и полихроматические. Дифракция восстанавливаемого пучка на совокупности пространственных несущих голограммы приводит к появлению изображения в широком интервале углов, причем при освещении немонахроматическим светом этот интервал за счет дисперсии расширяется в направлении, перпендикулярном к направлению интерференционных полос. Автором было показано [4], что можно без ущерба для качества изображений регистрировать голограммы сфокусированных изображений в диффузно рассеянном многомодовом излучении нескольких лазеров в сферическом пучке без опорного освещения голограммы, поскольку такая регистрация приводит к увеличению количества пространственных несущих.

### **Внестендовая голография**

Использование голографической интерферометрии при исследовании напряженно-деформированного состояния конструкций имеет некоторые специфические особенности. Прежде всего, это связано с использованием испытательной техники, выполненной в виде экспериментального нагрузочного

устройства, стенда или же вида промышленной испытательной машины, на которой закрепляется и подвергается нагружению испытываемая конструкция. Это положение наталкивается на трудности выполнения основного требования голографического процесса – обеспечения стационарности за время экспозиции всех компонент оптической схемы, включая конструкцию. При силовом воздействии на испытываемую конструкцию (чаще это производится электрогидравлическим способом) трудно, а порой невозможно, обеспечить механическую стабильность объекта за время экспозиции, исчисляемое при использовании непрерывных оптических квантовых генераторов секундами и даже минутами. Это осложняется тем, что испытательную машину с конструкцией в большинстве реальных испытаний невозможно разместить на оптической плите, используемой для виброизоляции оптической схемы. Особенно это касается крупногабаритных натуральных конструкций. Поэтому обычно для преодоления этих трудностей используют импульсные оптические квантовые генераторы. Однако они обладают двумя существенными недостатками – ограниченной энергией импульса и недостаточной когерентностью излучения. Кроме того, при интерферометрии существенную роль играют посторонние смещения, мешающие количественной оценке деформаций.

Такие трудности приводили к тому, что с помощью голографической интерферометрии вплоть до последнего времени натурные конструкции не исследовались.

Работы [4, 5, 6, 7] показали, что трудности исследований натуральных объектов преодолимы и при использовании постоянных лазеров. При этом регистрирующие оптические схемы при определенных допущениях, имея малые размеры, компактно монтировались на небольшом основании независимо от оптического квантового генератора, располагаемого на самостоятельном основании. Основание с регистрирующей оптической схемой жестко прикреплялось к конструкции или к испытательной машине. Причем существующие вибрации, наводимые посторонними агрегатами, а также возникающие вследствие электрогидравлического действия машины при уменьшении их в разумных пределах позволяли получать с хорошей дифракционной эффективностью дифференциальные интерферограммы. Эта методика основывается на независимости разности хода лучей в оптической схеме, возникающей в эксперименте, от допустимых колебаний источника излучения поверхности объекта. Такое положение справедливо для многих применяемых в экспериментах оптических схем, в частности, показанных на рис. 1. Изменение направления освещения в них при колебаниях источника излучения практически не приводит к возникновению разности хода лучей, вследствие малости изменения углов между направлениями лучей. Кроме того, колебания в основном происходят в вертикальном направлении, поэтому

расположение оптической схемы перпендикулярно направлению колебаний (т.е. в горизонтальной плоскости) способствует большей независимости схемы от положения источника. Это открывает широкие возможности исследования деформированного состояния натуральных конструкций на промышленной технике, а также решения других важных прочностных задач (например, дефектоскопия и неразрушающие испытания дорогостоящих большеразмерных натуральных конструкций авиационной техники).

### ***Основные свойства и достоинства метода спекл-голографии***

В каждой точке сфокусированного изображения спекл-голограммы записывается информация обо всем объекте. Эта локальность записи информации позволяет уменьшить влияние вибрации исследуемых объектов, что является желаемым при голографировании натуральных конструкций в промышленных условиях. Поскольку объектный и опорный пучки распространяются по одинаковому пути, неоднородности этого пути не оказывают влияния на качество голограмм.

Внешне такая голограмма выглядит как негативное фотографическое изображение предмета, однако наличие сложной пространственной структуры сообщает ей основные свойства голограмм. Восстановление изображения объекта производится в дифракционном ореоле, окружающем нулевой максимум. Эта особенность спекл-голограмм при использовании интерферометрических измерений позволяет менять чувствительность получаемых интерферограмм при восстановлении с одной голограммы и, кроме того, позволяет выделять произвольные компоненты деформации в плоскости изображения объекта.

Полезным свойством этих голограмм является их способность восстанавливать полихроматическое изображение в белом свете, которое является следствием локальной записи информации. Интерференционная полихроматическая картина полос наблюдается лишь в дифракционном ореоле, окружающем нулевой максимум. Среди других достоинств этого метода следует отметить пониженные требования к разрешающей способности регистрируемого материала, а также возможность использования источников излучения с пониженной когерентностью, т.е. использование многомодовых режимов оптических квантовых генераторов, что позволяет использовать большие уровни энергии для освещения больших площадей натуральных конструкций.

### ***Основы расшифровки спекл-голограмм, чувствительность и диапазон***

Для регистрации смещений и деформаций поверхности объектов производится двойное экспонирование спекл-голограмм, одно – до приложения нагрузки или на некотором этапе нагружения объекта, другое – после приложения дополнительной нагрузки.

Чувствительность спекл-голограмм не уступает обычной голографической интерферометрии. Данный метод относительно не чувствителен к смещению поверхности из плоскости, но оказывается особенно полезным для регистрации деформаций и перемещений объектов в их плоскости.

При освещении неразведенным пучком лазера любой точки спекл-голограммы двойной экспозиции объекта на экране наблюдается дифракционная картина интерференционных полос Юнга (рис. 2), имеющих угловое расхождение  $\varphi$ , определяемое формулой:

$$\sin \varphi = \frac{a}{L} = \frac{\lambda}{mU}, \quad (3)$$

где  $U$  - абсолютная величина смещения высвечиваемой точки в плоскости объекта,  $m$  - коэффициент увеличения изображения,  $a$  - шаг полос Юнга,  $L$  - расстояние от голограммы до экрана.

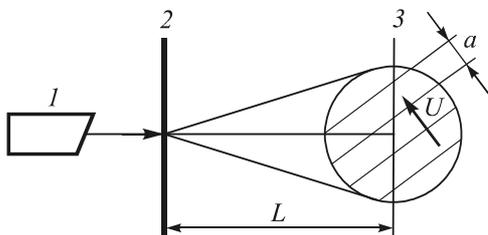


Рис. 2. Расшифровка спекл-голограмм методом полос Юнга: 1 – лазер, 2 – спекл-голограмма, 3 – экран с полосами Юнга

Теоретический диапазон регистрируемых перемещений составляет от  $U_{min} = 1,22 \lambda f/d$ , т.е. определяется средним размером спекла. Верхний предел зависит от качества получаемой дифракционной картины полос и может достигать величины 1/6 размера изображения объекта.

Направление полос будет ортогонально направлению смещения высвечиваемой точки. Таким образом, сканируя неразведенным лучом лазера по поверхности изображения на спекл-голограмме и измеряя угловое расхождение полос  $\varphi$ , можно определить величину и направление перемещения любой точки объекта. По этим полосам можно не только определить главные векторы смещения точек в плоскости изображения, но и вычислить относительную деформацию, взяв за базу интересующие точки. Следует отметить, что устранение постороннего перемещения объекта как общего целого в процессе его нагружения приведет к повышению точности измерения деформаций по приращению перемещений.

Более удобным и более точным методом анализа и определения деформаций является другой метод расшифровки спекл-голограмм – метод пространственной фильтрации спекл-голограмм, оптическая схема которого приведена на рис. 3.

На установку расшифровки спекл-голограмм получено авторское свидетельство [8].

В этом случае голограмма освещается коллимированным пучком, и изображение восстанавливает-

ся с помощью линзы, в фокальной плоскости которой расположена малая круговая диафрагма. Интерферограмма при этом формируется только лучами, дифрагированными в направлении этой диафрагмы, расположенной под углом  $\alpha$  к оптической оси и имеющей направление азимута  $\psi$ . Полученная таким образом интерферограмма отражает плоскую компоненту деформации поверхности, имеющую направление азимута  $\psi$  и цену полосы  $U_\lambda$ :

$$U_\lambda = \lambda / \sin \alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - дифракционный угол фильтрации.

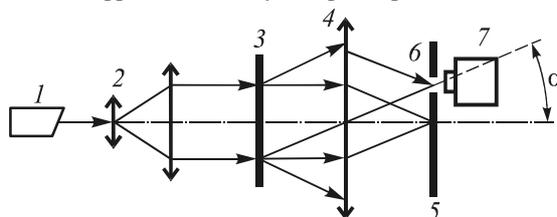


Рис. 3. Оптическая схема расшифровки спекл-голограмм методом оптической фильтрации:

1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – спекл-голограмма, 4 – линза преобразования Фурье, 5 – частотная плоскость, 6 – диафрагма фильтрации пространственной частоты, 7 – видеорегистратор

Изменяя азимут диафрагмы  $\psi$ , можно изменить направление компоненты регистрируемого поля смещения, определяя тем самым главную деформацию в плоскости изображения. Меняя угол расположения диафрагмы  $\alpha$ , можно изменять чувствительность регистрации деформаций поверхности. Наибольшая чувствительность достигается в случае расположения диафрагмы на краю дифракционного ореола (гало). Но интенсивность дифракционного ореола неоднородна и падает в радиальном направлении от центра при наличии больших перемещений, поэтому интенсивность и контраст картины полос падают при удалении от центра. Это связано в большой степени с индикатрисой рассеяния диффузного отражения объекта и микрорельефом поверхности, т.е. с диффузно-отражающими свойствами материала.

#### Оборудование и реализация метода в промышленных условиях испытаний конструкции

Остановимся подробнее на практической реализации метода. Оптическая схема регистрации спекл-голограмм показана на рис. 1. В этой схеме используется гелий-неоновый, работающий на длине волны 0,6328 мкм, лазер. В качестве расширителя пучка могут быть использованы микрообъективы, прилагаемые к микроскопам, или обычные линзы, или микролинзы с фокусным расстоянием, позволяющим расширить пучок до нужных размеров с выбранного расстояния по условиям эксперимента.

При этом можно воспользоваться формулой необходимого фокусного расстояния линзы:

$$f = \frac{d'L}{D}, \quad (5)$$

где  $d$  - диаметр расширяемого пучка лазера,  $L$  - расстояние, на котором расширяется пучок,  $D$  - необходимый диаметр высвечиваемого поля объекта.

Для меньшей потери энергии лазера используются коллиматоры, выпускаемые промышленностью (например, К-VIII-M или прилагаемые к оптическим скамьям ОСК-2,3).

Освещающая оптическая схема, включающая лазер и расширитель, обычно располагается вблизи исследуемого объекта с умеренной защитой от посторонних вибраций. В качестве вспомогательного оборудования для размещения и крепления оптических элементов можно использовать приспособления, прилагаемые к промышленным голографическим установкам типа СИН и УИГ-2М.

Регистрирующая оптическая схема, состоящая из объектива и фотопластинки-голограммы, должна по возможности жестко крепиться к исследуемому объекту или располагаться на вспомогательном оборудовании, исключая посторонние, в том числе и большие упругие смещения объекта как жесткого целого относительно регистрирующей схемы при нагружении и деформировании объекта. В случае невыполнения этого условия можно не получить картину полос или зарегистрировать жесткие смещения и не увидеть деформацию объекта.

Объектив подбирается по условиям получения на изображении интересующего размера поля объекта, а также по условиям получения достаточного качества картины полос при возникающих деформациях. Возможно применение обычных фотоаппаратов, однако размер изображения при этом получается малым, а это влечет за собой трудности при расшифровке и получении интерферограмм с достаточным качеством полос. Из отечественных аппаратов для этой цели использовался фотоаппарат «Фотон» при съемке на фотопластинки размером 90×120 мм. Можно использовать видеокамеры и числовые фотоаппараты с регистрацией стоп-кадров в процессе нагружения конструкции.

В качестве фотопластин-голограмм для гелий-неоновых лазеров использовались выпускаемые отечественные фотопластинки Микрат, ЛОИ-2 или ВР-Л, или современные ПФГ-03М, сенсibilизированные для световой волны 630 нм. Однако при ограниченном времени экспонирования эти пластинки получают недозаэкспонированными, поэтому на практике обычно они обрабатывались в проявителе Д-19 более длительное время, чем рекомендуется. Это, как показали эксперименты, не сопровождается потерей качества и падением дифракционной эффективности.

Фотопластинки Микрат, ЛОИ-2 или ВРЛ являются тонкослойными по сравнению с высокочувствительными материалами и, следовательно, обладают малыми усадочными свойствами, что необходимо для получения хорошего качества голограмм. Для уменьшения усадочных свойств фотоматериа-

лов рекомендуется применение дубящих закрепителей, например, Ф-10.

При испытании натуральных конструкций в промышленных условиях приходится производить затемнение регистрирующей схемы и исследуемого места объекта. Этому также способствует достаточно низкая светочувствительность к белому свету вышеупомянутых фотопластинок. Поэтому на практике вполне достаточно бывает прикрыть исследуемое место и регистрирующую схему от прямых лучей ярких источников и работать при неактивном освещении. При этом освещающий пучок проводится к исследуемому месту объекта с помощью световодов.

#### ***Метод спекл-голографии во встречных пучках***

Для регистрации деформаций объекта особое внимание уделяется выбору оптической системы регистрации. Выбор оптической схемы зависит от конкретных условий регистрации голограмм. Простейшей схемой является регистрация голограмм во встречных пучках, предложенная отечественным ученым Ю. Н. Денисюком. Нами этот метод был модифицирован и приспособлен к регистрации деформаций натуральных конструкций, при этом используется оптическое спекл-поле диффузно рассеивающей поверхности объекта. Теоретические основы этого метода изложены в работе [7]. В этой схеме фотопластинка размещается на поверхности объекта или вблизи ее, а освещение производится расширенным пучком лазера через почти прозрачную фотопластинку. Регистрируя на одну и ту же фотопластинку два состояния объекта без ее смещения на микронном уровне, получают спекл-голограммы во встречных пучках двойной экспозиции, которые расшифровываются описанными выше способами.

#### ***Примеры использования спекл-голографии в экспериментальной механике***

Рассмотрим пример регистрации спекл-голограмм при измерении деформаций на натурной панели авиаконструкции при растяжении ее на большой испытательной машине при промышленных исследованиях конструктивной прочности.

Ниже приведены результаты исследования панели изделия ТУ-144 в зоне подкрепленного отверстия диаметром 175 мм под кондиционер в нижней панели СЧК из сплава АК4-1Т1. Целью работы было определение НДС в зоне люка со стороны гладкой поверхности и исследование влияния отверстий диаметром 6 мм под крепежные элементы и последующей их зенковки на изменение НДС в подкрепляющем кольце и полотне панели.

На рис. 4, 5 приведены результаты испытаний. Показаны интерферограммы компонент деформаций и смещений, полученные на этапе нагрузки. На рис. 4 показаны интерферограммы трех ортогональных компонент деформаций, выделенных путем оптической фильтрации спекл-голограмм двойной

экспозиции во встречных пучках. На рис. 5 приведены примеры интерферограмм пространственных компонент деформаций и перемещений этой панели после сверления отверстий диаметром 6 мм.

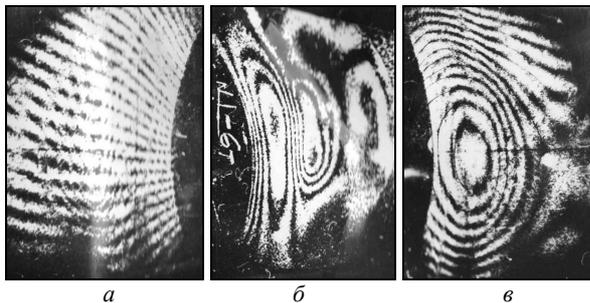


Рис. 4. Интерферограммы компонент смещения при  $\Delta P = 6 \text{ тс}$ :

$U_\lambda^x = 2,7 \text{ мкм}$  (а),  $W_\lambda = 0,3 \text{ мкм}$  (б),  $V_\lambda^y = 1,3 \text{ мкм}$  (в)

На приведенных интерферограммах наблюдается сложное пространственное НДС с наличием концентрации напряжений у отверстий, а также наличием местных изгибов вблизи подкрепляющей окантовки у отверстия под кондиционер.

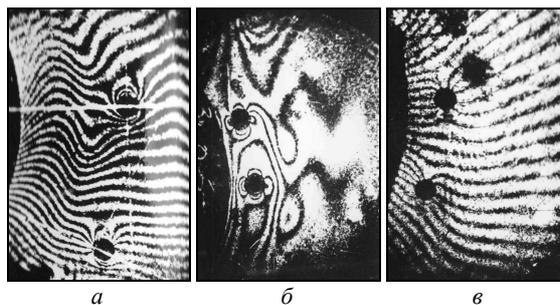


Рис. 5. Интерферограммы с отверстиями 6 мм при  $\Delta P = 6 \text{ тс}$ :

$U_\lambda^x + W_\lambda$  (а),  $W_\lambda = 0,3 \text{ мкм}$  (б),  $U_\lambda^x = 2,3 \text{ мкм}$  (в)

По интерферограммам видно изменение НДС от влияния отверстий, расположенных в зоне подкрепляющей окантовки, а также их зенковки, и на удалении от подкрепляющей окантовки в полотне панели. В результате расчета методом конечного элемента с использованием полученных интерферограмм построены эпюры деформаций по двум сечениям, а также рассчитаны коэффициенты концентрации напряжений. Примеры полученных результатов в виде эпюр деформаций приведены на рис. 6.

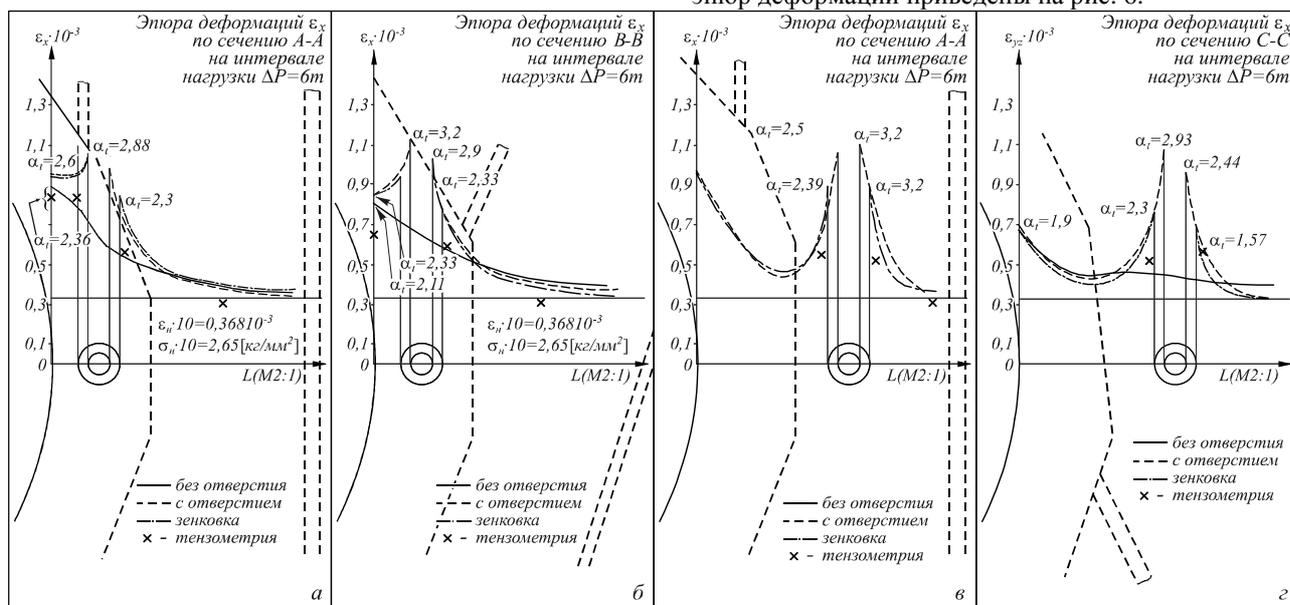


Рис. 6. Результаты измерения деформаций. Эпюры деформаций в зоне отверстий

Для сравнения после голографии была проведена проверочная тензометрия исследованной зоны. Полученные результаты, показанные крестиком на эпюре, сравнивались с результатами испытаний аналогичной панели, проведенных на ММЗ «Опыт». Отмечается удовлетворительное совпадение результатов, однако средний коэффициент концентрации напряжений на краю люка составляет 2,6 по сравнению с полученным 2,1 на ММЗ «Опыт».

**Регистрация деформаций натурной конструкции самолета при статических испытаниях**

Рассмотрим пример использования спекл-голографической интерферометрии во встречных пучках

при исследовании напряженно-деформированного состояния элементов конструкции в системе самолета при статических испытаниях. Эксперименты проводились одновременно с промышленными испытаниями на различных случаях нагружения систем самолета.

Нами получены результаты исследований нижней панели поверхности крыла ЯК-42 в районе нервюры 10А после образования усталостной трещины. На рис. 7 приведены интерферограммы плоской компоненты в зоне трещины до и после засверловки ее с целью остановки.

Было измерено поле деформаций по ортогонально-пространственным компонентам перемещений

$u, v, w$  с чувствительностью от 0,31 до 17,6 мкм на полосу.

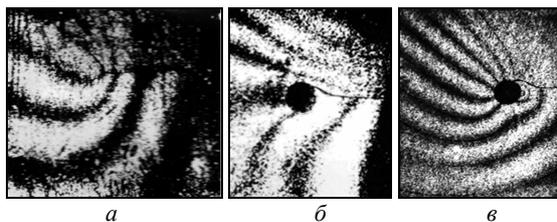


Рис. 7. Интерферограммы плоской деформации крыла в зоне трещины до и после ее засверловки с целью остановки ее роста по компонентам:

$$U_{\lambda}^x (a), V_{\lambda}^y (б), U_{\lambda}^z (в)$$

По полученным интерферограммам оценена концентрация напряжений и вид напряженного состояния в зоне трещины до и после ее засверловки с целью остановки ее роста. Отмечается сложное напряженно-деформированное состояние с наличием значительных сдвиговых деформаций в плоскости и из плоскости в результате изгибных и крутящих моментов, присутствующих в нагруженных конструкциях. Построены диаграммы деформирования по этапам нагружения с целью определения линейности нагружения и работы конструкции в целом. Построен профиль раскрытия трещины. Эти результаты приведены на рис. 8.

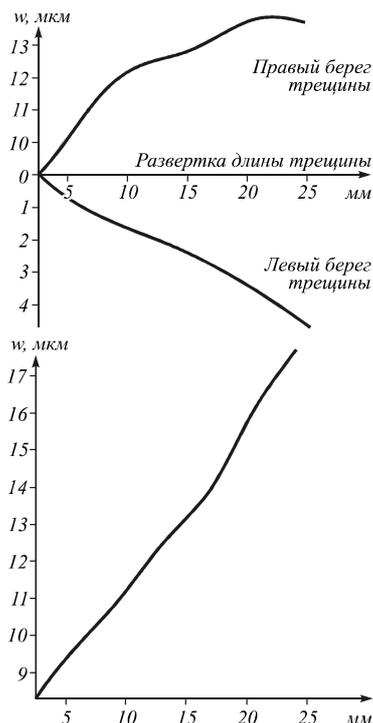


Рис. 8. Профиль раскрытия трещины

Полученные величины напряжений перед трещиной (183 МПа) сравнивались с результатами, полученными методом фотоупругих покрытий (180 МПа), а также по тензометрии (120 МПа) до возникновения трещины. Проведенные испытания позволили показать направления главных максимальных напряжений, а также предсказать направ-

ление продвижения трещины, что подтвердилось последующими испытаниями.

### Заключение

Представленные в работе новые методы внестендовой регистрации и расшифровки спекл-голограмм для измерения отдельных плоских и изгибных нормальных пространственных компонент деформаций и перемещений натуральных конструкций при испытании в промышленных условиях имеют важное значение. Они позволяют исследовать поля сложного пространственного напряженно-деформированного состояния конструкций, что недоступно другим экспериментальным методам анализа.

Голографическая интерферометрия позволяет проводить анализ сравниваемых состояний объекта в процессе всевозможных воздействий на него: нагружения силового, температурного, вибрационного и т.п. Информация о реакции объекта получается из анализа и интерпретации интерференционных картин полос. Обследовать весь объект одновременно удастся не всегда, особенно большеразмерные конструкции. Однако по анализу интерферограмм отдельных мест, наиболее напряженных или требующих определения НДС в отдельных зонах объекта, например, в зонах концентрации напряжений, в зонах образований трещин, отверстий, можно судить о работоспособности, надежности, безопасности, ресурсе всего объекта. Следует заметить, что прежде чем делать заключение об объекте в целом по реакции отдельных его мест, тем более по отдельным этапам нагружения, необходимо произвести расчет конструкции и путем коррекции расчета по экспериментальным данным можно производить экспериментально-расчетный анализ работы конструкции в целом. Расчет конструкции следует проводить методом конечного элемента с использованием экспериментальных данных – полей перемещений в качестве начальных условий и коррекции граничных условий (обратная задача).

Иногда экспериментальные данные можно использовать в качестве законов физико-механического поведения материала, вместо обычно используемого закона Гука. Это более физичный способ учета реальной работы материала и конструкции при реальном воздействии на объект эксплуатационных нагрузок во время испытаний или даже при эксплуатации и регламентных работах осмотра и оценки дальнейшей работоспособности конструкции.

### Литература

1. Горбатенко, Б.Б. Оптические схемы и статистические характеристики сигнала спекл-интерферометров перемещений / Б.Б. Горбатенко, Д.В. Лякин, О.А. Перепелицина, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 3. – С. 268-280.
2. Журавлёв, О.А. Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок / О.А. Журавлёв, С.Ю. Комаров, К.Н. Попов, А.Б. Прокофьев // Компьютерная оптика. – 2001. – Вып. 21. – С. 143-149.

3. Александров, Е.Б., Бонч-Бруевич, А.М. Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голограммной техники // Журнал Технической Физики. – 1967. – Т. 37. – С. 360-369.
4. Волков, И.В. Использование голографических методов для регистрации деформаций конструкции самолета // Труды ЦАГИ. – 1976. – Вып. 1810. – С. 17-27.
5. Волков, И.В. Исследование механики деформаций натуральных образцов с концентраторами методом Spekle голографии – Материалы 6 Всесоюзной Школы по голографии. – Л.: АН СССР, 1974. – С. 369-382.
6. Волков, И.В. Об исследовании механики деформаций образцов в зоне концентрации голографическим методом // Проблемы прочности АН УССР. – 1974. – № 12. – С. 92-95.
7. Волков, И.В. Внестендовая голография. Новые голографические и спекл-интерферометрические методы в экспериментальной механике // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. – 2005. – № 5(20). – С. 201-211.
8. А. с. 934215 СССР. Устройство для интерферометрического измерения деформаций объектов / Волков И.В., Клименко И.С. (СССР). – Опубл. 7.01.1982 г. – Бюл. № 21.
2. Zhuravlev, O.A. Development of the automated method of research of vibrating characteristics of power installations / O.A. Zhuravlev. S.Yu. Komarov. K.N. Popov. A.B. Prokof'ev // Computers Optics. – 2001. – No. 21. – P. 143-149. – (in Russian).
3. Alexandrov, E.B., Bonch-Bruevich, A.M. Investigation of surfers deformation of object by hologram technique // Technical Physics Journal. – 1967. – V. 37. – P. 360-369. – (in Russian).
4. Volkov, I.V. Using of holographic methods for registration of deformation of aircraft constructions // Publications of CAHI (Central Aerohydrodynamic Institute). – 1976. – No 1810. – P. 17-27. – (in Russian).
5. Volkov, I.V. Investigation of mechanics of deformation of full-scale specimens with raisers by method of speckle holography – Proceedings of the 6-th All-union School about holography. – Leningrad: ASc USSR, 1974. – P. 369-382. – (in Russian).
6. Volkov, I.V. Investigation of mechanic deformations of specimen by holographic method in concentration zone // Problems of strength. Academy of Sciences of Ukrainian SSR. – 1974. – No 12. – P. 92-95. – (in Russian).
7. Volkov, I.V. Full-scale holography. New holographic and speckle-interferometry methods in experimental mechanic // Izvestia of Higher Schools. Povolzhsky region. Technical Sciences. – 2005. – № 5(20). – P. 201-211. – (in Russian).
8. Volkov, I.V., Klimenko, I.S. Device for interferometry measure of objects deformation – Inventor's certificate. № 934215. – Published 07.01.1982. – Volume 21. – (in Russian).

### References

1. Gorbatenko, B.B. Optics arrangements and statistic parameters of signal of speckle interferometers of displacements / B.B. Gorbatenko, D.V. Lyakin, O.A. Perepelitsina, V.P. Rjabuho // Computer Optics. – 2009. – V. 33, No. 3. – P. 268-280. – (in Russian).

## USING OF HOLOGRAPHY AND SPECKLE INTERFEROMETRY FOR MEASURING FULL-SCALE CONSTRUCTION

Igor Valentinovich Volkov (*docent, e-mail: [volkoviv39@mail.ru](mailto:volkoviv39@mail.ru)*)  
 Penza Technological State Academy

### Abstract

This paper describes the methodology of using developed by the author new ways of speckle holography in production experiments of full-scale constructions. New methods of registration of speckle hologram of focused image or oncoming beams are described. It also deals with the ways of decoding of speckle holograms for measuring plane and normal space components of deformation and displacement in production experiments of materials and elements of full-scale aircraft constructions. The above methodology can be used in the investigation of wide spectra tasks on working out of strength and durability of aircraft.

*Key words:* speckle-holography, speckle-interferometry, out of stand holography, measuring deformation, full-scale construction.

*В редакцию поступила 23.11.2009 г.*