

УДК 535.412

*Тун Мин Лат, Вэй Хлэйн У, Ньян Мин Хтет, И. В. Волков*

Московский физико-технический институт (государственный университет)

## Расчетно-экспериментальный метод анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) авиаконструкций

Предложена новая методика расчетно-экспериментального анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) авиаконструкций с использованием спекл-голографической интерферометрии при сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС).

**Ключевые слова:** расчетно-экспериментальный метод, спекл-голографическая интерферометрия, концентрация напряжений, неразрушающий контроль авиаконструкций.

*Tun Min Latt, Wai Hlyan Oo, Nyan Min Htet, I. V. Volkov*

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

## Calculation experimental method for analyzing the stress strain state (SSS) of aircraft structures

We propose a new method for calculating the experimental method for analyzing the SSS of aircraft structures using speckle holographic interferometry in complex SSS.

**Key words:** calculation and experimental method, speckle-holographic interferometry, stress concentration, non-destructive testing of aircraft structures.

### 1. Введение

Проблема создания средств неразрушающего контроля и анализа технического состояния авиационно-космической техники является актуальной задачей. В настоящее время существуют различные методики и средства оперативного контроля и анализа технического состояния элементов конструкций. Однако создание новых средств неразрушающего контроля, основанных на применении оптических, особенно спекл-голографических, методов интерферометрии и расшифровки спекл-голограмм, имеет большую перспективу. Предлагается создание мобильной оперативной малогабаритной спекл-голографической установки для оперативного обнаружения повреждений конструкции, интерферометрического анализа состояния ее для решения вопроса дальнейшей эксплуатации. Применение голографических и спекл-интерферометрических методов в экспериментальной механике, в частности при исследовании напряженно-деформированного состояния, особенно в зонах концентрации напряжений в процессе поэлементных, агрегатных или натуральных испытаний авиационных конструкций рассматривались в работах [2–5].

## 2. Применение голографической и спекл-интерферометрии в экспериментальной механике

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 удается 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 образования трещин, можно судить о работоспособности, надежности, безопасности, ресурсе всего объекта. Следует заметить, что прежде чем делать заключение об объекте в целом по реакции отдельных мест его, тем более по отдельным этапам нагружения, необходимо произвести расчет конструкции и путем коррекции расчета по экспериментальным данным можно производить экспериментально-расчетный анализ (ЭРА) работы конструкции в целом. Расчет конструкции чаще всего проводится методом конечного элемента (МКЭ) с использованием экспериментальных данных – полей перемещений в качестве начальных условий и коррекции граничных условий.

На рис. 1 представлена схема проведения ЭРА, в которой используются основные фундаментальные достижения теорий механики деформируемых сред, а также используемые методы экспериментальной механики. Теоретические основы метода изложены в [1].

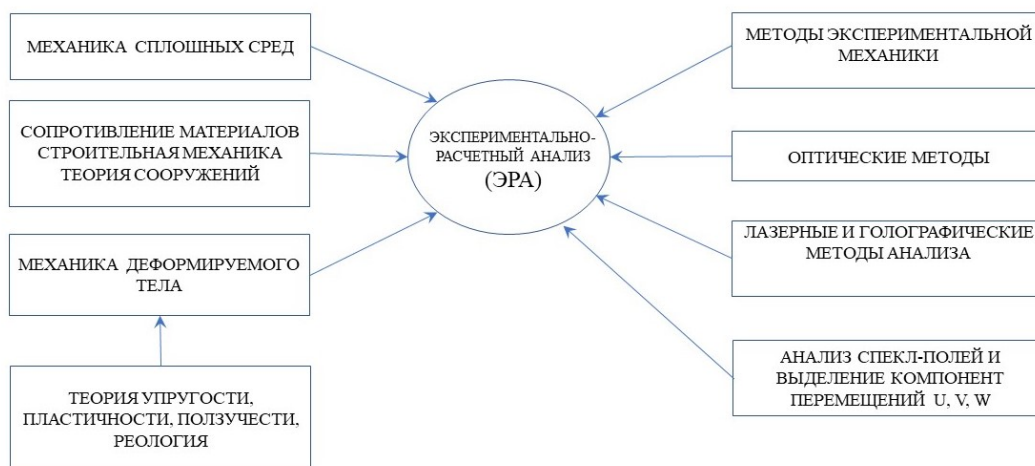


Рис. 1. Расчетно-экспериментальный анализ

Основными трудностями измерения деформации методом голографической интерферометрии помимо вибрации натуральных элементов были жесткие упругие смещения, ухудшающие корреляцию оптических полей, а также сложность выделения отдельных плоских компонент деформаций поверхности при выполнении оптического дифференцирования пространственных полей перемещения. Для решения этих задач были использованы методы «безопорных» и классических голограмм сфокусированных изображений. Расшифровка голограмм двойной экспозиции велась с применением двух взаимно дополняющих методов: оптической фильтрации, позволяющей проводить оптическое дифференцирование в пределах корреляции оптических полей, и метода полос Юнга, позволяющего производить поточечное сканирование изображения для выделения главного вектора перемещения в плоскости.

### 3. Метод спекл-голографии во встречных пучках

Для регистрации деформаций объекта особое внимание уделяется выбору оптической системы регистрации. Этот выбор оптической схемы зависит от конкретных условий регистрации голограммы. Простейшей схемой является регистрация голограмм во встречных пучках, предложенная отечественным ученым Ю.Н. Денисюком. В этой схеме фотопластинка размещается на объекте или вблизи его поверхности, 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, одно на промежуточной нагрузке  $P_1$ , другое после небольшого 5–10% приращения  $\Delta P$  на нагрузке  $P_2$ , получается голограмма двойной экспозиции. При восстановлении изображения происходит сравнение двух состояний объекта, в результате на поверхности объекта или вблизи ее наблюдаются полосы – интерферограмма. Картина полос может быть расшифрована по уравнению Александра–Бонч-Бруевича:

$$\bar{u}(\bar{\rho}_0 + \bar{\rho}_n) = \lambda_n,$$

где  $\bar{u}$  – вектор перемещения точек объекта,

$\bar{\rho}_0, \bar{\rho}_n$  – соответственно вектор освещения и вектор наблюдения объекта,

$\lambda_n$  – длина волны используемого лазера,  $n$  – порядок полос.

Таким образом, освещая и наблюдая деформации объекта вблизи нормали к поверхности, мы с чувствительностью  $\lambda/2$  наблюдаем изгибающую компоненту деформации поверхности. Для лазера с длиной волны  $\lambda = 0,6328$  мкм (He–Ne лазер) чувствительность составляет  $\sim 0,3$  мкм на полосу. Этот метод расшифровки голограмм имеет ряд недостатков и трудностей его применения, к которым относятся:

1. Большая трудоемкость и сложность расшифровки голограмм:
  - а) сложность определения абсолютного порядка полос,
  - б) сложность идентификации точек на разных голограммах,
  - в) ограниченность вариации угла наблюдения.
2. Низкая точность получаемых величин плоских компонент деформации:
  - а) слабоопределенная система разрешающих уравнений ( $D \rightarrow 0$ ),
  - б) сложность аппроксимации полей перемещений,
  - в) сложность измерения малых изменений больших упругих перемещений объекта.
3. Наличие жестких упругих перемещений объекта в пространстве резко сокращает информативность об исследуемых деформациях.

Для преодоления этих трудностей был разработан способ регистрации спекл-голограмм во встречных пучках, который модифицирует известный способ, предложенный Ю.Н. Денисюком. Основные достоинства спекл-голограмм:

1. Путем оптического дифференцирования при фильтрации выделяются отдельные плоские компоненты перемещений и деформаций при сложном их пространственном сочетании.
2. Повышается точность вычисления деформации:
  - а) деформация определяется на минимальной базе (полуполосе) без аппроксимации и сглаживания градиентов деформации,
  - б) не требуется отсчета порядка полос и поиска «нулевой полосы»,

в) предварительное редактирование интерферограмм сглаживает нерегулярную спекл-структуру полос (шумы), мешающую процессу автоматизации считывания и обработки картин полос.

3. Понижаются требования к когерентности источника.
4. Понижаются требования к виброизоляции оптических схем.
5. Имеется возможность подбора чувствительности интерферограмм при расшифровке.

Таким образом, с одной спекл-голограммы двойной экспозиции имеется возможность получения 3-мерной информации отдельно по ортогональным пространственным компонентам полей перемещений с помощью оптического дифференцирования [3] и определения деформаций. Имея экспериментальные данные о перемещениях и деформациях поверхности испытуемой конструкции в отдельных местах, можно с помощью расчетно-экспериментального анализа (ЭРА) определить напряженно-деформированное состояние (НДС) работы конструкции в целом.



Рис. 2. Этапы решения задач прочности и долговечности на основе голографии

Далее для этих целей при исследовании НДС отдельных мест натуральных авиаконструкций был использован метод регистрации спекл-голограмм во встречных пучках. Основные достоинства способа [4] заключаются в следующем:

- 1) получение трехмерной информации с одной голограммы во встречных пучках по компонентам о перемещениях, деформациях и НДС испытываемых конструкций;
- 2) при испытании в реальных промышленных условиях можно исследовать работу элементов авиаконструкций, в том числе в системе самолета;
- 3) способ позволяет решать важные задачи прочности всевозможных конструкций:
  - выявлять, измерять и оценивать влияние зоны концентрации напряжений в реальных конструкциях;

- исследовать зоны трещинообразования;
- задачи дефектоскопии и неразрушающего контроля и многие другие.

На рис. 2 представлена блок-схема решения задач прочности и долговечности на основе экспериментально-расчетного анализа с использованием спекл-голографической интерферометрии.

#### 4. Экспериментальные результаты

Рассмотрим пример исследования НДС отдельных элементов натуральных авиаконструкций. 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. 3 приведены примеры полученных интерферограмм трех ортогональных компонент перемещений, выделенных путем оптической фильтрации спекл-голограмм двойной экспозиции во встречных пучках. На приведенных интерферограммах пространственный компонент деформаций наблюдается сложное пространственное НДС с наличием концентрации напряжений у отверстий, а также наличием местных изгибов вблизи подкрепляющей окантовки у отверстия под кондиционер, расположенного в зоне подкрепляющей окантовки.



Рис. 3. Примеры полученных интерферограмм

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. Построены эпюры деформаций по двум сечениям, а также рассчитаны коэффициенты концентрации напряжений. Для сравнения после голографии была проведена проверочная тензометрия исследованной зоны. Полученные результаты сравнивались с испытаниями аналогичной панели, проведенными на ММЗ «Опыт». Отмечается удовлетворительное совпадение результатов, однако средний коэффициент концентрации напряжений на краю люка составляет 2,6 у нас по сравнению с полученным 2,1 на ММЗ «Опыт».

#### 5. Заключение

Предложенный метод расчетно-экспериментального анализа НДС авиаконструкций обладает простотой и приемлемой для практики информативностью. Он позволяет определять физико-механические характеристики материалов при сложном нагружении и испы-

тании материалов и конструкций [6]. Методика определения физико-механических характеристик материалов может быть использована при расчетно-экспериментальном анализе работы испытываемых конструкций и дальнейшем определении их прочности и ресурса.

## Литература

1. Волков И.В., Вышинский В.В., Кисловский А.О. Теоретические основы метода спекл-голографии в экспериментальной механике // Труды МФТИ. 2017. Т. 9, № 2. С. 13–22.
2. Волков И.В. Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натуральных конструкций // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 1. С. 82–89.
3. Волков И.В. Спекл-голография в экспериментальной механике. Пенза: ПГТА, 2010. 199 с.
4. Волков И.В. Способ определения деформаций поверхностей конструкций. Авторское свидетельство № 1269635, опубл. 8.07.1986.
5. Волков И.В. Использование метода спекл-голографии в экспериментальной механике // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 42–46.
6. Tun Min Latt, Nyan Min Htet, Wai Hlyan Oo, Волков И.В. Определение физико-механических характеристик материалов при исследовании концентрации напряжений в образцах с отверстиями. Труды МФТИ. 2018. Т. 10, № 1. С. 68–74.

## References

1. Volkov I.V., Vyshinsky V.V., Kislovskiy A.O. Theoretical bases of the speckle-holography method in experimental mechanics. Proceedings of MIPT. 2017. V. 9, N 2. P. 13–22.
2. Volkov I.V. Using of holography and speckle interferometry for measuring full scale construction. Computer optics. 2010. V. 34, N 1. P. 82–89.
3. Volkov I.V. Speckle holography in experimental mechanics. PenzGTU. 2010. 199 p.
4. Volkov I.V. The method of determining the deformations of the surfaces structures. Author's certificate number 1269635, publ. 08.07.1986.
5. Volkov I.V. Using the method of speckle holography in experimental mechanics. Izmeritelnaya tekhnika. 2017. N 2. P. 42–46.
6. Tun Min Latt, Nyan Min Htet, Wai Hlyan Oo, Volkov I.V. Determination of physicomachanical characteristics of materials in the study of concentration stresses on samples with holes. Proceedings of MIPT. 2018. V. 10, N 1. P. 68–74.

Поступила в редакцию 26.10.2018