

УДК 621.375

**ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ**

©2012 Р. Н. Сергеев, О. А. Журавлёв, В. Ф. Павлов, С. В. Алембеков

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрен принцип работы и даны результаты применения цифрового спекл-интерферометра для измерений микроперемещений в плоскости объекта, связанных с его поворотом или с деформированием под действием растягивающей силы.

*Спекл-интерферометр, муаровый эффект, напряжённно-деформированное состояние.*

Создание современного летательного аппарата с высокой надёжностью и ресурсом при широком диапазоне рабочих внешних воздействий характеризуется интенсивным расширением исследований его прочности [1]. Эта тенденция определила развитие расчётных и экспериментальных методов и средств в прикладной механике [2].

Широкие возможности численного анализа напряжённно-деформированного состояния (НДС) позволили вывести эксперимент на новый качественный уровень. Так стало возможным ставить более корректно задачу экспериментального исследования, а также интерпретировать его результаты. Важным и перспективным направлением экспериментальной механики деформируемого твёрдого тела является бурно развивающаяся цифровая корреляционная спекл-интерферометрия. Её уникальные возможности состоят в бесконтактном получении высокоточной информации о НДС объектов при статических, температурных, вибрационных и динамических нагрузках, а также в обнаружении внутренних и внешних дефектов [2-5].

В данной работе рассматриваются возможности применения цифрового спекл-интерферометра (ЦИ) для исследования линейных и угловых перемещений в плоскости объекта. Проблема получения информации о трёх проекциях перемещений при помощи ЦИ состоит в том, что для каждого из направлений необходима своя оптическая схема, реагирующая только на

одну составляющую. Обеспечение чувствительности интерферометра к другим направлениям возможно за счёт изменения взаимного расположения предмета и опорного пучка [6]. Так для определения нормальной составляющей используется схема, имеющая «гладкий» опорный волновой фронт. Такая оптическая схема получила распространение при исследованиях вибрационных, вибрационно-пульсационных, статических и температурных деформаций [3,4]. Для исследования составляющих перемещений в плоскости объекта необходима оптическая схема, в которой объект освещается двумя коллимированными пучками (рис. 1) [6]. Углы падения  $\theta$  этих пучков, отсчитанные от нормали к поверхности, должны быть одинаковыми по величине. Опорный пучок в таком интерферометре отсутствует.

Если для первого варианта оптической схемы способ формирования в ней интерферограмм достаточно полно изучен, то для второго варианта оптической схемы механизм получения интерферограмм остается мало освещённым. Как показали исследования, данный метод имеет много общего с методом голографического муара [6,7]. Однако схемы голографических интерферометров предъявляют высокие требования к виброизоляции элементов установки. С применением цифровой спекл-интерферометрии эти требования снижаются в связи с применением цифровых средств регистрации и специальных алгоритмов обработки спекл-изображений [3].

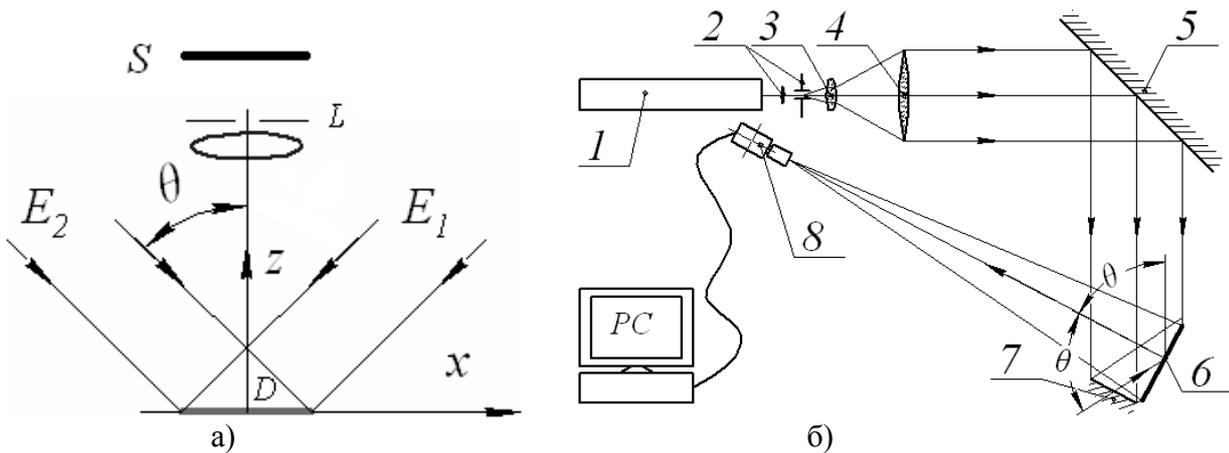


Рис. 1. а) Принципиальная оптическая схема интерферометра:  $E_1, E_2$  – освещающие пучки, падающие на объект под углом  $\theta$ ;  $L$  – объектив с диафрагмой;  $S, D$  – плоскости изображения и объекта; б) Компонентная схема созданного интерферометра: 1 – лазер; 2 – формирователь пучка; 3, 4 – линзы; 5, 7 – зеркала; 6 – плоский образец; 8 – телекамера с объективом

Методика получения муаровых полос в ЦСИ является общей с методикой получения голографического муара. Для этого производится двукратная регистрация изображений анализируемой поверхности до и после деформирования с последующим взаимным наложением изображений. Спекл-интерферограмма изображения деформированной поверхности образуется на матрице телекамеры вследствие сложения двух спекл-структур, соответствующих векторам  $E_1$  и  $E_2$ . Положение, форма и период полос корреляции определяются разностью фаз. Представив вектора через их проекции на оси координат, получим разность фаз:

$$\Delta\Psi = \frac{4\pi}{\lambda} u_x \sin \theta, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны света излучаемого лазером, мкм;  $\theta$  – угол между нормалью к поверхности и вектором освещающего пучка;  $u_x$  – перемещение поверхности в направлении оси  $x$ .

Следовательно, выражения для определения перемещений  $u_x$  будут иметь вид:

- для светлых полос

$$u_x = \frac{\lambda \cdot n}{2 \cdot \sin \theta}, \quad (2)$$

- для тёмных полос

$$u_x = \frac{\lambda \cdot (2n + 1)}{2 \cdot \sin \theta}, \quad (3)$$

где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Можно заметить, что чувствительность интерферометра будет определяться, в первую очередь, углом между векторами  $E_1$  и  $E_2$ . Анализируя зависимости (2) и (3) при  $n = 1$ , можно показать, что чувствительность интерферометра максимально изменяется при варьировании значений угла  $\theta$  в пределах 4-48°. При увеличении угла  $\theta$  от 48 до 89° чувствительность интерферометра изменяется не более, чем на 8%.

Следует отметить, что муаровы полосы соединяют точки объекта, имеющие одинаковые компоненты смещения, нормальные к биссектрисе угла между двумя направлениями освещения и лежащие в плоскости, содержащей векторы  $E_1$  и  $E_2$ .

В качестве исследуемых объектов использовались квадратная пластина с размерами 250x250 мм, закреплённая в поворотном устройстве (рис. 2а), а также образцы полос резины или полимерных материалов шириной 40 мм, длиной 110 мм и толщиной 3 мм, зафиксированные в зажимах нагрузочного устройства (рис. 2б).

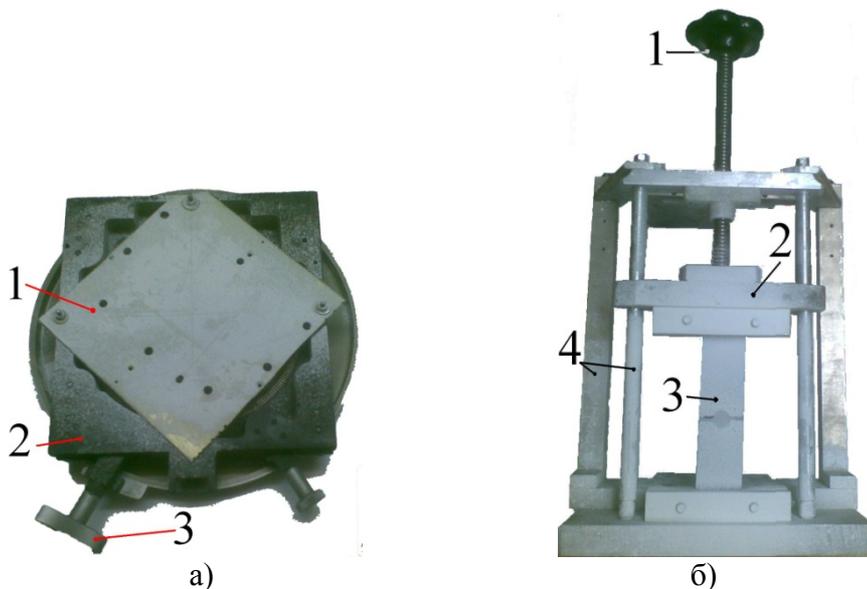


Рис. 2. Характерный вид поворотного (а) и нагрузочного (б) устройств: а) 1 – металлическая пластина – образец; 2 – корпус устройства; 3 – микрометрический винт; б) 1 – нагрузочный винт; 2 – подвижный ползун; 3 – образец; 4 – стойки

Металлическая пластина в устройстве на рис. 2а поворачивалась относительно своего центра при помощи микрометрического винта на угол порядка 1-1,5°, а перемещение подвижного ползуна на рис. 2б составляло величину от 10 до 50 мкм. Скорость поворота пластины и перемещений ползуна выдерживалась постоянной.

В качестве источника излучения в разработанном ЦСИ использовался He-Ne лазер непрерывного действия с уровнем мощности 7 мВт. Для получения изобра-

жения применялась ПЗС-камера со скоростью записи 25 кадров в секунду. Отснятые спекл-изображения объектов записывались в память компьютера, а затем производилось их программное вычитание друг из друга. Интервал между вычитаемыми изображениями зависел от скорости углового поворота или линейного растяжения образца. Полученные картины распределений интерференционных муаровых полос представлены на рис. 3.

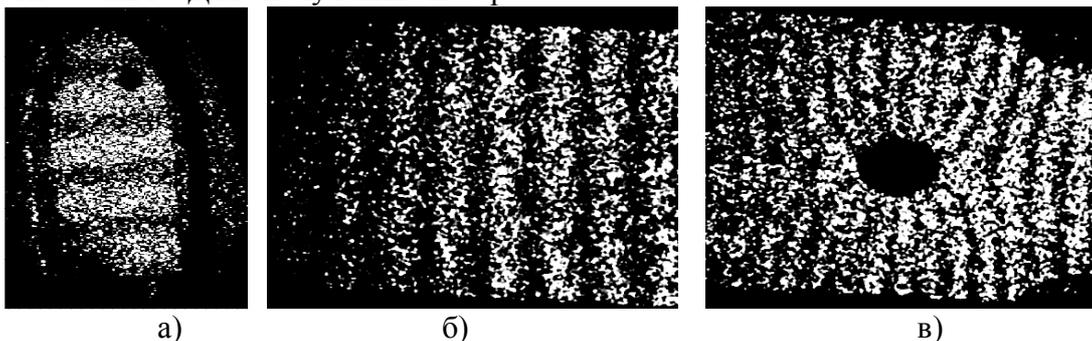


Рис. 3. Характерный вид интерференционных муаровых полос: а) – поворот металлической пластины; б) – растяжение сплошного образца из твёрдой резины; в) – растяжение образца из твёрдой резины с отверстием

В целях определения возникающих напряжений в образце с отверстием была создана конечно-элементная модель в среде MSC.Nastran [8]. Модель создавалась с применением гексаэдральных трёхмерных элементов с характерными размерами 1×1×1 мм, что позволило более точно описать зону отверстия. Физико-механические

характеристики материала соответствовали следующим значениям: модуль продольной упругости  $E = 0,325 \times 10^7$  Па, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,475$ . Результаты расчётов представлены на рис. 4.

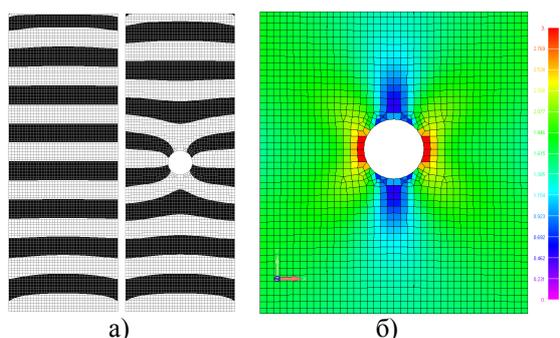


Рис. 4. Основные результаты расчётов: а) – расчётные интерферограммы для сплошного образца и для образца с отверстием; б) – расчётное распределение эквивалентных напряжений в соответствии с теорией Фон Мизеса (область отверстия увеличена)

Значения расчётных эквивалентных напряжений максимально нагруженной области по теории Фон Мизеса соответствует величине 3 МПа.

Столь малое напряжение возникает вследствие незначительного удлинения и большого поперечного сечения образца. Как показано в [6], варьируя геометрическими параметрами образца, можно получить напряжения выше 40 МПа.

К основным результатам работы следует отнести создание цифрового интерферометра, обеспечивающего получение полей муаровых полос для исследования напряжённо-деформированного состояния объектов. При этом метод муаровых полос реализуется без специального изготовления эталонных решёток и без их нанесения на объект. Освоена методика количественной оценки внутренних напряжений, возникающих при растяжении образца.

#### Библиографический список

1. Оболенский, Е. П. Экспериментальные методы исследования прочности конструкций летательных

аппаратов: Учебное пособие. [Текст] / Е. П. Оболенский, Р. А. Михеев. – М.: МАИ, 1982. – 71 с.

2. Разумовский, И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого тела: Учеб. пособие. [Текст] / И. А. Разумовский. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 240 с.

3. Журавлёв, О.А. Автоматизированная виброметрия механических конструкций на основе помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра: Лабораторный практикум. [Текст] / О.А. Журавлёв, А.В. Ивченко, С.Ю. Комаров, Ю.Н. Шапошников, Ю.Д. Щеглов. Под ред. академика РАН В.П. Шорина. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2007. – 124 с.

4. Сергеев, Р.Н. Применение цифрового спекл-интерферометра с непрерывным лазером для исследования неустановившихся температурных деформаций. [Текст]/ Р.Н. Сергеев//Известия СНЦ РАН, т. 13, №4(2), 2011. – С. 628-631.

5. Владимиров, А.П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. [Текст] / А. П. Владимиров. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 241 с.

6. Козачок, А. Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. [Текст]/ А. Г. Козачок. – М.: Машиностроение, 1984. – 176 с.

7. Жилкин, В. А. Исследования упругопластических задач методом голографического муара. [Текст]/ В. А. Жилкин//Проблемы прочности, №12, 1984. – С. 69-73.

8. Рычков, С.П. Моделирование конструкций в среде MSC.visual NASTRAN для Windows. [Текст]/ С.П. Рычков. – М.: NT Press, 2004. – 552 с.

#### SPECKLE INTERFEROMETRY DIGITAL RESEARCH FOR STRESS-STRAIN STATE OF OBJECTS

©2012 R. N. Sergeev, O. A. Zhuravlev, V. F. Pavlov, S. V. Alembekov

Samara State Aerospace University  
named after academician S.P. Korolyov (national research university)

The principle of operation and gives the results of the use of digital speckle interferometer for measuring micro-displacement in the plane of the object associated with its rotation or deformation under the action of tensile force. A variant of the speckle interferometer capable of measuring the deformation movement in two planes.

*Speckle interferometer moire effect of the stress-strain state.*

### **Информация об авторах**

**Сергеев Роман Николаевич**, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: romansr@yandex.ru. Область научных интересов: космонавтика, механика, оптика, лазерные контрольно-измерительные системы.

**Журавлев Олег Анатольевич**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: лазерные контрольно-измерительные системы.

**Павлов Валентин Фёдорович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Алембеков Сергей Валерьевич**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [alemsv@list.ru](mailto:alemsv@list.ru). Область научных интересов: космонавтика, механика, оптика, лазерные контрольно-измерительные системы.

**Sergeev Roman Nikolaevich**, postgraduate, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: romansr@yandex.ru. Area of research: astronautics, mechanics, optics and laser test and measuring system.

**Zhuravlev Oleg Anatolievich**, Doctor of Technical Science, Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: laser test and measuring system.

**Pavlov Valentin Fjodorovich**, doctor of technical science, professor, Head of department «strength of materials», Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

**Alembekov Sergey Valerievich**, student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [alemsv@list.ru](mailto:alemsv@list.ru). Area of research: astronautics, mechanics, optics and laser test and measuring system.