

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

© 2011 Р. Н. Сергеев

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва

Поступила в редакцию 10.03.2011

В работе рассматриваются вопросы применения цифрового спекл-интерферометра (ЦИИ) с непрерывным лазером для исследования динамического процесса деформирования объекта при тепловом воздействии на основе разработанного программного метода покадровой обработки последовательного ряда изменяющихся во времени интерференционных картин.

Ключевые слова: цифровой спекл-интерферометр, непрерывный лазер, программный метод, температурная деформация, неустановившийся режим, дефектоскопия

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение термостабильности космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) является одной из важных задач, решаемых при проектировании и наземных тепловых испытаниях. Расчет термостабильности КА ДЗЗ требует подробного учета всех тепловых воздействий в реальных условиях эксплуатации, режимов работы аппаратуры, характеристик материалов и т.д. Методы расчета могут не обеспечивать полной адекватности условий, соответствующих режиму эксплуатации. Вследствие этого на этапе испытаний проводится имитирование режимов работы КА ДЗЗ с целью проверки работоспособности системы терморегулирования, а так же получения реальных значений деформаций [1].

К одним из наиболее информативных бесконтактных средств измерения деформационных полей перемещений, обусловленных нагревом конструкции, относятся голографические и спекл-интерферометры [2]. Данные интерферометры с непрерывным источником излучения работают, в большинстве случаев, в режимах двойной экспозиции или усреднения во времени. Применение ЦИИ с непрерывным лазером для контроля объектов в процессе их движения или для отслеживания происходящих с объектом формоизменений (например, при температурном нагружении) становится возможным за счет использования в оптико-электронной схеме интерферометра современных высокочастотных средств обработки изображений. Примером такого измеритель-

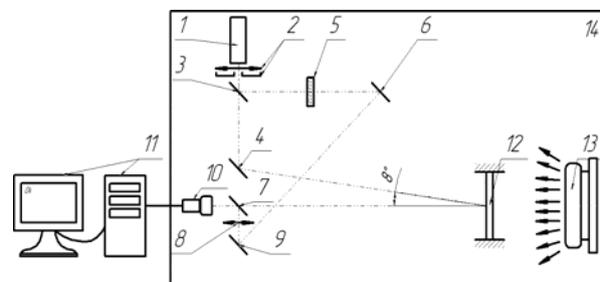
ного средства может являться созданный в [3] спекл-интерферометр, оснащенный разработанной программой для покадровой обработки последовательного ряда изменяющихся во времени интерференционных картин.

В данной работе представлены результаты экспериментальной отработки ЦИИ с программным методом WaveFront для исследования неустановившейся температурной деформации модельных объектов в виде элементов оболочек.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

#### Описание экспериментальной установки

На рис. 1 приведена оптико-электронная схема созданного в Самарском государственном аэрокосмическом университете (СГАУ) интерферометра, получившего применение для виброметрии



**Рис. 1.** Схема цифрового спекл-интерферометра для исследования температурных деформаций: 1 – лазер; 2 – микрообъектив с диафрагмой; 3 – светоделитель; 4, 6, 9 – поворотные зеркала; 5 – свето-фильтр; 7 – плоскопараллельная пластина; 8 – объектив; 10 – телекамера с объективом; 11 – ПЭВМ с блоком ввода изображения; 12 – исследуемый объект; 13 – нагревательное устройство; 14 – оптический стол

Сергеев Роман Николаевич, аспирант кафедры «Автоматические системы энергетических установок», инженер-конструктор 1 категории ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: Roman.SR@yandex.ru.

конструкции [4] и исследования полей деформаций при силовом нагружении [5]. Для проведения исследований температурных деформаций в схему ЦСИ были введены изменения, связанные лишь с заменой нагрузочного устройства.

Отработка методики применения ЦСИ для исследования неустановившихся температурных деформаций проводилась на объекте в виде круглой мембраны толщиной 0,7 мм, выполненной за одно целое с оправкой из стальной заготовки диаметром 180 мм. Кроме тонкостенной мембраны рассматривался также объект в виде металлической пластины толщиной 3,5 мм. Пластина закреплялась по контуру в жесткой металлической рамке. В качестве источника теплового излучения использовались электрические плитки с закрытой и открытой спиралью, а также тепловентилятор в виде фена. Температура поверхностей объекта определялась с помощью переносного радиационного пирометра Center – 350 с лазерной указкой, а также могла контролироваться в каждой точке с помощью цифрового термографа системы ИРТИС – 2000NH.

#### Алгоритм регистрации спекл-интерферограмм объектов в процессе деформирования

Регистрация проводилась в два этапа. Первый этап включал запись видеофайла из 25 кадров процесса температурного деформирования мембраны. На втором этапе производился сравнительный анализ кадров видеофайла с помощью, разработанной в СГАУ программы WaveFront.exe.

Алгоритм программы WaveFront.exe заключается в следующем. Записанный видеофайл раскладывается на отдельные кадры, каждому кадру присваивается порядковый номер. Отдельный кадр содержит спекл-интерферограмму деформированного образца в конкретный момент времени. Временной интервал между кадрами  $\Delta t$  задается перед началом записи видеофайла. Минимальный интервал между кадрами  $\Delta t = 40$  мс.

Создав массив кадров из разложенного видеофайла, программа WaveFront.exe проводит

процесс вычитания кадров. В результате вычитания кадров получается спекл-интерферограмма, отражающая картину прошедших изменений. Таким образом, путем вычитания из первого кадра последующих, получается массив спекл-интерферограмм, отслеживающих неустановившиеся температурные деформации во времени. Для получения последовательного ряда спекл-интерферограмм необходимо чтобы разность между кадрами спекл-структур не превышала предельно допустимых перемещений, находящихся на уровне  $\leq 5\lambda$ . Сокращая временной интервал  $\Delta t$  между кадрами или задавая более короткое общее время  $\Delta T$  регистрации можно рассматривать процесс деформирования в широком диапазоне изменения тепловых нагрузок.

#### Результаты экспериментального и численного моделирования

На рис. 2 приведен пример фрагмента последовательного ряда спекл-интерферограмм, соответствующих процессу нарастания температурной деформации мембраны. Режим записи видеофайла составлял 25 кадров в минуту. На рис. 3а итоговая спекл-интерферограмма представлена для более детальной проработки. Замкнутые интерференционные полосы на рис. 2, 3а, соответствуют линиям равного смещения точек поверхности мембраны. Конфигурация полос выделяет области деформаций 3 и 4. Визуальный контроль показал, что замкнутая область 4 связана с наличием поверхностной неоднородности мембраны в виде её локального прогиба.

В целях качественного анализа получаемых спекл-интерферограмм было проведено численное моделирование с использованием конечно-элементного пакета MSC.NASTRAN деформации мембраны с учетом перепада температуры на поверхностях и заданных условий по заделке. На рис. 3б представлен характерный вид полученной численной модели мембраны. Из рис. 3а, б видно, что численная модель дает более идеализированную картину замкнутых полос. Это еще раз подчеркивает важность этапа экспериментальных исследований.

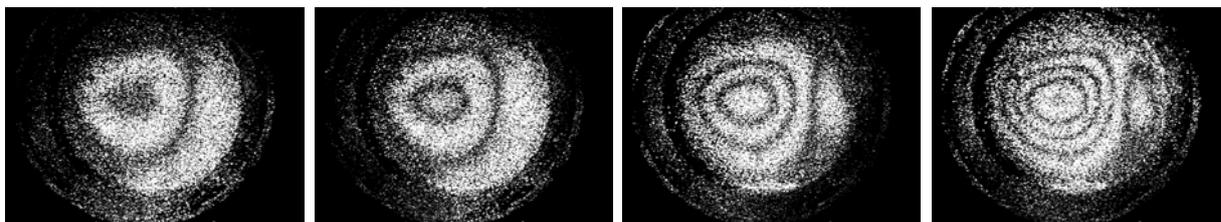
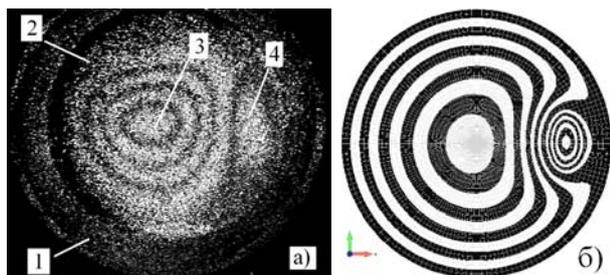


Рис. 2. Фрагмент раскадровки динамического процесса температурного деформирования мембраны



**Рис. 3.** а – спекл-интерферограмма температурно-деформированной поверхности мембраны: 1 – кольцевая обечайка; 2 – мембрана; 3, 4 – области деформаций; б – численная модель нагруженной мембраны

### ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЛАСТИНЫ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПО КОНТУРУ

#### Влияние заделки на распределение температурной деформации пластины

Приведенные на рис. 4 и 5 спекл-интерферограммы показывают процесс температурной деформации пластины при двух вариантах неравномерности её закрепления в прямоугольной рамке. При этом на рис. 4 отражена динамика температурной деформации пластины в условиях её жесткого закрепления в левом нижнем углу рамки.

При приближении к равномерному закреплению по краям пластины область ее максимальной температурной деформации сместилась к верхней перекладине рамки (см. рис. 5).

Выход интерференционных полос на рис. 4,

5 на края рамки говорит о том, что совместно с температурным изгибом пластины происходит смещение закрепляющей её рамки. Для снижения уровня нагрева рамки было проведено её экранирование от прямого излучения нагревателя. На рис. 6 приведен характерный вид интерферограммы при равномерном закреплении пластины по контуру и оптимальных условиях её термонагружения.

#### Применение спекл-интерферограмм температурной деформации для дефектоскопии пластины

Обнаруженный с помощью ЦСИ дефект на поверхности стальной мембраны (см. рис 2, 3а) показал на перспективность применения спекл-интерферограмм температурных деформаций для поиска скрытых дефектов, которые могут быть связаны с изменением сплошности материала или геометрии поверхности. Непосредственное влияние дефекта на характерный вид получаемых интерференционных картин позволяет осуществлять контроль на основе качественного анализа интерферограммы, не прибегая, в большинстве случаев, к ее количественной обработке, что имеет большое значение при использовании метода в промышленных целях.

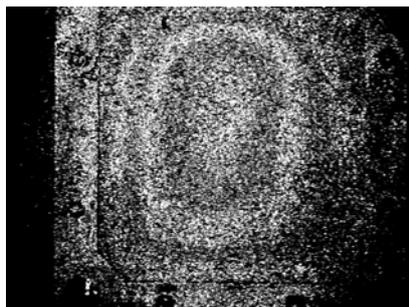
Надежность выявления дефектов на основе качественного анализа интерферограмм определялась с помощью пластины со специально выполненным дефектом в виде лунки с нагартованной структурой металла на одной из сторон пластины. На рис. 7а, б приведен характерный вид



**Рис. 4.** Характерный вид температурной деформации пластины в прямоугольной рамке с неравномерной жесткостью закрепления



**Рис. 5.** Характерный вид температурной деформации пластины в прямоугольной рамке с равномерной жесткостью закрепления по краям



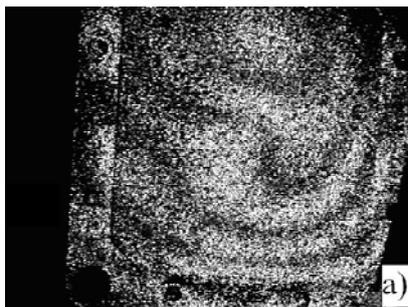
**Рис. 6.** Характерный вид спекл-интерферограммы температурной деформации пластины с равномерным закреплением по контуру в экранированной рамке

спекл-интерферограмм температурной деформации данной пластины при двух вариантах её закрепления по контуру в жесткой рамке.

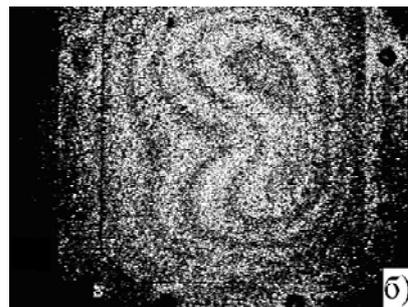
Особенностью полученных картин интерференционных полос является огибание полосами определенной области в средней части пластины. Такой характер изменения конфигурации полос является признаком наличия дефекта в виде глухого отверстия. Следует отметить, что при нагружении данной пластинки силовым методом (с помощью микрометрического винта) данный вид дефекта не проявил себя в изменении интерференционной картины.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны методики применения цифрового спекл-интерферометра с непрерывным лазером и программой WaveFront.exe для изучения неустановившихся температурных деформаций элементов конструкции. Кроме определения величины температурных перемещений в каждой точке анализируемой поверхности, показана возможность применения получаемых спекл-интер-



**Рис. 7.** Характерный вид спекл-интерферограмм температурной деформации поверхности пластины с дефектом в виде лунки на обратной стороне при неравномерном (а) и равномерном (б) закреплении по контуру



ферограмм для контроля жесткости крепления элементов конструкции и выявления скрытых дефектов в толще материалов.

Полученные результаты имеют практический интерес и обосновывают необходимость разработки и создания мобильного интерферометра для проведения контроля объектов в реальных условиях их эксплуатации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н.* Тепловые испытания космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 143 с.
2. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
3. Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций [под ред. В.П. Шорина]. Самара: СГАУ, 2005. 193 с.
4. *Комаров С.Ю.* Разработка помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра для определения резонансных частот и форм колебаний высоконагруженных элементов конструкций, систем и агрегатов энергетических установок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2004. 18 с.
5. *Сергеев Р.Н.* Исследование деформаций пластин с помощью цифрового спекл-интерферометра // Сб. докл. «VI Самарская конкурс-конференция», Самара: Универс групп. 2008. С. 31-37.

## APPLICATION OF DIGITAL SPECKLE INTERFEROMETER WITH CONTINUOUS LASERS RESEARCH UNSTEADY TEMPERATURE DEFORMATION

© 2011 R. N. Sergeev

Samara State Aerospace University

The paper deals with the application of digital speckle interferometer with a continuous laser beam to study the dynamic process of deformation of the object during thermal exposure, based on software developed by the method of processing frame-sequential series of time-varying interference patterns.

Key words: digital speckle interferometry, a continuous laser, a software method, the temperature deformation, transient, inspection

*Roman Sergeev, Design Engineer 1 Category, Graduate Student at the Automatic Systems of Power Plants Department. E-mail: RomanSR@yandex.ru*