

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОЙ ШИРОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ЗЕРКАЛЬНОГО ФОТОАППАРАТА

М.В. Бурков, к.т.н., доцент ММС ИФВТ

Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: burkov@tpu.ru

Введение. Авиастроение является одной из самых высокотехнологичных отраслей промышленности, требующих применения прочных и легких материалов. На сегодняшний день, конструкции серийно выпускающихся самолетов на 80 % (по массе) состоят из металлических сплавов, в то время как всего 20 % приходится на композиты. Модернизация технологий обработки, применения различных упрочняющих покрытий позволяет незначительно снизить массу конструкций новых самолетов, сохраняя исходный уровень прочности. «Качественно новый» переход к более легким конструкциям возможен при значительном расширении области применения композитов. Так, новые самолеты Boeing 787 и Airbus A350XWB уже на 50 % состоят из углепластиков, которые применяются в ответственных высоконагруженных узлах: лонжеронах крыла, обшивке фюзеляжа, оперении.

Однако, в отличие от металлов, композиты обладают сложной гетерогенной структурой, что приводит к появлению значительного количества дефектов, как производственного, так и эксплуатационного характера. Большой проблемой являются, так называемые, слабозаметные ударные повреждения углепластиковых конструкций (Barely visible impact damage – BVID), причиной появления которых является отсутствие у данного материала пластических свойств. Так, например, на дюралевой обшивке удар привел бы к появлению вмятины, благодаря пластическим свойствам, в то время как на углепластике образуется практически незаметное с наружной стороны ударное повреждение, характеризующееся разрывом волокон и расслоением внутри. Такие повреждения, особенно находящиеся в зонах перепада жесткости, развиваясь в процессе эксплуатации, могут стать причиной разрушения конструкции.

На сегодня одним из самых распространенных методов контроля является ультразвуковой, однако из-за необходимости поточечного ручного сканирования и использования контактной жидкости данный метод является непроизводительным, приводя к длительному простоем авиационной техники и финансовым потерям. Значительный интерес представляют оптические методы НК, благодаря полномасштабности и бесконтактности. Сдвиговая спекл-интерферометрия или ширография - это разновидность интерферометрических методов НК, с помощью которой регистрируется производная (что делает метод нечувствительным к перемещению исследуемого объекта как жёсткого целого, в частности, при вибрации) от компонент вектора перемещений на поверхности объекта [1]. Таким образом, измеряя и анализируя поверхностные деформации, можно обнаруживать дефекты в исследуемом материале. Метод обладает следующими преимуществами:

- бесконтактность измерений, что существенно упрощает процесс контроля;
- метод является широкомасштабным и позволяет исследовать большие области, что делает его весьма производительным.

Метод использует спекл-эффект, а принцип работы заключается в следующем: контролируемый объект освещается расходящимся лазерным лучом, а изображение его поверхности регистрируется оптической системой, представляющей собой

интерферометр Майкельсона с видеосенсором. Для получения информации о наличии дефектов необходимо снять два изображения: в свободном состоянии и в слегка нагруженном, в результате обработки которых получается картина полос, представляющая собой визуализацию дефектной области.

Материал и методика исследования. В работе была поставлена задача разработать устройство на основе зеркальной цифровой камеры Canon EOS 550D с объективом EF-S 55-250 мм для диагностики материалов методом цифровой широкографии. В качестве приспособления для создания оптического сдвига использовался интерферометр Майкельсона, размещенный перед камерой. Такая схема, при которой камера работает в паре со стандартным объективом, а сдвиговое устройство располагается перед камерой, позволяет получать изображения высокого качества. Схема является более простой, что на начальном этапе освоения метода широкографии позволяет избежать ошибок, связанных с неправильной компоновкой приспособления, а вопросы компактности интерферометра не имеют решающего значения. Для освещения использован твердотельный лазер с диодной накачкой (DPSS), работающий в видимом спектре излучения с длиной волны 532 нм и плавной регулировки мощности излучения до 500 мВт.

Для получения широкограммы необходимо произвести цифровое вычитание двух спекл-картин исследуемого объекта: в начальном состоянии и в нагруженном. Интерферометр с камерой всегда располагали перпендикулярно поверхности исследуемого объекта, поэтому в зависимости от положения лазера в пространстве устройство будет чувствительно, либо к деформациям в плоскости, либо к внеплоскостным (направленным по нормали к поверхности). Так, если ось лазера расположена перпендикулярно поверхности исследуемого объекта, то на широкограмме будет зафиксирована производная внеплоскостных деформаций $\partial w/\partial x$. Если же расположить ось лазера практически параллельно поверхности исследуемого объекта, то широкограмма будет отражать производную плоскостных деформаций $\partial v/\partial x$.

На рисунке представлена схема лабораторного стенда и фотография приспособления.



Рис. 1. Схема лабораторного стенда (а) и интерферометр с цифровой камерой (б).

Для получения широкограммы необходимо произвести цифровое вычитание двух спекл-картин исследуемого объекта. На широкограмме при этом наблюдается интерференционная полосная картина, определяющаяся уравнением (1) [1]:

$$\Delta_x = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[\sin \Theta_{yz} \frac{\partial v}{\partial x} + \left(1 + \cos \Theta_{yz} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right], \quad (1)$$

где Δ_x относительная разность фаз в направлении оси x ; δx величина сдвига одного изображения относительно другого за счет поворота зеркала; λ длина волны освещения; θ_{yz} угол между осью лазера и осью оптической системы в плоскости yz ; $\partial v/\partial x$ и $\partial w/\partial x$ производные деформаций в направлении осей y и x соответственно по x . Данное уравнение справедливо, если ось оптической системы расположена перпендикулярно поверхности объекта. В соответствии со схемой на Рис. 1,а, интерферометр с камерой всегда располагали перпендикулярно поверхности, таким образом в зависимости от положения лазера (т.е. угла θ_{yz}) в пространстве устройство будет чувствительно, либо к деформациям в плоскости, либо к внеплоскостным (по нормали к поверхности).

Так, если ось лазера расположена перпендикулярно поверхности исследуемого объекта, т.е. угол $\theta_{yz} = 0$, то уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\Delta_x = \frac{4\pi\delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (2)$$

При этом на широграмме будет зафиксирована производная внеплоскостных деформаций $\partial w/\partial x$. Если же расположить ось лазера практически параллельно поверхности исследуемого объекта, то широграмма будет отражать производную плоскостных деформаций $\partial v/\partial x$.

Тестирование лабораторного стенда проводили на образце типа тонкой круглой мембраны, нагружаемой точечной нагрузкой по нормали к поверхности. Нагрузка прикладывается точно в центре с помощью микрометра, по показаниям которого контролируется величина внеплоскостной деформации. Эскиз приспособления для нагружения мембраны изображен на рисунке 2 а.

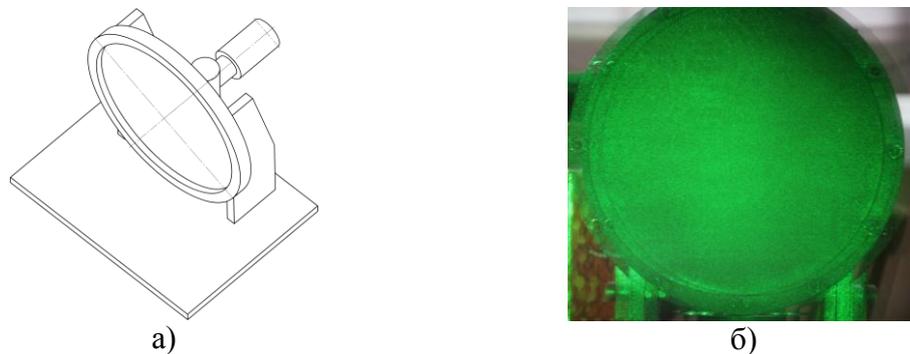


Рис. 2. Приспособление для нагружения мембраны (а) и спекл-картина (б).

В качестве мембран выступали два образца: один из алюминиевого сплава Д16Т, другой из волокнистого композиционного материала. Оба они были покрыты серой краской для создания равномерной шероховатой поверхности, на которой в результате освещения когерентным лазерным светом будет формироваться спекл. Для каждого образца было сделано 20 изображений с постепенно увеличивающейся нагрузкой, прикладываемой в центре, при этом для обоих образцов шаг поворота микрометра был одинаков и равнялся 2,5 мкм.

Также, для двух экспериментов идентичны были параметры мощности лазерного освещения, положение оптической системы, а также параметры фотографирования. Положение лазера также оставалось постоянным в пространстве, при этом угол θ_{yz} был примерно нулевым. Расположить источник света точно по нормали к поверхности исследуемого образца невозможно, в связи с

тем, что это положение занимает оптическая система. Однако, согласно уравнению (1) **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, синус малого угла примерно равен нулю, поэтому плоскостные деформации в итоговой широграмме будут настолько малы, что ими можно пренебречь.

После получения серий спекл-изображений (рис. 2 б), производили цифровое вычитание изображений, получая широграммы. При этом сравнивали первое изображение (недеформированное состояние образца) и последующее (после приращения деформации). Далее, отбрасывая цветовую информацию, конвертировали широграммы в градации серого (от 0 до 255).

Результаты экспериментов и обсуждение. На рисунке 3 представлены 6 широграмм из 19, рассчитанных для эксперимента с нагружением алюминиевой мембраны. Видно, что при смещении микрометра выше 32,5 мкм, в центре образца (точке с максимальным значением внеплоскостной деформации) наблюдается декорреляция спекла и интерференционная картина пропадает. Данное устройство пока позволяет проводить только качественные измерения – обнаружение дефектов. Дальнейшее направление исследований будет связано с разработкой устройства, использующего фазосдвиговой принцип измерения деформаций. Одной из главных технических характеристик разрабатываемого устройства, является видеосенсор высокого разрешения. Производители оборудования для контроля методом цифровой ширографии (Dantec, Steinbichler) обычно используют сенсоры с разрешением не более 3 Мп, что обусловлено, прежде всего, ростом необходимых вычислительных мощностей, снижающим скорость обработки данных и, соответственно, процесса контроля, основным критерием которого является возможность работы в режиме реального времени.

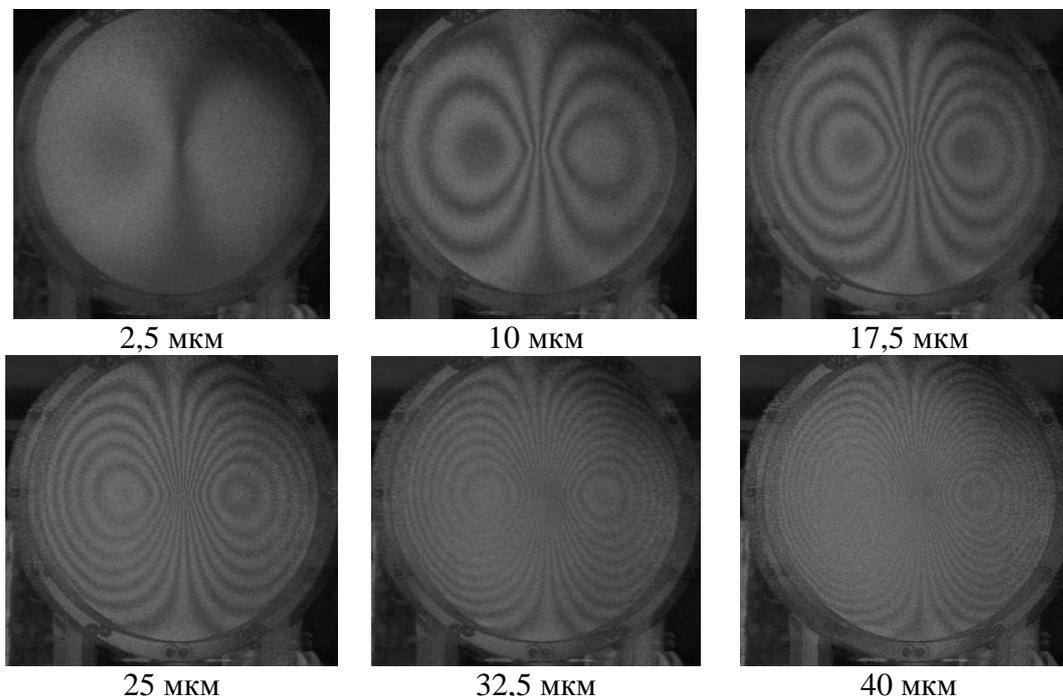


Рис. 3. Широграммы тонкой мембраны нагруженной в центре, в подрисуночной надписи указано значение смещения микрометра.

Использование матрицы высокого разрешения, в нашем случае, обусловлено требованиями высокой точности для решения задач исследования процессов деформации и разрушения композиционных материалов на кафедре «Материаловедение в машиностроении» и в лаборатории МПКМ ИФПМ СО РАН. При этом проблема роста времени обработки первичных данных является решаемой, например, с использованием расчетных графических карт.

Таким образом, разработанное устройство позволит повысить скорость проведения неразрушающего контроля в режиме реального времени (с частотой регистрации видеоизображения), за счет возможности за один проход исследовать большие площади с сохранением одинакового пространственного разрешения. С другой стороны, с использованием специализированных объективов (универсальная конструкция прибора позволяет использовать широкую номенклатуру объективов), устройство позволит решать и исследовательские задачи, требующие высоких значений точности и разрешающей способности.

Другим характерным преимуществом разрабатываемого устройства является возможность гибкой адаптации оптической схемы и программного обеспечения для нужд конкретного заказчика, что невозможно при покупке готового комплекса зарубежных производителей.

Работа выполнена в рамках проектов УМНИК и РФФИ № 14-08-31747 мол_а.

Список литературы:

1. Steinchen, W. Digital Shearography. Theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry. – Washington: SPIE press, 2003 – 312 p.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧЕ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ

Ан И-Кан, д.т.н., профессор,

Д.В. Беляев, ст. преподаватель

Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,

тел.(3822)-606-375

E-mail: dvb@tpu.ru

В настоящее время достаточно широкое распространение в разных отраслях промышленности (нефтегазовой, авиакосмической, подъемно-транспортной и т.п.) получают волновые передачи с промежуточными телами качения (ВПТ). Благодаря широкому диапазону передаточных отношений, конструктивной гибкости и многопарности зацепления введение их в конструкции позволяет создавать механизмы с улучшенными характеристиками. Однако недостаточная изученность создает препятствия к их производству и более широкому распространению.

Конструкции ВПТ достаточно разнообразны, в данной статье, рассмотрена передача, основу которой составляет механизм, представленный на рисунке 1.