

Submitted 13.10.16
Accepted 18.11.16

Применение метода шерографии для дефектоскопии изделий из композиционных материалов

Шерография, представляющая собой сдвиговый спекл-интерферометрический метод НК, находит все большее применение в областях промышленности, связанных с композитным производством. Оперативность бесконтактного метода, высокая чувствительность, наглядность результатов и универсальность использования различных видов воздействия на исследуемые образцы определяют основные преимущества шерографии в сравнении с другими методами НК. Целью данной статьи является знакомство читателей с общими принципами шерографии и областями производства, к которым может быть применен данный метод контроля. Статья дает представление об основных типах оборудования, его ограничениях и возможностях. Применение метода шерографии в значительной степени позволяет как оптимизировать и отладить процесс производства, так и контролировать объекты, находящиеся в эксплуатации; может являться инструментом входного контроля.

Y. A. Bobko¹, I. S. Sinchugov¹

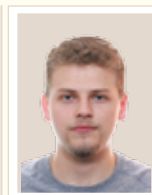
Nondestructive Testing of Composite Structures Specimens by Shearography

New composite materials call for a new approach to the nondestructive testing. The goal of this article is to show the advantages of shearography in comparison with other testing methods. The article describes the main principles of shearography as one of the interferometric methods. Applying various types of loading (thermal, mechanical, vibration, pressure, etc.) makes it possible to visualize various types of defects. High sensitivity and operativeness of the noncontact method, possibility of using many types of loading on the tested samples, non-contact testing of the object in question, and the possibility of testing large areas simultaneously determine the main advantages of the shearography method. The authenticity of the flaw detection grows when use is made of loading that resembles the operating conditions of the objects, which makes it possible to estimate the defect behavior in the specific operating conditions. The article provides the reader with an account of the main types of equipment, its limitations and features. Applications of shearography enable the user both to substantially optimize and check-out the production and monitor the objects in operation. Shearography can also serve as an input testing tool.

Keywords: shearography, composites, nondestructive testing, interferometric method, disbond, delamination

Сотрудники ООО «Нева
Технолоджи», Санкт-Петербург**БОБКО
Юрий Анатольевич**

Инженер, бакалавр,
студент магистратуры
СПбПУ Петра Великого, об-
ласть интересов – оптика,
электротехника, электро-
ника, программирование.

**СИНЧУГОВ
Илья Сергеевич**

Ведущий инженер,
руководитель проектов.



Введение

Постоянное развитие новых материалов в высокотехнологичных отраслях производства накладывает ограничения в использовании существующих стандартных методов контроля. Технологическая сложность производства изделий из таких материалов с большой долей вероятности может приводить к появлению производственных дефектов, наличие которых довольно трудно выявить. В то же время дефекты, возникшие в процессе эксплуатации, могут приводить к значительным разрушениям внутренней структуры без проявления внешних признаков на поверхности. Поэтому для соответствия более высоким стандартам качества

и нормам безопасности применяются новые методы диагностики структурных неоднородностей. Одним из таких методов является шерография, появление которой неразрывно связано с открывшимися возможностями цифровой оптики. Так в настоящее время шерография — один из основных методов НК композитных конструкций ведущих зарубежных корпораций, что подтверждает результативность технологии.

Этот метод НК позволяет inspectировать объекты, внутренняя структура которых может быть как однородной, так и неоднородной. К этим объектам относятся углепластики, углеволокна, стеклопластики (с применением сотовой основы или без неё), компоненты с ме-

таллической или композитной сэндвич-структурой, прочие комбинации этих материалов, платы печатного монтажа, резинотехнические изделия и т. д.

Также одним из преимуществ шерографии в сравнении с другими методами НК является её применимость при использовании различного рода воздействий (тепловое, механическое, вибрационное, давлением и пр.). Данные системы позволяют своевременно обнаруживать такие дефекты, как нарушения сцепления, расслоения, пузыри, или включения инородных частиц (металлических, водяных, воздушных), непрочности, нарушения связей, трещины, «схлопнутые» дефекты, ударные повреждения и другие аномалии.

¹ Neva Technology Ltd., St. Petersburg, Russia; ilya.sinchugov@nevattec.ru

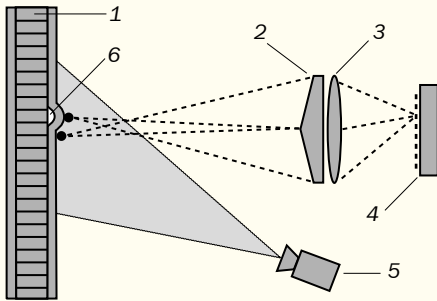


Рис. 1. Принципиальная схема процесса шерографии: 1 — образец (сэндвичная панель с алюминиевым сотовым наполнителем); 2 — бипризма в качестве сдвигающего оптического прибора; 3 — линзы; 4 — CCD-матрица; 5 — лазерные диоды с лучевым расширителем; 6 — отсечение

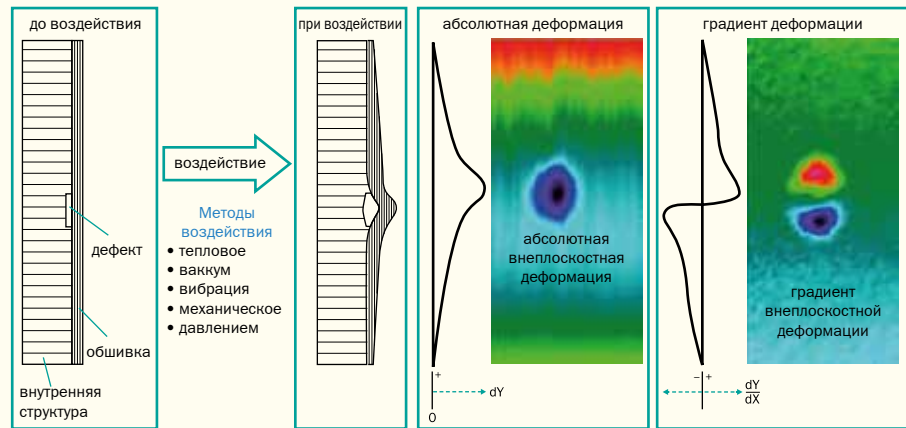


Рис. 2. Процедура шерографического контроля

Описание метода шерографии

Шерография — оптический метод, схожий по своему принципу с голографической интерферометрией и электронной спекл-интерферометрией, с помощью которого внутренние разрушения или дефекты компонентов могут быть выявлены посредством измерения и анализа поверхностных деформаций [1, 2]. Деформации образуются как ответная реакция внутренней структуры на некоторое незначительное внешнее воздействие. Совмещая полученные изображения объекта в ненагруженном состоянии с изображением, взятым в нагруженном состоянии, можно определить изменение любой заданной точки изображения. Исходя из общего принципа интерференции, в рассматриваемого рода системах необходимы два световых когерентных луча. Это может быть достигнуто либо использованием одного лазерного устройства и светоразделительной пластины, либо наличием двух лучей, один из которых является опорным [2]. В отличие от электронной спекл-интерферометрии метод шерографии не требует опорного луча, что позволяет снизить требования к жёсткому закреплению системы и обеспечению вибростабильности [3, 4]. Результат шерографии представляется в виде «шерограмм» — изображений, характеризующих деформации поверхности, а значит, и сам дефект.

В процессе измерений поверхность объекта контроля засвечивается лазерным излучением, при этом свет отражается на светочувствительную матрицу, оснащённую, так называемой, «сдвигающей оптикой». Эта «сдвигающая оптика» проецирует изображение объекта на матрицу камеры дважды, и каждая точка объекта, таким образом, является

дважды отображаемой на CCD-матрицу (рис. 1). При внешнем воздействии объект испытания деформируется, лазерное излучение, отражённое каждым участком поверхности, также изменяется, что объясняется изменением длины оптического пути лучей света, исходящих от источника лазерного излучения вследствие перемещения каждой точки на поверхности. При помощи специального алгоритма программное обеспечение (ПО) автоматически вычитает одно изображение из другого, получая результирующую картину.

Наблюдаемая интерференционная картина, характеризующая поверхностные деформации, анализируется ПО, которое в итоге позволяет получить информацию о дефекте.

На рис. 2 приведена процедура проведения метода шерографии. При наличии внутренних неоднородностей или дефектов в структуре исследуемого композитного образца в результате воздействия на него произойдет перемещение точек поверхности. Шерография позволяет определить области «локальных» перемещений, которые на шерограмме отображаются наличием контрастных областей, напоминающих по форме «бабочку». Направление контрастности, как правило, совпадает с направлением вектора сдвига. Таким образом, данный метод позволяет оперативно определить область внутренних неоднородностей на фоне общего шума. Шерограмма представляет собой изображение градиента перемещений. Поле перемещений на

поверхности объекта представляется в виде разности фаз для каждой точки.

Системы шерографии обладают интерферометрической чувствительностью к поверхностным деформациям, позволяющей обнаружить субмикронные перемещения поверхности объекта, следовательно, даже незначительное воздействие (например, нагрев лампой накаливания в течение 1–2 с или давление воздуха 20–80 мбар) приводит к однозначным результатам измерений при проведении НК объекта [5].

В общем случае установка для проведения процедуры НК методом шерографии включает в себя (рис. 3):

- шерографический сенсорный модуль, в состав которого входят:
 - шерографическая камера;
 - устройства для регулировки и настройки сдвигающей оптики;
 - источники рассеянного лазерного излучения;
- компьютер с программным обеспечением;
- оборудование для создания внешнего возмущающего воздействия;
- устройство для фиксации объекта контроля (опционально).



Рис. 3. Внешний вид шерографического оборудования на примере Dantec Dynamics FlawExplorer

Особенности штативной и мобильной модификаций дефектоскопического оборудования

Серийно шерографическое оборудование выпускается в штативной, мобильной и роботизированной модификациях. Также существует и ряд нестандартных технических решений, например, для контроля лопастей ветрогенераторов.

Штативная шерографическая система производства компании Dantec Dynamics с сенсорным модулем FlawExplorer (рис. 4) является компактным и надёжным средством решения задач НК композиционных изделий в лабораторных и цеховых условиях. Сенсорный модуль снабжен дальномером и позволяет автоматически настраивать коэффициент масштаба и оптический сдвиг.



Рис. 4. Внешний вид штативной шерографической системы Dantec Dynamics FlawExplorer

Лазерное освещение в шерографической системе FlawExplorer осуществляется встроенными подвижными четырьмя либо восемью светодиодами, которые позволяют инспектировать область от 100 см² до 2 м² за один раз. В зависимости от метода воздействия время контроля одной области может составлять менее 30 с. Результаты контроля и обнаруженные дефекты отображаются на экране компьютера в режиме реального времени.

Штативная система, в отличие от мобильной, в большей степени предназначена для статичных лабораторных испытаний. Данная комплектация является более гибкой в применении, позволяет контролировать объекты со сложной геометрией и структурой поверхности, работать с различными видами внешнего воздействия. Так как сенсорный модуль устанавливается на штативе, то при его перемещении на следующее место стоянки необходимо соблюдать одинаковое расстояние до объекта, либо (при изменении расстояния до объекта) настраивать фокусное расстояние линзы, проводить процедуру автоматического расчёта расстояния до объекта «дальномером» для пересчёта масштабного коэффициента и соблюдать позиционирования каждой области сканирования. Одним из решений этой особенности является применение манипулятора, автоматически перемещающего сенсорный модуль на постоянном расстоянии от объекта с заданным интервалом перемещения.

Роботизированная система предназначена для автоматизации процесса инспектирования, снижения человеческого фактора и может применяться при контроле крупногабаритных и серийных объектов. Подобного рода система была успешно внедрена компанией ООО «Нева Технолоджи» в технологическую цепочку производства крупногабаритных сотовых панелей на одном из спутникостроительных предприятий.

Мобильная комплектация системы Q-810 с вакуумным сенсорным модулем устанавливается на постоянном расстоянии от объекта за счёт имеющихся ножек-ограничителей и надёжно закрепляется на поверхности объекта за счёт разряженного воздуха. Видимые границы вакуумной рамки позволяют чётко позиционировать систему для инспектирования последовательных областей сканирования. Наличие сенсорного дисплея и кнопок на рукоятках сенсорного модуля позволяют работать удалённо от компьютера. Таким образом, мобильная система позволяет оперативно контролировать крупногабаритные изделия. Подобные мобильные системы внедрены на объектах авиакосмической промышленности, в двигателестроительных организациях и на других предприятиях РФ.

Как было сказано, шерография позволяет выявлять дефекты с использованием различных типов внешнего воздействия (например, тепловое, механическое, вибрация, вакуум, давле-

ние, магнитное и пр.). Предположим, в образце имеется область со «схлопнувшимся» дефектом, т.е. между слоями присутствует механический контакт, но физические связи в области контакта нарушены. При этом такая область способна воспринимать значительно меньшую нагрузку ввиду слабой адгезии между слоями материала. По причине отсутствия воздушного включения, данный тип дефекта плохо поддается дефектоскопии тепловым или ультразвуковым методами: тепловой метод зачастую не позволяет выявить локальные температурные всплески в области дефекта в виду наличия непосредственного контакта между слоями, а ультразвуковые волны не отражаются от поверхности дефекта. При вакуумном воздействии слои материала растягиваются и дефект «раскрывается». Оптимальный тип воздействия применяется в зависимости от структуры и материала объекта контроля, от размера, положения (глубины залегания) и типа дефектов. Достоверность контроля возрастает при использовании типа нагружения, схожего с эксплуатационными условиями, что позволяет оценить поведение дефекта в характерных условиях эксплуатации.

Шерография позволяет контролировать изделия на этапе отработки технологии (рис. 5), при серийном производстве (рис. 6–8) и в процессе эксплуатации конструкций.

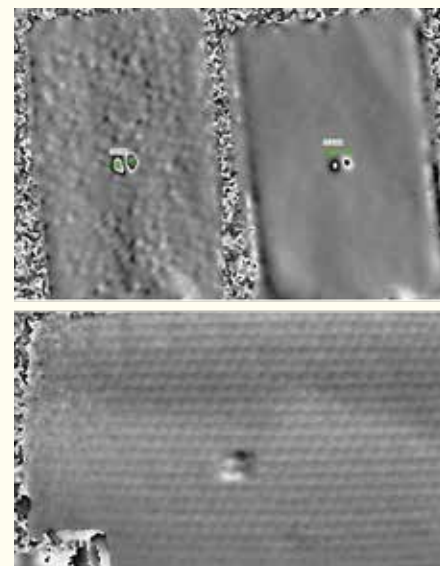


Рис. 5. Изображения результата контроля (шерограммы) сотовых панелей с заложенным внутренним дефектом — фторопластовой плёнкой (имитатор непровязки обшивки к сотовой структуре)



Рис. 6. Инспектирование мотогондолы авиационного двигателя



Рис. 7. Контроль элемента трубы с углепластиковым покрытием

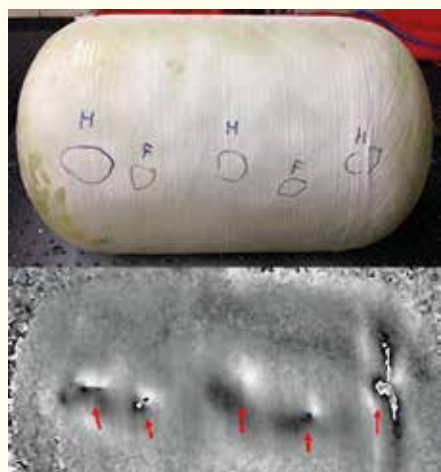


Рис. 8. Контроль сосуда высокого давления, выполненного намоткой

На данный момент времени технология нашла широкое применение в авиа- и космостроении, в автомобильной, нефте- и газоперерабатывающей промышленности, при производстве электроники и др. Так, например, при производстве лопастей ветрогенераторов и их эксплуатационном контроле шерография является наиболее эффективным и применяемым методом.

Особое место метод шерографии занимает в исследованиях композитных конструкций. На рис. 9 представлены внутренние складки и расслоения кессона углепластикового крыла при отработке технологии производства изделий.

Компания «Нева Технолджи» внесла значительный вклад в развитие и популяризацию метода шерографии на территории РФ. Реализованы работы по отработке технологий производства углепластикового кессона крыла, выявление сухих волокон образцов, в результате которых был внесен ряд изменений в используемые материалы, процесс производства и обработки авиационных изделий. «Нева Технолджи» помогала осуществлять входной и выходной контроль качества беспилотных летательных аппаратов, диагностику скрытых дефектов корпусов и конструктивных элементов космического навигационного оборудования. Работы по анализу разрушения композитных конструкций в результате механо- и гидрорезки позволили выявить размеры областей расслоений. В ходе многочисленных исследований были проведены научные изыскания, подготовлены статьи и материалы.

Заключение

Шерография является оперативным бесконтактным методом, обладающим высокой чувствительностью. Используемое шерографическое оборудование отображает результаты инспектирования в режиме реального времени. Область контроля площадью до 2 м² может быть проинспектирована менее чем за 30 с. Возможен как ручной, так и автоматический режим работы.

Но, несмотря на множество преимуществ, успешное применение метода шерографии для НК в производстве во многом зависит от глубины и типа

дефекта, типа используемых материалов, характера внешнего воздействия и лазерной засветки. Также основным ограничением измерения и инспектирования является обязательное наличие поверхности объекта, которая может быть наблюдаема непосредственно шерографической камерой.

Для суждения о критичности дефектов желательно предварительно набрать базу данных характерных дефектов для конкретного типа изделия и оперировать нормативами и стандартами предприятия. В таком случае неоднородность можно более подробно охарактеризовать, если сопоставить получаемые шерограммы с эталонными (из базы данных). Создание базы данных способствует, в том числе, отработке оптимальной методики инспектирования, определению наиболее результативных методов воздействия, их интенсивности и продолжительности.

Литература

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия / Пер. с англ. // Ред. Г. В. Скроцкий. — М.: МИР, 1986. — 328 с.
2. Разумовский И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 240 с.
3. Vieira Fantin A., Dal Pont A. Using shearography to detect damage in gas pipelines. — The International Society for Optical Engineering. SPIE Newsroom. 2006. No. 10.1117/2.1200609.0399. Доступно по ссылке spie.org/documents/newsroom/imported/.../2006090399.pdf
4. Jian Zhang, Rongsheng Geng. Studies on Digital Shearography for Testing of Aircraft Composite Structures and Honeycomb-based Specimen. — In: 17th WCNDT. — Shanghai, China. 2008. Доступно по ссылке www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/593.pdf
5. Wolfgang S., Lianxiang Y. Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry. USA. 2003. — 330 p.

Статья получена 13 октября 2016 г.,
в окончательной редакции — 18 ноября

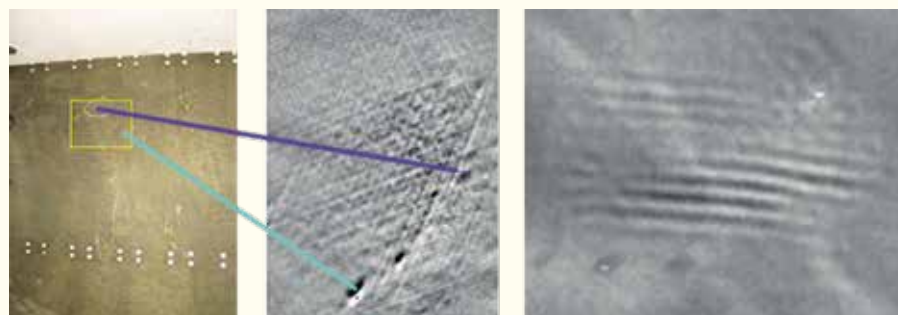


Рис. 9. Складки и расслоения в прототипе кессона углепластикового крыла