

УДК 620.178.6:678.8

И.А. Рузаков¹

**МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПКМ
НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-88-98

Большое количество публикуемых статей, посвященных интегрированию волоконных брэгговских решеток в структуру композиционного материала, демонстрирует исследовательский и практический интерес к данному направлению. Благодаря волоконно-оптической технологии стало возможно следить за внутренним состоянием композиционной детали. Это позволяет отслеживать ресурс отдельных элементов конструкции в режиме реального времени и оперативно выявлять дефекты и неисправности.

В данной работе приведен обзор существующих методов мониторинга напряженно-деформированного состояния элементов конструкций летательных аппаратов, показано преимущество применения волоконно-оптических датчиков в системах встроенного контроля конструкций из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, волоконная брэгговская решетка, расслоение, трещина, встроенный контроль.

I.A. Ruzakov¹

**STRAIN STATE MONITORING OF THE STRUCTURAL STATE
FROM POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIAL
BASED ON FIBER-OPTIC SENSORS (review)**

A large number of published articles devoted to the integration of fiber optic sensors into the structure of composite material demonstrates research and practical interest in this area. Fiber optic technology does possible to monitor the internal state of the plate from polymer matrix composite material. This allows to track the resource of individual structural elements in real-time and quickly identify defects and cracks.

This article provides an overview of modern methods for determining the impact damage of structural elements of aircraft made from polymer matrix composite material using fiber-optic Bragg gratings. The advantages of using fiber-optic sensors in the systems of embedded control of the plate from polymer matrix composites is shown.

Keywords: polymer matrix composite material, fibre bragg grating, delamination, cracks, structural health monitoring.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время разработка технологии мониторинга напряженно-деформированного состояния элементов конструкции летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является важной и актуальной задачей.

Основными преимуществами ПКМ в сравнении с традиционными конструкционными материалами (сталь, алюминиевые и титановые сплавы и т. д.) являются низкая плотность, высокая прочность, коррозионная стойкость и долговечность [1–4]. Следует

отметить следующие недостатки ПКМ: малый температурный диапазон эксплуатации, низкая удельная прочность при разрыве, в процессе длительной эксплуатации могут накапливаться повреждения, обладают большим разбросом значений характеристик [5–8]. При минимизации воздействия приведенных условий ПКМ являются наиболее перспективными конструкционными материалами для элементов конструкции летательных аппаратов.

Повышение безопасности полетов, сокращение эксплуатационных расходов (затраты на плановые и внеплановые осмотры летательных аппаратов с целью оценки состояния конструкции) и прогнозирование остаточного ресурса конструкции летательного аппарата, эксплуатирующегося длительно, позволяют снизить риск причинения вреда людям или нанесения ущерба имуществу до приемлемого уровня (либо поддерживать его на более низком уровне посредством непрерывного процесса выявления источников опасности).

Для подтверждения высокой надежности авиационной техники применяется технический контроль, т. е. проверка соответствия конструкции летательного аппарата установленным техническим требованиям. Большой популярностью пользуются методы неразрушающего контроля – контроль объекта путем определения физико-механических свойств деталей и конструкции из ПКМ без их разрушения [9–11] с помощью ультразвуковых, тепловых, акустических, оптоволоконных и других методов контроля.

Плотность, пористость, содержание армирующих волокон в ПКМ имеют определяющую роль для получения стабильного уровня упруго-прочностных свойств при кратковременном статическом и длительных статических и динамических нагружениях [12]. Отклонения в составе ПКМ, вид деформации (растяжение/сжатие), характер нагруженного состояния (одноосное, плоское, объемное), длительность и цикличность нагружения приводят к значительным изменениям характеристик прочности, упругости и стойкости конструкции из ПКМ.

Сложность состава ПКМ, многообразие форм армирующих наполнителей, различные технологии изготовления препрегов и методов формования обуславливают и многообразие получаемых дефектов [13, 14]. Дефекты неметаллических материалов подразделяют на макро- и микродефекты. К макродефектам относят расслоения, непроклеи, трещины и крупные раковины; к дефектам микроструктуры – зоны повышенной пористости, низкую степень отверждения связующего при формовании, подмятия и др. Расслоения не оказывают влияния на модуль упругости и прочность ПКМ, однако при деформационных нагрузках прочность материала может существенно снижаться в зависимости от глубины залегания и длины дефекта. Трещины являются концентраторами напряжений, нарушают целостность композита, что может привести к расслоению материала.

Основные методы определения дефектов в ПКМ

Внутренние повреждения ПКМ могут быть вызваны разрушением волокна, расщеплением матрицы, дезонируванием (отделение волокон от матрицы) или отслаиванием (отказ соединения между смежными композитными слоями). Одним из типов внутренних дефектов, заслуживающих пристального внимания, является отслоение. Отслоение присутствует, когда клей двух соседних слоев теряет свойства. Это обычно происходит во время воздействия температуры и/или деформации на структуру и вызвано высоким уровнем межслойного напряжения. Недостаток, который возникает из-за отслоений, заключается в невозможности обнаружить повреждение с помощью визуальных осмотров на основе графика состояния.

Ни один из существующих методов неразрушающего контроля не имеет абсолютной точности. Наиболее часто используемые методы основаны на ультразвуковых

исследованиях, радиографии, инфракрасной термографии, методах направленной волны и волоконной оптике.

Ультразвуковой метод неразрушающего контроля предполагает распространение высокочастотного звука в диапазоне от 20 кГц до нескольких МГц в ПКМ. С помощью характеристик передаваемой или отраженной звуковой волны получают характеристики материала и выявляют дефекты. Ультразвуковой метод неразрушающего контроля особенно эффективен при обнаружении и оценке плоских дефектов, таких как расслоения в многослойных композитах. Ослабление ультразвуковых волн в среде может также отражать изменение внутреннего состояния материала (пористость, пустоты, плотность), вызванное процессом длительной эксплуатации.

Метод акустической эмиссии основан на явлении возникновения и распространения упругих колебаний (акустических волн) при деформации напряженного материала. Акустические волны обычно регистрируют с помощью высокочувствительных пьезоэлектрических датчиков. Сравнение скорости акустических волн, генерируемых на разных частотах, позволяет оценить и выявить местоположение расслоений.

Метод импульсного эха широко используется в качестве инструмента неразрушающего контроля. Один и тот же излучатель используется как в качестве источника, так и приемника. Ультразвуковая волна, отраженная от дефекта, регистрируется излучателем. По прошедшему времени между испускаемым импульсом и регистрацией ультразвуковой волны можно определить глубину дефекта. Традиционные методы ультразвукового контроля, такие как С-сканирование (автоматизированная система отображает поле сканирования, где разными цветами отмечены различные диапазоны значений амплитуды принятого сигнала), эффективны, но дорогостоящи и не могут проводиться постоянно.

Системы контроля на основе электрических приклеиваемых тензодатчиков являются совершенными, но требуют подвода электрического питания к точке измерения и при перепадах температуры снижают свою чувствительность. Альтернативным методом является использование оптоволоконных датчиков деформации. В отличие от электрических тензодатчиков, они не требуют подвода проводов, помехозащищены и искробезопасны.

Система встроенного мониторинга на основе оптоволоконных датчиков позволяет реализовывать на одном волокне до нескольких десятков датчиков. В качестве таких датчиков применяют оптическое волокно с периодическим по длине изменением показателя преломления светонесущей сердцевины (решеткой Брэгга) [15]. Период структуры и, соответственно, длина волны отраженного света изменяются при механическом сжатии или растяжении волокна. В результате пересчета смещения центральной длины волны в деформацию установлено, что смещение длины волны в 1,34 нм соответствует деформации 0,11% при нагрузке 1500 кг в зоне максимального изгибающего момента.

Известны примеры систем встроенного мониторинга на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), с помощью которых контролируют напряженно-деформированное состояние материала и его температуру [16–18].

Волоконные брэгговские решетки в структуре ПКМ

Теме внедрения ВБР в композиционные материалы посвящено большое количество статей. Так, в работе [19] исследовано оптическое волокно малого диаметра (~40 мкм), покрытое полиимидной оболочкой (52 мкм), интегрированное в один слой ПКМ толщиной 125 мкм. Отмечено, что такие оптические волокна обладают механическими и оптическими свойствами, аналогичными свойствам обычных оптических волокон (диаметр сердцевины 50 мкм и диаметр оболочки 125 мкм), и не вызывают какого-либо снижения прочности композитов, когда они (оптические волокна) внедряются параллельно усиливающим волокнам в слоистых материалах.

На рис. 1 показано, что интегрированное волокно малого диаметра не увеличивает концентрацию напряжений в слое ПКМ и сохраняет исходную жесткость и толщину ПКМ.

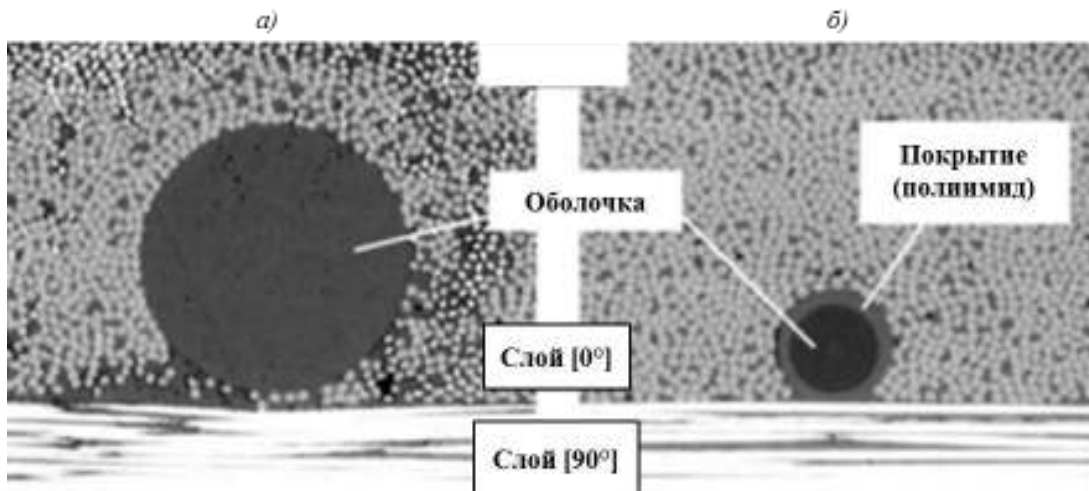


Рис. 1. Традиционное оптическое волокно (а) и волокно малого диаметра (б), интегрированное в структуру углепластика

На рис. 2 показан образец ПКМ со слоями, уложенными по схеме $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]$, с встроенным датчиком на основе волоконной брэгговской решетки толщиной 10 мм. По смещению центральной длины волны ВБР можно определить деформацию в определенной точке определенного слоя ПКМ, а по количеству пиков при нагрузке на растяжение и сжатие – деформацию связанных и расслоенных слоев соответственно [20].

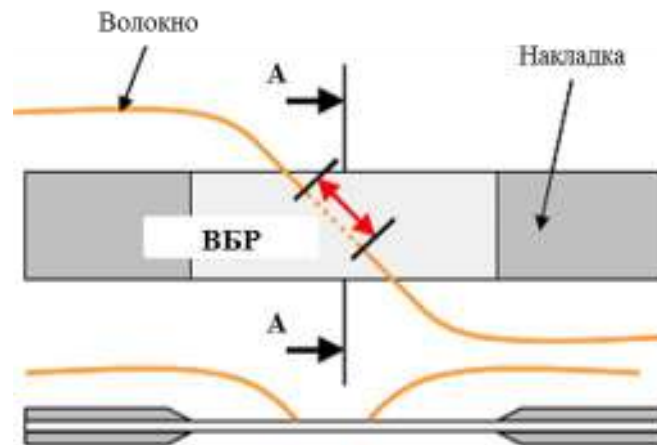


Рис. 2. Образец из ПКМ с встроенным датчиком (ВБР)

Этот метод может быть также применен для обнаружения расслоений вокруг сосредоточенных по напряжению областей (заклепочные отверстия и др.). Поперечные трещины, расслоения и растрескивание матрицы материала идентифицированы в слоистых образцах углепластика с помощью обратного анализа спектра отражения [21, 22].

Следует отметить работу [23], посвященную исследованию решеток с линейно изменяющимся периодом (чирпированные ВБР). Благодаря трапециевидному спектру таких решеток любая неоднородность в структуре материала, например трещина, выделяется на спектре. Для экспериментальной проверки в структуру материала интегрировали

чирпированную брэгговскую решетку длиной 50 мм с шириной спектра отражения 5 нм. В результате возникновения поперечных трещин на спектре ВБР образуются провалы, соответствующие их местоположению (рис. 3).

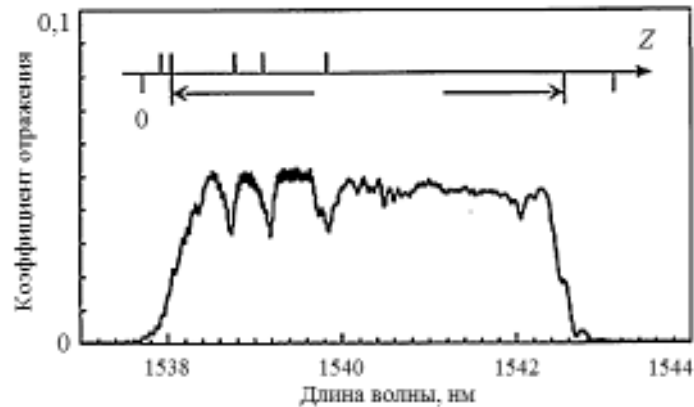


Рис. 3. Спектр чирпированной ВБР при наличии поперечных трещин в композитном образце

В России большой опыт внедрения оптоволоконных датчиков на основе брэгговских решеток в композиционный материал имеет ФГУП «ВИАМ». В своих работах авторы рассматривают возможные проблемы при измерении деформации конструкции из ПКМ, а также вопросы влияния интеграции оптоволокна на свойства ПКМ. На рис. 4 представлена зависимость показаний оптоволоконного датчика и тензодатчика от приложенной нагрузки.

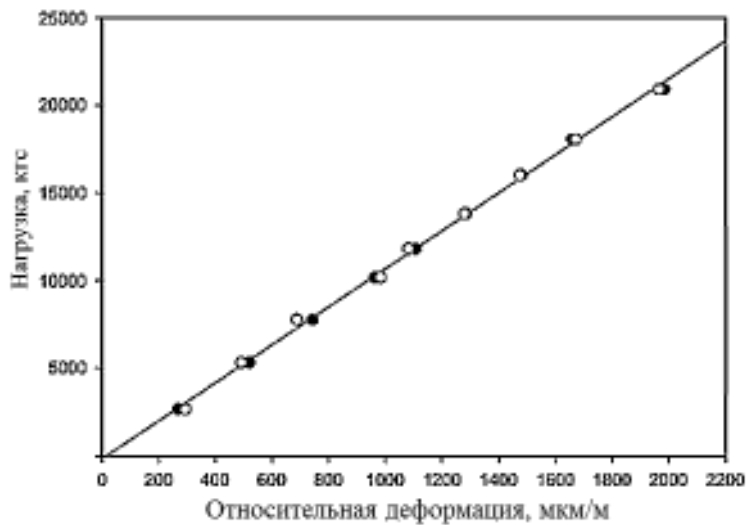


Рис. 4. Сравнение значений деформации ВБР (○) и тензодатчика (●)

В результате испытаний, описанных в работах [24, 25], сделан вывод, что оптоволоконные датчики по точности сопоставимы с точностью измерения деформации с помощью тензодатчиков при комнатных температурах.

Метод акустического неразрушающего контроля на основе ВБР

В системах встроенного контроля на основе метода акустического неразрушающего контроля в зависимости от характеристик распространения ультразвуковых волн могут быть рассмотрены различные типы волн: сейсмические волны материала,

продольные и/или поперечные, волны ползучести, волна Стоунли, волна Лова, рэлеевские волны и волны Лэмба. Основным критерием является геометрическая форма исследуемого элемента. Регистрацию волн Лэмба в структурном контроле можно выделить в отдельное направление с большим количеством публикаций, среди которых следует отметить работы [26–31]. В работах [32, 33] экспериментально подтверждается возможность обнаружения расслоения ПКМ с помощью волн Лэмба. Принцип работы основан на управляемой акустической волне с ее векторами распространения (волнами Лэмба), параллельными поверхности конструкции. Волны Лэмба являются подходящими для применения в системах встроенного контроля элементов конструкции летательных аппаратов из ПКМ, так как они способны распространяться на больших расстояниях с малым затуханием амплитуды.

Волна Лэмба возбуждается и принимается с помощью актюаторов (пьезоэлектрических пластин). Пьезоактюаторы применяются как для мониторинга ближнего поля (метод высокочастотного электромагнитного импеданса, толщинный метод), так и для мониторинга дальней зоны (метод эха, метод определения разницы между эталонным и материалом, метод фазированной решетки). Место появления трещины обычно находят с помощью определения разницы во времени между испускаемой и принимаемой волнами.

В работе [34] исследована стрингерная панель из слоистого композиционного материала и обнаружено, что параметры дефектов (размеры, тип, ориентация, расстояние до актюаторов) влияют на распространение волн Лэмба. В работе [35] проведено численное моделирование и экспериментально исследовано влияние ориентации трещин на сформированный отклик. Основным выводом, сделанный в этих работах, следующий: волны отражения, вызванные трещинами, уменьшают амплитуду исходной волны. Кроме того, волны, генерируемые параллельно росту трещины, имеют большую амплитуду, чем поперечные, а если длина трещины увеличивается, то амплитуда отраженных волн также увеличивается. Однако установлено, что минимальный предел обнаружения трещины составляет 10 мм.

Перспективным направлением неразрушающего контроля является метод акустического неразрушающего контроля на основе ВБР. Известно, что длина волны ВБР прямо пропорциональна деформации решетки. Если поля деформации, приложенные к ВБР, неоднородны, то результатом может являться как смещение резонансной длины волны решетки, так и ее уширение.

В работе [36] исследовалось влияние распространения волны Лэмба на показатель преломления сердцевины ВБР. Обнаружено, что волна Лэмба вызывает смещение резонансной длины волны решетки. В эксперименте генерировали волну Лэмба на частоте 2,25 МГц и исследовали ее влияние на длину волоконно-оптических датчиков длиной 1 и 12 мм. Результаты показывают, что чувствительность регистрации отраженного сигнала зависит от длины ВБР. Соотношение длины волны Лэмба и длины решетки можно выбирать от 1 до 4 в зависимости от необходимой чувствительности выявления расслоения [37].

На рис. 5 показан образец для испытания на усталость с установленной системой встроенного контроля на основе брэгговской решетки и пьезокерамических актюаторов. Во время испытания непрерывно контролировали частоту излучения волны Лэмба и резонансную длину волны ВБР.

В качестве основного метода опроса брэгговских решеток выбран метод опроса с применением маломощного, узкого перестраиваемого лазерного диода и фотодетектора. Сдвиг резонансной длины волны прямо пропорционален мощности отраженного сигнала [38]. На рис. 6 приведена схема высокоскоростной оптической системы опроса.

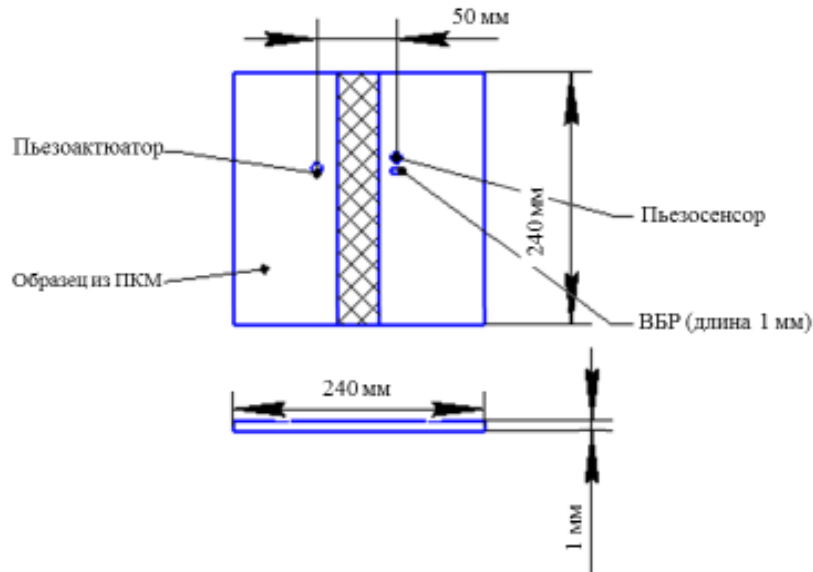


Рис. 7. Схема расположения пьезоактюатора, пьезосенсора и ВБР-датчика на образце из ПКМ

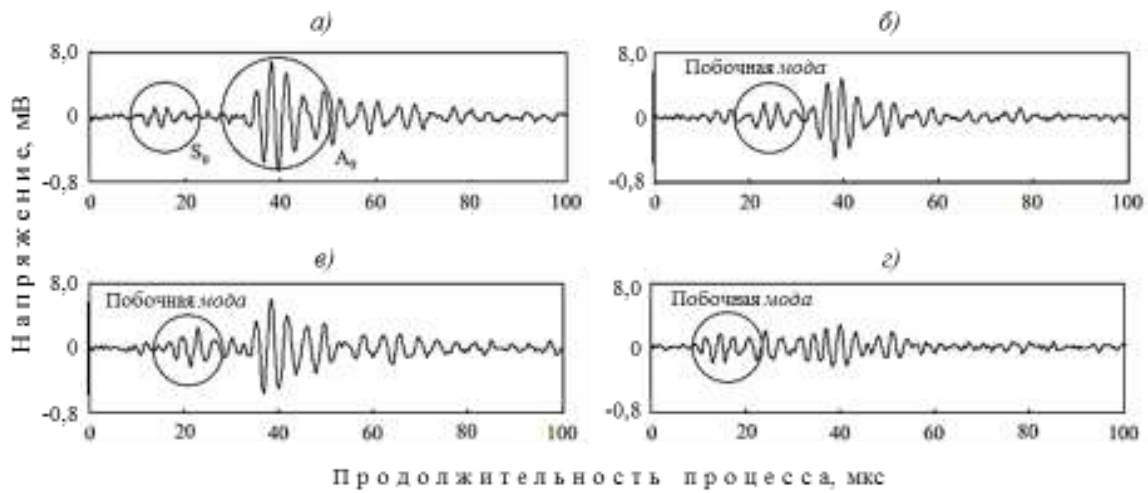


Рис. 8. Изменение принятого сигнала при длине расслоения 0 (а), 10 (б), 20 (в) и 30 мм (г)

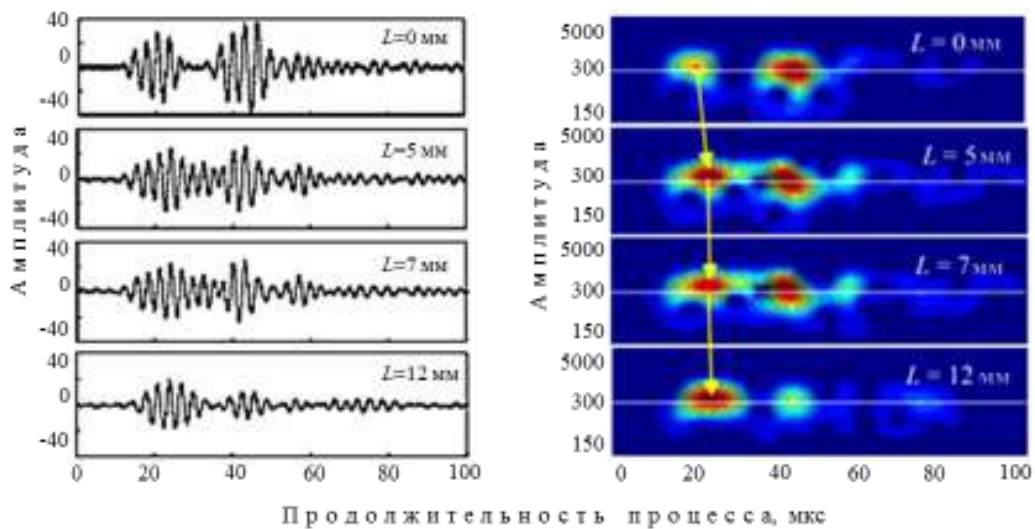


Рис. 9. Изменение частоты детектируемой волны Лэмба по мере разрастания трещины

На рис. 9 показаны результаты эксперимента. Волны Лэмба, прошедшие через область расслоения различной длины, зарегистрированы ВБР-датчиком. При присутствии расслаивания в образце в принятом сигнале выделяют новую акустическую волну. Длина расслаивания может быть оценена на основе отношения амплитуд новой *моды* и *моды* А0 и времени прихода новой *моды*, регистрируемой ВБР-датчиком.

Авторы работы [39] представили прототип встроенной системы структурного мониторинга на основе акустического неразрушающего контроля с помощью фазосмещенного ВБР-датчика. При испытании композиционного материала на трехточечный изгиб, получили, что чувствительная встроенная система мониторинга может обнаруживать низкоамплитудные высокочастотные сигналы волны Лэмба от поперечных трещин. При точном измерении времени регистрации волны Лэмба на каждом датчике, определили положение поперечных трещин с погрешностью <4%. В результате показан высокий потенциал сбалансированной встроенной системы на основе фазосмещенного ВБР-датчика для обнаружения трещин в композиционных материалах.

В данной работе не рассматривался процесс влагопереноса в ПКМ с интегрированными сенсорами. В работе [40] отмечено изменение массы образцов из ПКМ при натурном экспонировании, моделирующем реальный цикл полета, вследствие повышения влагосодержания образцов в течение 12 мес. Процесс перемещения влаги в образцах с интегрированными ВБР и ее влияния на амплитуду волны Лэмба требует дальнейших исследований.

Заключение

Волоконно-оптические датчики в настоящее время являются перспективными для использования в системах встроенного контроля элементов конструкций из ПКМ. Для оценки деформации целесообразно использовать ВБР, интегрированные в слой материала. Для определения ударных нагрузок целесообразно использовать систему встроенного мониторинга на основе приклеиваемых волоконных решеток и пьезокерамических актюаторов, генерирующих продольные акустические волны определенной частоты. Перспективной разработкой также является обнаружение повреждений и расслоений ПКМ с помощью акустических волн Лэмба и ВБР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
2. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7 (43). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.10.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.
3. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
4. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.07.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
5. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
6. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Шелемба И.С. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 26–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34.

7. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66.
8. Старцев В.О., Махоньков А.Ю., Котова Е.А. Механические свойства и влагостойкость ПКМ с повреждениями // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S1 (38). С. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55.
9. Latishenko V.A., Matiss J.G., Sandalov A.V. Diagnostics of load carrying capacity of composite structures // *10th World Conference on Non-Destructive Testing*. Moscow. 1982. Rep. 5–3.
10. Мурашов В.В., Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф. Использование информативных параметров приборов неразрушающего контроля при диагностике физико-механических характеристик углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2002. Вып.: Полимерные композиционные материалы. С. 70–77.
11. Murashov V.V., Romyantsev A.F. Diagnosis of physical and mechanical properties of constructional carbon fiber reinforced plastics (CFRP) // *10th European Conference on Non-Destructive Testing (Moscow, June 7–11, 2010)*. 2010. Disc 1: Reports.
12. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3: Ультразвуковой контроль. 864 с.
13. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. №4. С. 23–31.
14. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. №5. С. 31–42.
15. Brand C., Boller C. Identification of life cycle cost reduction in structures with self-diagnostic devices // *Proceedings of NATO RTO Symposium on Design for Low Cost Operation and Support (Ottawa, October 21–22, 1999)*. Paper 17.
16. Aldridge N., Foote P.D., Read I. Operational load monitoring for aircraft and maritime applications // *Strain*. 2000. Vol. 36. P. 123–126.
17. Measures R.M. *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. 1st ed. London: Academic Press, 2004. P. 1609–1610.
18. Chandler K., Ferguson S., Graver T. et al. On-line structural health and fire monitoring of a composite personal aircraft using an FBG sensing system // *Proceedings SPIE*. 2008. Vol. 6933. P. 125–131.
19. Takeda N., Okabe Y., Kuwahara J. et al. Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: Quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using Lamb wave sensing // *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65. No. 15. P. 2575–2587.
20. Coppola G. Analysis of feasibility on the use of fiber Bragg grating sensors as ultrasound detectors // *Proceedings SPIE*. 2001. 8th Annual Symposium on smart structures and Materials. P. 224–232.
21. Minakuchi S., Umehara T., Takagaki K. et al. Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013. Vol. 48. P. 153–161.
22. Takeda N., Minakuchi S., Umehara T. et al. Life cycle monitoring of curved composite parts using embedded fiber Bragg grating sensors // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 410. P. 18–21.
23. Guo H., Dai Y., Xiao G., Mrad N., Yao J. Interrogation of a long-period grating using a mechanically scannable arrayed waveguide grating and a sampled chirped fiber Bragg grating // *Optical Letter*. 2008. No. 33. P. 1635–1637.
24. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2010. №3. С. 10–15.

25. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
26. Wang S.S. Delamination Crack Growth in Unidirectional Fiber-Reinforced Laminates under Static and Cyclic Loading // *Composite Material: Testing and Design*, ASTM STP. 1979. Vol. 674. P. 642–663.
27. Kessler S. Piezoelectric-based in situ damage detection of composite materials for structural health monitoring systems: PhD Thesis Department of Aeronautics and Astronautics. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2002. P. 100–112.
28. Valdes S. Structural integrity monitoring of CFRP laminates using piezoelectric devices: PhD Thesis Department of Aeronautics. Imperial College London, 2000. P. 44–49.
29. Chang F. Structural Health Monitoring: A Summary Report // *Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring (Stanford, September 8–10, 1999)*. 1999. P. 244–276.
30. Giurgiutiu V., Bao J., Zhao W. Active Sensor Wave Propagation Health Monitoring of Beam and Plate Structures // *Proceedings of the 8th International SPIE Symposium on Smart Structures and Materials (Newport Beach, 2001)*. 2001. Vol. 4327. P. 184–213.
31. Bar-Cohen Y. NDE of Fiber Reinforced Composite Materials // *Materials Evaluation*. 1986. Vol. 44. P. 446–454.
32. Saravanos D.A., Heyliger P.R. Coupled Layerwise Analysis of Composite Beams with Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1995. No. 6. P. 350–362.
33. Saravanos D.A., Birman V., Hopkins D.A. Detection of Delaminations in Composite Beams using Piezoelectric Sensors // *Proceedings of the 35th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference of the AIAA*. 1994. P. 218–223.
34. Monnier T. Lamb waves-based impact damage monitoring of a stiffened aircraft panel using piezoelectric transducers // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2006. P. 411–421.
35. Lee B.C., Manson G., Staszewski W.J. Environmental effects on Lamb wave responses from piezoceramic sensors // *Materials Science Forum*. 2003. P. 195–202.
36. Tsuda H., Lee J.R., Guan Y.S., Takatsubo J.J. Investigation of fatigue crack in stainless steel using a mobile fiber Bragg grating ultrasonic sensor // *Optical Fiber Technology*. 2007. No. 13. P. 209–214.
37. Betz D.C., Thursby G., Culshaw B., Staszewski W.J. Identification of structural damage using multifunctional Bragg grating sensors: I. Theory and implementation // *Smart Material and Structure*. 2006. No. 15. P. 1305–1312.
38. Perez I., Cui H.L., Udd E. Acoustic emission detection using fiber Bragg gratings // *Proceedings SPIE*. 2001. Vol. 4328. P. 209–215.
39. Wu Q., Yu F., Okabe Y., Saito K., Kobayashi S. Acoustic emission detection and position identification of transverse cracks in carbon fiber-reinforced plastic laminates by using a novel optical fiber ultrasonic sensing system // *Structural Health Monitoring*. 2014. No. 14. P. 205–213.
40. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.