ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 73-77

_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ _____ ТЕХНИКА

УДК 534.6.08+620.192.63

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ В КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ¹

© 2020 г. С. Д. Бочкова^{*a*,*}, С. А. Волковский^{*a*}, М. Е. Ефимов^{*a*,**}, И. Г. Дейнека^{*a*}, Д. С. Смирнов^{*a*}, Е. В. Литвинов^{*a*}

^а Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) Россия, 197101, С.-Петербург, Кронверкский просп., 49

*e-mail: sooyfar@gmail.com **e-mail: spbefimovmikhail@gmail.com Поступила в редакцию 03.03.2020 г. После доработки 10.03.2020 г. Принята к публикации 12.03.2020 г.

Описан метод определения положения источника акустического воздействия в композитных материалах с использованием волоконно-оптических интерферометров Фабри—Перо. Предложенный метод основан на анализе времени прихода акустических сигналов на чувствительные элементы при механическом воздействии на композитный материал. Произведено моделирование относительных времен прихода сигналов на чувствительные элементы в зависимости от местоположения источника воздействия и калибровка метода путем нахождения оптимальных пороговых значений для корректной регистрации времени прихода акустического сигнала. Описана экспериментальная установка и указаны условия проведения эксперимента. Разработанный метод локализации был реализован в экспериментальном макете регистратора сигналов акустической эмиссии и исследован в эксперименте. Оценена погрешность предложенного метода. Рассмотрены направления дальнейших исследований и пути модернизации предложенного метода.

DOI: 10.31857/S0032816220040230

ВВЕДЕНИЕ

Современные инженерные конструкции зачастую представляют собой достаточно сложную систему, состоящую из большого количества отдельных элементов. Мониторинг прочностных характеристик каждого элемента конструкции в течение срока эксплуатации является одним из важнейших условий для предотвращения аварийных ситуаций. Для решения таких задач успешно применяют метолы неразрушаюшего контроля ввиду того, что такие методы позволяют проводить анализ надежности, не нарушая целостности системы. Это позволяет своевременно обнаружить и локализовать возникающие повреждения в конструкционных элементах, оценивать их критичность и помогает принимать решение о ремонте или выводе данного элемента из эксплуатации и его замене.

Часто в качестве материала конструкционных элементов используют композитные материалы. Их преимуществами являются высокие прочность, жесткость, износоустойчивость и неподверженность коррозии. Также к важному достоинству можно отнести достаточно малую массу композитных материалов по сравнению с металлами сопоставимой прочности.

Широко применяются акустические методы неразрушающего контроля: ультразвуковой [1] и акустической эмиссии (а.э.) [2]. Для определения местоположения источников а.э. обычно используют метод порогового детектирования момента прихода акустического сигнала на чувствительные элементы для последующего нахождения местоположения источника посредством триангуляции [3]. Такой метод хорошо работает для однородных материалов, где скорость распространения акустической волны примерно однородна. Однако в сложных и неоднородных (композитных) материалах скорость распространения акустических волн может отличаться в зависимости от направления.

¹ Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции "Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020" (http://or-2020.permsc.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).

Актуальность работы обусловлена необходимостью мониторинга прочностных характеристик сложных и неоднородных конструкций в течение срока их эксплуатации для предотвращения аварийных ситуаций.

Основной целью работы являлась разработка метода локализации воздействия на композитный материал с использованием волоконно-оптических датчиков а.э. интерферометрического типа, для достижения которой были проведены калибровка метода и тестирование на большом количестве данных, полученных от повторяемого источника акустических сигналов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Для получения представления о современных достижениях в области триангуляции источников акустических сигналов для задач неразрушающего контроля был рассмотрен ряд работ, посвященных данной тематике, и выделены основные проблемы и недостатки существующих методов.

Наибольший интерес для анализа представляет работа [4]. В ней приведено сравнение трех методов: ТОА, АІС и модифицированная версия АІС. Авторами работы [4] рассмотрен самый распространенный метод локализации источника акустического воздействия – ТОА (Time of arrival, время прихода сигнала). Он основан на детектировании времен прихода акустического сигнала на каждый из датчиков измерительной сетки. Полученные времена могут быть успешно преобразованы в расстояния для дальнейшей локализации источника акустического воздействия, при условии известной скорости распространения звука в материале.

Недостатком такого метода является то, что он подходит только для материалов, в которых скорость распространения одинакова во всех направлениях или незначительно отличается. Это значит, что в композитных материалах метод может иметь значительную погрешность. Усредненная абсолютная погрешность применения данного метода, согласно данным, приведенным авторами в [4], составила порядка 200 мм.

Второй метод, рассмотренный авторами [4], – AIC (Akaike information criteria, информационный критерий Акаике) [5]. Он основан на критерии японского ученого Хиротсугу Акаике. Метод базируется на сравнении зашумленности до и во время прохождения акустического импульса и нахождении функционального минимума их наибольшей разницы для каждой точки сетки. Таким образом, обеспечивается высокая достоверность определения времени прихода акустического сигнала.

Основными недостатками являются трудоемкость метода и необходимость постоянного участия квалифицированного оператора, потому что метод подразумевает определение порогового значения вручную от запуска к запуску. В своей работе авторы [4] предлагают модификацию метода AIC, которая позволяет методу работать автоматически. Это позволило им получить стабильный автоматический метод неразрушающего контроля композитного материала со значением усредненной абсолютной погрешности порядка 3 мм.

Однако предложенный в [4] метод требует большого количества вычислений и налагает определенные ограничения на вычислительную мощность устройства, в котором он будет реализован. К тому же, в качестве чувствительных элементов в экспериментальной установке использовались пьезоэлектрические датчики. Это приводит к определенным ограничениям в эксплуатации всей системы, поскольку такие датчики требуют электрического питания, подвержены электромагнитному воздействию и зачастую обладают большими массогабаритными характеристиками по сравнению с волоконными датчиками.

Еще одной представляющей интерес является работа [6]. Метод основан на оценке погрешности взвешенного медианного абсолютного отклонения (MAD). Метод локализации на основе выброса ошибок определяет местоположение воздействия, сравнивая его сходство с набором предварительно полученных опорных сигналов. В целом, этот метод обеспечивает возможность локализации с использованием не менее трех чувствительных элементов. Чувствительными элементами экспериментальной установки являлись волоконные брэгговские решетки. Полученная усредненная абсолютная погрешность описываемого метода локализации не превышает 29 мм.

Результатом теоретического анализа наиболее перспективных методов появилась идея создания более точного и надежного метода локализации источника для композитных материалов, где в качестве чувствительных элементов использовались волоконные интерферометры Фабри-Перо. Их преимуществами, за исключением традиционных для волоконно-оптических датчиков, являются их малый размер и высокая чувствительность. В качестве исследуемой среды был выбран композитный графит-эпоксидный материал.

Такой выбор обусловлен широким распространением таких материалов в авиа- и космостроении, судостроении и многих других отраслях [7] ввиду высокой прочности и жесткости, сопоставимых, а в некоторых случаях и превосходящих, характеристики металлов при значительно меньшей массе. В нашей работе было принято решение использования оригинального метода опроса волоконно-оптических интерферометров Фабри–Перо [8]. Он заключается в гомодинировании несущей с помощью фазовой модуляции. Таким образом обеспечивается достоверность значений амплитуды выходного сигнала вне зависимости от положения рабочей точки интерферометра.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве среды распространения акустической волны использовалась композитная пластина (см. на рис. 1). Она была поделена на 16 равных секторов от А до Р. В углы композитной пластины были встроены четыре волоконно-оптических интерферометра Фабри-Перо, опрос которых проводился экспериментальным макетом регистратора сигналов а.э., работа которого основана на принципе, описанном в [8]. Это позволило регистрировать акустические сигналы с соотношением сигнал/шум более 30 дБ, что обеспечивало высокую достоверность выходных данных. Во избежание появления в регистрируемом сигнале паразитных низкочастотных составляющих от вибрационных воздействий пластина была плотно закреплена по углам с помощью держателей.

Регистратор сигналов а.э. представляет собой устройство опроса четырех волоконно-оптических интерферометров Фабри-Перо [8, 9] с последующей демодуляцией полученных сигналов для получения информации о разности фаз в интерферометрах в режиме реального времени с частотой дискретизации выходного сигнала 1.25 МГц. Данные, полученные с регистратора, направлялись на программируемую логическую интегральную схему (п.л.и.с.) для дальнейшей демодуляции. П.л.и.с. отвечала за управление и цифровую обработку сигналов. Демодулированные данные, представляющие собой осциллограммы сигналов интерферометров. передавались на персональный компьютер. где происходила дальнейшая обработка и калибровка предлагаемого метода определения местоположения с помощью программного пакета MatLab.

3. ОПИСАНИЕ И КАЛИБРОВКА МЕТОДА

Предложенный метод заключается в сравнении разности времени прихода сигналов с двух боковых датчиков относительно опорного. За опорный датчик принимают тот, который первым зарегистрировал акустическое воздействие. Боковыми считались датчики, сигналы с которых регистрировались вторым и третьим по счету после опорного датчика. Например, если воздействие происходило в секторах A/B/E/F, то опорным датчиком являлся второй датчик и рассматривалось различие между временами прихода сигналов на первый и третий датчик (рис. 1). По результатам сравнения разности относительных задержек сигналов с соседних датчиков проводилось вычисление области воздействия.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки и ее схема.

За начало акустического импульса каждого из датчиков принимался момент пересечения порога, который был индивидуально подобран для каждого из чувствительных элементов в зависимости от очередности прихода на них акустического сигнала и, следовательно, удаленности от источника. Разработанный метод также включает в себя расчет длительности и энергии акустического импульса. Длительность определялась согласно следующему выражению:

$$T = \frac{X_{\rm end} - X_{\rm bedin}}{F_{\rm d}}$$

где $F_{\rm d}$ — частота дискретизации сигнала, $X_{\rm begin}$ — начало регистрируемого акустического сигнала одного из датчиков, а $X_{\rm end}$ — его конец.

Можно получить энергию акустического импульса по формуле

$$W = \int_{0}^{T} |A| dt,$$

где T – длительность акустического импульса, |A| – модуль амплитуды акустического импульса.

Перед испытанием метода в экспериментальном макете регистратора сигналов а.э. была разработана модель метода локализации акустического воздействия в среде MatLab. Это было необходимо, в том числе, для настройки и калибровки предложенного метода. Моделирование проводилось на основе реальных акустических сигналов, полученных с экспериментальной установки, а калибровка — нахождением оптимальных значений порогов и относительных времен прихода акустических сигналов в зависимости от местоположения источника.

Необходимость подбора порогов обусловлена несколькими причинами. Во-первых, композитный материал имеет неоднородную структуру, и акустическая волна неравномерно затухает в процессе распространения. Во-вторых, неоднородность среды также подразумевает значительный



Рис. 2. Примеры входного сигнала.

разброс скоростей распространения. Это вносит дополнительную погрешность.

Источником акустического воздействия был выбран стальной шарик массой 1.75 г и диаметром 7 мм ввиду высокой повторяемости генерируемых акустических сигналов. Записанные сигналы были использованы в качестве входных данных для разработанной модели. Пример зарегистрированных акустических сигналов представлен на рис. 2.

Воздействие производилось по центру каждого из секторов композитной пластины от *A* до *P* (рис. 1). С помощью сравнения реальных значений расстояний от источника до датчиков с полученными расстояниями в модели были найдены оптимальные пороговые величины. В дальнейшем это позволило получить достоверную карту времен прихода акустических сигналов на чувствительные элементы в зависимости от местоположения воздействия.

Таким образом, путем анализа набора повторяемых данных были определены приблизительные скорости распространения и найдены оптимальные значения пороговых значений по амплитуде регистриремого сигнала в зависимости от порядка его прибытия на датчики. В частности, для первого зарегистрированного (опорного) сигнала порог составлял 0.11 рад. Для сигналов, которые регистрировались вторым и третьим по счету, было выбрано одинаковое пороговое значение 0.07 рад. Наименьший порог 0.05 рад был выбран для последнего из сигналов, поскольку, приходя на самый удаленный датчик, сигнал затухал сильнее всего.

Разработанный метод локализации воздействия, а также расчеты длительности и энергии каждого импульса были имплементированы в п.л.и.с.



Рис. 3. Вычисленные и реальные местоположения источника а.э.

4. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Собранный экспериментальный макет в совокупности с программным обеспечением, разработанным по предложенному методу, был экспериментально исследован. В качестве источника акустического воздействия использовался тот же стальной шарик, что и для калибровки. Падение шарика с высоты на чувствительную плоскость композитной пластины порождало упругие колебания, которые регистрировались с помощью встроенных в нее волоконно-оптических интерферометров. Сигналы с интерферометров демодулировались с помощью макета-регистратора сигналов а.э., в котором также проводился расчет местоположения источника акустического воздействия, энергии и длительности. После того, как заканчивались все необходимые расчеты, результат выводился на экран.

С целью повышения повторяемости входных данных источник акустического воздействия был одинаковым для каждой тестируемой точки. Для оценки достоверности вычисления длительности и энергии падение шарика осуществлялось с трех высот: 1, 1.2 и 1.5 м. Всего было исследовано 40 различных мест воздействия. Результаты экспериментального исследования приведены на рис. 3.

5. ВЫВОДЫ

В данной работе представлен метод локализации акустического воздействия на квадратную графит-эпоксидную пластину со встроенными в нее четырьмя волоконно-оптическими датчиками а.э. Разработанный метод основан на сравнении двух боковых расстояний относительно опорного датчика. Реализована модель алгоритма в среде MatLab. В результате калибровки и моделирования были подобраны оптимальные пороговые значения и найдены относительные времена прихода акустических сигналов в зависимости от местоположения источника. Проведено экспериментальное исследование предложенного метода посредством его реализации в составе экспериментального макета регистратора сигналов а.э. в виде части проекта в п.л.и.с. В результате, было установлено, что усредненная абсолютная погрешность предложенного метода составляет порядка 15 мм.

В дальнейшем планируется повышение точности локализации посредством модификации существующего метода. Модифицировать метод предполагается введением дополнительных математических выражений, в частности алгоритмами авто- и кросс-корреляции для более точного нахождения моментов прихода акустического сигнала на чувствительные элементы.

Предложенный метод может быть использован для решения задач, в которых требуется постоянный мониторинг композитных материалов. К таким задачам можно отнести детектирование, оценку и локализацию повреждений в процессе эксплуатации лопастей вертолета, крыльев самолета, мостов и других объектов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 2019-0923).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Grosse C.U., Ohtsu M. // Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering. 2008. P. 1–404. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9
- El Kouche A., Hassanein H.S. // Procedia Computer Science. 2012. V. 10. P. 136.
- 3. Gorman M.R. // J. the Acoustical Society of America. 1991. V. 90. P. 358.
- Al-Jumaili S.Kh., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin Rh. // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. V. 72. P. 513. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.11.026
- Akaike H. // Ann. Inst. of Stat. Math. 1974. V. 26. P. 363–387.
- Pratik Shrestha, Yurim Park, Hyunseok Kwon, Chun-Gon Kim // Composite Structures. 2017. V. 180. P. 412. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.094
- 7. Cairns D.S., Wood L.A // 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1999. C. 27.
- 8. *Ефимов М.Е.* Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.11.01. ИТМО, Санкт-Петербург, 2018. 140 с.
- 9. *Куликов А.В., Мешковский И.К., Ефимов М.Е.* Патент на изобретение RU 2624837 // Опубл. 07.07.2017. Бюл. № 19.