

Ф И З И К А

УДК 539.3/620.179.163

DOI: 10.31429/vestnik-17-1-1-49-56

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАССЛОЕНИЙ
В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Бочарова О. В., Анджигович И. Е., Лыжов В. А., Седов А. В., Калинин В. В.

ONE METHOD FOR IDENTIFYING OF LAMINATIONS IN COMPOSITE MATERIALS

O. V. Bocharova¹, I. E. Andjiovich², V. A. Lyzhov¹, A. V. Sedov¹, V. V. Kalinchuk¹¹ Southern Scientific Center, Rostov-on Don, Russia² Southern Federal University, Rostov-on Don, Russia

e-mail: olga.v.bocharova@gmail.com

Abstract. The problem of identifying hidden inhomogeneities in composite materials has been investigated. An effective approach has been proposed that allows recognizing the presence of heterogeneity and determining its type, based on monitoring changes in the parameters of surface wave fields. To increase the informativeness of the wave field, an original method has been developed that allows capturing minor differences in wave fields. This method is based on the use of optimal signal expansions on a basis that is adaptively tuned to the maximum possible sensitivity to heterogeneity characteristics. A series of experimental studies was conducted to investigate the possibility of using this approach to identify heterogeneities in a sandwich composite. The possibility of recognizing the presence and type of heterogeneity (separation of fiberglass, rigid inclusions) from the reflected and transmitted wave field has been investigated. The experimental results showed that using of the proposed approach provides a clear recognition of the type of heterogeneity in the diagnostic space of images. When recognizing the presence of heterogeneity and determining its type in a sandwich composite, the transmitted wave field is more informative.

Keywords: heterogeneity, non-destructive testing, surface wave field, composite material.

Композиционные материалы находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Особым классом композиционных материалов являются сэндвич-композиты. Эти конструкционные материалы день ото дня становятся все более популярными, что обусловлено их уникальной способностью снижать вес готового изделия без потери механических характеристик. Сэндвичи изготавливаются из двух тонких прочных жестких наружных слоев (называемых несущими), между которыми находится легкий толстый слой заполнителя, достаточно прочный для того, чтобы сохранять наружные слои в исходном положении при нагруз-

ке [1, 2]. Заполнитель соединяется с несущими слоями путем склейки, сварки или пайки. Клеевая прослойка или припой, расположенный между заполнителем и несущими пластинами, одновременно выполняет роль соединительного и демпфирующего элемента, а также служит дополнительной защитой от коррозии. Сэндвич-композиты обладают такими преимуществами, как низкий вес, высокая жесткость и прочность. Эти преимущества являются следствием широко известного факта: разделение двух материалов с помощью другого легкого материала увеличивает прочность и жесткость конструкции [1, 2]. Несущие слои, подкрепленные заполнителем, воспри-

Бочарова Ольга Витальевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: olga.v.bocharova@gmail.com.

Анджигович Игорь Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики неоднородных структур Южного федерального университета; e-mail: ocean_8@mail.ru.

Лыжов Вячеслав Александрович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: maggod-rnd@yandex.ru.

Седов Андрей Владимирович, д-р физ.-мат. доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: sedov_a.v@mail.ru.

Калинчук Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, член-корр. РАН, заведующий отделом механики, математики и нанотехнологий Южного научного центра РАН; e-mail: kalin@ssc-ras.ru.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов: 18-38-00871-мол_a, 18-08-01012, 19-48-230042-р_a.

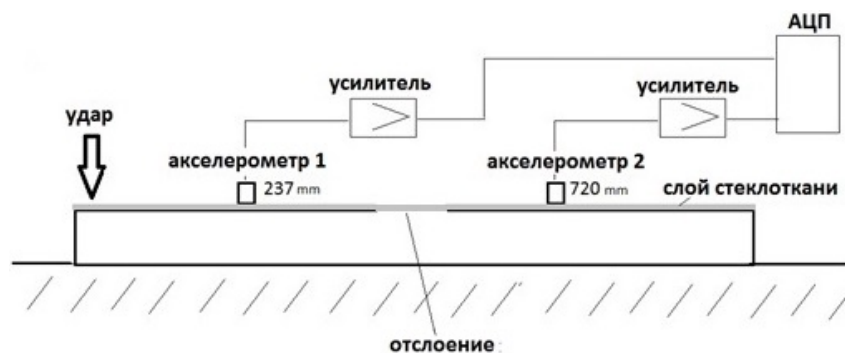


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

нимают высокие напряжения сжатия, иногда превышающие предел упругости материала. Кроме того, сэндвич-композиты обладают такими важными характеристиками как теплоизоляция, звукоизоляция, вибростойкость, коррозионная стойкость, хорошие диэлектрические свойства, что позволяет успешно использовать их в различных отраслях, включая самолетостроение, судостроение, ветроэнергетику, аэрокосмическую отрасль, транспорт, промышленность и т.д. [1–4].

В процессе эксплуатации в условиях высоких нагрузок и вибраций в конструкциях возникают значительные напряжения, которые могут привести к появлению в них расслоений, скрытых дефектов, резко снижающих их прочностные характеристики, что может стать причиной их разрушения. Это обстоятельство обуславливает необходимость использования традиционных методов неразрушающего контроля [5, 6], а также развития новых методов идентификации дефектов и неоднородностей в композиционных материалах [7–12].

В настоящей работе предлагается эффективный подход, позволяющий распознавать наличие неоднородности в композиционных материалах, основанный на контроле изменения параметров поверхностных волновых полей.

1. Методы исследований

Предлагается подход, цель которого — по отклику поверхности среды на ударное воздействие получить информацию о состоянии среды. В качестве образца рассмотрен двухслойный материал. Первый слой — полоса из пенополистирола, моделирующая наполнитель сэндвич-композита, 2-ой слой — тон-

кий из плотной лакостеклоткани, моделирует несущий слой сэндвич-композита.

Ударное возмущение осуществляется электромагнитным механизмом, обеспечивающим постоянство условий импульсного возмущения во всех сериях экспериментов. Колебания исследуемой точки поверхности среды регистрируется калиброванным малогабаритным ИСР-акселерометром 352A24 фирмы PCB Piezotronics (США). Сигнал с акселерометра усиливается предварительным ИСР усилителем ZETLAB 440. Аналоговые сигналы подаются на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-Card E14-140, обрабатываются на компьютере программой PowerGraph и сохраняются для дальнейшей математической обработки. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Было рассмотрено несколько вариантов модели сэндвич-композита:

1 — полоса пенополистирола с равномерно наклеенным на верхней стороне поверхности слоем лакостеклоткани;

2 — искусственно созданный в середине образца композита отрыв лакостеклоткани, моделирующий дефект типа «расслоение» («непроклей») шириной 18 мм;

3 — жесткое включение (стальная пластина шириной 18 мм) в середине образца под слоем лакостеклоткани.

Измерения производились датчиками, расположенными в «ближней» (до расслоения) и «дальней» (после расслоения) зонах поверхности. Датчик, расположенный в «ближней» зоне, регистрирует отраженную от дефекта волну; датчик, расположенный в «дальней» зоне, регистрирует прошедшую через дефект волну. Исследовалась возможность обнаружения и эффективность распознавания наличия дефекта и его типа по от-

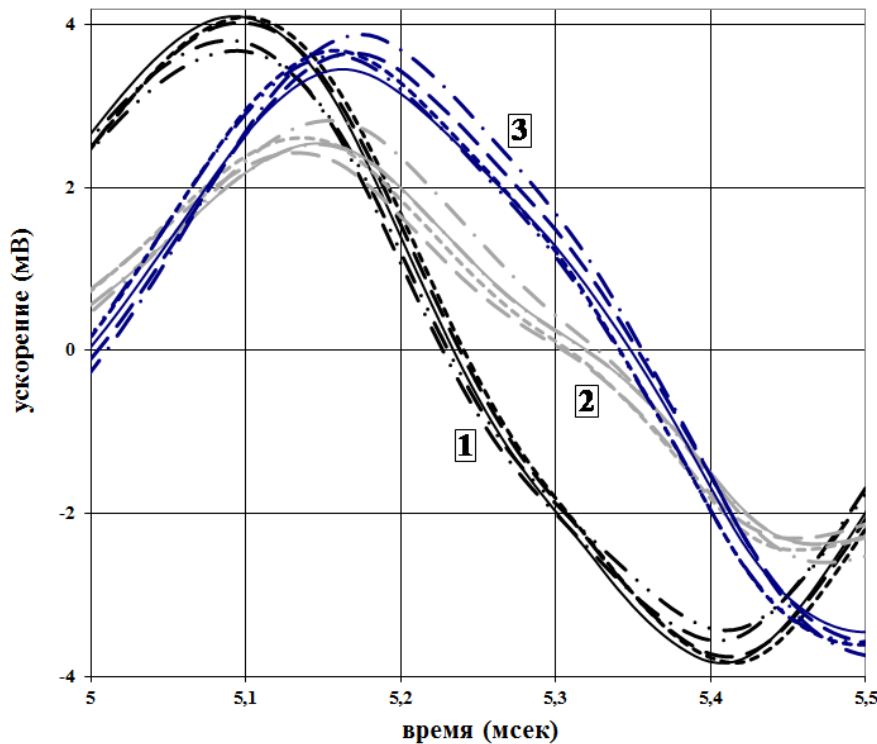


Рис. 2. Акселерограмма точки поверхности в дальней зоне (прошедшая поверхностная волна)

раженному или по прошедшему волновому полю. Для каждого варианта модели были проведены серии по пять измерений с целью подтверждения повторяемости эксперимента. На рис. 2–4 представлены акселерограммы волнового поля, измеренные на поверхности композита датчиком, находящимся в «дальней зоне», в различные интервалы времени. Линии, отмеченные цифрой 1, соответствуют поверхностному волновому полю для неповрежденного (без дефектов) композита, цифрой 2 — волновому полю для композита с расслоением, цифрой 3 — для композита с жестким включением под слоем лакостеклоткани. По оси абсцисс отложено время в миллисекундах, по оси ординат — вертикальная компонента ускорения (мВ). Различными типами линий (штрих, пунктир, штрих-пунктир и т.п.) на рис. 2 представлены результаты повторяющихся экспериментов для одной и той же модели композита. Графики демонстрируют достаточно высокую степень повторяемости регистрируемого сигнала, что свидетельствует о хорошем качестве проведенного эксперимента.

Рис. 3 и 4 демонстрируют хорошую чувствительность прошедшей волны к наличию дефекта в композите и к его типу.

На рис. 5 и 6 показаны акселерограммы, измеренные на поверхности среды датчиком, находящимся в «ближней зоне», в различных временных интервалах. Как следует из рис. 5, в интервале 0–3,5 мс отраженная поверхностная волна практически не чувствует наличие дефекта. Дефект начинает проявляться в волне по истечении 3,5 мс. Из рис. 6 следует, что наибольшему влиянию подвержена амплитуда ускорения, сдвига фазы практически не наблюдается.

Для повышения информативности предложенного метода ранее [10] был разработан оригинальный подход, позволяющий улавливать незначительные отличия в волновых полях и, тем самым, идентифицировать наличие неоднородностей в исследуемом объекте. Этот метод основан на использовании оптимальных ортогональных разложений сигналов по базису, который специально настраивается на максимально возможную чувствительность к типу, размерам и расположению того или иного дефекта. Выходное измеренное значение представляет собой скалярную функцию отклика среды $f^*(t)$, $t \in [0, T_H]$ на зондирующее воздействие F . Интервал времени T_H достаточен для стабильного выявления возникающих диагностируемых состоя-

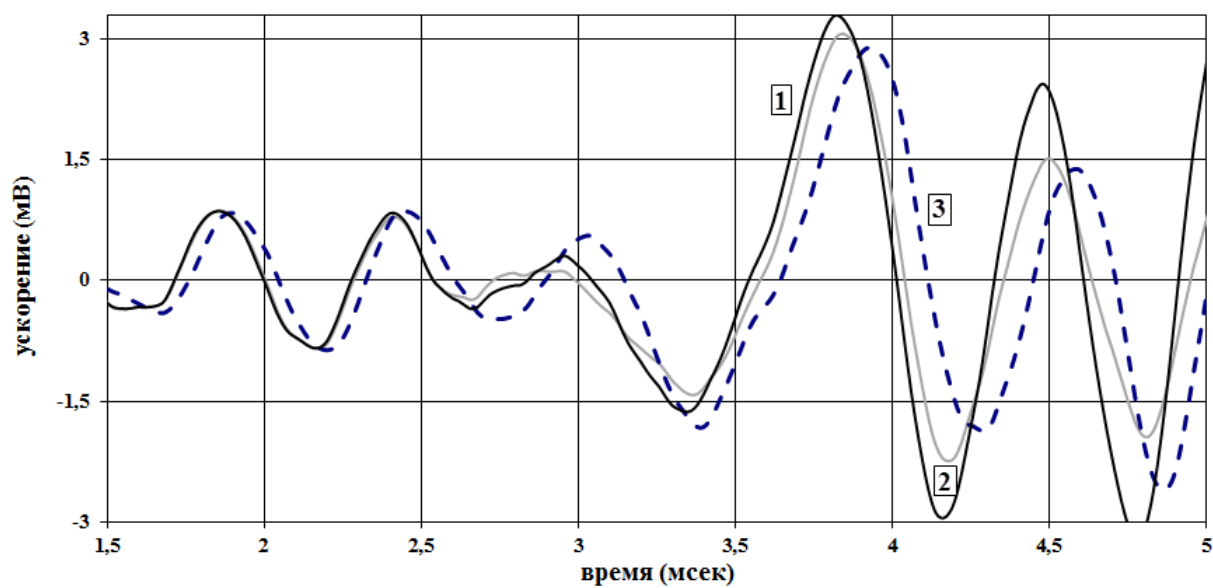


Рис. 3. Акселерограмма точки поверхности в дальней зоне

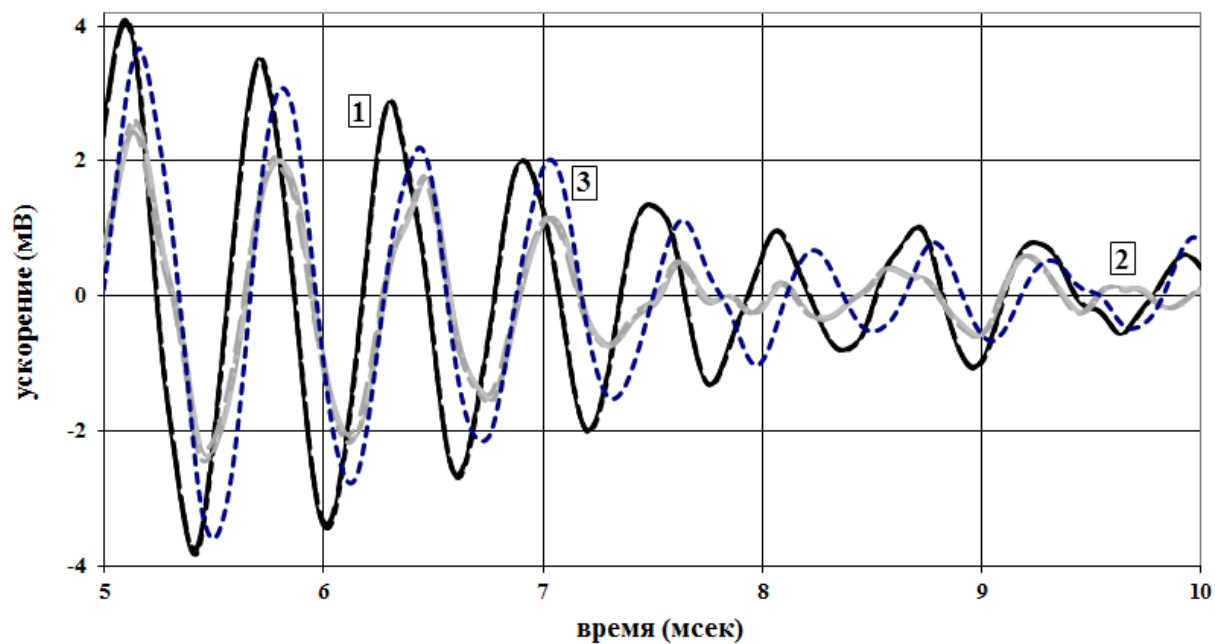


Рис. 4. Акселерограмма точки поверхности в дальней зоне

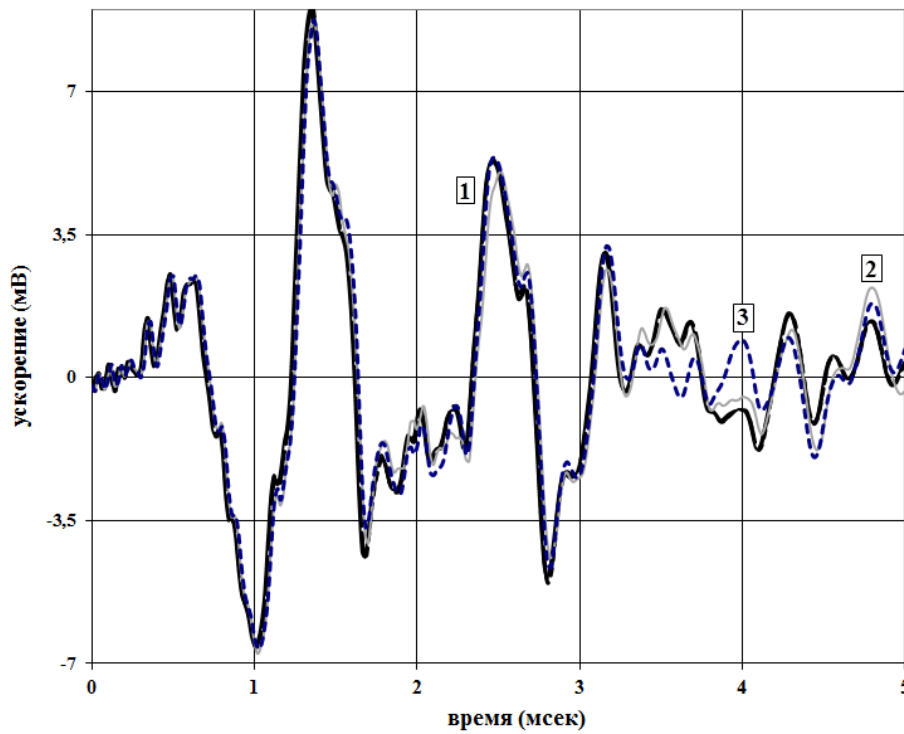


Рис. 5. Акселерограмма точки поверхности в ближней зоне

ний. Обучающая выборка f^* формируется из отдельных графиков $f_i^*(t)$, полученных для различных типов дефектов в конструкции, но для одного типа зондирующего неразрушающего действия. Каждый график $f_i^*(t)$ может рассматриваться как вектор действительных значений $f_i^* = [f_{i1}^*, f_{i2}^*, f_{i3}^*, \dots, f_{iN}^*]^T \in \mathbb{R}^N$ изменения отклика во времени.

На практике обучающая выборка сигналов может быть получена либо физическим экспериментом на моделях, либо математическим моделированием отклика образца на ударное воздействие с использованием пакетов прикладных программ, таких как ANSYS.

Предварительно к измеренным векторам f_i^* применялась процедура оценки амплитудных спектров $f_i^* = [f_{i1}^*, f_{i2}^*, f_{i3}^*, \dots, f_{iN}^*]^T \in \mathbb{R}^N$ на основе дискретного преобразования Фурье

$$f_{ik} = \left| \sum_{l=0}^{N-1} f_{il}^* \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} lk\right) \right|.$$

Эта процедура повышает вычислительную устойчивость предложенного алгоритма. Затем вектора $f_i \in \mathbb{R}^N$ раскладывались по ортонормированному адаптивно-настраиваемому базису, определяемому как результат решения комплекса оптимизационных задач [10].

2. Результаты исследований и их обсуждение

Проведена серия экспериментов по численной обработке сигнала. Исследовалась возможность распознавания наличия неоднородности и ее типа по отраженному и по прошедшему волновому полю. На рис. 7 приведены результаты построения признакового диагностического пространства и расположения двумерных образов для трех вариантов модели. Изображения образов представлены в виде точек, координатами которых являются коэффициенты при разложении векторов в выбранном базисе. Цифрами 1 и 4 показаны образы, соответствующие цельному сэндвич-композиту, цифрами 2 и 5 — сэндвич-композиту с отрывом лакостеклоткани, цифрами 3 и 6 — сэндвич-композиту с жестким включением под слоем лакостеклоткани. Образы 1, 2 и 3 получены из акселерограмм, зарегистрированных дальним датчиком, 4, 5 и 6 — из акселерограмм, зарегистрированных ближним датчиком.

Результаты проведенных экспериментов показали, что при распознавании наличия дефекта и определения его типа в сэндвич-композите информативным является как прошедшая, так и отраженная волна. Лучшие ре-

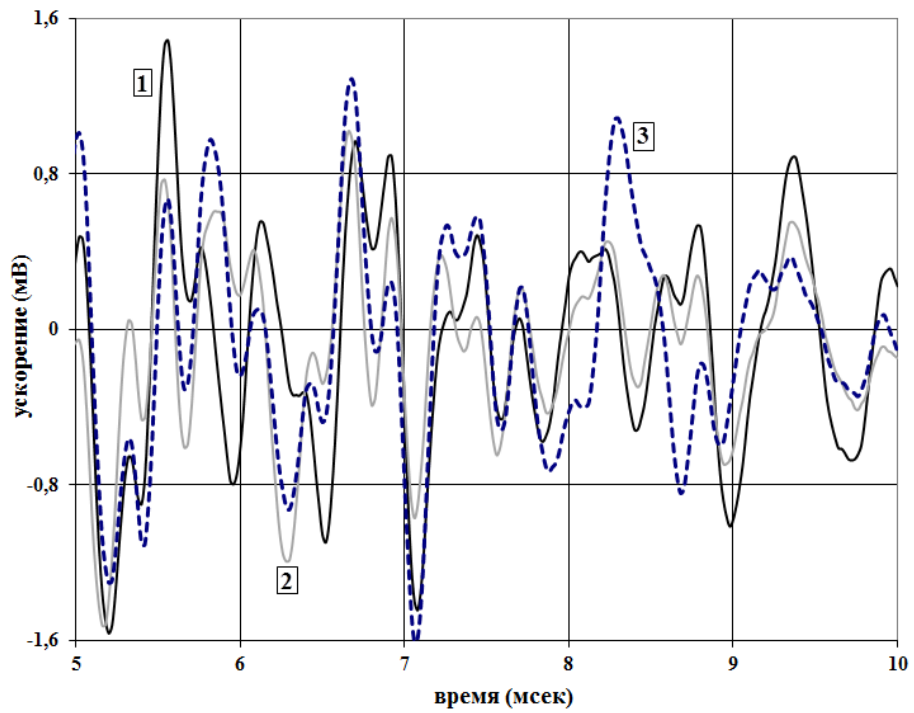


Рис. 6. Акселерограмма точки поверхности в ближней зоне

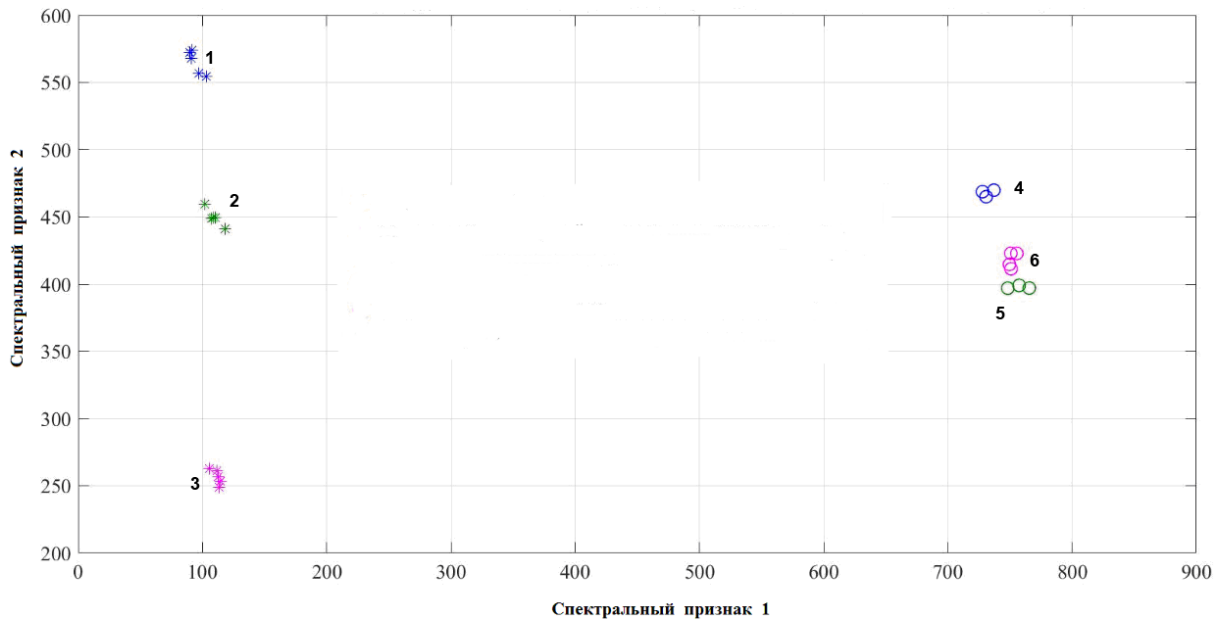


Рис. 7. Расположение образов в пространстве распознавания для различных моделей сэндвич-композиатов

зультаты распознавания дефектов удалось достигнуть при использовании акселерограмм от прошедшей волны. В этом случае второй спектральный признак хорошо реагирует на наличие дефекта и на его тип (отрыв стеклоткани или жесткое включение). Первый спектральный признак практически не ощущает дефект. При использовании отраженной волны наличие дефекта обнаруживается вторым спектральным признаком. Однако тип дефекта установить не удастся. Первый спектральный признак при использовании отраженной волны не реагирует на наличие дефектов.

Выводы

Предложен и реализован подход обнаружения и определения типа дефектов в композиционных материалах, основанный на контроле изменения параметров поверхностных волновых полей.

Для повышения информативности волнового поля разработан оригинальный метод, основанный на использовании оптимальных ортогональных разложений сигналов по адаптивно-настраиваемому базису.

Результаты проведенных экспериментов показали, что при распознавании наличия неоднородности и определении ее типа в сэндвич-комposite более информативной является прошедшая волна, что необходимо учитывать при выборе мест расположения датчиков.

Литература

1. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
2. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. М.: Машиностроение, 1982. 152 с.
3. Прохоров Б.Ф., Кобелев В.Н. Трехслойные конструкции в судостроении. Л.: Судостроение, 1972. 334 с.
4. Крысин В.Н. Слоистые клееные конструкции в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1980. 228 с.
5. Неразрушающие методы контроля / Под ред. В. Я. Кершенбаума. М.: Наука и техника, 1992. 254 с.
6. Boopathy G., Surendar G., Nema A. Review on non-destructive testing of composite materials in aircraft applications // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Iss. 8. P. 1334–1342.
7. Соловьев А.Н., Соболев Б.В., Васильев П.В. Ультразвуковая локация внутренних трещиноподобных дефектов в составном уругом

цилиндре с применением аппарата искусственных нейронных сетей // Дефектоскопия. 2016. Т. 52. №3. С. 3–9.

8. Бочарова О.В., Седов А.В., Анджиикович И.Е., Калинин В.В. Об одном методе идентификации дефектов, основанном на контроле структуры и особенностей поверхностных волновых полей // Дефектоскопия. 2016. Т. 52. № 7. С. 21–28.
9. Dervilis N., Choi M., Taylor S.G., Barthorpe R.J., Park G., Farrar C.R., Worden K. On damage diagnosis for a wind turbine blade using pattern recognition // Journal of Sound and Vibration. 2014. Vol. 333. Iss. 6. P. 1833–1850.
10. Бочарова О.В., Анджиикович И.Е., Лыжков В.А., Седов А.В., Калинин В.В. О возможности биспектрального подхода к обработке сигнала в задачах низкочастотной дефектоскопии // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2019. Т. 16. № 1. С. 66–72.
11. Есипов Ю.В., Мухомтов В.М., Калинин В.В., Анджиикович И.Е. О возможности раннего диагноза состояния стержневых конструкций с применением сегнетоэлектрических датчиков динамической деформации // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2010. Т. 7. № 4. С. 29–35.
12. Есипов Ю.В., Мухомтов В.М., Калинин В.В. Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций // Измерительная техника. 2008. № 10. С. 39–42.

References

1. Panin, V.F., Gladkov, Yu.A. *Konstruktsii s zapolnitelem* [Placeholder constructions]. Mashinostroenie, Moscow, 1991. (In Russian)
2. Panin, V.F. *Konstruktsii s sotovym zapolnitelem* [Honeycomb Structures]. Mashinostroenie, Moscow, 1982. (In Russian)
3. Prokhorov, B.F., Kobleev, V.N. *Trekhslonnye konstruktsii v sudostroenii* [Three-layer structures in shipbuilding]. Sudostroenie, Leningrad, 1972. (In Russian)
4. Krysin, V.N. *Sloistye kleenye konstruktsii v samoletostroenii* [Laminated glued constructions in aircraft construction]. Mashinostroenie, Moscow, 1980. (In Russian)
5. Kershenbaum, V.Ya. (ed.) *Nerazrushayushchie metody kontrolya* [Non-destructive testing methods]. Nauka i tekhnika, Moscow, 1992. (In Russian)
6. Boopathy, G., Surendar, G., Nema, A. Review on non-destructive testing of composite materials in aircraft applications. *Int. J. of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, vol. 8, iss. 8, pp. 1334–1342.

7. Solov'ev, A.N., Sobol', B.V., Vasil'ev, P.V. Ul'trazvukovaya lokatsiya vnutrennikh treshchinopodobnykh defektov v sostavnom uprugom tsilindre s primeneniem apparata iskusstvennykh neyronnykh setey [Ultrasonic location of internal crack-like defects in a composite elastic cylinder using an artificial neural network apparatus]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2016, vol. 52, no. 3, pp. 3–9. (In Russian)
8. Bocharova, O.V., Sedov, A.V., Andzhikovich, I.E., Kalinchuk, V.V. Ob odnom metode identifikatsii defektov, osnovannom na kontrole struktury i osobennostey poverkhnostnykh volnovykh poley [About one defect identification method based on the control of the structure and features of surface wave fields]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2016, vol. 52, no. 7, pp. 21–28. (In Russian)
9. Dervilis, N., Choi, M., Taylor, S.G., Barthorpe, R.J., Park, G., Farrar, C.R., Worden K. On damage diagnosis for a wind turbine blade using pattern recognition. *J. of Sound and Vibration*, 2014, vol. 333, iss. 6, pp. 1833–1850.
10. Bocharova, O.V., Andzhikovich, I.E., Lyzhov, V.A., Sedov, A.V., Kalinchuk, V.V. O vozmozhnostyakh bispektral'nogo podkhoda k obrabotke signala v zadachakh nizkochastotnoy defektoskopii [On the possibilities of the bispectral approach to signal processing in the tasks of low-frequency flaw detection]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2019, vol. 16, no. 1, pp. 66–72. (In Russian)
11. Esipov, Yu.V., Mukhortov, V.M., Kalinchuk, V.V., Andzhikovich, I.E. O vozmozhnosti rannego diagnoza sostoyaniya sterzhnevnykh konstruksiy s primeneniem segnetoelektricheskikh datchikov dinamicheskoy deformatsii [On the possibility of an early diagnosis of the state of bar structures using ferroelectric sensors of dynamic deformation]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2010, vol. 7, no. 4, pp. 29–35. (In Russian)
12. Esipov, Yu.V., Mukhortov, V.M., Kalinchuk, V.V. Ispytatel'naya ustanovka dlya analiza deformatsii modeley trekhmernykh konstruksiy [Testing installation for the analysis of deformation of models of three-dimensional structures]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2008, no. 10, pp. 39–42. (In Russian)