

УДК 539.3  
DOI: 10.7868/S25000640250303

## МОНИТОРИНГ РАССЛОЕНИЯ СРЕДЫ ПО ПАРАМЕТРАМ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

© 2025 г. И.Е. Анджинович<sup>1</sup>, О.В. Бочарова<sup>2</sup>, А.С. Турчин<sup>1,2</sup>

**Аннотация.** Предложен эффективный метод низкочастотного неразрушающего контроля процесса расслоения среды по изменению параметров поверхностных волн, которые возбуждаются путем импульсного (ударного) воздействия на контролируемый объект. Метод заключается в аналоговом контроле характеристик поверхностного волнового поля, сопровождающего изменение параметров расслоения, путем измерения ускорения заданных точек на поверхности контролируемого объекта, в преобразовании аналогового сигнала в цифровой и в последующей его математической обработке. Последняя состоит в переводе регистрируемого сигнала с помощью оригинальных математических методов в двумерный образ. Такой подход позволяет обеспечить визуализацию амплитудно-временного сигнала посредством его преобразования в точку в двумерном пространстве. Любое изменение параметров волнового поля приводит к изменению положения точки на плоскости. Таким образом реализуется возможность визуального контроля изменения параметров расслоения по положению точки в двумерном пространстве. Проведен эксперимент по контролю перемещения включения в трещине, моделирующей динамический процесс расслоения композиционного материала. В качестве источника колебаний использовался вибростенд, моделирующий ударное воздействие. Трещина представляет собой протяженную сквозную прорезь в образце. Волновое поле контролировалось на поверхности среды в области прорези (над) и за прорезью (после).

Исследована информативность контроля по изменению параметров прошедшего поля, а также изменение поведения системы «включение – трещина». Исследование показало достаточно высокую чувствительность метода.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, акселерометр, низкочастотный мониторинг, расслоение среды, поверхностно-волновое поле, биспектральный метод.

### MONITORING OF THE MEDIUM STRATIFICATION BY THE PARAMETERS OF THE SURFACE WAVE FIELD

I.E. Andzhikovich<sup>1</sup>, O.V. Bocharova<sup>2</sup>, A.S. Turchin<sup>1,2</sup>

**Abstract.** An effective method of low-frequency non-destructive testing of the medium stratification process by changing the parameters of surface waves excited by pulse (impact) action on the tested object is proposed. The method consists of analog control of the characteristics of the surface wave field accompanying the change in the stratification parameters by measuring the acceleration of specified points on the surface of the tested object, converting the analog signal into a digital one and its subsequent mathematical processing. The latter consists of a special transformation of the recorded signal by using original mathematical methods into a two-dimensional image. This approach allows for visualization of signal change control by converting the original amplitude-time signal into a certain point in two-dimensional space. Any change in the wave field parameters leads to a change in the position of the point on the plane. This implements the possibility of visual

<sup>1</sup> Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: vkalin415@mail.ru

control of the change in stratification parameters by the position of the point in two-dimensional space. As an example, an experiment was conducted to control the movement of an inclusion in a crack simulating the dynamic process of stratification of a composite material. A vibration table simulating an impact effect was used as a source of oscillations. A crack is defined as an elongated through-thickness fissure in a specimen. The wave field was monitored at two points on the object's surface: above the crack and after it. The information content of control by changing the parameters of the transmitted field, and the change in the resonant behavior of the "inclusion-crack" system was studied. The study showed a fairly high sensitivity of the method.

**Keywords:** non-destructive testing, accelerometer, low-frequency monitoring, the medium stratification, surface wave field, bi-spectral method.

1. Zhao Z. 2021. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics. *Ceramics International*. 47(4): 4389–4397. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.10.065
2. Chaki S., Harizi W., Bourse G., Ourak M. 2015. Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 78: 358–361. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.033
3. Boopathy G., Surendar G., Nema A., Prem Anand T.P. 2017. Review on non-destructive testing of composite materials in aircraft applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 8(8): 1334–1342.
4. Rucevskis S., Wesolowski M., Chate A. 2009. Damage detection in laminated composite beam by using vibration data. *Journal of Vibroengineering*. 11(3): 363–373.
5. Amezcua-Sanchez J.P., Dominguez-Gonzalez A., Sedaghati R., Romero-Troncoso R. de J., Osornio-Rios R.A. 2014. Vibration control on smart civil structures: a review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 21(1): 23–38. doi: 10.1080/15376494.2012.677103
6. Dervilis N., Choi M., Taylor S.G., Barthorpe R.J., Park G., Farrar C.R., Worden K. 2014. On damage diagnosis for a wind turbine blade using pattern recognition. *Journal of Sound and Vibration*. 333(6): 1833–1850. doi: 10.1016/j.jsv.2013.11.015
7. Есипов Ю.В., Мухортов В.М., Калинин В.В. 2008. Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций. *Измерительная техника*. 10: 39–42.
8. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. 2021. Shear horizontal waves in piezoelectric structures with a functionally graded coating. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 28(5): 486–494. doi: 10.1080/15376494.2019.1578006
9. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. 2020. Peculiarities of surface acoustic waves, propagation in structures with functionally graded piezoelectric materials, coating from different ceramics on the basis of PZT. *Journal of Advanced Dielectrics*. 10(1–2): 2060017. doi: 10.1142/S2010135X20600176
10. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. 2021. Specific features of SH-waves propagation in structures with prestressed inhomogeneous coating made of piezoceramics based on  $\text{LiNbO}_3$ . *Journal of Advanced Dielectrics*. 11(5): 2160007. doi: 10.1142/S2010135X21600079
11. Белянкова Т.И., Калинин В.В. 1993. О взаимодействии осциллирующего штампа с предварительно напряженным полупространством. *Прикладная математика и механика*. 57(4): 123–134.
12. Бочарова О.В., Седов А.В., Анджинович И.Е., Калинин В.В. 2016. Об одном методе идентификации дефектов, основанном на контроле структуры и особенностей поверхностных волновых полей. *Дефектоскопия*. 7: 21–28.
13. Бочарова О.В., Анджинович И.Е., Седов А.В., Калинин В.В. 2017. Возможности биспектрального подхода к обработке сигнала. *Измерительная техника*. 9: 62–65.

## REFERENCES

1. Zhao Z. 2021. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics. *Ceramics International*. 47(4): 4389–4397. doi:10.1016/j.ceramint.2020.10.065
2. Chaki S., Harizi W., Bourse G., Ourak M. 2015. Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 78: 358–361. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.033
3. Boopathy G., Surendar G., Nema A., Prem Anand T.P. 2017. Review on non-destructive testing of composite materials in aircraft applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 8(8): 1334–1342.
4. Rucevskis S., Wesolowski M., Chate A. 2009. Damage detection in laminated composite beam by using vibration data. *Journal of Vibroengineering*. 11(3): 363–373.
5. Amezcua-Sanchez J.P., Dominguez-Gonzalez A., Sedaghati R., Romero-Troncoso R. de J., Osornio-Rios R.A. 2014. Vibration control on smart civil structures: a review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 21(1): 23–38. doi: 10.1080/15376494.2012.677103
6. Dervilis N., Choi M., Taylor S.G., Barthorpe R.J., Park G., Farrar C.R., Worden K. 2014. On damage diagnosis for a wind turbine blade using pattern recognition. *Journal of Sound and Vibration*. 333(6): 1833–1850. doi: 10.1016/j.jsv.2013.11.015
7. Esipov Yu.V., Mukhortov V.M., Kalinchuk V.V. 2008. Test equipment for analyzing the deformation of models of three-dimensional structures. *Measurement Techniques*. 51(10): 1104–1109. doi: 10.1007/s11018-009-9169-7
8. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. 2021. Shear horizontal waves in piezoelectric structures with a functionally graded coating.

- Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 28(5): 486–494. doi: 10.1080/15376494.2019.1578006
9. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. 2020. Peculiarities of surface acoustic waves, propagation in structures with functionally graded piezoelectric materials, coating from different ceramics on the basis of PZT. *Journal of Advanced Dielectrics*. 10(1–2): 2060017. doi: 10.1142/S2010135X20600176
10. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. 2021. Specific features of SH-waves propagation in structures with prestressed inhomogeneous coating made of piezoceramics based on  $\text{LiNbO}_3$ . *Journal of Advanced Dielectrics*. 11(5): 2160007. doi: 10.1142/S2010135X21600079
11. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. 1993. The interaction of a vibrating punch with a prestressed half-space. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 57(4): 713–724. doi: 10.1016/0021-8928(93)90041-J
12. Bocharova O.V., Sedov A.V., Andzhikovich I.E., Kalinchuk V.V. 2016. On a defect identification method based on monitoring the structure and peculiarities of surface wave. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 52(7): 377–382. doi: 10.1134/s1061830916070020
13. Bocharova O.V., Andzhikovich I.E., Sedov A.V., Kalinchuk V.V. 2017. On the possibilities of bispectral approach to signal processing. *Measurement Techniques*. 60(9): 957–961. doi: 10.1007/s11018-017-1300-6

Поступила 29.05.2025

Принята 17.06.2025