

УДК 539.3/620.179.163

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В СРЕДАХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Бочарова О. В., Седов А. В., Анджинович И. Е., Калинчук В. В.

ON MODELING OF SURFACE WAVE FIELDS IN MEDIA WITH INHOMOGENEITIES

Bocharova O. V. \*, Sedov A. V. \*, Andjikovich I. E. \*\*, Kalinchuk V. V. \*

\* Southern Scientific Center, Rostov-on Don, Russia

\*\* Southern Federal University, Rostov-on Don, Russia

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

*Abstract.* Peculiarities of the dynamic process at the surface of a rectangular parallelepiped, weakened by the cylindrical cavity, have been investigated. Diameter of the cavity, as well as the depth of its occurrence have been varied. Surface oscillations have been excited in the sample by impulse action. For the calculation of the wave field on the surface of the parallelepiped, weakened by the presence of the cavity, the package ANSYS has been applied.

The possibility of determining the presence of a defect by parameters of the surface wave field has been examined. The method of image recognition has been used. By using this method, the recognition of the type of defect corresponds to the recognition of the type of the response function. In this case, there is a steady and unique dependence between the type of response function and the parameters of the defect structure. The series of computational experiments has been carried out. Experimental results demonstrated that there is a precise spatial distribution of images in the space of recognition depending on the defect of sample.

*Keywords:* defect, nondestructive testing, surface wave field

Задачи неразрушающего контроля состояния, определения дефектов различных механических конструкций всегда были и остаются актуальными. Современное развитие технологий производства новых материалов приводит к необходимости создания эффективных методов мониторинга состояния объекта.

В настоящее время для дефектоскопии механических конструкций часто применяют системы с волновыми низкочастотными или ультразвуковыми воздействиями. По реакции конструкции на данные воздействия судят о ее состоянии, наличии дефекта в форме коррозии, трещин, пустот или инородных заполнений. Так, известны применения подобных подходов при обнаружении повреждений лезвий лопастей ветровых турбин на ранней стадии, когда отказ может привести к катастрофическому результату для всей системы [1],

при неразрушающем контроле материалов, используемых в машиностроении [2].

В работе [3] разработан неразрушающий способ обнаружения поверхностных и объемных дефектов, основанный на сканировании поверхности исследуемого объекта сфокусированным лазерным пучком и детектировании генерируемых им акустических волн пьезоэлектрическим датчиком. В [4] исследована возможность обнаружения подповерхностных дефектов в твердых телах методом сканирующей высокочастотной акустической микроскопии. Автором работы [5] при использовании аналитических формул, полученных на основе методов теории возмущений, исследована задача об идентификации полости в упругом цилиндре.

Успешное применение указанных подходов, обеспечение требуемой точности на-

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

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

Анджинович Игорь Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела волновых процессов Южного федерального университета; e-mail: ocean\_8@mail.ru

Калинчук Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, заместитель Председателя по науке Южного научного центра РАН; e-mail: kalin@ssc-ras.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (13-08-96528-р-юг, 15-08-0674, 14-08-01213).

прямо связаны с использованием математических методов обработки сигналов. В настоящей работе использован метод, основанный на оптимальном ортогональном разложении сигналов по базису, адаптивно-настраиваемому по обучающей выборке.

### 1. Методика проведения исследований

Исследовались особенности динамического процесса на поверхности прямоугольного параллелепипеда, заземленного на нижней границе в трех областях, ослабленного дефектом в форме цилиндрической полости диаметра  $D$  и заглубленным от поверхности на величину  $h$  [6, 7]. Диаметр дефекта, равно как и глубина его залегания, варьировались. Поверхностные колебания в образце возбуждались кратковременным силовым воздействием  $F$  на одном из концов. Для расчета волнового поля на поверхности параллелепипеда, ослабленного наличием дефекта, был применен конечно-элементный пакет ANSYS с использованием командного языка APDL. При расчетах принимались следующие значения: модуль Юнга  $E = 22$  МПа, плотность  $\rho = 50$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Возбуждение волнового поля осуществлялось импульсом в виде «ступеньки» длительностью 50 мкс.

Возникшие колебания, описываемые функцией  $f(t)$ ,  $t \in [0, T_n]$  фиксировались датчиком  $S$  в течение временного интервала  $T_n$ , достаточного для прихода отраженных волн от противоположного конца конструкции.

Распознавание типа дефекта по функциям отклика  $f(t)$  осуществлялось на основе использования построенных признаков пространства диагностики  $\xi$ .

Для отображения обобщенного топологического пространства  $\mathbf{C}$  функций  $f(t)$  в пространство  $\xi$  использовалось ортогональное гомеоморфное отображение, которое можно рассматривать как обобщенное спектральное разложение функций  $f(t)$  по ортонормированным базисным функциям  $\{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots\}$  пространства  $\xi$  вида [8]

$$f_i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} w_{i1} \xi_i(t),$$

$$(f_i(t) \in \mathbf{C}) \rightarrow ((w_{i1}, w_{i2}, \dots) \in \xi).$$

С учетом того, что функция  $f_i(t)$  представлена конечным числом измерений  $N$ , то есть

$f_i(t) \in \mathbf{R}^N$ , последнее ортогональное преобразование может быть представлено как конечномерное

$$f_i(t) = w_0 + \sum_{i=1}^m w_{i1} \xi_i(t),$$

$$(f_i(t) \in \mathbf{R}^N) \rightarrow ((w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}) \in \mathbf{R}^m).$$

В соответствии с последним график функции  $f_i(t)$ , преобразуется в  $m$ -мерный образ  $W_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}) \in \mathbf{R}^m$ .

Особенностью указанного преобразования является адаптивность ортонормированного базиса  $\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m\}$ , зависящего от типа преобразуемых функций  $f(t)$ . В частности, базис  $\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m\}$  определяется как результат решения комплекса оптимизационных задач

1) Минимизация среднеквадратической ошибки воспроизведения функции  $f(t)$  при фиксированном числе  $m$  ортонормированных функций

$$\Delta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{\sum_{k=1}^N (\Psi)^2},$$

$$\Psi = f_i(k\Delta t) - \sum_{j=1}^m w_{ij} \xi_j(k\Delta t) - w_0,$$

где  $M$  — объем обучающей выборки.

2) Выполнения условия ортонормированности базисных функций

$$(\xi_i, \xi_j) = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j, \end{cases}$$

$$i, j = \overline{1, m}.$$

3) Обеспечение наибольшей разнесенности образов в признаковом пространстве, соответствующих различным типам дефектов

$$d^2(W_i, W_l) = \frac{1}{M} \sum_{\substack{i,l=1 \\ i \neq j}}^M \|W_i - W_l\|^2.$$

Для простоты графической и физической интерпретации дефектоскопии образцов будем осуществлять по образам  $W_i = (w_{i1}, w_{i2}) \in \mathbf{R}^2$  в двумерном признаковом пространстве. Как показали исследования, указанная размерность признакового пространства достаточна для проведения качественной диагностики образцов.

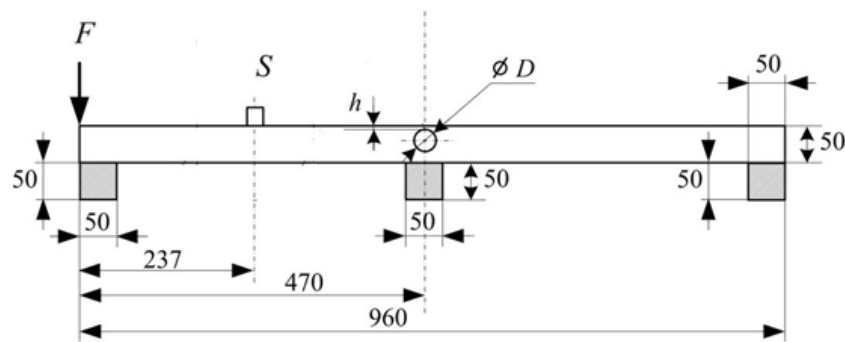


Рис. 1. Общий вид прямоугольной конструкции

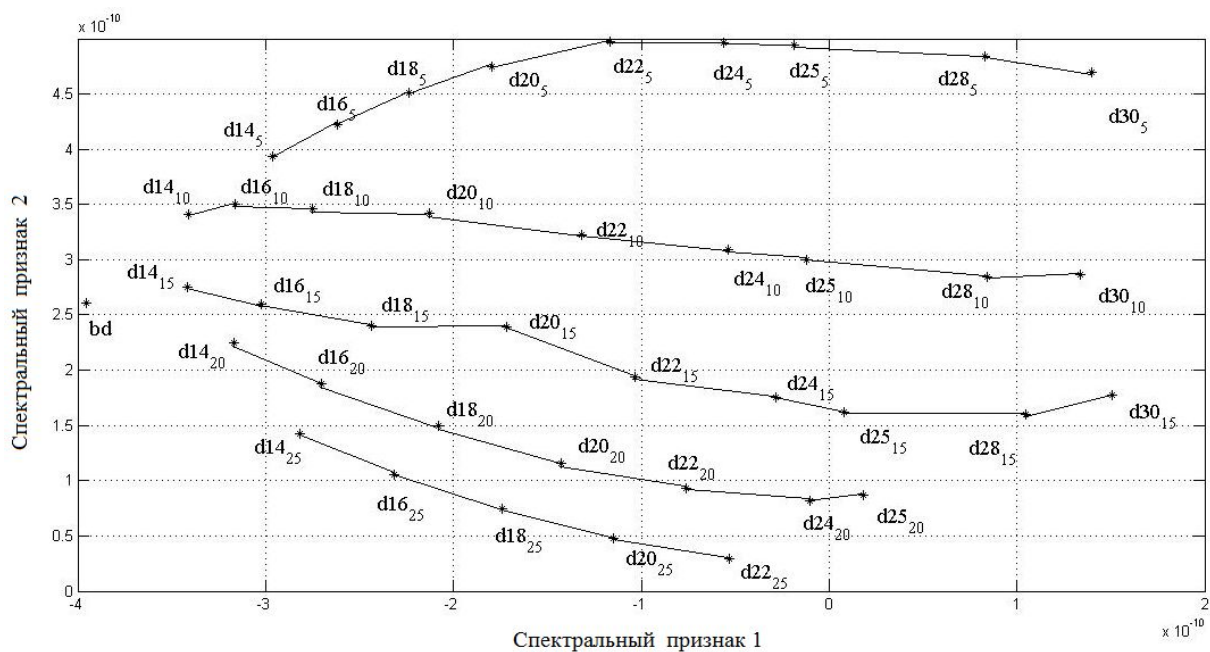


Рис. 2. Расположение образцов в пространстве распознавания для образцов с полостями различного размера и заглубления

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

Для исследования возможностей дефектоскопии конструкций, показанных на рис. 1, были проведены следующие эксперименты:

- 1) Исследование влияния размера дефекта  $D$  на возможность дефектоскопии.
- 2) Исследование влияния глубины залегания  $h$  дефекта на возможность дефектоскопии.

Рис. 2 иллюстрирует результаты построения признакового диагностического пространства и расположения образцов для образцов с полостями различного размера и заглубления.

На рис. 2  $bd$  — образ для образца без дефектов,  $dD_h$  — образ для образца с полостью (диаметр  $D$  и заглубление  $h$ ).

Результаты экспериментов показали, что имеет место четкое распределение образцов в пространстве распознавания, в зависимости от дефекта образца.

## Выводы

1. На основании численного моделирования динамических процессов исследованы особенности волновых полей на поверхности тела, ослабленного наличием дефекта.

2. Предложен метод идентификации дефектов по функции отклика на поверхности

среды, основанный на настраиваемом ортонормированном базисе.

3. Применение предложенного настраиваемого ортонормированного базиса для реализации признакового пространства распознавания дефектов обеспечивает достаточную возможность идентификации дефекта, его размера и заглубления.

### Литература

1. 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.
2. Salazar A., Vergara L., Llinares R. Learning material defect patterns by separating mixtures of independent component analyzers from NDT sonic signals // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010. Vol. 24. Iss. 6. Pp. 1870–1886.
3. Исмагилов И.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И., Мугачев С.А., Хасанов А.А. Обнаружение поверхностных и объемных дефектов в металлах лазерно-акустическим способом // *Дефектоскопия*. 2014. № 6. С. 16–24.
4. Корх Ю.В., Перов Д.В., Юнкевич А.Б. Обнаружение подповерхностных микродефектов методом высокочастотной акустической микроскопии // *Дефектоскопия*. 2015. № 4. С. 19–33.
5. Bocharova O.V. On inverse problems of identification the cavity in the elastic cylinder // *IOP Publishing Journal of physics: conference series*. 2014. Vol. 490. No. 1. P. 012057. DOI:10.1088/1742-6596/490/1/012057
6. Бочарова О.В., Лыжов В.А., Анджи́кович И.Е. Некоторые особенности волновых полей на поверхности тел, ослабленных наличием дефектов // *Вестник Южного научного центра РАН*. 2013. Т. 9. № 2. С. 11–15.
7. Бочарова О.В., Анджи́кович И.Е., Ворович Е.И. К проблеме исследования поверхностных волновых полей с помощью тонкопленочных сегнетоэлектрических датчиков // *Вестник Южного научного центра РАН*. 2015. Т. 11. № 1. С. 30–35.
8. Седов А.В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами: декомпозиционный подход. М.: Наука, 2010. 438 с.

### References

1. 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.
2. Salazar A., Vergara L., Llinares R. Learning material defect patterns by separating mixtures of independent component analyzers from NDT sonic signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, vol. 24, iss. 6, pp. 1870–1886.
3. Ismagilov I.R., Golenishchev-Kutuzov V.A., Kalimullin R.I., Migachev S.A., Khasanov A.A. Obnaruzhenie poverkhnostnykh i ob"emnykh defektov v metallakh lazerno-akusticheskim sposobom [Detection of surface and bulk defects in the metal laser-acoustic method]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2014, no. 6, pp. 16–24. (In Russian)
4. Korkh Yu.V., Perov D.V., Yunkevich A.B. Obnaruzhenie podpoverkhnostnykh mikrodefektov metodom vysokochastotnoy akusticheskoy mikroskopii [Detection of sub-surface microdefects by low-frequency acoustic microscopy]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2015, no. 4, pp. 19–33. (In Russian)
5. Bocharova O.V. On inverse problems of identification the cavity in the elastic cylinder. *IOP Publishing Journal of physics: conference series*, 2014, vol. 490, no. 1, p. 012057. DOI:10.1088/1742-6596/490/1/012057
6. Bocharova O.V., Lyzhov V.A., Andzhikovich I.E. Nekotorye osobennosti volnovykh poley na poverkhnosti tel, oslablennykh nalichiem defektov [Some features of wave fields on the surface of the body, weakened by the presence of defects]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bull. of the Southern Scientific Center RAS], 2013, vol. 9, no. 2, pp. 11–15. (In Russian)
7. Bocharova O.V., Andzhikovich I.E., Vorovich E.I. K probleme issledovaniya poverkhnostnykh volnovykh poley s pomoshch'yu tonkoplenochnykh segnetoelektricheskikh datchikov [To study the problem of surface wave fields using thin-film ferroelectric sensors]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center RAS], 2015, vol. 11, no. 1, pp. 30–35. (In Russian)
8. Sedov A.V. *Modelirovanie ob"ektov s diskretno-raspredelemnymi parametrami: dekompozitsionnyy podkhod* [Simulation of discrete objects with distributed parameters: decomposition approach]. Moscow, Nauka Publ., 2010, 438 p. (In Russian)