

УДК 620.111.3

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-2-17-27

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ В СИСТЕМЕ «СОТОВАЯ МАТРИЦА – КОМПОЗИТ» НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ В ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Асеев Е. М., Калашников Е. В.

Московский государственный областной университет

141014, Московская обл., г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи – экспериментальное изучение сложной системы, сочетающей в себе сотовую структуру, сопряжённую по нормали с композиционной структурой и имеющей дефектность.

Процедура и методы. Рассматривается влияние дефектности сотовой структуры на акустическую эмиссию в системе «сотовая матрица – композит», когда в роли внешнего возмущения выступает изменяющееся температурное поле. Используются методы акустической эмиссии. Вместо нагружения образца внешними силами используется температурное поле. Градиенты температурного поля генерируют механические напряжения в образце, возбуждая акустические поля в образце. Регистрировались акустические сигналы и температура образца.

Результаты. Получены зависимости амплитуд акустических сигналов от времени, в связи с нагреванием образцов с дефектом и без дефекта. А также обнаружено влияние размеров образца на акустическую эмиссию.

Теоретическая и/или практическая значимость. Амплитудные характеристики сигналов акустической эмиссии позволяют контролировать сложные системы при различных температурах и обнаруживать дефекты без использования механического нагружения изделий. Развиваемые методы акустической эмиссии в температурных полях применимы для анализа и контроля сложных инженерных конструкций.

Ключевые слова: структура пчелиных сот, акустическая эмиссия, пьезоэлектрический преобразователь, температура, амплитуда, композит, неразрушающий контроль

EFFECT OF DEFECTS ON HONEYCOMB STRUCTURE IN A 'HONEYCOMB – COMPOSITE MATRIX' SYSTEM ON ACOUSTIC EMISSION IN A CHANGING TEMPERATURE FIELD

E. Aseev, E. Kalashnikov

*Moscow Region State University,
ul. Very Voloshinoi 24, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation*

Abstract

Aim. The purpose is an experimental study of a complex system that combines a honeycomb structure that is normal-conjugated with a compositional structure and has imperfections.

Methodology. The influence of the defectiveness of the honeycomb structure on acoustic emission in the "honeycomb matrix – composite" system, when a changing temperature field acts as an external disturbance, is considered. Acoustic emission methods are used. Instead of loading the sample with external forces, a temperature field is used. Temperature field gradients generate mechanical stresses in the sample, exciting acoustic fields in the sample. Acoustic signals and sample temperature are recorded.

Results. Time dependences of the amplitudes of acoustic signals are obtained by heating samples with and without defects. It is also found that the sample size affects the acoustic emission.

Research implications. The amplitude characteristics of acoustic emission signals make it possible to control complex systems at different temperatures and detect defects without using mechanical loading of products. The developed methods of acoustic emission in temperature fields are applicable to the analysis and control of complex engineering structures.

Keywords: honeycombs structure, acoustic emission, piezoelectric transducer, temperature, amplitude, composite, non-destructive testing, technical diagnostics

Введение

Акустическая эмиссия (далее – АЭ) как вид технического диагностирования и контроля в своём современном виде является одним из эффективных методов исследования дефектности [4–7; 9–11] и качества изделий [14; 15] больших объёмов (ресиверы, шаровые резервуары, трубопроводы). Эти методы используют и для исследования сотовых структур наномасштабов, характерных, например, для растений [8]. Эти же методы применяются к исследованию специальных структур в виде пчелиных сот [12; 13]. Есть ограничения метода в виде влияния шумов на результат, а также необходимости «нагружать» объект контроля. Суть такого метода заключается в том, что при воздействии внешней нагрузки, например, изгибающей силы на исследуемый объект, его дефекты (поры, дислокации, трещины) внутри начинают излучать акустические волны в разных частотных диапазонах и с разными амплитудами становясь, таким образом, источником акустической эмиссии [1; 2]. Частотные зависимости АЭ позволяют идентифицировать типы дефектов. А амплитудные зависимости этих частотных характеристик определяют плотность дефектов определённого типа. Акустико-эмиссионный метод обладает свойствами стационарности и интегральности. Это предполагает

установку нескольких (более трёх) преобразователей акустической эмиссии (далее – ПАЭ), которые могут быть задействованы в триангуляции для поиска и локализации координат источника АЭ [1; 2].

В случае же системы «сотовая матрица – внешний композит» (см. рис. 1) ситуация гораздо более сложная. Наличие многих границ сопряжения может вызывать плохо контролируемые напряжения и приводить к высокому затуханию УЗ либо к большому числу дополнительных источников УЗ-колебаний. Более того, сопряжение сот между собой, их изготовление и сопряжение с композиционной пластиной, нормальной к оси сотовой структуры, не исключает их неидеального исполнения (неидеальность исполнения предполагает неплотное прилегание стенок сот между собой – неоднородность такого прилегания, неоднородность сопряжения сотовой структуры с композиционной пластиной). Это создаёт трудность и неопределённость даже в определении понятия дефектности для такой структуры. Также в повседневных испытаниях нет возможности механически изгибать или сжимать такую конструкцию.

Между тем, известно [3], что изменение температурного поля и возникающие при этом температурные градиенты могут создавать напряжения в телах, возникновение которых будет вызывать акустические колебания. И таким образом манипуляции с температурой и контроль возникающей при этом акустической эмиссии могут служить независимым методом исследования очень сложной системы типа «сотовая матрица – внешний композит».

В таком случае цель настоящей работы состоит в том, чтобы выяснить, как сложная система типа «сотовая матрица – внешний композит» откликается только на температурные изменения.

1. Методика и схема эксперимента

Образцы получены путём распиливания сотовой конструкции с наполнителем из просмоленной бумаги, внешний слой представлял собой угольный композит под слоем краски (см. рис. 1). Этот внешний композит сопряжён с сотовой структурой (рис. 1b). Рассматривали два типа образцов. Первый образец (далее – образец «a») имеет размеры $100 \times 53 \times 30 \text{ mm}^3$, а второй является большим по размерам (образец «b»): $225 \times 95 \times 30 \text{ mm}^3$.



Рис. 1 / Fig. 1. Общий вид образца (a) и размеры сот (b). Сторона соты $C = 3 \text{ mm}$ и $D = 5,2 \text{ mm}$ / (a) General view of the sample and (b) dimensions of the cells. Honeycomb side $C = 3 \text{ mm}$ and $D = 5,2 \text{ mm}$

Источник: составлено авторами.

Изменяющееся температурное поле создаёт градиенты температуры, которые индуцируют внутренние напряжения. В результате в исследуемом образце (1) возникают локальные перестройки, которые становятся источниками дискретной акустической эмиссии (рис. 2).

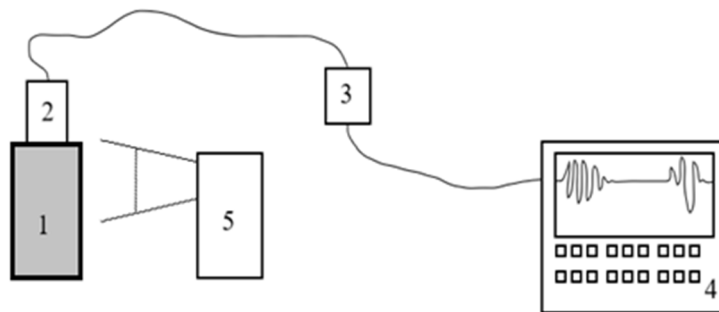


Рис. 2 / Fig. 2. Схема экспериментальной установки: (1) исследуемый образец; (2) пьезоэлектрический преобразователь акустической эмиссии; (3) предусилитель; (4) блок аналого-цифрового преобразователя системы детектирования и обработки сигналов; (5) тепловизор / Scheme of the experimental setup: (1) test sample; (2) piezoelectric acoustic emission transducer; (3) preamplifier; (4) analog-to-digital converter unit of the signal detection and processing system; (5) thermal imager

Источник: составлено авторами.

Сигналы АЭ поступают на вход ПАЭ (2), откуда сигнал в виде напряжения идёт на вход предусилителя (3) и далее на блок аналого-цифрового преобразователя системы детектирования и обработки сигналов (4). Параллельно с этим с помощью тепловизора (5) в режиме реального времени контролируется изменение температуры образца.

В процессе эксперимента использовались: низкочастотные пьезоэлектрический преобразователь акустической эмиссии GT-205, масляная контактная смазка для согласования акустических импедансов образцов и ПАЭ, предусилители ПАЭФ-014, комплекс акустико-эмиссионный измерительный A-Line 32D, тепловизор InfReC R550Pro-D.

В экспериментах образцы первоначально были помещены в морозильную камеру и охлаждались до температуры -10°C , после чего на внешний композитный слой каждого из них ставили по одному пьезоэлектрическому преобразователю акустической эмиссии. Параллельно с приёмом УЗ-волн регистрировалось изменение температурного поля образца. С помощью тепловизора производили измерение температурного поля с частотой 1 кадр в 10 секунд. Регистрировали распределение температурного поля в образцах (a) и (b) и релаксацию температуры.

2. Результаты экспериментов

Первое, на что указывают результаты экспериментов, – это сильная зависимость сигналов акустической эмиссии от размеров исследуемых образцов.

(2а) Поведение бездефектных образцов

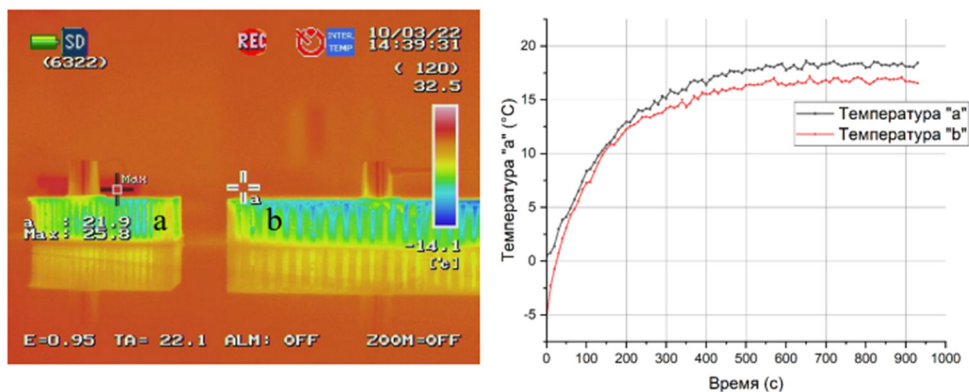


Рис. 3 / Fig. 3. Распределение температурного поля в образцах «a» и «b» (левый рисунок). Искусственных дефектов нет. Релаксация температуры для образцов «a» и «b» (правый рисунок). «a» – малые размеры. «b» – большие размеры / Temperature field distribution in samples “a” and “b” (left figure). There are no artificial defects. Temperature relaxation for samples “a” and “b” (right figure). “a” – small sizes. “b” – large sizes

Источник: составлено авторами

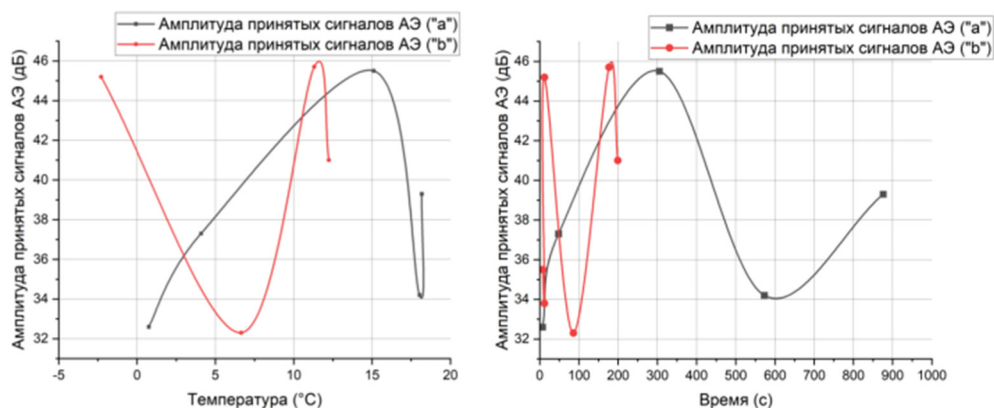


Рис. 4 / Fig. 4. Зависимости амплитуды пришедших на ПАЭ сигналов АЭ от температуры и от времени (до создания искусственных дефектов) / Dependences of the amplitude of the acoustic emission signals that arrived at the acoustic emission transducer on temperature and time (before the creation of artificial defects)

Источник: составлено авторами

Из сопоставления рис. 3 и рис. 4 следует, что большая часть пришедших импульсов лежит в области наибольшей скорости изменения температуры, при этом практически все они пришлись на температурный диапазон $2,5 \div 15,0$ °C, а далее при переходе температуры в насыщение акустическая активность падает.

(2b) Поведение образцов с дефектами

После измерений в каждом образце на одной из бумажных сот с помощью бритвы был введён искусственный дефект – сделан вертикальный надрез (параллельный бумажной соте), и проведены эксперименты по той же схеме. При этом характер распределения температурного поля (см. рис. 5) остался практически таким же. Но зависимости амплитуд пришедших сигналов на преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ) изменился коренным образом (рис. 6). Это изменение проявляется в изменении формы сигнала (для малого образца), а для большого образца сигнал вырождается в точку (см. рис. 6).

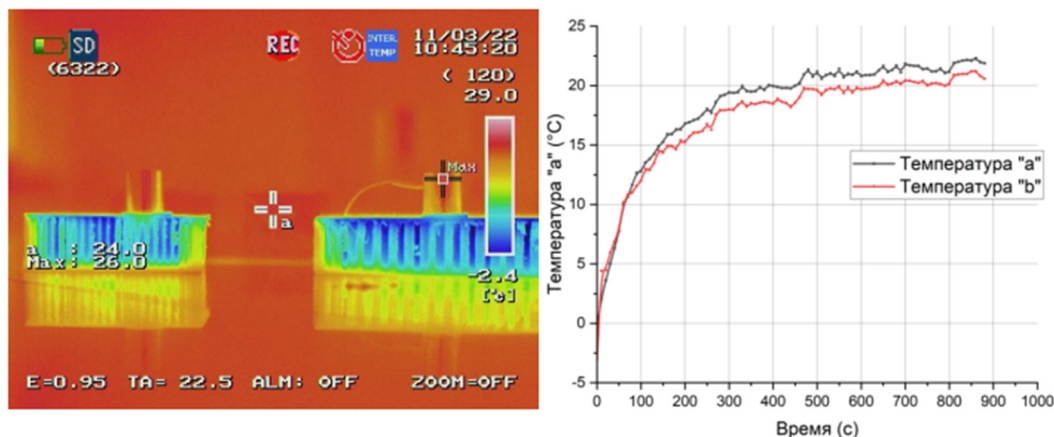


Рис. 5 / Fig. 5. Распределение температурного поля в образцах «a» и «b» (левый рисунок). Введены искусственные дефекты / Temperature field distribution in samples “a” and “b” (left figure). Artificial defects are introduced

Источник: составлено авторами

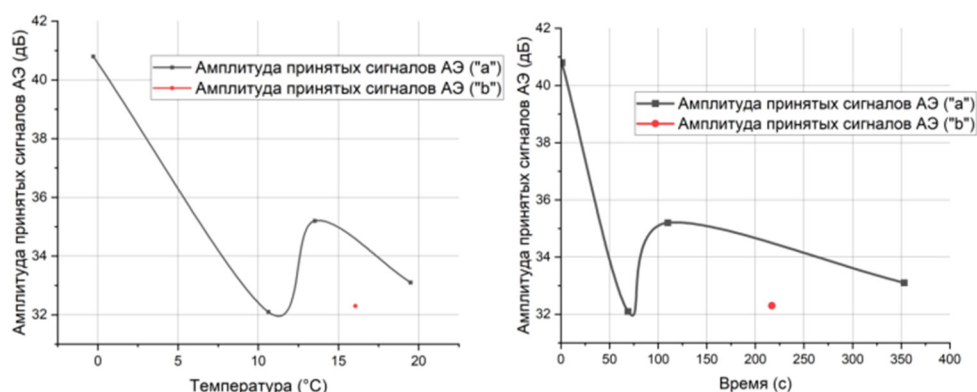


Рис. 6 / Fig. 6. Зависимости амплитуды пришедших на ПАЭ сигналов АЭ от температуры и от времени (после создания искусственного дефекта). Сигнал для большого образца (*b*) вырождается в точку (красная точка) / Dependences of the amplitude of the acoustic emission signals that arrived at the acoustic emission transducer on temperature and time (after the creation of an artificial defect). Signal for large sample (*b*) degenerates to a point (red dot)

Источник: Составлено авторами.

3. Результаты и их обсуждение

Сравнение зависимостей акустического сигнала от температуры на рис. 4 и рис. 6 и от времени обнаруживает несколько важных результатов:

1) Амплитуда принятых сигналов акустической эмиссии очень сильно зависит от размеров испытываемых образцов.

2) Амплитуда принятых сигналов акустической эмиссии (зависимости от температуры и времени) проявляет сильно нелинейный характер.

3) В отсутствии искусственно созданных дефектов формы сигналов акустической эмиссии на начальных этапах (в интервалах температуры от 0 °С до 20 °С, рис. 4) ведут себя противоположным образом. Для малых образцов «*a*» амплитуда сигналов нарастает с минимальных её значений. В то же самое время для больших образцов «*b*» амплитуда сигналов начинается с максимальных значений и резко падает. При этом для малых образцов «*a*» начальная часть числа сигналов акустической эмиссии «растянута». А для больших образцов «*b*» начальная часть числа сигналов акустической эмиссии «сжата».

4) Возникновение дефекта (рис. 6) меняет картину зависимостей. В частности, число сигналов акустической эмиссии для больших образцов теперь вырождается в точку. А для малых образцов начальный участок зависимости амплитуды принятых сигналов, можно сказать, «переворачивается», сохраняя нелинейность, и начинается с максимального своего значения, переходя к минимальному своему значению, затем имеет «горб» возрастания.

Заключение

Установлено, что амплитудные характеристики сигналов акустической эмиссии позволяют контролировать сложные системы при различных температурах и обнаруживать дефекты без использования механического нагружения изделий.

Статья поступила в редакцию 14.03.2022 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бехер С. А., Бобров А. Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии. Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2013. 145 с.
2. Буйло С. И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. 184 с.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. Т. 7. М.: Наука, 1987. 248 с.
4. Acoustic Emission and Ultrasound for Damage Characterization of Concrete Elements / Aggelis D. G., Shiotani T., Momoki S., Hiram A. // ACI Materials Journal. 2009. Vol. 106. No. 6. P. 509–514. DOI: 10.14359/51663333.
5. Evaluation of the characterization of acoustic emission of brittle rocks from the experiment to numerical simulation / Bu F., Xue L., Zhai M., Huang X., Dong J., Liang N., Xu C. // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 498–514. DOI: 10.1038/s41598-021-03910-8.
6. Acoustic Emission from Porous Collapse and Moving Dislocations in Granular Mg-Ho Alloys under Compression and Tension / Chen Y., Ding X., Fang D., Sun J., Salje E. K. H. // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. P. 1–12. DOI: 10.1038/s41598-018-37604-5.
7. Chen Z., Qu J. Dislocation-induced acoustic nonlinearity parameter in crystalline solids // Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 114. Iss. 16. P. 164906–164921. DOI: 10.1063/1.4826523.
8. Cybulska J., Pieczywek P. M., Zdunek A. The effect of Ca²⁺ and cellular structure on apple firmness and acoustic emission // European Food Research and Technology. 2012. Vol. 235. P. 119–128. DOI: 10.1007/s00217-012-1743-6.
9. Acoustic emission source location method and experimental verification for structures containing unknown empty areas / Dong L., Tao Q., Hu Q., Deng S., Chen Y., Luo Q., Zhang X. // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Vol. 32. Iss. 3. P. 487–497. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.01.002.
10. Huang Y., Li K. M. The Effect of Honeycomb Cavity: Acoustic Performance of a Double-leaf Micro Perforated Panel // The Summer Undergraduate Research Fellowship (SURF) Symposium (4 August, 2016, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA) [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/surf/2016/presentations/56/> (дата обращения: 01.02.2022).
11. Kim C. S., Kwun S. I., Lissenden C. J. Influence of Precipitates and Dislocations on the Acoustic Nonlinearity in Metallic Materials // Journal of the Korean Physical Society. 2009. Vol. 55. No. 2. P. 528–532.
12. Acoustic emission analysis of full-scale honeycomb sandwich composite curved fuselage panels / Leone F. A. Jr., Ozevin D., Godinez V., Mosinyi B., Bakuckas J. G. Jr., Awerbuche J., Lau A., Tan T.-M. // 15th International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. Vol. 6934, Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and

- Homeland Security. (San Diego, CA, March, 2008) [Электронный ресурс]. URL: <https://clk.ru/rf7fX> (дата обращения: 01.02.2022). DOI: 10.1117/12.776146.
13. Modal acoustic emission based location method in honeycomb core sandwich structure / Liu Y., Pang B. J., Jia B., Chang Z. Z. // 6th European Conference on Space Debris (Darmstadt, Germany, 22–25 April 2013) [Электронный ресурс]. URL: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc6/paper/18/SDC6-paper18.pdf> (дата обращения: 01.02.2022).
14. Acoustic emission diagnosis system and wireless monitoring for damage assessment of concrete structures / Yoon D.-J., Lee S., Kim C. Y., Seo D.-C. // Proceedings of NDT for Safety (November 07–09, 2007, Prague, Czech Republic). P. 301–308.
15. Acoustic Emission Analysis method for solving problems of damage mechanisms in concrete structures / Zejli A., Khamlichi A., Attajkani S., Ameziane K. // 24^{ème} Congrès Français de Mécanique (Brest, 26 au 30 Août 2019) [Электронный ресурс]. URL: <https://cfm2019.sciencesconf.org/245076/document> (дата обращения: 01.02.2022).

REFERENCES

1. Bekher S. A., Bobrov A. L. *Osnovy nerazrushayushchego kontrolya metodom akusticheskoi emissii* [Fundamentals of non-destructive testing by acoustic emission]. Novosibirsk, Siberian Transport University Publ., 2013. 145 p.
2. Buylo S. I. *Fiziko-mekhanicheskie, statisticheskie i khimicheskie aspekty akustiko-emissionnoi diagnostiki* [Physico-mechanical, statistical and chemical aspects of acoustic emission diagnostics]. Taganrog, Southern Federal University Publ., 2017. 184 p.
3. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Theory of Elasticity*, Vol. 7. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1986. 195 p.
4. Aggelis D. G., Shiotani T., Momoki S., Hiram A. Acoustic Emission and Ultrasound for Damage Characterization of Concrete Elements. In: *ACI Materials Journal*, 2009, vol. 106, no. 6, pp. 509–514. DOI: 10.14359/51663333.
5. Bu F., Xue L., Zhai M., Huang X., Dong J., Liang N., Xu C. Evaluation of the characterization of acoustic emission of brittle rocks from the experiment to numerical simulation. In: *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, pp. 498–514. DOI: 10.1038/s41598-021-03910-8.
6. Chen Y., Ding X., Fang D., Sun J., Salje E. K. H. Acoustic Emission from Porous Collapse and Moving Dislocations in Granular Mg-Ho Alloys under Compression and Tension. In: *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41598-018-37604-5.
7. Chen Z., Qu J. Dislocation-induced acoustic nonlinearity parameter in crystalline solids. In: *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 114, iss. 16, pp. 164906–164921. DOI: 10.1063/1.4826523.
8. Cybulska J., Pieczywek P. M., Zdunek A. The effect of Ca²⁺ and cellular structure on apple firmness and acoustic emission. In: *European Food Research and Technology*, 2012, vol. 235, pp. 119–128. DOI: 10.1007/s00217-012-1743-6.
9. Dong L., Tao Q., Hu Q., Deng S., Chen Y., Luo Q., Zhang X. Acoustic emission source location method and experimental verification for structures containing unknown empty areas. In: *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, vol. 32, iss. 3, pp. 487–497. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.01.002.
10. Huang Y., Li K. M. The Effect of Honeycomb Cavity: Acoustic Performance of a Double-leaf Micro Perforated Panel. In: *The Summer Undergraduate Research Fellowship (SURF) Symposium (4 August, 2016, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA)*. Available at: <https://docs.lib.purdue.edu/surf/2016/presentations/56/> (accessed: 01.02.2022).

11. Kim C. S., Kwun S. I., Lissenden C. J. Influence of Precipitates and Dislocations on the Acoustic Nonlinearity in Metallic Materials. In: *Journal of the Korean Physical Society*, 2009, vol. 55, no. 2, pp. 528–532.
12. Leone F. A. Jr., Ozevin D., Godinez V., Mosinyi B., Bakuckas J. G. Jr., Awerbuche J., Lau A., Tan T.-M. Acoustic emission analysis of full-scale honeycomb sandwich composite curved fuselage panels. In: *15th International Symposium on Smart Structures and Materials & Non-destructive Evaluation and Health Monitoring*. Vol. 6934, *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security*. (San Diego, CA, March, 2008). Available at: <https://clck.ru/rf7fX> (accessed: 01.02.2022). DOI: 10.1117/12.776146.
13. Liu Y., Pang B. J., Jia B., Chang Z. Z. Modal acoustic emission based location method in honeycomb core sandwich structure. In: *6th European Conference on Space Debris (Darmstadt, Germany, 22–25 April 2013)*. Available at: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc6/paper/18/SDC6-paper18.pdf> (accessed: 01.02.2022).
14. Yoon D.-J., Lee S., Kim C. Y., Seo D.-C. Acoustic emission diagnosis system and wireless monitoring for damage assessment of concrete structures. In: *Proceedings of NDT for Safety (November 07–09, 2007, Prague, Czech Republic)*, pp. 301–308.
15. Zejli A., Khamlichi A., Attajkani S., Ameziane K. Acoustic Emission Analysis method for solving problems of damage mechanisms in concrete structures. In: *24^{ème} Congrès Français de Mécanique (Brest, 26 au 30 Août 2019)*. Available at: <https://cfm2019.sciences-conf.org/245076/document> (accessed: 01.02.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Асеев Евгений Михайлович – аспирант кафедры общей физики Московского государственного областного университета;
e-mail: aseevgenij@yandex.ru

Калашников Евгений Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики и информационных технологий Московского государственного областного университета;
e-mail: ekevkalashnikov1@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgenii M. Aseev – Postgraduate Student, Department of General Physics, Moscow Region State University;
e-mail: aseevgenij@yandex.ru

Evgenii V. Kalashnikov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of Computational Mathematics and Information Technology, Moscow Region State University;
e-mail: ekevkalashnikov1@gmail.com

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Асеев Е. М., Калашников Е. В. Влияние дефектности сотовой структуры в системе «сотовая матрица – композит» на акустическую эмиссию в изменяющемся температурном поле // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2022. № 2. С. 17–27.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-1-17-27.

FOR CITATION

Aseev E. M., Kalashnikov E. V. Effect of defects on the honeycomb structure in a 'honeycomb – composite matrix' system on acoustic emission in a changing temperature field. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, no. 2, pp. 17–27.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-1-17-27.