

**Башков О. В., Кхун Хан Хту Аунг**  
**O. V. Bashkov, Khun Han Htoo Aung**

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ И ВНУТРИ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ**

### **STUDIES OF ACOUSTIC EMISSION WAVES EXCITED ON THE SURFACE AND INSIDE ALUMINUM PLATE**

**Башков Олег Викторович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Oleg V. Bashkov** – Doctor of Technical Sciences, Head of Materials Science and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Кхун Хан Хту Аунг** – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Khun Han Htoo Aung** – Postgraduate Student, Materials Science and Technology of New Materials Department Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Данное исследование посвящено моделированию волн акустической эмиссии (АЭ), распространяющихся в пластине, при образовании и распространении трещин. Волны, моделирующие развитие трещин при зарождении и развитии микро- и макродефектов, возбуждались единичным источником Су-Нильсена при изломе грифеля карандаша в различных местах пластины. По результатам вейвлет-анализа сигналов АЭ показано, что форма регистрируемых волн АЭ зависит от видов источников, расстояния и геометрии контролируемого объекта. Исследовано также влияние глубины источника и расстояния распространения на регистрируемые АЭ-волны.

**Summary.** This study is devoted to the predictive modeling of acoustic emission waves due to the energy released during the local restructuring of the structure and the increment of crack propagation in the plate. The waves were excited by a single Hu-Nielsen source to simulate a growing crack and the waves were recorded at various locations. As a result of processing of acoustic emission signals, it is shown that the shape of the recorded AE waves depends on the types of sources, distance and geometry of the controlled object. The influence of the source depth and propagation distance on the registered AE waves is also studied.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, волны Лэмба, источник Су-Нильсена, вейвлет-преобразование.

**Key words:** acoustic emission, Lamb waves, source Hsu-Nielsen, wavelet transform.

УДК 621.9:519.8

#### **Введение**

Благодаря развитию в области физики твёрдого тела, математики, технологий распознавания, сбора и обработки сигналов появилась возможность изучать физико-механические свойства материала без разрушения его структуры. Однако это требует проведения исследований, позволяющих устанавливать связь между структурными изменениями, наблюдаемыми в материале *in situ* и параметрами физических величин, регистрируемых дополнительно в процессе изменений, происходящих в структуре. При возрастающих требованиях к изготовлению различных промышленно опасных объектов, таких как трубопроводы, газовые и нефтехранилища, объекты авиастроения и другие объекты транспорта, актуальным вопросом становится применение современных методов неразрушающего контроля для прогнозирования ресурса не только в процессе эксплуатации, но и на этапе производства с целью снижения стоимости и оценки достаточного уровня качества. Поэтому в последние десятилетия внимание учёных и практиков было обращено на развитие кон-

цепции мониторинга технического состояния (Structural Health Monitoring (SHM)), которая основана на регистрации физических параметров с различных датчиков, установленных на конструкциях, и анализе данных параметров для выявления повреждений и деградации структуры материала. Одним из эффективных методов является метод акустической эмиссии (АЭ). Акустическая эмиссия – явление возникновения и распространения упругих волн за счёт энергии, выделяемой при локальной перестройке структуры материала [1]. Энергия, выделяемая при локальном повреждении материала, обусловлена распространением различных мод колебаний в пластине в виде групповой волны, имеющей различную скорость в зависимости от толщины пластины и частоты волны [2]. Волны Лэмба, определяющие различные моды распространения упругих волн в пластине, применяются в задачах контроля и мониторинга состояния объекта благодаря их малому коэффициенту затухания, что позволяет контролировать не только металлические, но и композиционные материалы. В последнее время можно встретить всё больше работ, посвящённых исследованию волн Лэмба, в том числе теоретических и содержащих численный анализ волн Лэмба при зарождении и распространении трещин [3; 4]. В работах [5; 6] при моделировании распространения волны Лэмба в пластине сигналы АЭ возбуждались единичным источником, имеющим форму Гаусса с различным временем нарастания. В работе [7] выполнены дефектоскопия ударных повреждений в композиционных материалах и анализ механических характеристик металлических материалов при статическом и циклическом нагружениях на основе волн Лэмба [8]. Анализ оптимального размещения пьезоэлектрических преобразователей выполнен в [9; 10]. Однако из-за сложной дисперсии свойств волн Лэмба, необходимо учитывать множество факторов: стабильность толщины клеевого слоя и деградации его свойств [11], амплитудно-частотную характеристику и геометрию датчиков [12], виды источников и их расположение [13]. Таким образом, вид источника и геометрические характеристики канала распространения волны определяют форму волны на определённом расстоянии её регистрации.

Зарегистрированные сигналы АЭ содержат значительный объём информации об источнике формирования, среде распространения упругой волны и местоположении источника. В данной работе проведены исследования по установлению связи между параметрами регистрируемых волн Лэмба и параметрами разрушения структуры материала при возбуждении локальным единичным источником АЭ.

#### **Материалы и методика исследования**

Для проведения испытания были подготовлены пластины алюминиевого сплава Д16 размером 500×600 мм толщиной 1,8 и 7 мм. С целью моделирования развития трещин различного происхождения в различных местах пластины, волны АЭ возбуждались источником Су-Нильсена (излом грифеля карандаша диаметром 0,5 мм). Источник Су-Нильсена является стандартным инструментом, используемым в экспериментах как источник АЭ, и применяется для проверки характеристик датчиков и определения пороговых значений обнаружения сигналов АЭ [14; 15]. В работах [16; 17] представлена информация о важности понимания того, как различия в механических свойствах грифеля карандаша и его диаметре могут влиять на характер регистрируемых тестовых сигналов. Схема проведения испытания, расположения датчика и источников Су-Нильсена показана на рис. 1.

Источник Су-Нильсена, обозначенный красным треугольником, был расположен либо на поверхности пластины на расстоянии 130 мм от края пластины, либо в торце среднего сечения пластины, либо на глубине 3,5 мм на фрезерованной поверхности площадки у края образца (данная фрезерованная поверхность на рисунке не показана). Преобразователь АЭ, являющийся приёмником АЭ-сигналов, поочередно устанавливался в точках, расположенных на расстоянии 90, 150 и 200 мм от края пластины и, соответственно, от источника. Источник Су-Нильсена возбуждался путём излома грифеля карандаша твёрдостью 2Н в указанных выше местах. Сигналы АЭ регистрировались специализированной АЭ-системой, разработанной в ЦКП «Новые материалы и технологии «КНАГУ»».

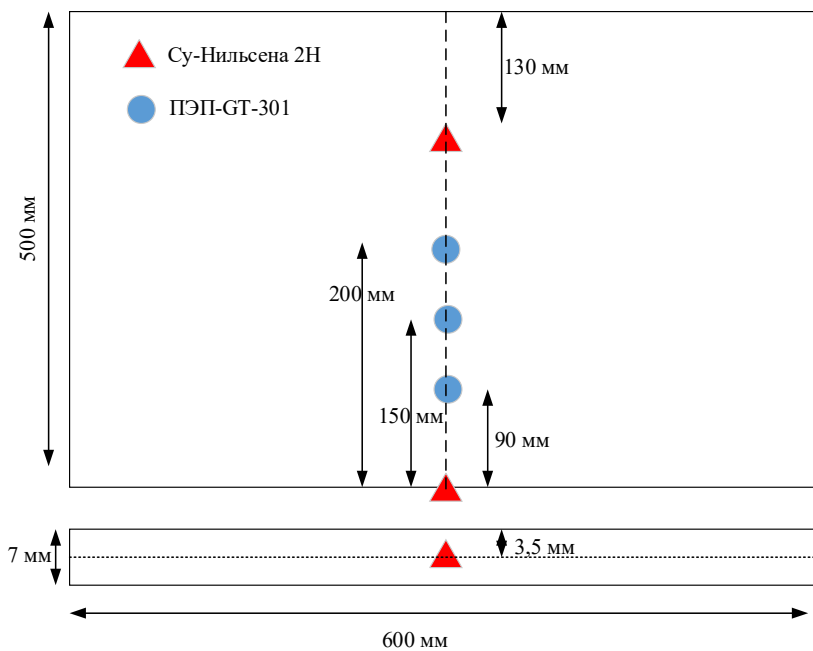


Рис. 1. Схема расположения датчика и источников Су-Нильсена в пластине D16

Для регистрации волны АЭ использовалась 4-канальная система АЭ на основе высокочастотного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 10 МГц. Пьезоэлектрический датчик (GT-301), который является специализированным широкополосным датчиком в диапазоне 50–550 кГц, был установлен на поверхности пластины и подключён к АЭ-системе через предварительный усилитель с коэффициентом усиления 40 дБ.

#### Результаты обработки АЭ-сигналов

Энергия, высвобождаемая при образовании трещин, может быть проанализирована по потенциалам возбуждения (импульс Су-Нильсена), которые регистрируются в виде распространяющихся в пластинах волн Лэмба. Различные моды волны Лэмба, распространяющейся в пластине групповой волны, имеют различную скорость в зависимости от толщины пластины и частоты волны [18]. Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных на различных расстояниях между датчиком и источником АЭ при возбуждении на поверхности, на краю и на глубине 3,5 мм от края пластины толщиной 7 мм, показаны на рис. 2–4.

В результате качественного анализа вейвлет-спектрограмм было обнаружено, что выбранные моды зарегистрированных волн, которые обозначены в виде кривых красного цвета на рис. 2–4, характеризуются как антисимметричные волны  $A_0$  и симметричные волны  $S_0$ . При анализе работ других авторов также известно, что когда сигнал АЭ генерируется монополюсом (излом грифеля 2Н) на поверхности пластины, антисимметричная волна  $A_0$  имеет большую амплитуду частотной компоненты вейвлет-декомпозиции в сравнении с симметричной волной  $S_0$ . При аналогичном возбуждении источника, расположенного на глубине 3,5 мм от края поверхности, наоборот, наибольшую амплитуду частотной компоненты вейвлет-декомпозиции имеет симметричная волна  $S_0$  в сравнении с антисимметричной волной  $A_0$ . Это и наблюдается на вейвлет-спектрограммах и спектрах Фурье-сигналов, зарегистрированных на трёх различных расстояниях (90, 150 и 200 мм) от источника (см. рис. 2–4). Различие в сигналах АЭ, зарегистрированных на разных по отношению к глубине расположения источника местах пластины, заключается в форме зарегистрированных сигналов. Для сигналов, где источник АЭ располагается на краю пластины, а точнее в торце пластины, регистрируются компоненты высоких частот более 200 кГц.

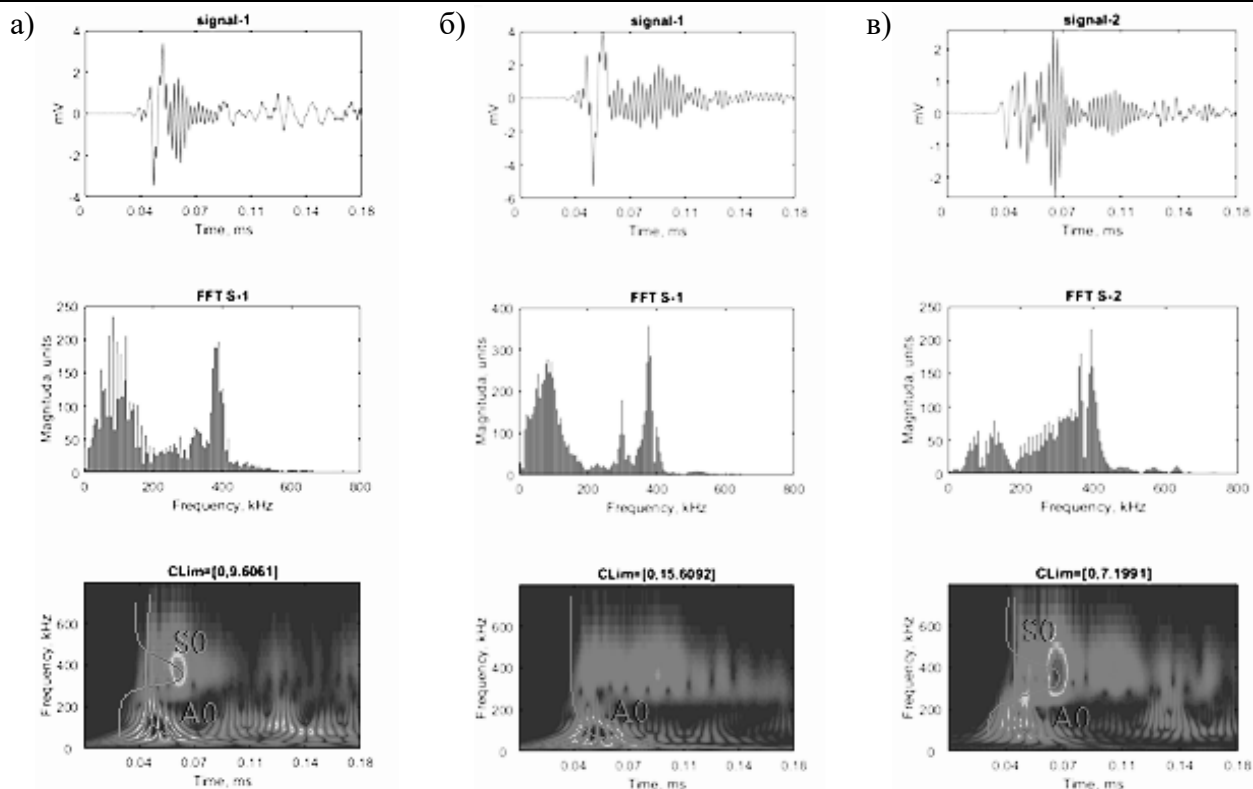


Рис. 2. Результаты обработки сигналов на расстоянии 90 мм на разных местах источников АЭ, зарегистрированных в пластине толщиной 7 мм: а – на поверхности; б – на краю; в – на глубине 3,5 мм от края

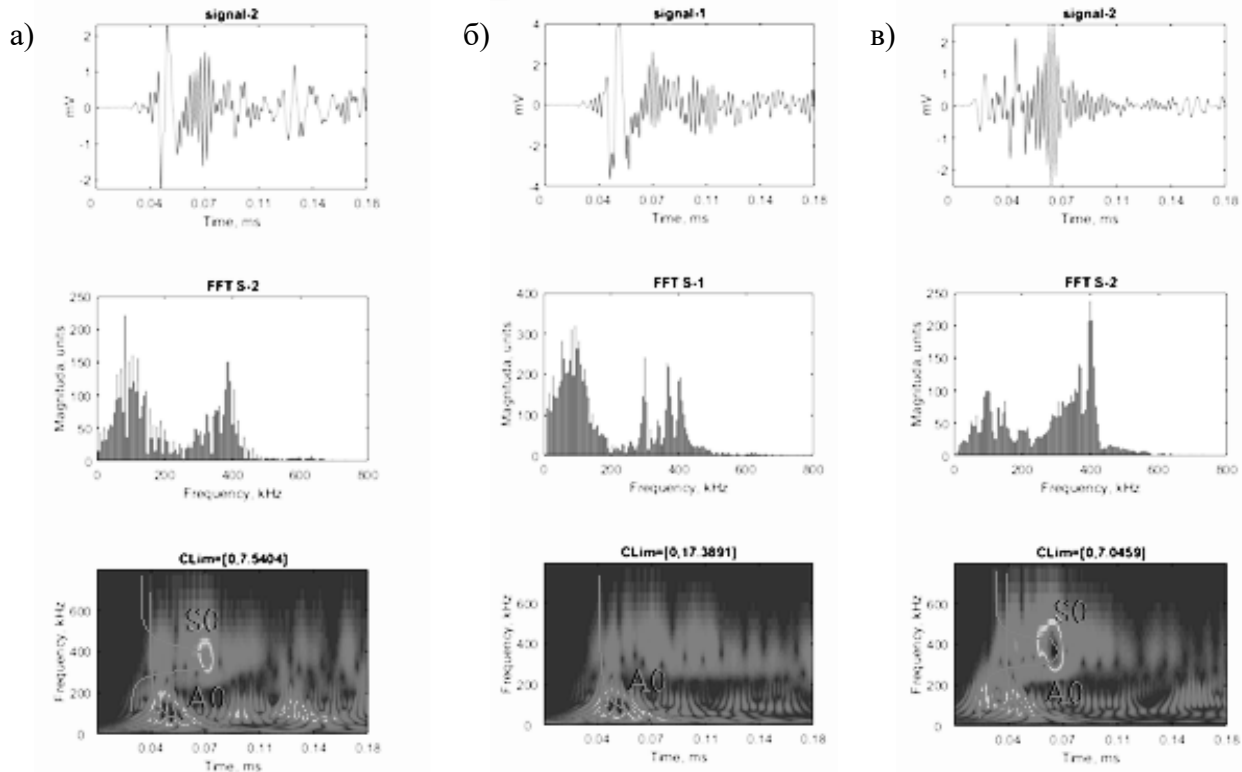


Рис. 3. Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных на расстоянии 150 мм от приёмника в пластине толщиной 7 мм, при расположении приемника: а – на поверхности; б – на краю; в – на глубине 3,5 мм от края

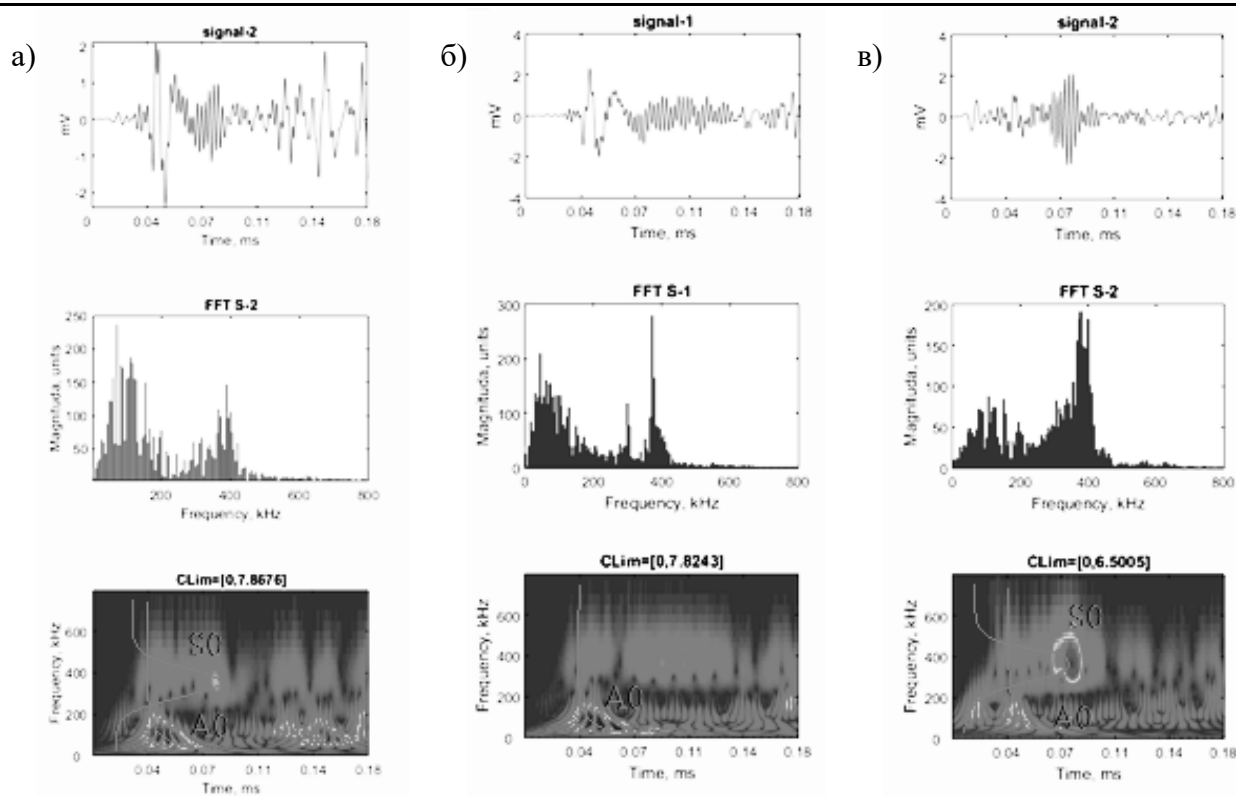


Рис. 4. Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных на расстоянии 200 мм от приёмника в пластине толщиной 7 мм, при расположении приемника:  
 а – на поверхности; б – на краю; в – на глубине 3,5 мм от края

Сигнал имеет несколько повторных осцилляций с длительным высокочастотным «послезвучанием» на частоте близкой к 400 кГц, как видно по вейвлет-спектрограммам, например, в диапазоне времени от 0,06 до 0,11 мс (см. рис. 2, б). На Фурье-спектре видно, что пики осцилляций наблюдаются в частотах 300 и 380 кГц (см. рис. 2, б и 4, б), на расстоянии 150 мм от источника отмечено также на частоте 410 кГц (см. рис. 3, б). В результате на основании анализа компонент вейвлет-декомпозиции на частотах 300 и 380 кГц на частотно-временной спектрограмме можно определить источник АЭ, определяющий различную форму зарегистрированных сигналов и выполнить классификацию источников АЭ. На вейвлет-спектрограммах, соответствующих расположению источника на поверхности (см. рис. 2–4, а) и на глубине 3,5 мм от края поверхности (см. рис. 2–4, в), наблюдается увеличение временной задержки между амплитудой антисимметричной и симметричной волн в виде смещения вправо яркого пятна на частоте 380 кГц с ростом расстояния между излучателем и приёмником.

В связи с тем что при толщине пластины 1,8 мм оказалось затруднительным подготовить площадку, расположенную на глубине, равной половине толщины, анализировались только сигналы АЭ, зарегистрированные при возбуждении волны на поверхности пластины. Для сигналов, зарегистрированных в пластине толщиной 1,8 мм (см. рис. 5), отмечено отличие Фурье-спектров и вейвлет-спектрограмм от сигналов в пластине толщиной 7 мм. Устойчивый максимум магнитуды на частоте 350 кГц наблюдается для различных расстояний установки источника относительно приёмника. На вейвлет-спектрограмме отчётливо наблюдается форма нелинейной зависимости, по форме схожей с формой дисперсионной кривой скорости антисимметричной волны А0.

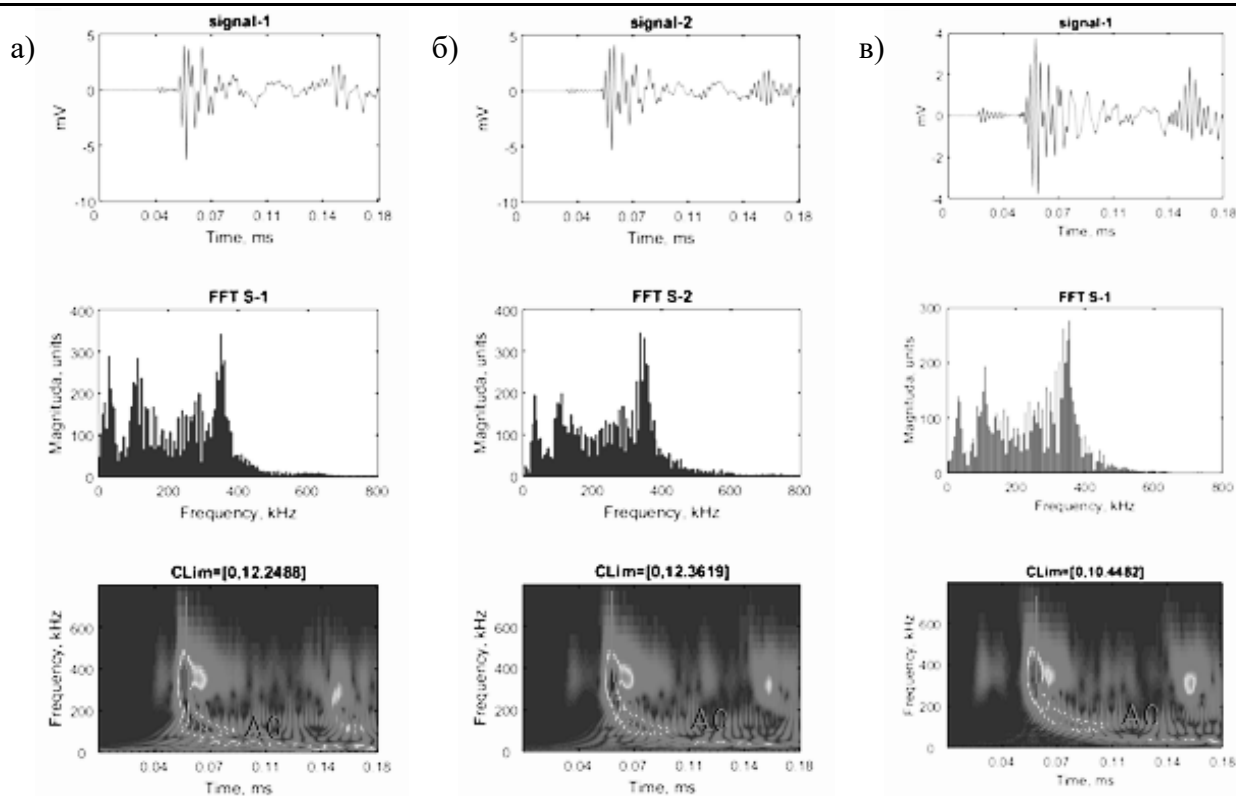


Рис. 5. Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных в пластине толщиной 1,8 мм при расположении источника от приёмника на расстоянии: а – 90 мм; б – 150 мм; в – 200 мм

### Заключение

В результате качественного и количественного анализа видно, что вид источника и геометрические характеристики канала распространения волны определяют форму волны на определённом расстоянии регистрации от её источника. В работе исследованы особенности АЭ-сигналов, зарегистрированных при распространении ультразвуковых волн в листовом металле с использованием пьезоэлектрических датчиков, отмечено отличие спектральных составляющих сигналов АЭ от места расположения источника по глубине возбуждения. Результаты анализа можно использовать для дефектоскопии, идентификации и классификации дефектов на основе особенностей регистрируемой волны Лэмба.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / О. В. Башков, С. В. Панин, П. С. Любутин, А. В. Бяков, С. Рамасуббу. – Томск: Изд-во национального исследовательского Томского политехнического университета, 2014. – 301 с.
2. Zhongqing Su and Lin Ye, Identification of Damage using Lamb Waves, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol. 48. 2009. P. 346.
3. M. F. Haider, V. Giurgiutiu, B. Lin, Yu. L., Simulation of lamb wave propagation using excitation potentials, Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. V.6A. № PVP2017 – 66074. P.7.
4. M. F. Haider, V. Giurgiutiu, A Helmholtz Potential Approach to the Analysis of Guided Wave Generation during Acoustic Emission Events, Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, 1(2), 021002.
5. Кхун, Х. Х. Моделирование акустических волн в пластинах при возбуждении источниками с различной длительностью фронта волны / Х. Х. Кхун, Ф. Вао, О. В. Башков // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре, 2018. – С. 75-78.

6. Khon H., Bashkov O. V., Zolotareva S. V., Solovev D. B. Modeling the propagation of elastic ultrasonic waves in isotropic and anisotropic materials when excited by various sources // *Materials Science Forum*. – 2018. – V. 945. – P. 926-931.
7. G. R Markus Sause, *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*, Springer Series in Materials Science 242. Springer, 2016.
8. Применение ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба для контроля состояния образцов алюминиевого сплава в96ц3т12 / М. В. Бурков, А. В. Еремин, П. С. Любутин, А. В. Бяков, С. В. Панин // *Дефектоскопия*. – 2017. – № 12. – С. 3-15.
9. Lee B. C., Staszewski W. J. Sensor location studies for damage detection with Lamb waves. – *Smart Materials and Structures*, 2007, V. 16, Iss. 2, P. 399-408.
10. A. M. Zelenyak, M. A. Hamstad, G. R Markus Sause. Finite Element Modeling of Acoustic Emission Signal Propagation with Various Shaped Waveguides. 31<sup>st</sup> Conference of the European Working Group on Acoustics Emission (EWGAE). – 2018.
11. M. G. R. Sause, S. Horn. Simulation of Acoustic Emission in Planar Carbon Fiber Reinforced Plastic Specimens. *J. Nondestruct Eval.* –V. 29. 2010. P. 123-142.
12. Kanji Ono. Rayleigh Wave Calibration of Acoustic Emission Sensors and Ultrasonic Transducers. *Sensor*. – No. 19. 3129. 2019.
13. E. Ahn, H. Kim, S. H. Sim, S. W. Shin, J. S. Popovics, M. Shin, Surface-wave based model for estimation of discontinuity depth in concrete. *Sensors* 2018, 18, 2793.
14. Nielsen, *Acoustic Emission Source based on Pencil Lead Breaking*, The Danish Welding Institute Publication: Copenhagen, Danmark. 1980. P. 15-18.
15. Sause, M. G. R., & Hamstad, M. A. (2018). Numerical modeling of existing acoustic emission sensor absolute calibration approaches. *Sensors and Actuators A: Physical*, 269, 294-307.
16. G. R Markus Sause, Investigation of Pencil-lead Breaks as Acoustic Emission Source, *J. Acoustic Emission*. V. 29. 2011. P. 184-196.
17. Разработка и испытание лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии / С. В. Панин, А. В. Бяков, В. В. Гренке, И. В. Шакиров, О. В. Башков // *Автоматрия*. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 115-128.
18. H. Lamb. On Waves in an Elastic Plate. *Proceedings of the Royal Society, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 93. 1917. P. 114-128.