

На правах рукописи



Кхун Хан Хту Аунг

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ
В ПЛАСТИНАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16 И 1163
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Специальность 05.16.09 — Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов»

Научный руководитель - Башков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Плотников Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный университет», г. Барнаул

Коневцов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск

Защита состоится 27 апреля 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КНАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте https://sovnet.knastu.ru/diss_defense/show/160.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Проценко Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Большинство конструкций выполняются в форме пластин или элементов, созданных из пластин (крыло самолета, трубопроводы, сосуды). Повреждения или структурные изменения материалов в данных конструкциях инициируются дефектами на низких уровнях деформации, могут развиваться в значительных масштабах и быстро приводить к разрушению. В результате деградации структуры в конструкционных материалах происходит изменение свойств, что непременно приводит к возникновению макродефектов типа усталостных трещин, развивающихся при циклических нагрузках, которые могут привести к катастрофическим последствиям. Для предотвращения непредвиденного разрушения важно своевременно выявлять характер структурных изменений, происходящих в материалах.

Таким образом, исследование процесса накопления повреждений является одной из важных задач при определении структурного состояния материалов и остаточного ресурса конструкций. Для решения данных задач необходимо установление связи между механизмами разрушения, протекающими в материалах в процессе воздействия эксплуатационных нагрузок и свойствами материалов, а также создание модели, описывающей структурную деградацию в процессе деформации исследуемых объектов. Одним из решений поставленных задач является разработка методик интегральной оценки поврежденности, позволяющих получать качественную и количественную информацию о структурном изменении состояния конструкции в реальном времени развития деформации или разрушения.

Информативным методом анализа структурных изменений в материалах в реальном времени развития пластической деформации и разрушения является метод акустической эмиссии (АЭ). Он несет в себе информацию о локальном развитии дефектов, механизмах и особенностях разрушения и степени их опасности. Волны АЭ, распространяясь в пластинах, испытывают существенную трансформацию из-за дисперсии скорости звука волн Лэмба. Поиск методов анализа волн в пластинах конструкционных материалов является актуальной задачей в связи с необходимостью достоверной оценки механизма разрушения по характеру регистрируемых сигналов АЭ.

Степень проработанности темы

Большой вклад в развитие теоретических и практических исследований основ анализа АЭ при деформации и разрушении материалов внесли такие российские и зарубежные ученые, как В.М. Баранов, Г.А. Бигус, В.С. Бойко, В.В. Болотин, С.И. Буйло, Ю.Б. Дробот, В.И. Иванов, Д.Л. Мерсон, Г.Б. Муравин, В.В. Муравьев, Н.А. Семашко, Л.Н. Степанова, К. Оно, А. Грин, М. Хамстед, Маркус Г.Р. Саус, Д. Кайзер и другие. В большинстве научных работ описаны теоретические аспекты, моделирование разрушения материалов и

распространения АЭ волн в материалах, обработки АЭ сигналов, зарегистрированных при разрушении, и причины их происхождения.

Цель диссертационной работы заключается в установлении закономерностей эволюции структурных изменений, выявляемых при развитии трещин в материалах пластин из алюминиевых сплавов, на основе применения метода акустической эмиссии.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка математических моделей волн АЭ, распространяющихся в пластинах алюминиевых сплавов при развитии в них локальных повреждений.

2. Проведение экспериментальных исследований развивающихся повреждений в пластинах алюминиевых сплавов Д16 и 1163, направленных на анализ и разработку критериев идентификации регистрируемых сигналов АЭ по видам источников разрушения.

3. Разработка методики оценки характера развивающихся дефектов в пластинах алюминиевых сплавов Д16 и 1163 на основе спектральных методов Фурье и вейвлет-анализа сигналов АЭ.

Объектом исследования являются структура и повреждения в материалах пластин конструкционных сплавов 1163 и Д16. **Предметом** исследований являются закономерности развития повреждений в материалах пластин алюминиевых сплавов Д16 и 1163 на основе анализа зарегистрированных сигналов акустической эмиссии.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана модель идентификации типов дефектов в виде трещин, развивающихся в пластинах алюминиевых сплавов, на основе параметров регистрируемых сигналов АЭ.

2. Установлена связь между микротвердостью материала в устье трещины, развивающейся в пластине алюминиевого сплава 1163, и расчетным параметром АЭ, определяемым как отношение энергий частотных диапазонов Фурье спектра компонент вейвлет преобразования сигнала АЭ.

3. Разработан критерий идентификации типа развивающегося дефекта, характеризуемого структурным состоянием и совокупностью свойств материала как источника АЭ и регистрируемого в пластине алюминиевого сплава на различном расстоянии от приемника АЭ.

Практическая ценность диссертации заключается в разработке методики оценки свойств среды (пат. № 2737235 С1G01N РФ), являющейся источниками АЭ, генерируемыми в результате образования и развития дефектов типа трещин, находящихся на различных расстояниях от приемника АЭ, основанная на численном анализе отношения энергии частотных компонент, полученных в результате вейвлет разложения сигналов АЭ, зарегистрированных при развитии дефектов в пластинах конструкционных материалов. Результаты научной работы были внедрены в учебный процесс при курсовом и дипломном проектировании и использованы при чтении курсов на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов». Методики, изложенные в

патенте и программе для ЭВМ, были использованы при отработке управляющих программ процесса листовой обтяжки на прессе ACB «Loire FET 1500-6000/6200».

На защиту выносятся:

1. Методика обработки и критерии анализа дефектов, развивающихся в структуре материалов и характеризующих различные типы разрушения, на основе параметров сигналов АЭ, регистрируемых в пластинах из материалов Д16 и 1163.

2. Установленные зависимости между видами повреждений, характеризующих механизмы разрушения, а также твердостью локальной зоны развивающихся дефектов типа трещин в структуре материала пластин алюминиевых сплавов Д16 и 1163 и параметрами сигналов АЭ, регистрируемых при распространении волн АЭ в пластинах.

3. Методика идентификации типов развивающихся повреждений в пластинах алюминиевых сплавов Д16 и 1163 на основе анализа зарегистрированных сигналов АЭ, распространяющихся в пластинах волн Лэмба.

Методология и методы исследования

В работе использовались современные методы исследования структуры материалов и эволюции структурных изменений при механическом воздействии на материалы. Экспериментальные исследования проводились на базе оборудования центра коллективного пользования научным оборудованием «Новые материалы и технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». Механические испытания для формирования усталостных трещин выполнялись на магнитодинамической установке для циклических испытаний. Измерение твердости выполнялось на микротвердомере НМV-2. Регистрация и анализ сигналов акустической эмиссии выполнялись с использованием системы для регистрации акустической эмиссии A-Line 32D Лель, системы на базе АЦП Adlink PCI-9812 и программного обеспечения AE Pro-2.0. Для компьютерного моделирования и расчета результатов экспериментальных исследований использовалось программное обеспечение Abaqus, MS Excel, Matlab.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлена применением современных методов исследования в материаловедении (оптическая и электронная микроскопия, методы механических испытаний, метод акустической эмиссии, методы анализа экспериментальных данных и методы моделирования), корректностью постановки задач и обоснованным выбором материалов исследования, достаточным объемом экспериментальных данных и обоснованностью представленных результатов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на отчетной конференции аспирантов Республики Союз Мьянма (г. Комсомольск-на-Амуре, 2016 г.); LVIII международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Пермь, 2017 г.); 47-ой научно-технической конференции студентов и аспирантов (г. Комсомольск-на-Амуре, 2017 г.); во Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (г. Тольятти, 2018 г.); международной научной конференции «Far East Con-2018» (г. Владивосток, 2018 г.); 33rd European Conference on Acoustic Emission Testing, EWGAE (г. Париж, 2018 г.); XXI Краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов, секция «Технические и химические науки» (г. Хабаровск, 2019 г.); XVII региональной научной конференции «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование» (г. Благовещенск, 2019 г.); международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2018 г., 2019 г.); международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (ICMTMTE 2019)» (г. Севастополь, 2019 г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2018 г., 2019 г., 2020 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и пути развития промышленности: техника и технологии» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2020 г.).

Публикации

По результатам исследований опубликовано 16 работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 4 публикаций в зарубежных изданиях, входящих в перечни Web of Science или Scopus, 7 публикаций в журналах, сборниках научных трудов и трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, получен один патент на изобретение, получены два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.16.09 Материаловедение (в машиностроении).

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне и практической значимости соответствует паспорту специальности 05.16.09 Материаловедение (по отраслям) по следующим пунктам:

- 1) установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды;
- 2) разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях;

Участие в научных проектах

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского научного фонда в рамках проекта № 16-19-10149 и фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-38-90318.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, проведении экспериментальных исследований и их анализе, подготовке публикации и формировании выводов по работе.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четыре глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержит 140 страницы основного текста, включая 8 таблиц, 59 рисунок и список литературы из 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научных исследований, сформулирована цель и определены задачи работы. Показана научная новизна, практическая значимость и апробация полученных результатов.

В первой главе приведен анализ современного состояния способов применения АЭ для регистрации повреждений в материалах по теме диссертации. На основании анализа по результатам обзора современного состояния способов применения АЭ по теме диссертации изложена цель работы, сформулированы основные задачи исследования, необходимость выполнения практических исследований, проанализированы способы анализа результатов работы.

Во второй главе приведено описание материалов, разработан план и приведены методики выполнения исследований. Выполнен анализ моделей распространения волн Лэмба в пластинах различной толщины. В качестве материала для исследований были выбраны пластины из алюминиевых сплавов Д16 и 1163.

Экспериментальные исследования были разделены на две части. Первая часть исследований была направлена на разработку критериев идентификации развивающихся в материалах дефектов как источников АЭ, инициируемых изломом карандаша (источника Су-Нильсена) и основана на анализе волн Лэмба, распространяющихся в металлических пластинах различной толщины. Излом грифеля карандаша на поверхности материала является стандартным инструментом, используемым в экспериментах как источник АЭ. Разрушение грифеля карандаша различной твердости на поверхности материала используется в данной части работы для исследования особенности распространения волн в исследуемых образцах, определения характеристики регистрируемых сигналов АЭ и моделирования развития трещин различного происхождения в различных местах пластины как показаны на рисунке 1(а).

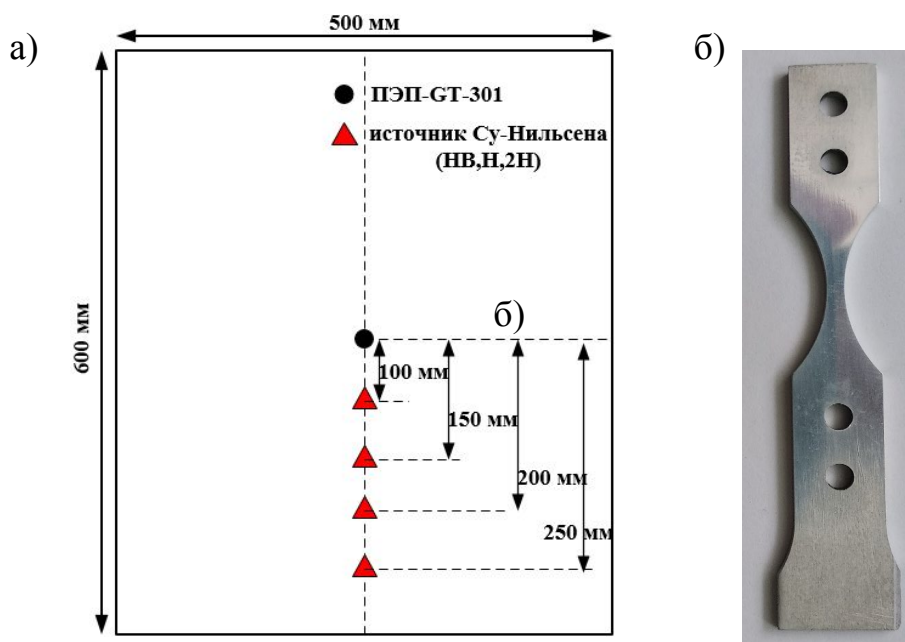


Рисунок 1 – Образцы для испытаний: а – пластина из сплава Д16 со схемой размещения на ней приемника и источников АЭ; б – образец сплава 1163 для испытаний

Вторая часть исследований была направлена на практическое использование разработанного способа идентификации источников АЭ. Для исследования и идентификации источников волн АЭ, распространяющихся в пластине Д16 при раскрытии реальных усталостных трещин, выращенных в образцах алюминиевого сплава 1163 (см. рисунок 1, б). Развитие магистральных трещин инициировалось единичными импульсами кратковременной нагрузки при приложении изгибающего момента к образцам в процессе испытания.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по распространению волн АЭ в пластинах Д16 при симулировании повреждений. Возбуждение волн АЭ осуществлялось изломом грифеля карандаша различной твердости (источник Су-Нильсена), характеризующим различные типы источников АЭ. Данная глава содержит две серии экспериментальных исследований и испытаний. Первая серия предварительных исследований была направлена на разработку критериев оценки типа источника и выполнялась при возбуждении одним источником, находящимся на различном расстоянии от приемника. Анализ основан на анализе особенностей регистрируемых волн Лэмба.

Результаты обработки сигналов, зарегистрированных на различных расстояниях между преобразователем акустической эмиссии (ПАЭ) и источником АЭ, показаны на рисунке 2. Источники были сгенерированы изломом грифеля карандаша твердостью НВ. Вейвлет-спектр сигнала АЭ для источника, который отстоит от ПАЭ на 250 мм, состоит из двух волн: прямой волны и отраженной волны, обозначенных кружками на рисунке 2, в, г. В результате анализа вейвлет-спектрограмм было обнаружено, что выбранные

моды зарегистрированных волн, которые обозначены как эллипсы на рисунке 2, характеризуются как антисимметричные волны.

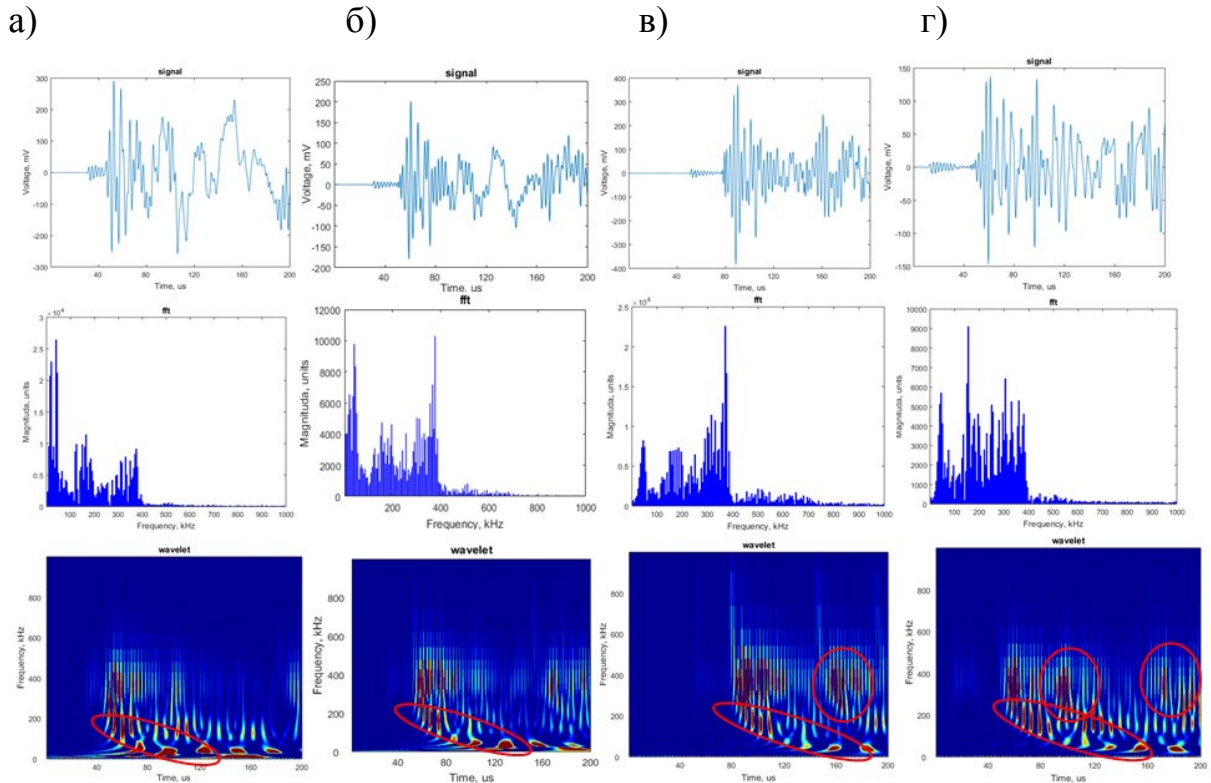


Рисунок 2 – Результаты обработки сигналов на разных расстояниях между датчиком и источником в пластине Д16 толщиной 1,8 мм:
а – 100 мм; б – 150 мм; в – 200 мм; г – 250 мм

Кривые на рисунке 3, а были построены в соответствии с максимумами интенсивности вейвлет-коэффициентов, которые были охарактеризованы как антисимметричные волны.

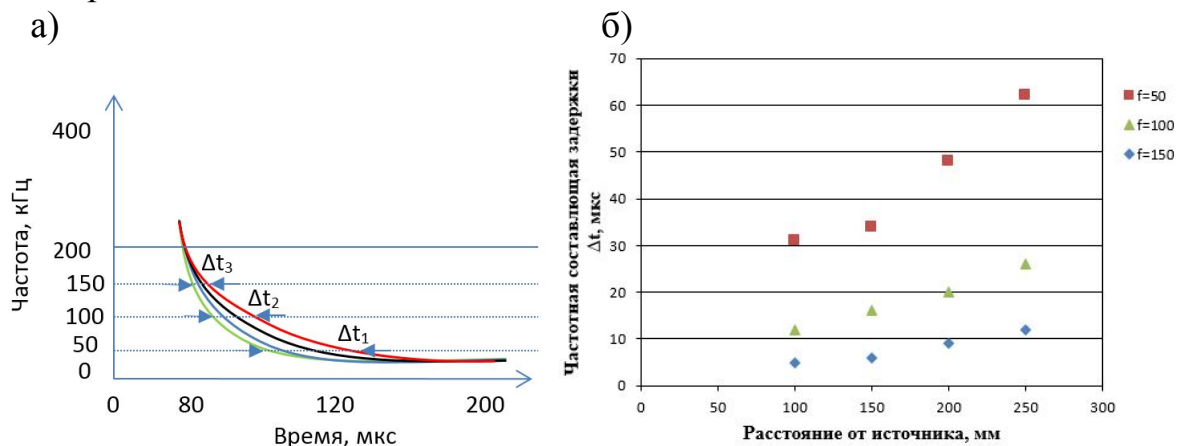


Рисунок 3 – Результаты регистрации антисимметричной моды волны Лэмба в пластине Д16 толщиной 1.8 мм: а – консолидация максимумов вейвлет-коэффициентов; б – зависимость задержки компоненты A_0 от расстояния

Из рисунка 3 можно установить, что с увеличением расстояния до источника АЭ время задержки антисимметричной компоненты волны Лэмба A_0 уменьшается с увеличением частотной составляющей данной задержки.

Сигналы АЭ и их Фурье спектры, которые были зарегистрированы ПАЭ на расстоянии 150 мм от источников, возбуждаемых при изломе грифеля различной твердости, приведены на рисунке 4. Вид сигналов АЭ, зарегистрированных на расстоянии 150 мм от источников твердостью НВ, Н и 2Н, и их Фурье спектры имеют высокую степень сходства (см. рисунок 4).

При качественном выявлении типа источника по виду графиков сигналов АЭ и их спектров Фурье, подобные сигналы можно отнести к однотипным, не имеющим между собой существенных различий. Для зарегистрированных сигналов АЭ был выполнен дискретный вейвлет-анализ и получены компоненты дискретного вейвлет-преобразования для шести уровней декомпозиции.

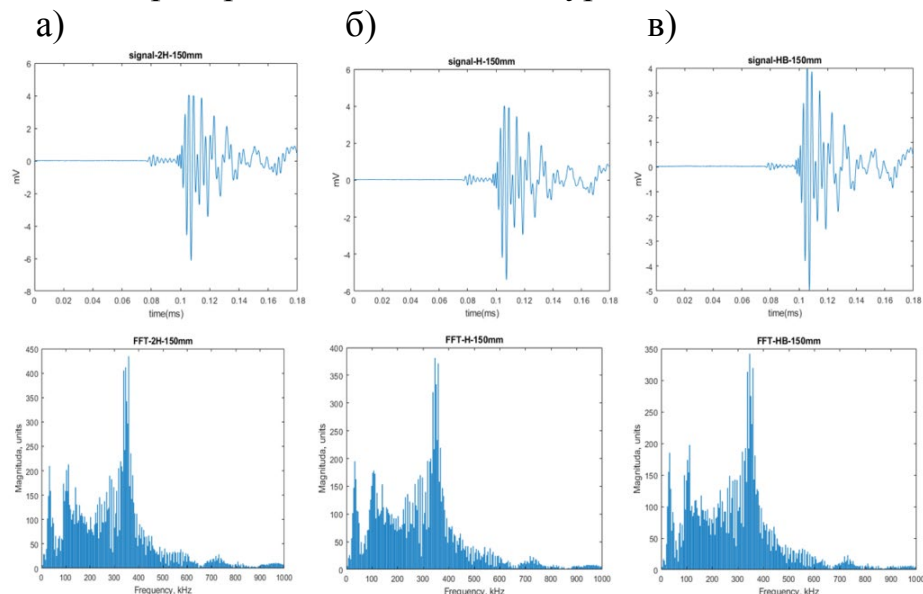


Рисунок 4 – Сигналы АЭ и их Фурье спектры, зарегистрированные в пластине Д16 толщиной 1.8 мм на расстоянии 150 мм от источников АЭ, возбуждаемых источником Су-Нильсена различной твердости грифеля карандаша:

а – твердость 2Н; б – твердость Н; в – твердость НВ

На рисунке 5 показаны графики дискретного вейвлет-преобразования сигналов АЭ, зарегистрированных на расстоянии 150 мм от источников, возбуждаемых при изломе грифелей карандаша твердостью 2Н, Н и НВ для шести уровней вейвлет-декомпозиции. Из графиков на рисунке 5 видно, что декомпозиции второго, третьего и четвертого уровней имеют отдельные характерные различия. Для каждой компоненты вейвлет-декомпозиции рассчитывали энергию по формуле

$$E_{\text{АЭ}} = \frac{1}{f_s} * \sum x_i^2,$$

где $E_{\text{АЭ}}$ – энергия компоненты сигнала; f_s – частота дискретизации; x_i – текущее дискретное значение компоненты вейвлет декомпозиции.

Изменение численного значения энергии частотной компоненты для отдельно взятого источника с определенной твердостью от расстояния до приемника АЭ является закономерным. Для частотной компоненты вейвлет-декомпозиции четвертого уровня отмечен монотонный характер изменения энергии отдельных частотных диапазонов сигнала АЭ.

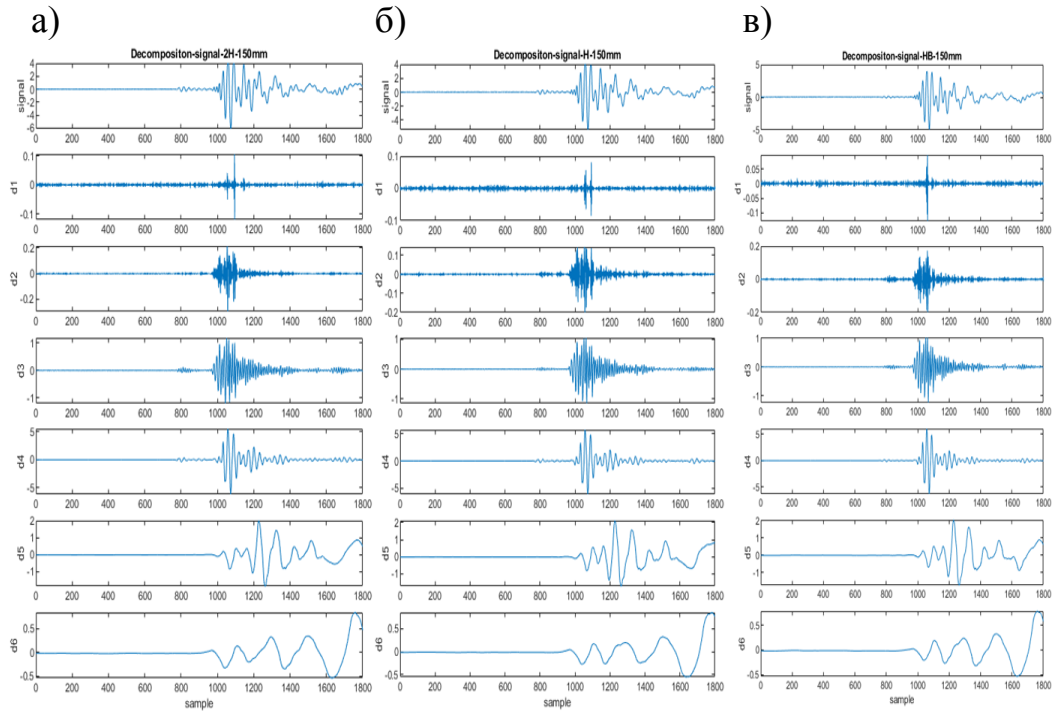


Рисунок 5 – Вейвлет разложение сигнала АЭ, зарегистрированных в пластине Д16 толщиной 1.8 мм на расстоянии 150 мм при изломе карандаша различной твердости: а – 2Н; б – Н; в – НВ

Это обосновано тем, что четвертый уровень вейвлет-декомпозиции соответствует по частоте приблизительно середине частотного диапазона регистрируемых сигналов АЭ и для частоты дискретизации аналого-цифрового преобразования регистрирующей АЭ системы $f_d = 5$ МГц составляет 253 кГц.

Для установления зависимости энергии частотного диапазона от расстояния до приемника АЭ было выполнено преобразование Фурье и построен Фурье спектр для частотной компоненты вейвлет-декомпозиции четвертого уровня каждого из сигналов АЭ (см. рисунок 6, а). На полученном Фурье спектре выполнено разделение на два частотных диапазона с границей на частоте $f_g = 300$ кГц, расположенной между двумя пиками частотных компонент спектра, характеризующих симметричную и антисимметричную моды волны Лэмба. Частотные диапазоны слева и справа от границы f_g выбраны равными по 100 кГц для снижения влияния шумов на результаты.

Расчет энергии каждого из двух частотных диапазонов выполнялся по формуле

$$E_i = \int_{f_1}^{f_2} f f t(d4(x_i))^2 dx,$$

где E_i – энергия частотного диапазона; E_1 – энергия частотного диапазона слева от границы f_g между $f_1 = 200$ кГц и $f_2 = 300$ кГц; E_2 – энергия частотного диапазона справа от границы f_g между $f_1 = 300$ кГц, $f_2 = 400$ кГц; $d4(x_i)$ – компонента вейвлет-декомпозиции четвертого уровня; fft – Фурье преобразование сигнала.

Для рассчитанных значений энергии E_1 и E_2 найдено их отношение E_1/E_2 , показывающее вклад в частотную компоненту составляющих сигнала. Рассчитанные значения отношения E_1/E_2 для различных значений твердости грифеля карандаша как источника АЭ и различных расстояний между источником АЭ и приемником при многократном повторении эксперимента приведены на рисунке 6, б. Их значения умещаются от расстояния и от значения твердости (см. рисунок 6, в). По диаграмме зависимости отношения E_1/E_2 от расстояния между источником АЭ и приемником (см. рисунок 6, б) определяют тип источника, расположенного на определенном расстоянии от приемника.

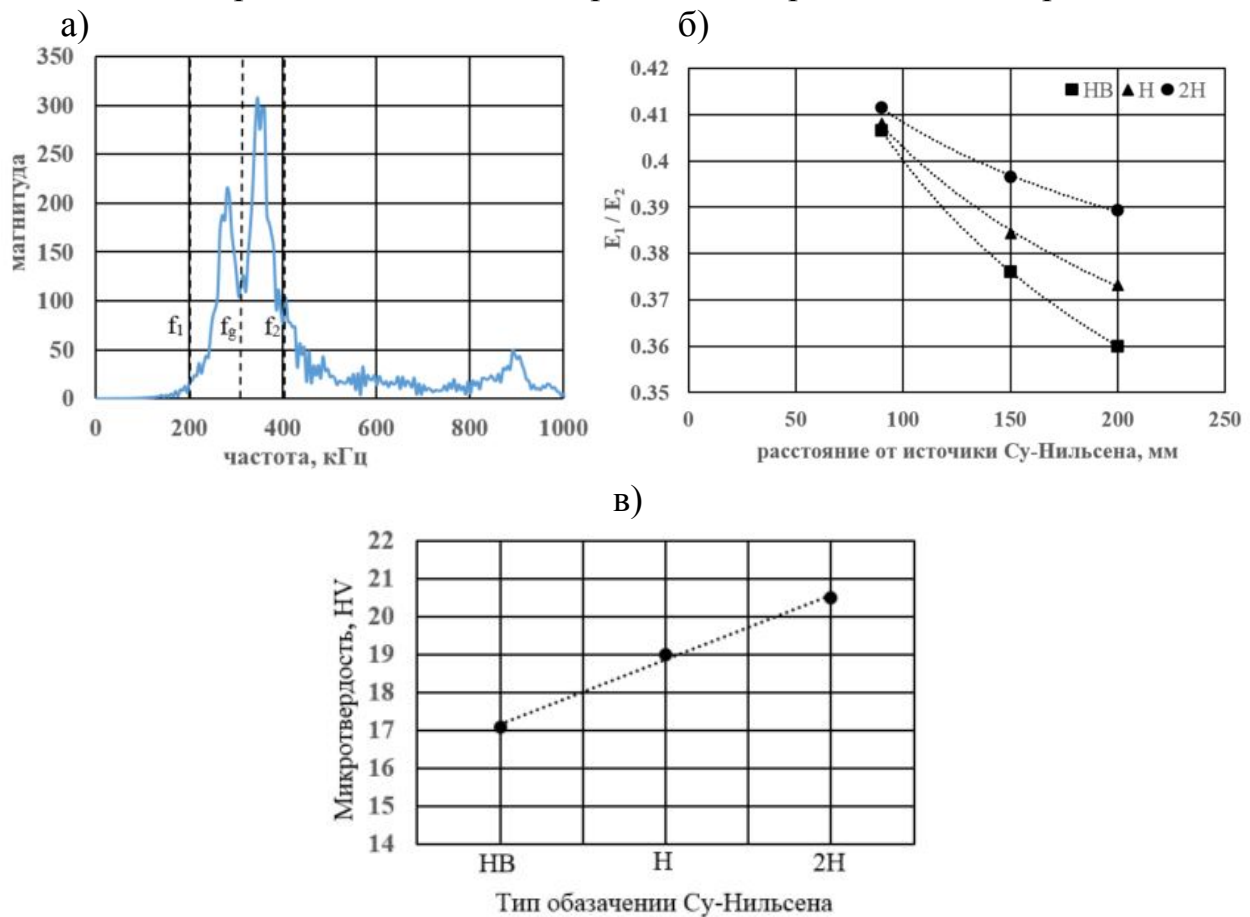


Рисунок 6 – Расчетные параметры анализа сигналов АЭ в пластине Д16 толщиной 1.8 мм: а – Фурье-спектрограмма компоненты $d4$ сигнала АЭ; б – отношение E_1/E_2 для источников с различной твердостью (НВ, Н, 2Н); в – зависимость твердости грифелей карандаша от их обозначений

В четвертой главе представлено практическое использование результатов исследования в конструкционных материалах. Для идентификации источников, которые выявлены при регистрации волн АЭ, проводили эксперименты с использованием источника Су-Нильсена, симулирующего разрушение. Модель пластины, где возбуждались источники разрушений, приведена на рисунке 7.

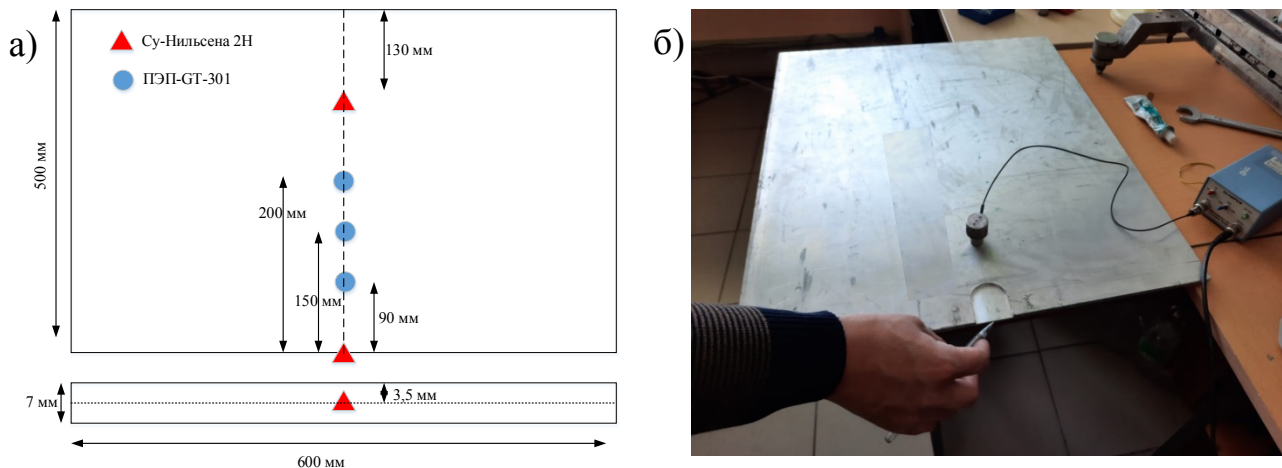


Рисунок 7 – Образец пластины Д16 толщиной 7 мм для проведения исследования с источником Су-Нильсена: а – Схема расположения датчика и источников Су-Нильсена в пластине Д16; б – фото проведения исследования

Источники расположены на глубине, у края пластины и на поверхности пластины. Для регистрации сигналов АЭ использовали широкополосный ПАЭ GT-301. ПАЭ был расположен на расстоянии 90 мм и 150 мм от источника.

В результате качественного анализа вейвлет-спектрограмм для сигналов, зарегистрированных от источника Су-Нильсена, было обнаружено, что выбранные моды зарегистрированных волн, которые были обозначены в виде кривых красного цвета на рисунке 8, характеризуются как антисимметричные волны A_0 и симметричные волны 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 . Различие в сигналах АЭ, зарегистрированных на разных по отношению к глубине расположения источника местах пластины, заключается в форме зарегистрированных сигналов (рисунок 8).

Для сигналов, зарегистрированных на расстоянии 150 мм от источника, отмечено также наличие осцилляций на частоте 410 кГц (см. рисунок 8, б). На вейвлет-спектрограммах, соответствующих расположению источника на поверхности (см. рисунки 8, а) и на глубине 3,5 мм от края поверхности (см. рисунки 8, в), наблюдается увеличение временной задержки между амплитудой антисимметричной и симметричной волн в виде смещения амплитудных значений спектра на частоте 380 кГц с ростом расстояния между излучателем и приёмником.

В результате качественного и количественного анализа видно, что вид источника и геометрические характеристики канала распространения волны определяют форму волны на определенном расстоянии регистрации от ее источника.

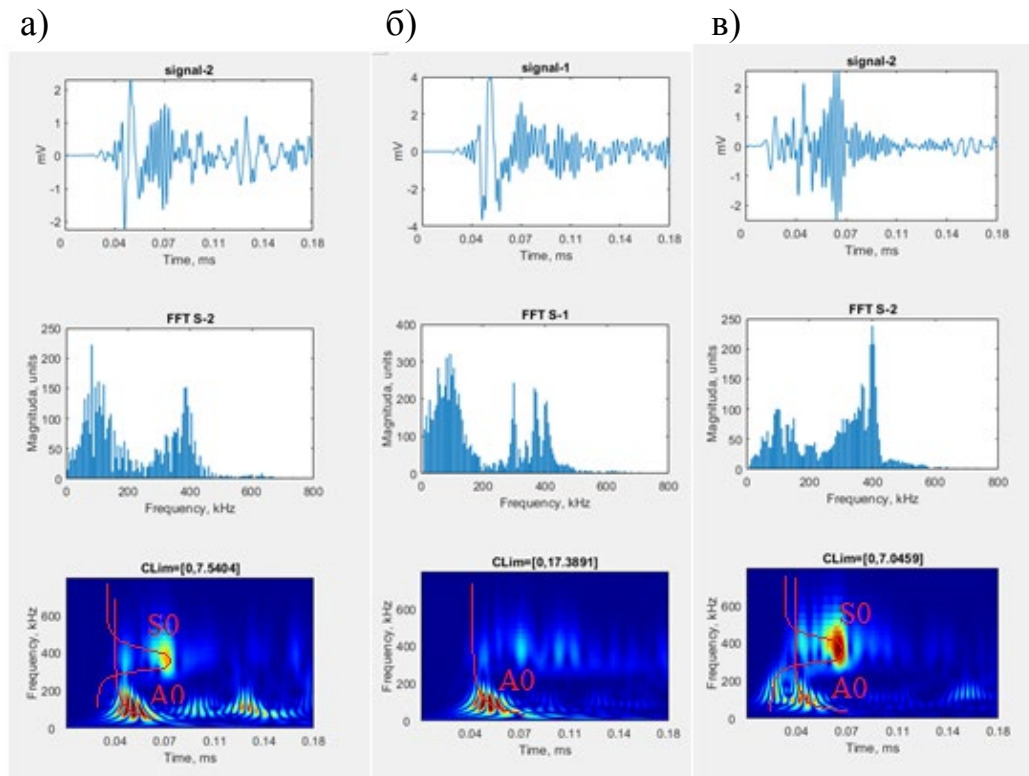


Рисунок 8 – Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных на расстоянии 150 мм от приемника в пластине Д16 толщиной 7 мм, при расположении источника: а – на поверхности; б – на краю; в – на глубине 3,5мм от края

После оценки источника с использованием излома Су-Нильсена, проводили исследования развития реальных трещин, которые обусловлены распространением волн АЭ в пластине конструкционных материалов. Для проведения исследований были изготовлены образцы из алюминиевого сплава 1163 размером 54,4 мм с радиальной формой рабочей части радиусом 15 мм и шириной в наиболее узком сечении 2 мм (рисунок 9, б).

На каждом из исследуемых образцов по методу консольного изгиба на установке с электромагнитным приводом была выращена магистральная трещина, не превышающая половины сечения. Образцы с помощью специальной струбцины прижимались к поверхности пластины из алюминиевого сплава Д16, как показано на рисунке 9, а. Размер пластины 500 мм×600 мм×7 мм.

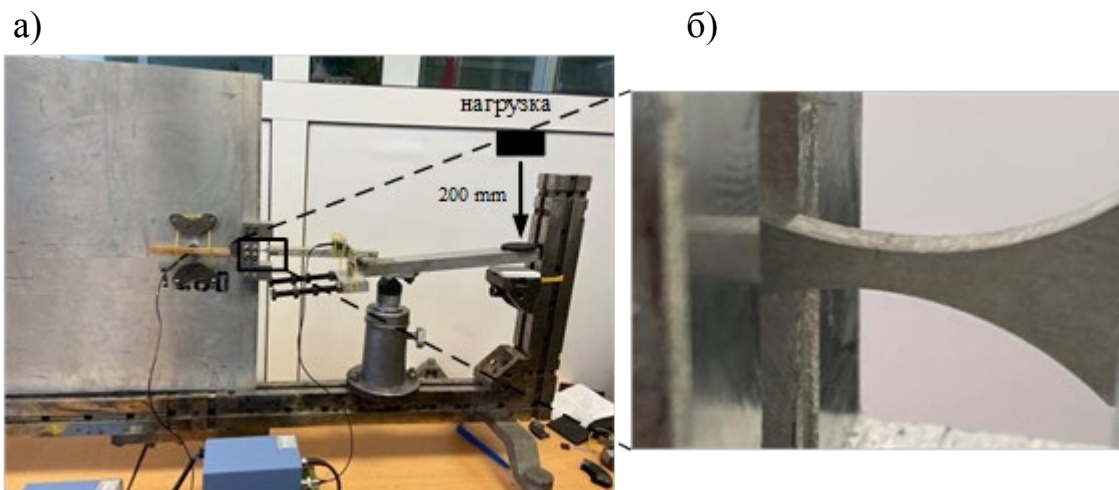


Рисунок 9 – Стенд для проведения исследований: а – экспериментальный стенд; б – исследуемый образец алюминиевого сплава 1163

Экспериментальный стенд включал вертикально установленную пластину с прижатым к ее краю образцом с выращенной трещиной. Консольная схема нагружающего устройства, приведенная на рисунке 9, а, позволяла выполнять изгиб образца на определенную величину с заданной скоростью. В работе представлены результаты для заданного расстояния между ПАЭ и источником АЭ (трещиной), равного 90 мм.

Размер предварительно выращенной магистральной трещины в образце сплава 1163 определялся по результатам предварительных усталостных испытаний. При приложении к образцу усилия с заданной величиной изгиба сигнал АЭ формировался за счет единичного подрастания трещины. Нагружение производилось несколько раз, и анализ проводился для 12 последовательных нагрузок. При каждой загрузке регистрировался генерируемый сигнал АЭ. На рисунке 10 показаны сигналы АЭ и их Фурье, зарегистрированные в результате трех последовательных одиночных нагружений. Нагружение осуществлялось всегда с одинаковой скоростью, определяемой по скорости падения груза на нагружающую консоль.

После проведения эксперимента микроструктура изменения развивающейся трещины изучалась на микроскопе. Результаты микроструктурных исследований показаны на рисунке 11. На фото видно изменение размеров трещины после нагружения в сравнении с трещиной до разрушения.

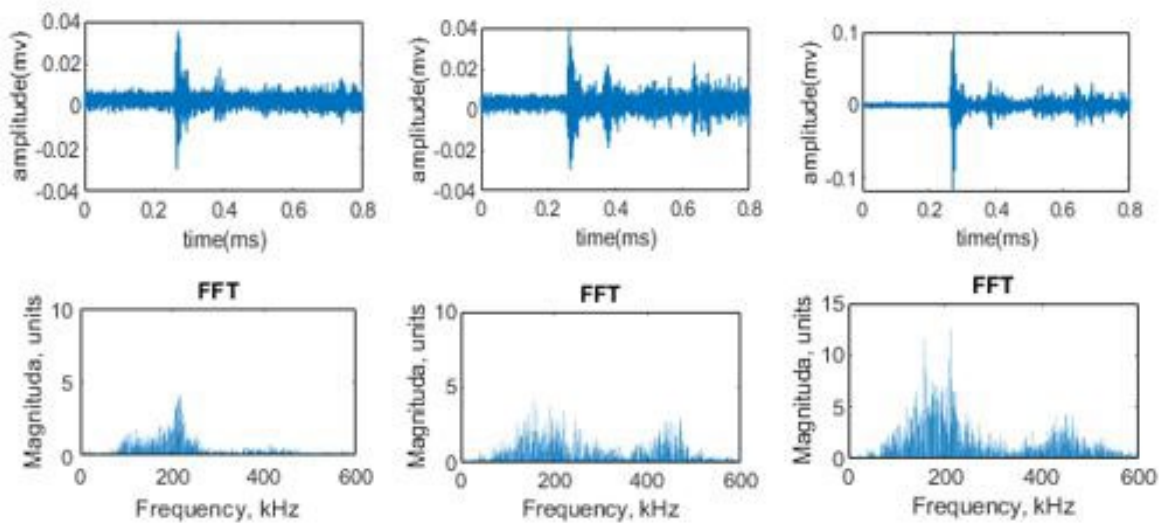


Рисунок 10 – Сигналы АЭ и их Фурье, зарегистрированные в пластине Д16 толщиной 7 мм в результате последовательных нагружений 1 – 3

В результате анализа Фурье спектров зарегистрированных сигналов АЭ можно увидеть, что на спектрах наблюдаются два пика, находящиеся в диапазонах частоты 100-250 кГц и 250-500 кГц. Для сигналов 2 и 3 подобные источники можно отнести к однотипным, не имеющим различий между собой в диапазоне частот 250-500 кГц. Используя эту особенность частотных спектров, можно заранее определить длину распространения трещины, а также другие параметры регистрируемых АЭ сигналов, такие как амплитуда, величина низкочастотной и высокочастотной составляющих и вейвлет-коэффициент.

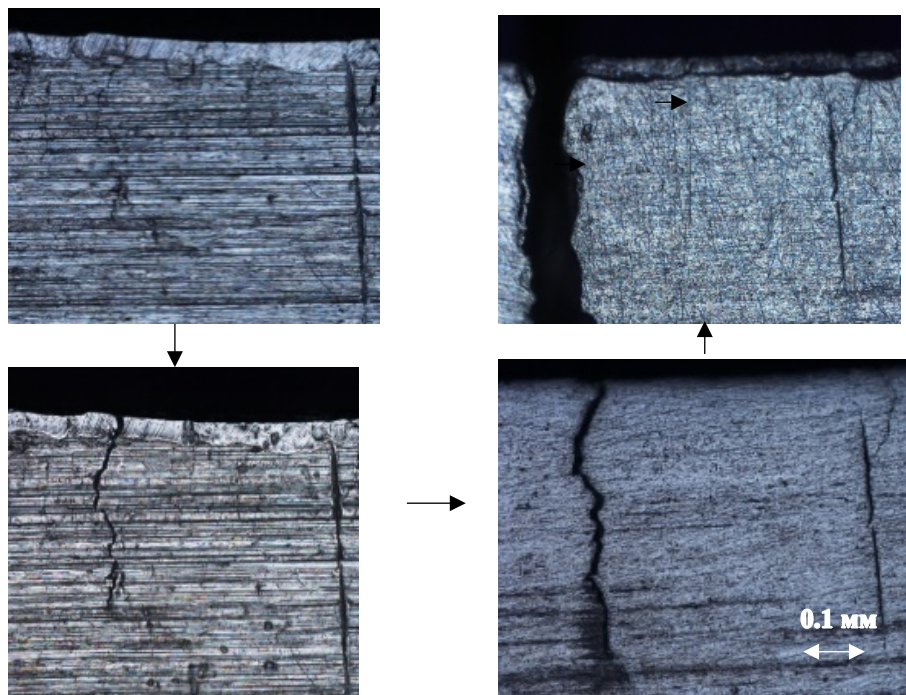


Рисунок 11 – Микроструктура зарождения трещины до разрушения на образце алюминиевого сплава 1163

Однако дополнительный анализ вейвлет-декомпозиции сигналов АЭ, выполненных отдельно для низкочастотных и высокочастотных компонент, показал наличие некоторого различия для компоненты четвертого уровня разложения, который имеет диапазон частот 260-520 кГц. Критерий, для которого была рассчитана энергия для четвертого уровня разложения, использует отдельно два диапазона частот: 200-300 кГц (энергия E_1) и 300-400 кГц (энергия E_2). Использование отношения этих энергий E_1/E_2 позволяет проанализировать характер трансформации развивающегося источника АЭ.

На рисунке 12 приведен график изменения микротвердости измеренной вдоль трещины и зависимость между новым параметром E_1/E_2 и значением микротвердости, зарегистрированной для области излучения источника АЭ.

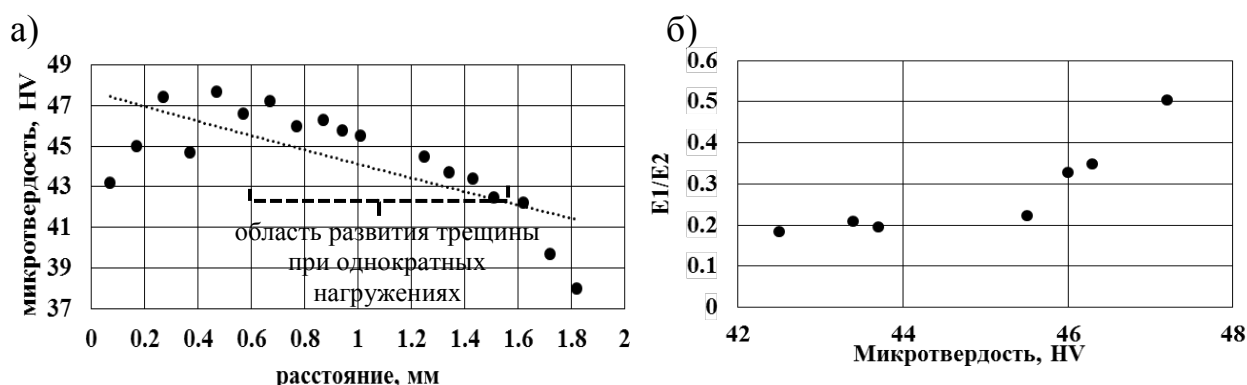


Рисунок 12 – Результаты исследования: а – микротвердость, измеренная вдоль трещины; б – зависимость между новым параметром E_1/E_2 и значением микротвердости алюминиевого сплава 1163

Видно, что монотонное снижение параметра E_1/E_2 и значения микротвердости снижаются по мере продвижения магистральной трещины при ее развитии в процессе однократных нагружений (рисунок 13).

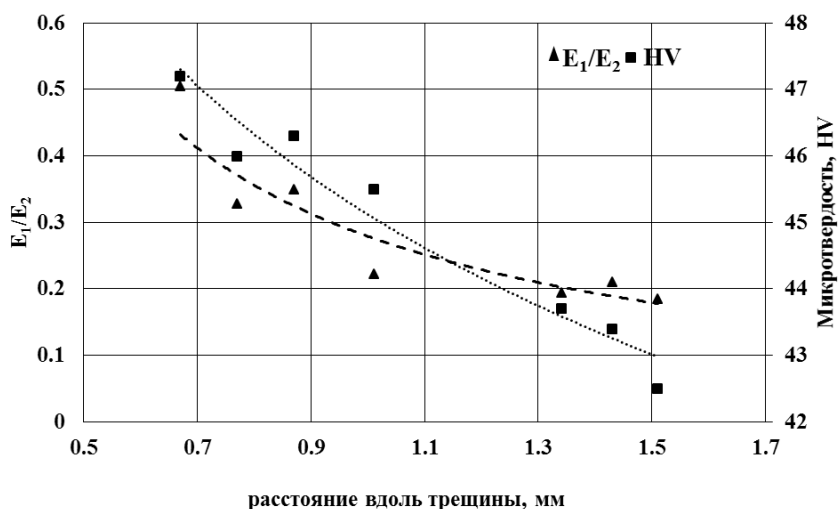


Рисунок 13 – Зависимость энергетического отношения E_1/E_2 и микротвердости от расстояния вдоль трещины образца сплава 1163

Физический смысл полученной зависимости (рисунок 13) может быть охарактеризован как увеличение пластичности в месте единичного подрастания трещины по мере роста и смещения местоположения ее устья. При этом было установлено, что значение твердости устья выращенной усталостной трещиной выше, чем в областях, удаленных от устья.

На рисунке 14 представлены структуры для фрактографического анализа, полученные на растровом электронном микроскопе (РЭМ). Можно выделить два типа структуры: первый тип структуры характерен для развития усталостной трещины и обозначен символом Б, второй тип – это вязкий излом, связанный с однократным нагружением (обозначен символом А). В рисунке 14, 1(в), показывает две зоны роста трещин, где трещины росли с разной скоростью и можно увидеть границы изменения скорости при развитии излома.

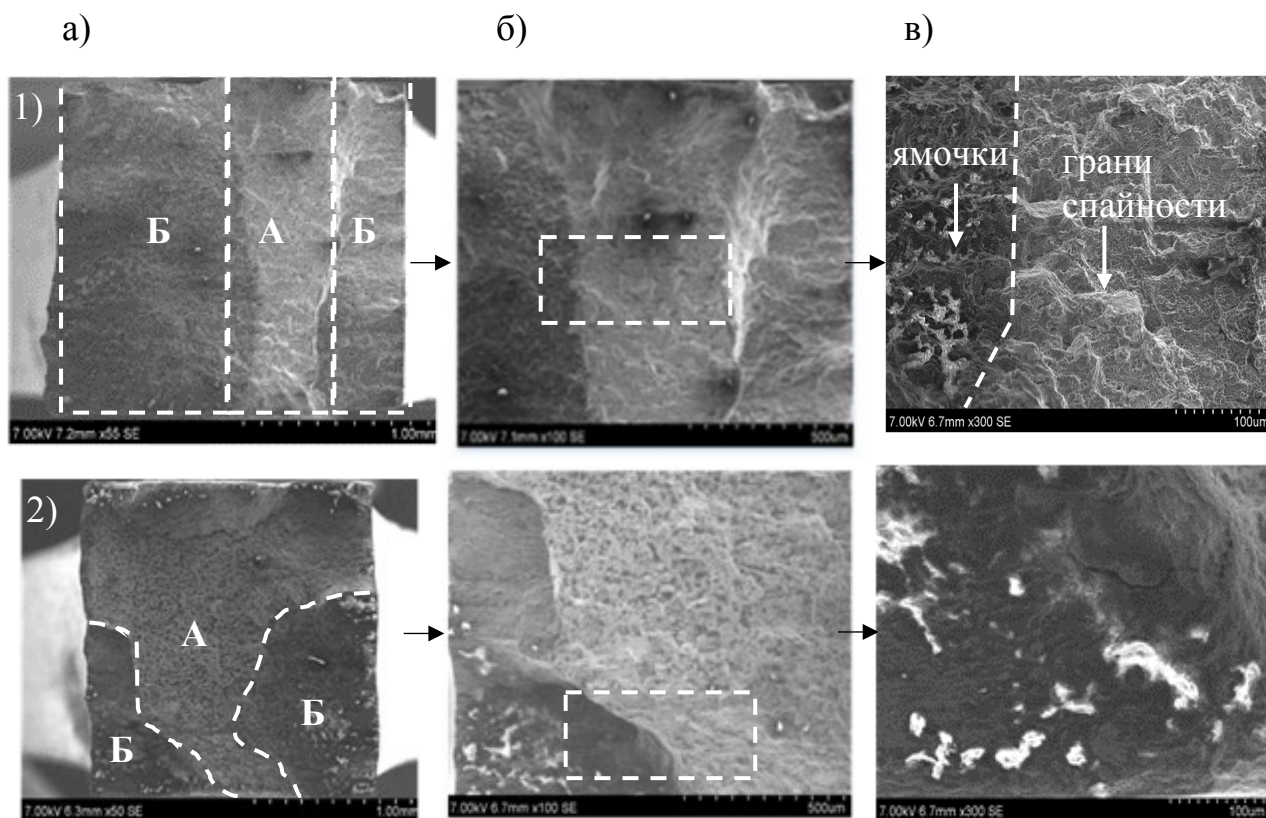


Рисунок 14 – Микроструктуры образца с прорастающей трещиной алюминиевого сплава 1163

Фрактографический анализ показал, что каждая из структур имеет характерный для определенного вида тип разрушения. При развитии усталостной трещины наблюдаются продольные тонкие полосы, характеризующие знакопеременную деформацию с постепенным продвижением трещины от поверхности вглубь материала при изгибе образца (см. рисунок 15).

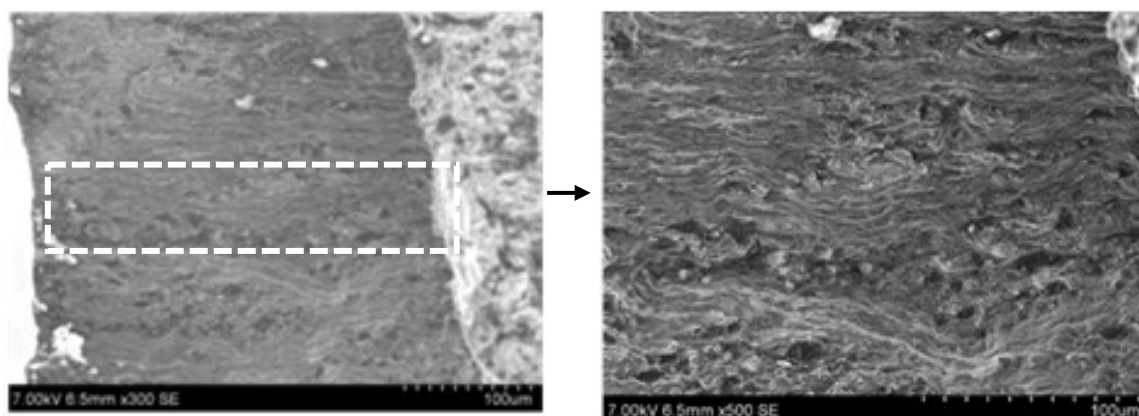


Рисунок 15 – Продольные полосы развития усталостной трещины алюминиевого сплава 1163

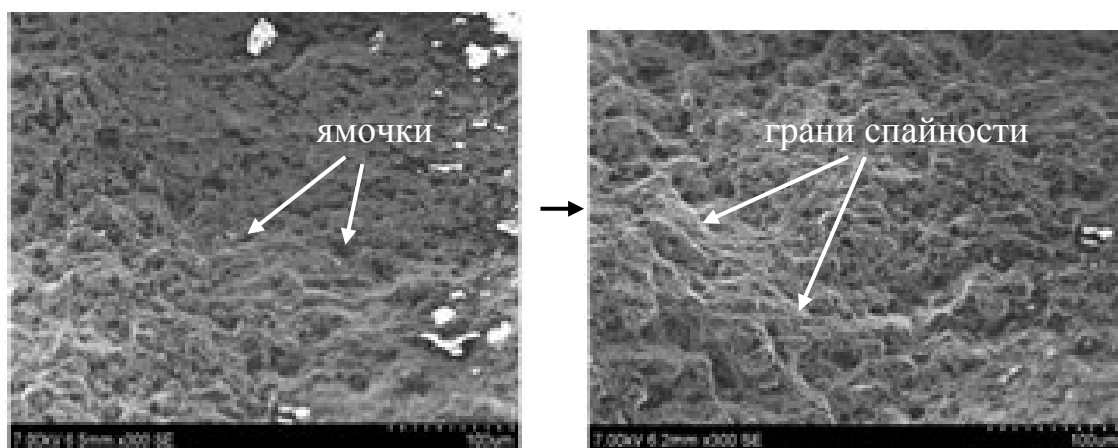


Рисунок 16 – Структура излома образца алюминиевого сплава 1163

Отличие между двумя типами структур, характеризующих усталостный излом и однократное нагружение, можно оценить также по размеру фрагментов или зерен, наблюдаемых на фрактограмме. Размеры зерен в усталостном изломе меньше. Вязкий излом, связанный с однократным нагружением, характеризуется наличием ямочек на поверхности. По мере увеличения числа нагружений размеры ямочек на поверхности трещины постепенно уменьшаются и становятся более мелкими (см. рисунок 16). Это означает, что пластичность снижается по мере накопления повреждений, что сопровождается уменьшением среднего размера зерна.

На основании параметра АЭ, определенного как отношение энергий частотных диапазонов Фурье-спектра, установлено, что при единичном кратковременном подрастании выращенной усталостной трещины происходит смещение зоны окружающей устье трещины, характеризующейся повышенной твердостью, сформированной в процессе накопления усталости, в зону, охарактеризованную по параметрам АЭ как зону с пониженной твердостью образца сплава 1163. Новый критерий при достоверном определении расстояния до источника излучения АЭ волны позволяет косвенно установить свойства структуры в области развивающегося дефекта. Ранее данная задача решалась

только на основе данных о затухании энергии ультразвуковой волны в материале при невозможности установления типа и свойств развивающегося источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан критерий идентификации типа развивающегося дефекта, характеризваемого структурным состоянием и совокупностью свойств материала как источника АЭ и регистрируемого в пластине алюминиевого сплава на различном расстоянии от приемника АЭ.

2. Разработана методика идентификации дефектов типа трещин, развивающихся в структуре материала, выполненного в виде пластин. Использован новый критерий, основанный на расчете отношения энергии двух частотных диапазонов Фурье-спектра компонент вейвлет разложения зарегистрированных сигналов АЭ.

3. Получены результаты оценки параметров АЭ, основанные на анализе распространения волн АЭ в пластине алюминиевого сплава Д16, при возбуждении локального модельного единичного разрушения изломом грифеля карандаша различной твердости.

4. Установлена зависимость между значением микротвердости материала в устье трещины, развивающейся в пластине алюминиевого сплава 1163, и расчетным параметром АЭ, определяемым как отношение энергии частотных диапазонов Фурье спектра частотных компонент вейвлет преобразования сигнала АЭ. При единичном кратковременном подрастании выращенной усталостной трещины в образце сплава 1163 происходит смещение зоны окружающей устье трещины, характеризваемой повышенной твердостью, сформированной в процессе накопления усталости, в зону, характеризующуюся пониженной твердостью.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Башков, О. В. Детектирование сигналов акустической эмиссии волоконно-оптическими интерференционными преобразователями / О. В. Башков, Р. В. Ромашко, В. И. Зайков, С. В. Панин, М. Н. Безрук, Х. Х. А. Кхун, И. О. Башков // Дефектоскопия. – 2017. – № 6. – С. 18-25.

2. Башков, О. В. Исследования волн акустической эмиссии при возбуждении на поверхности и внутри алюминиевой пластины / О. В. Башков, Х. Х. А. Кхун // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № 1-1 (41). – С. 106-112.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных *Web of Science/Scopus*

3. 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 // Trans Tech Publications, Vol. 945, 2019, p. 926-931.

4. Khon, H., Bashkov, O. V. The Study of Acoustic Emission Waves Generated From Different Types of Sources // Material Today: Proceeding, Vol. 9, Part.5, 2019, p. 2243-2247. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.544>.

5. Khon, H., Bashkov, O. V., Bryansky, A. A., Solovev, D. B. Failure Analysis of Polymer Blinder Using Acoustic Emission Method // Trans Tech Publications, Vol. 992, 2020, p. 1030 - 1035.

6. Bashkov, O.V., Romashko, R.V., Bashkov, I. O., Zaikov, V. I., Khon, H., Solovev, D. B. Sensitivity Analysis of Adaptive Holographic Fiber-Optic Acoustic Emission Sensors during the Registration of Acoustic Waves In a Plate // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 459 062104, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/6/062104>.

В прочих изданиях:

7. Кхун, Х. Х. Исследование распространения волн акустической эмиссии в пластинах / Х. Х. Кхун, О. В. Башков // Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018): Всероссийская конференция с международным участием, Тольятти, 2018. – С. 160.

8. 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 всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 2018. – С. 75-78.

9. H. Htoo Khun, O. Bashkov, V.Zaikov, R.Romashko, I.Bashkov, “Research the comparative sensitivities of fiber-optic sensors and piezoelectric sensors for detection of Acoustic Emission waves”, 33rd European Conference on Acoustic Emission Testing, EWGAE – 2018, p. 64.

10. Кхун, Х. Х. Исследование распространения акустическая волн в пластине / О. В. Башков, Х. Х. Кхун // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 2018. – С. 15-20.

11. Кхун, Х. Х. Исследование распространения волны Лэмба в тонкой пластине / Х. Х. Кхун, О. В. Башков, Зо Хейн // Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 2019. – С. 99-102.

12. Кхун, Х. Х. Исследование волн акустической эмиссии, генерируемых различными типами источников в пластине / Х. Х. Кхун, О. В. Башков, Зо Хейн // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: сб.

материалов XVII региональной научной конференции. – Благовещенск, 2019. – С. 194-198.

13. Кхун, Х. Х. Идентификация развивающихся повреждений в металлических материалах на основе метода акустической эмиссии / Х. Х. Кхун, О. В. Башков, Зо Хейн // Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 2020. – С. 78-80.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

14. Свид. о регистр. программы для ЭВМ. Программа для ЭВМ «Программа спектральной обработки сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных волоконно-оптическими датчиками акустической эмиссии» / Башков О. В., Кхун Хан Хту Аунг – № 2018610603; заявл. 24.01.2018; опубл. 16.03.2018.

15. Свид. о регистр. программы для ЭВМ. «Программа разделения сигналов акустической эмиссии для мониторинга процесса разрушения материалов» / Кхун Хан Хту Аунг – № 2019666303; заявл. 09.12.2019 ; опубл. 17.12.2019.

Патентные документы:

16. Пат. 2737235 C1G01N Российская Федерация. Способ идентификации источников акустической эмиссии / О. В. Башков, Кхун Хан Хту Аунг, И. О. Башков, А. А. Брянский – № 2020115070; опубл. 26.11.2020, Бюл. № 33. – 14 с.

Кхун Хан Хту Аунг

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ
В ПЛАСТИНАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16 И 1163
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.02.2021.
Формат 60 x 84 1/16. Бумага 80 г/м². Ризограф EZ570E.
Усл. печ. л. __. Уч.-изд. л. __. Тираж __ экз.

Полиграфическая лаборатория Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.