

ПРОБЛЕМЫ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2021 г. Ю.Г. Матвиенко¹, И.Е. Васильев^{1,*}, Д.В. Чернов¹, В.И. Иванов², С.В. Елизаров³

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия 101990 Москва,

Малый Харитоньевский пер., 4

²ЗАО «НИИИИ МНПО Спектр», Россия 119048 Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1

³ООО «Интерюнис—ИТ», Россия 111024 Москва, шоссе Энтузиастов, 20б

*E-mail: vie01@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.05.2021; после доработки 15.07.2021

Принята к публикации 10.08.2021

Выполнена оценка точности локации источников акустической эмиссии (АЭ) в зонах концентраторов (центральных отверстий диаметром 5 мм), расположенных на расстоянии 40 мм от приемных преобразователей при испытаниях на разрыв плоских образцов из стали, алюминиевого сплава и композита с габаритными размерами 550×50×4 мм. Изучена зависимость расчетной скорости распространения импульсов АЭ от их амплитуды и парциальной энергии различных мод волн Лэмба. При пороговом методе регистрации сигналов погрешность локации источников АЭ, возникающая при расстоянии между источником АЭ и приемным преобразователем АЭ (ПАЭ) $\Delta L < 0,1$ м, может превышать 10 % относительно базового размера (B) области локации. Для импульсов АЭ амплитудой $u_m < 60$ дБ при уменьшении расстояния $\Delta L < 0,05$ м уровень погрешности может достигать 20—30 % относительно базового размера антенной решетки.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, локация, пороговый метод, скорость импульса, амплитуда, парциальная энергия, погрешность измерения.

DOI: 10.31857/S0130308221090049

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основным методом регистрации событий АЭ является фиксация превышения нарастающим фронтом принимаемого сигнала установленного порога дискриминации — напряжения u_{th} на входе системы АЭ контроля [1—5]. Порог дискриминации устанавливается в зависимости от уровня возникающих помех. При этом необходимо учитывать, что компактный широкополосный акустический импульс, излучаемый источником АЭ, при прохождении акустического канала разделяется на несколько мод волн Лэмба в виде цуга отдельных импульсов различной амплитуды, распространяющихся с разной скоростью [3]. Преобразователи акустической эмиссии могут регистрировать не только моменты прихода разных мод упругих волн, но и разных фаз этих мод в зависимости от выбранных настроек АЭ системы, в том числе уровня порога дискриминации сигналов (u_{th}) и диапазона частот пропускания цифровых фильтров (Δf). Стандартный алгоритм расчета скорости распространения импульсов АЭ основан на линейной зависимости между разностью времен их прихода на ПАЭ локационной группы и расстоянием между приемными преобразователями. Такой подход не учитывает многие факторы, влияющие на скорость распространения импульса в диспергирующей среде акустического канала. Для корректного вычисления скорости распространения импульсов АЭ вблизи ПАЭ при пороговом методе регистрации импульсов АЭ необходимо учитывать нелинейные изменения энергетических и частотно-временных параметров затухающих и расходящихся во времени высокочастотных мод волнового пакета при прохождении акустического канала с учетом его дисперсионных свойств.

Следовательно, при регистрации импульсов вблизи источника АЭ с использованием порогового метода момент пересечения фронта сигнала порога дискриминации u_{th} зависит не только от уровня энергии основных низкочастотных мод, но и от доли высокочастотных составляющих мод волнового пакета, создающих дополнительные погрешности при определении разности времени прихода (РВП) импульсов на ПАЭ антенной решетки.

С целью оценки точности алгоритмов, используемых для локации АЭ событий в наиболее применяемых системах акустической эмиссии Aline-32D (РФ), PCI-2 (США), Vallen (ФРГ), были проведены эксперименты по испытанию плоских образцов из стали ст3, алюминиевого сплава АМг3 и многослойного полимерного композитного материала (ПКМ) на разрыв. Задача настоящих исследований состояла в выявлении основных факторов возможных погрешностей стандартного алгоритма локации источников АЭ, когда их регистрация происходит вблизи ПАЭ при $\Delta L < 100$ мм.

ОБРАЗЦЫ, АППАРАТУРА ДЛЯ АЭ ДИАГНОСТИКИ И НАГРУЖАЮЩАЯ УСТАНОВКА

Габаритные размеры испытываемых образцов составляли $550 \times 50 \times 4$ мм. На расстоянии 110 мм от их торцевых поверхностей были просверлены два отверстия диаметром 5 мм, которые служили концентраторами напряжений при испытаниях образцов на разрыв. При проведении диагностики АЭ преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) устанавливались на расстоянии 40 мм от концентраторов, так что размер линейной локации составлял $B = 360$ мм. На рис. 1 показана испытываемый образец (1) — полоса из сплава АМгЗ в захватах (2 и 3) нагружающей установки Instron-5982, на поверхности которого на расстоянии 40 мм от каждого концентратора с применением струбцин (5) через слой контактной смазки были установлены резонансные преобразователи R15a—SMA (4) производства фирмы Mistras (США).

Перед проведением испытаний образцов на разрыв определялись оптимальные настройки АЭ системы, включающие выбор порога дискриминации сигналов $u_{th} = 42$ дБ, полосы пропускания фильтров $\Delta f_p = 30$ —500 кГц, средней групповой скорости импульсов АЭ, составившей $V_g = 3300$ м/с при максимальном размере зоны локации $B = 360$ мм. Групповая скорость распространения импульсов определялась с применением электронного генератора MFG-7210MA (КНР), оснащенного широкополосным преобразователем UT-1000, выпускаемого фирмой Mistras (США), при максимальной амплитуде импульсов $u_m = 74$ и 80 дБ, регистрируемой преобразователями R15a — SMA на расстоянии 400 и 40 мм от источника АЭ.

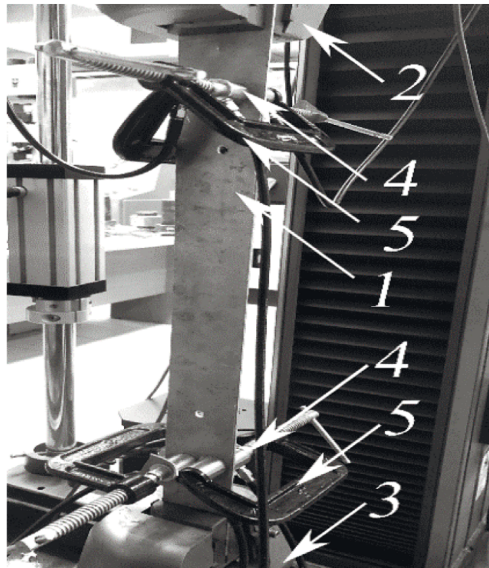


Рис. 1. Образец (1) в захватах (2 и 3) электромеханической установки Instron-5982; преобразователи R15a—SMA (4) закреплены на образце струбцинами (5).

Испытания образцов проводили на электромеханической установке Instron-5982 (США) при автоматическом повышении нагрузки со скоростью перемещения активной траверсы стенда 1 мм/мин. Синхронно с регистрацией данных АЭ видеокамерой EOS—60D фирмы Canon (США) осуществляли видеосъемку процесса деформирования и разрушения образцов в зонах концентраторов. Для исключения шумовых сигналов, возникающих от захватов нагружающего устройства, проводили фильтрацию значений разности времен прихода импульсов АЭ по условию $\Delta t < 250$ мкс, рассчитанному исходя из расстояния между приемными преобразователями антенной решетки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В ходе диагностики АЭ при испытаниях образцов на разрыв в зонах концентраторов наблюдалась неравномерное накопление повреждений, вследствие чего интенсивность процессов разрушения материала в местах расположения верхнего и нижнего отверстия заметно отличалась, что отражалось на графиках накопления событий АЭ, регистрируемых в зонах концентраторов.

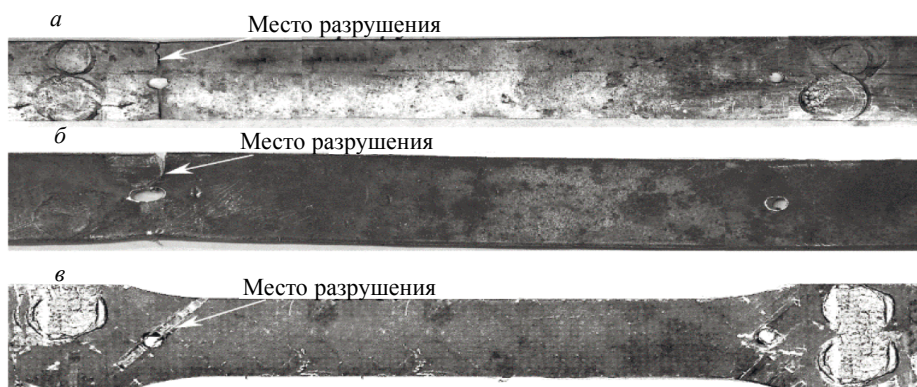


Рис. 2. Картины деформирования и разрушения образцов из алюминиевого сплава АМг-3 (а), стали ст3 (б) и ПКМ (в) в местах расположения отверстий диаметром = 5 мм.

Образование и развитие доминантных трещин, сопровождаемое потерей несущей способности и разрушением образцов, также происходило в одном из концентраторов. На рис. 2 приведено сравнение картин деформирования материала и разрушения образцов из сплава АМг-3 (а), стали ст3 (б) и ПКМ (в) в местах расположения отверстий.

В зонах концентраторов, где происходили наиболее интенсивные локальные разрушения структуры материала, должна регистрироваться и максимальная плотность индикаций источников АЭ. Однако, как показали проведенные эксперименты, максимальная плотность индикаций источников АЭ, регистрируемая системами PCI-2 и Vallen была смещена относительно расположения концентраторов соответственно на 40—65 мм от центра отверстий. Причем система Vallen регистрировала максимальную плотность индикаций источников АЭ уже вне области локации на расстоянии 20—25 мм от ПАЭ.

На графиках рис. 3 приведены результаты локации источников АЭ и графики их накопления, зарегистрированные системами Aline-32D (а, з), PCI-2 (б, д) и Vallen (в, е), при испытаниях на разрыв образца из стали ст3.

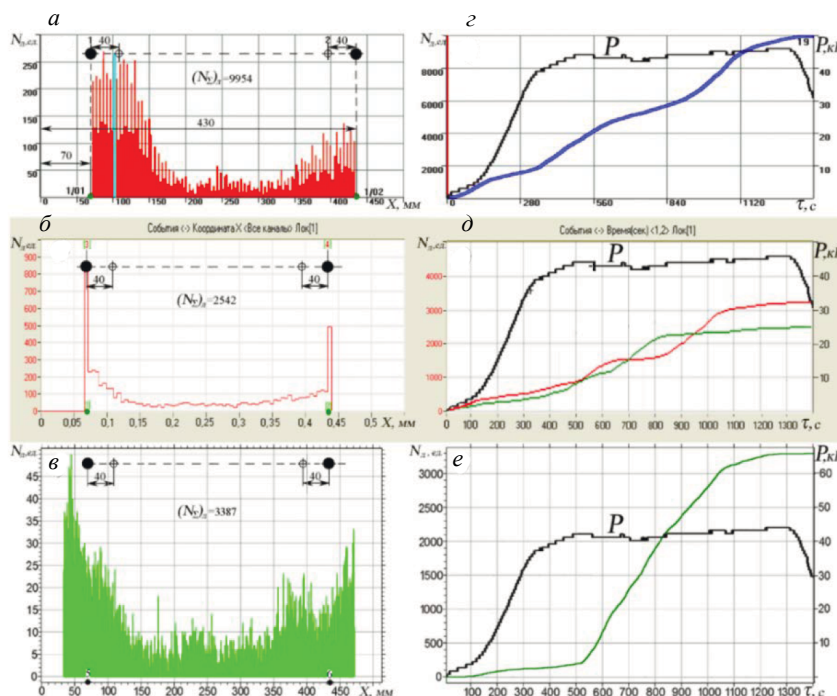


Рис. 3. Результаты локации источников АЭ и графики их накопления, зарегистрированные системами Aline-32D (а, з), PCI-2 (б, д) и Vallen (в, е), при испытании образца из стали ст3 на разрыв.

Как следует из сравнения графиков (*a*—*e*) на рис. 3, локация источников АЭ, регистрируемых с применением системы Aline-32D в области концентраторов, характеризуется максимальным рассеянием плотности их индикаций в интервале ± 40 мм относительно центра отверстий, достигающей в зоне образования трещины 250—270 ед/мм. Наибольшая плотность индикаций источников АЭ, составляющая соответственно 500 и 800 ед/мм, регистрировалась системой PCI-2 в местах установки ПАЭ № 3 и № 4 на расстоянии 40 мм от концентраторов (график *b* на рис. 3). Максимальная погрешность локации источников АЭ, достигающая 60—65 мм относительно центра отверстий, как следует из графика (*e*), регистрировалась системой Vallen. Сопоставление кривых накопления событий АЭ на графиках (*z*), (*d*) и (*e*) свидетельствует о том, что если тренд их роста, регистрируемый системами Aline-32D и PCI-2, был достаточно близок и отличался лишь количеством событий, то тренд накопления, регистрируемый системой Vallen, заметно выделялся. При этом количество событий АЭ, регистрируемое системой Aline-32D при испытаниях всех образцов на разрыв, было в 3-4 раза большим по сравнению с зарубежными аналогами.

Как правило, расчет координат источников АЭ проводится по стандартной методике [1, 2] с использованием двух параметров: разности времен прихода импульсов АЭ на преобразователи антенной решетки (Δt) и скорости распространения акустических сигналов в стенке контролируемого изделия (V_g). Согласно ПБ 03-593-03, групповая скорость V_g акустического импульса определяется следующим образом. Посредством источника Су—Нильсена или электронного имитатора, расположенного вне зоны локации на расстоянии 30—50 мм от одного из преобразователей акустической эмиссии, излучают импульсы АЭ. Исходя из известного расстояния между ПАЭ и значений разности прихода импульсов на преобразователи, рассчитывают скорость их распространения в диагностируемом изделии.

Стандартно применяемый пороговый алгоритм регистрации импульсов с использованием вычисляемого значения скорости V_g не учитывает многих факторов влияющих на точность локации источника АЭ, когда развивающийся дефект находится вблизи ПАЭ, где моды волн Лэмба еще не разошлись и передний фронт импульса АЭ имеет сложную структуру. Одним из таких факторов, влияющим на точность локации в случае, когда источник АЭ расположен вблизи ПАЭ при пороговом методе регистрации сигналов, является погрешность определения момента пересечения фронтом волны установленного уровня порога дискриминации u_{th} . Как показали проведенные эксперименты, в зависимости от амплитуды принимаемого сигнала эта погрешность может достигать 60 мкс, что оказывает существенное влияние на разность времен прихода (РВП) импульсов АЭ на приемные преобразователи, а, следовательно, и уровень приведенной погрешности локации источников АЭ.

На графиках рис. 4 наглядно продемонстрирована зависимость момента t_{ϕ} — превышения амплитудой сигнала порогового напряжения u_{th} , а, следовательно, и времени задержки (Δt_{ϕ}) его регистрации аппаратурой от крутизны фронта нарастающей волны.

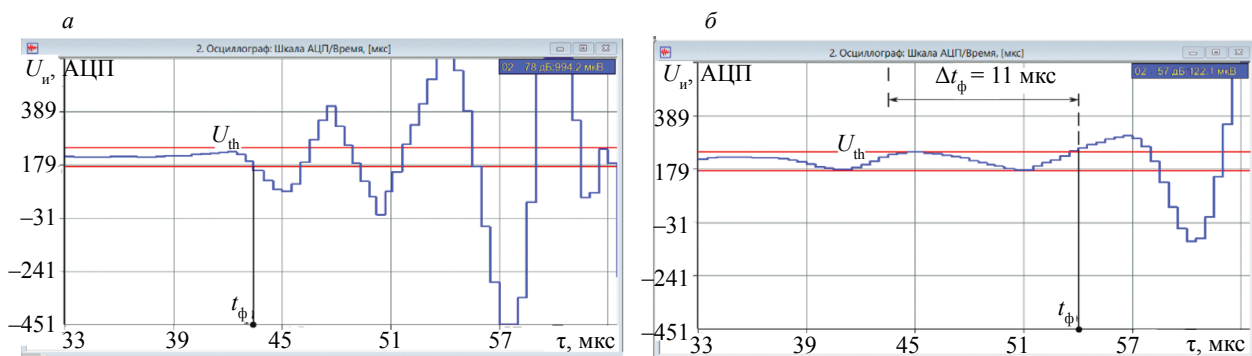


Рис. 4. Влияние крутизны фронта сигнала АЭ на время его задержки при регистрации по пороговому методу.

Как отмечалось в публикациях [6—9], при малом расстоянии между ПАЭ и источником АЭ ($\Delta X \leq 100$ мм) даже незначительные колебания приращения параметра Δt_{ϕ} существенным образом сказываются на вычисляемых значениях V_g . По мере удаления источника АЭ от ПАЭ высокочастотные гармоники ($f = 250$ — 400 кГц) волнового пакета быстро затухают. Анализируя приведенные на рис. 5 спектрограммы сигналов, зарегистрированные на расстояниях ΔL : 30 (*a*),

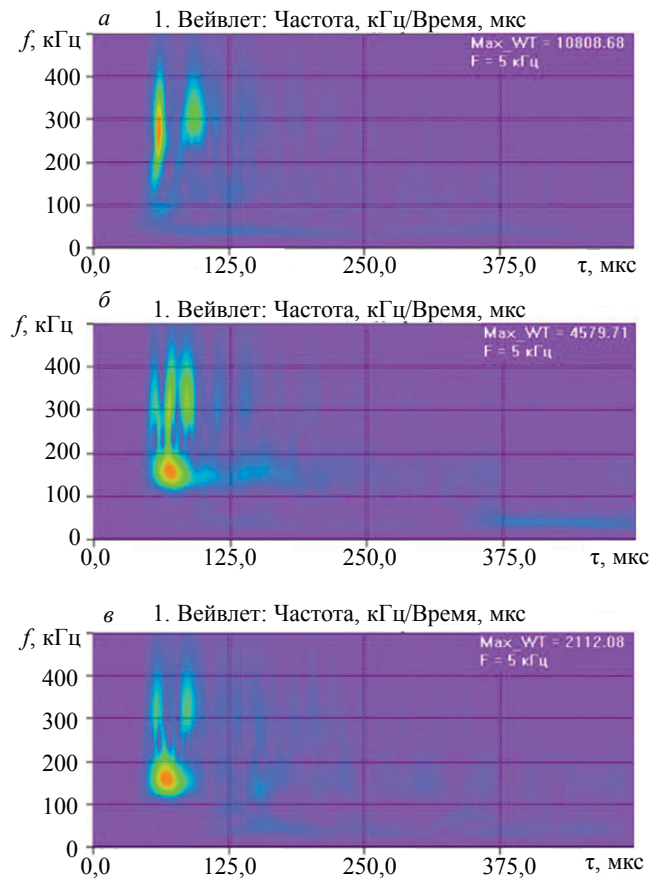


Рис. 5. Спектрограммы сигнала АЭ, зарегистрированные на расстоянии 30 мм (а), 90 мм (б) и 120 мм (в) от ПАЭ в композитной пластине [6].

90 (б) и 120 (в) мм от источника АЭ в композитной пластине [6], можно отметить, что по мере удаления ПАЭ уровень энергии регистрируемых импульсов заметно снижался за счет быстрого затухания высокочастотных гармоник. Если принять уровень энергии импульса на расстоянии $\Delta L = 30$ мм от источника АЭ за 100 %, то, как следует из спектрограмм рис. 5, на расстоянии 90 мм он снижается более, чем в два раза, а на расстоянии 120 мм — практически в пять раз. На расстояниях, больших 150 мм, высокочастотные моды на спектрограммах фактически отсутствовали, а энергия сигналов снижалась более, чем в десять раз.

Быстрое затухание высокочастотных мод на расстояниях $\Delta L > 100$ мм приводит к уменьшению разброса параметра Δt_{ϕ} и, как следствие, росту и стабилизации вычисляемой групповой скорости импульса по мере удаления от источника АЭ [6—9].

Другим важным фактором, влияющим на погрешность локации источников АЭ, расположенных вблизи ПАЭ, является амплитуда регистрируемых импульсов. На рис. 6 показана гистограмма распределения амплитуды локационных импульсов, зарегистрированных системой Aline-32D, в ходе рассмотренных выше испытаний стальной полосы при уровне порога $u_{th} = 42$ дБ и полосе пропускания цифровых фильтров $\Delta f = 30$ —500 кГц.

Как следует из гистограммы распределения максимальных значений амплитуд, практически 99 % всех локационных импульсов имеет уровень u_m в интервале от 45 до 65 дБ. При этом менее 0,01 % из них было с амплитудой $u_m > 85$ дБ, сопоставимый с той, которая возникает при сломе грифеля цангового карандаша (источник Су—Нильсена).

Для того, чтобы учесть совместное влияние амплитуды регистрируемых импульсов и высокочастотных гармоник на рассчитанную величину скорости распространения импульса вблизи источника АЭ при $\Delta L \leq 100$ мм были проведены экспериментальные исследования с использованием испытанной на разрыв полосы из стали ст3 с размерами $550 \times 50 \times 4$ мм. В ходе экспериментов излучатель UT-1000 генератора импульсов MFG-7210MA и приемные преобразователи

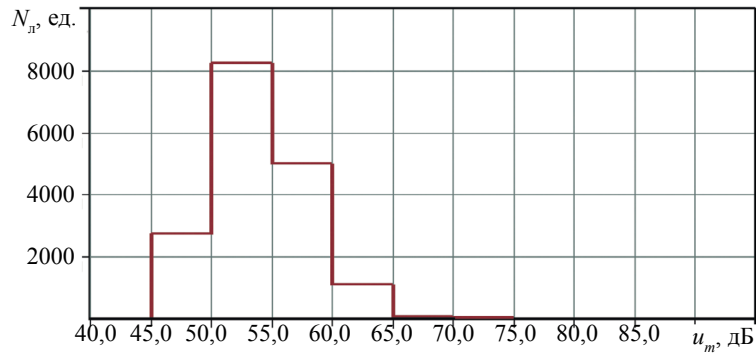


Рис. 6. Дифференциальное распределение импульсов АЭ событий (N_p), зарегистрированных при испытаниях стальной полосы с концентраторами на разрыв при уровне порога $u_{th} = 42$ дБ и $\Delta f = 30\text{--}500$ кГц.



Рис. 7. Вид стальной полосы и мест расположения на ее поверхности источника АЭ (UT-1000) и приемных преобразователей (R15α—SMA).

R15α—SMA располагались как показано на рис. 7, а регистрация акустических сигналов осуществлялась при помощи системы Aline-32D.

Расчет групповой скорости распространения импульсов АЭ проводился согласно ПБ 03-593-03. Для исследования влияния спектральных и энергетических характеристик импульса АЭ на расчетное значение скорости V_g порог дискриминации и полоса пропускания частотных фильтров были выбраны такими же, как и при испытаниях полосы на разрыв: $u_{th} = 42$ дБ и $f = 30\text{--}500$ кГц.

Использование генератора MFG-7210MA и излучателя UT-1000 позволило получать импульсы АЭ с уровнем максимальной амплитуды и парциальной энергией высокочастотных гармоник, аналогичные тем, какие регистрировались при испытаниях стальной полосы на разрыв, а именно, с уровнем амплитуды $u_m = 50\text{--}90$ дБ и изменением доли парциальной энергии высокочастотных гармоник от 6 до 18 % в диапазоне $f = 250\text{--}400$ кГц ($H_{250\text{--}400}$) относительно их полной энергии (H_Σ).

На рис. 8 представлены графики изменения значений расчетной скорости V_g от уровня максимальной амплитуды импульсов (a) и доли парциальной энергии высокочастотных гармоник

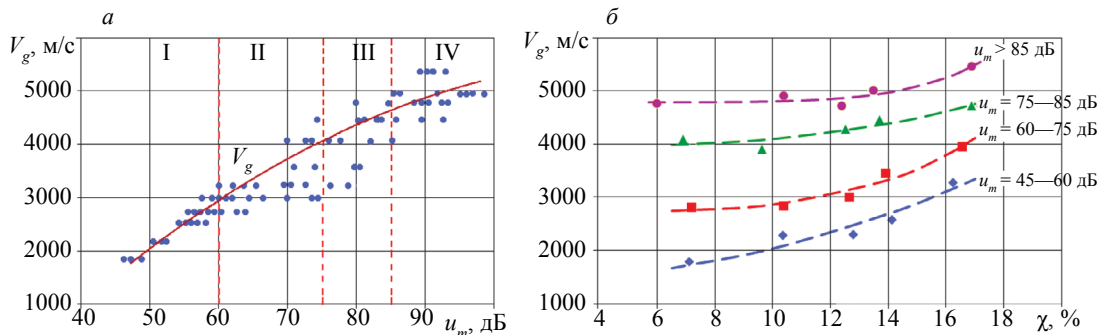


Рис. 8. Зависимость расчетной скорости распространения импульсов АЭ от амплитуды u_m (a) и доли парциальной энергии высокочастотных гармоник $\chi = H_{250\text{--}400}/H_\Sigma$ (b) сигналов.

$\chi = H_{250-400}/H_{\Sigma}$ (δ), зарегистрированные приемным преобразователем R15a—SMA на расстоянии 50 мм от излучателя UT-1000 импульсов АЭ. Построенная по экспериментальным данным зависимость $V_g = f(u_m, \chi)$, приведенная на рис. 8а, может быть разделена на 4 характерные интервала: I, II, III, IV.

Как следует из графиков рис. 8, для сигналов АЭ, относящихся к интервалу I, при повышении уровня амплитуды u_m до 60 дБ и доли парциальной энергии высокочастотных гармоник $\chi = H_{250-400}/H_{\Sigma}$ от 7 до 16 % наблюдается заметный рост рассчитанного значения групповой скорости импульсов от 1800 до 3000 м/с. Для сигналов интервала II зависимость вычисляемой скорости импульсов от доли парциальной энергии высокочастотных составляющих в спектре сигналов становится особенно наглядной. При повышении амплитуды импульсов от 60 до 75 дБ, как видно из графика 8а, уровень вычисленной групповой скорости сохраняется практически на одном уровне $V_g = 2750$ м/с, когда доля энергии высокочастотных мод $\chi < 12$ %. Для сигналов, относящихся к интервалу III с амплитудой $u_m = 75-85$ дБ, рост расчетной групповой скорости до 4250—4750 м/с происходит при повышении доли $\chi > 12$ %. Следует отметить, что для сигналов IV интервала с амплитудой $u_m > 85$ дБ, влияние энергия высокочастотных гармоник на расчетную групповую скорость импульсов, возрастающую от 4750 до 5400 м/с, проявляется когда их уровень уже превышает $\chi > 14$ %.

Таким образом, чем больше доля энергии высокочастотных составляющих в спектре сигнала, тем больше значение расчетной групповой скорости V_g импульсов АЭ, регистрируемых ПАЭ расположенного вблизи от источника АЭ на расстоянии $\Delta L < 100$ мм. Дальнейшее распространение импульса в стенке изделия сопровождается снижением энергии высокочастотных мод и их влиянием на крутизну фронта сигнала при пересечении уровня порога дискриминации u_{th} . При этом возрастает влияние основных низкочастотных гармоник. Поэтому для повышения точности локации источников АЭ, расположенных вблизи ПАЭ, необходимо установление зависимости $V_g = f(u_m, \chi)$, учитывающей не только уровень амплитуды импульсов от источников, расположенных вблизи ПАЭ, но и долю энергии высокочастотных гармоник в спектре этих сигналов.

Наблюдаемое на рис. 8а скачкообразное изменение групповой скорости на графике зависимости $V_g = f(u_m, \chi)$ с повышением амплитуды импульсов обусловлено быстрым затуханием высокочастотных гармоник в ближней от источника АЭ зоне при практически неизменном уровне энергии низкочастотных мод. Вследствие этого задержка регистрации сигналов, определяемая по времени t_{ϕ} , для импульсов АЭ, имеющих разные значения амплитуд, но близкие энергии высокочастотных мод, может быть практически одинаковой, как и вычисляемая групповая скорость волнового пакета V_g .

Как следует из гистограммы рис. 6, более 99 % всех зарегистрированных локационных импульсов имели максимальную амплитуду в интервале $u_m = 45-65$ дБ. Согласно графика на рис. 8а их расчетная групповая скорость должна составлять примерно 2750 м/с. На графиках рис. 9 сопоставлены результаты линейной локации источников АЭ, полученные при расчетной скорости локационных импульсов $V_g = 3300$ (а) и 2750 м/с (б).

Как видно из сравнения графиков на рис. 9, при скорости $V_g = 2750$ м/с наибольшая плотность индикаций источников АЭ, достигающая 350 ед/мм, отмечается непосредственно в месте образования магистральной трещины, совпадающей с расположением отверстия в стальной полосе.

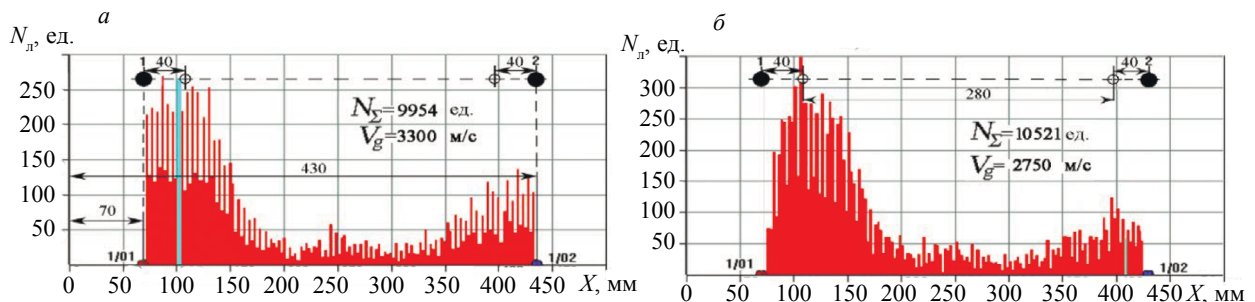


Рис. 9. Сопоставление результатов локации источников АЭ при испытании на разрыв стальной полосы, полученные при $V_g = 3300$ м/с (а) и 2750 м/с (б).

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Тестовые испытания систем контроля АЭ, включающих Aline-32D, PCI-2, Vallen, выполненные при испытаниях на разрыв плоских образцов из алюминиевого сплава АМг3, низкоуглеродистой стали ст3, и ПКМ, показали, что при расположении ПАЭ (R15a—SMA) на расстоянии 40 мм от концентраторов (отверстий диаметром 5 мм), погрешность превышала 10 % относительно базового размера $B = 360$ мм. При этом наилучшая кучность результатов (плотность индикаций источников АЭ событий) была показана системой PCI-2, а уровень погрешности локации источников АЭ не превышал 11 %. Наибольшая погрешность локации источников АЭ, достигающая 19 %, была получена с использованием системы Vallen. Результаты локации источников АЭ в области концентраторов, полученные с применением системы Aline-32D, имели в интервале ± 40 мм относительно центра отверстий значительное рассеяние индикаций с высокой плотностью регистрации событий АЭ, а уровень возможной погрешности локации источников АЭ в зонах отверстий не превышал 11 %.

2. Экспериментальные исследования возможных погрешностей локации источников АЭ, возникающих в случае расположения источников АЭ вблизи ПАЭ, проводились на полосе из стали ст3 при испытании на растяжение. Для генерации сигналов АЭ, аналогичных зарегистрированным при испытаниях полосы, использовался генератор импульсов MFG-7210MA с подключенным широкополосным преобразователем UT-1000. Результаты исследований, приведенные на графиках рис. 4—8, позволили выявить основные факторы, снижающие точность локации источников АЭ, при их расположении вблизи ПАЭ на расстоянии $\Delta L < 100$ мм.

2.1. При пороговом методе регистрации аппаратурой момента пересечения сигналом уровня порога u_{th} время t_{ϕ} зависит от крутизны фронта набегающей волны, определяемой уровнем энергии высокочастотных гармоник (см. рис. 4, 5). Увеличение доли парциальной энергии высокочастотных составляющих спектра $\chi > 10$ % заметно влияет на крутизну фронта сигнала, что уменьшает время Δt_{ϕ} — задержки его регистрации аппаратурой, а, следовательно, приводит к повышению расчетной скорости импульсов вблизи источника АЭ.

2.2. Для снижения возможных погрешностей локации источников АЭ, превышающих 10 % от базового размера антенной решетки и возникающих при расстояниях между ПАЭ и источником меньше 100 мм, при определении групповой скорости распространения импульсов в объекте необходимо учитывать уровень максимальной амплитуды импульсов u_m и долю энергии высокочастотных составляющих в спектре сигналов $\chi = H_{250-400}/H_{\Sigma}$. Как следует из графиков рис. 8, зависимость $V_g = f(u_m, \chi)$ является нелинейной. Если уровень высокочастотных мод снижается достаточно быстро, то энергия низкочастотных гармоник сохраняется практически неизменной. Поэтому повышение максимальной амплитуды генерируемых импульсов не всегда сопровождается увеличением их расчетной скорости, так как ее рост зависит не только от уровня u_m , но и доли парциальной энергии χ высокочастотных гармоник.

2.3. Согласно результатам, приведенным на рис. 6, более 99 % всех импульсов событий АЭ, зарегистрированных с применением системы Aline-32D при испытаниях стальной полосы на растяжение (см. рис. 3), имели максимальную амплитуду в интервале $u_m = 45—65$ дБ. В соответствии с графиком рис. 8а, их расчетная групповая скорость должна составлять примерно $V_g = 2750$ м/с. Сопоставление результатов локации источников АЭ, полученных при значениях расчетной скорости локационных импульсов 3300 м/с и пересчитанных на уровень $V_g = 2750$ м/с, как видно из рис. 9, свидетельствует о том, что при этой расчетной скорости наибольшая плотность индикаций источников событий АЭ регистрируется непосредственно в области концентраторов (отверстий в стальной полосе).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате явления дисперсии при прохождении акустического канала компактный импульс «расплывается», разделяясь на волновые пакеты различных мод, каждая из которых имеет свою длину, частоту и скорость распространения в стенке изделия [3—9]. Следовательно, единой скорости распространения упругих волн в изделиях фактически не существует, а есть лишь набор разных скоростей для характерных мод волн Лэмба. Поэтому ПАЭ в каждый момент времени могут регистрировать приход разных мод волнового пакета в зависимости от того, какая из них менее затухла в акустическом канале при распространении от источника АЭ до приемных преобразователей. Совместное воздействие перечисленных выше факторов влияет на время регистрации импульсов приемными преобразователями, а, следовательно, на вычисление их групповой

скорости и разницу времени прихода на ПАЭ, что приводит к погрешностям при локации источников АЭ. Особенно это проявляется, когда источник АЭ находится вблизи от ПАЭ на расстоянии $\Delta L \leq 100$ мм. Вышеперечисленные факторы, влияющие на групповую скорость волнового пакета, дают основания полагать, что для достижения требуемой точности локации источников АЭ, меньшей 10 % относительно базового размера антенной решетки при пороговом методе регистрации импульсов от источников, расположенных вблизи ПАЭ, необходимо установление зависимости $V_g = f(u_m, \chi)$, учитывающей не только уровень амплитуды регистрируемых импульсов, но и долю энергии высокочастотных гармоник. Поэтому более корректно групповую скорость распространения импульса в стенке изделия вычислять не по результатам тестирования с применением источника Су—Нильсена, а использовать для этого источники с медианным уровнем амплитуды сигналов, регистрируемых в ходе предварительных экспериментов с учетом доли парциальной энергии высокочастотных составляющих спектра.

Для повышения точности локации источников АЭ используют различные методики, основанные на применении метода Δt -mapping [10—14], нейронных сетей [15—18], исследовании частотно-временных параметров регистрируемых сигналов [19—21]. Такие методики, как правило, требуют большого количества предварительных исследований. Необходимость их проведения обусловлена в частности тем, что в изделиях из многослойных сложно структурированных композитных материалов с локальными усилениями жесткости (стрингерами, нервюрами) имеет место анизотропия акустических свойств, в связи с чем упругие волны могут распространяться с разными скоростями на различных участках объекта и в различных направлениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00351).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (ПБ 03-593-03). Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Серия 03. Выпуск 38 / Кол. авт. М.: НТЦ Промышленная безопасность, 2003. 53 с.
2. ГОСТ Р ИСО 22096—2015. Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
3. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
4. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Основы диагностики технических устройств и сооружений. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 445 с.
5. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Рамазанов И.С., Харламов Б.М. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / Под ред. Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. М.: Машиностроение—Полет, 2008. 440 с.
6. Makhutov N.A., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. et al. Influence of The Passband of Frequency Filters on the Parameters of Acoustic Emission Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 3. P. 173—180. [Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В. Влияние полосы пропускания частотных фильтров на параметры импульсов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 3—14.]
7. Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. Снижение погрешности при определении скорости распространения волнового пакета в композиционных материалах // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 1. С. 115—120.
8. Matvienko Yu. G., Vasil'ev I.E., Bubnov M.A. et al. Influence of Dimensions and Shape of Process Cutouts on the Accuracy of Locating Acoustic Emission Sources // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 101—109. [Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Бубнов М.А., Чернов Д.В. Влияние размеров и формы технологических вырезов на точность локации источников акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2020. № 2. С. 3—11.]
9. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. Повышение точности линейной локации источников акустической эмиссии / В сб.: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019). Сборник трудов конференции. 2020. С. 669—672.
10. Eaton M.J., Pullin R., Holford K.M. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. V. 43 (6). P. 856—863.
11. Baxter M.G., Pullin R., Holford K.M., Evans S.L. Delta T source location for acoustic emission // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. V. 21 (3). P. 1512—1520.

12. *Al-Jumaili S.K., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin R.* Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. V. 72—73. P. 513—524.
 13. *Hensman J., Mills R., Pierce S.G., Worden K., Eaton M.* Locating acoustic emission sources in complex structures using Gaussian processes // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010. V. 24 (1). P. 211—223.
 14. *Kundu T.* Acoustic source localization // *Ultrasonics*. 2014. V. 54. No. 1. P. 25—38.
 15. *Kalafat S., Sause M.G.R.* Acoustic emission source localization by artificial neural networks // *Structural Health Monitoring*. 2015. V. 14. Is. 6. P. 633—647. DOI: 1475921715607408
 16. *Grabowski K., Gawronski M., Staszewski W.J., Uhl T., Packo P.* Acoustic emission localization through excitability prediction and dispersion removal technique // *Progress in acoustic emission XVIII, JSNDI & IIIAE-23*. December 5—9. 2016. P. 217—220.
 17. *Kalafat S., Bornschlegl M., Sause M.G.R.* Localization of acoustic emission sources in complex three dimensional fiber composites using artificial neural networks // *Progress in acoustic emission XVIII, JSNDI & IIIAE-23*. December 5—9. 2016. P. 221—226.
 18. *Kurz J.* New approaches for automatic three dimensional source localization of acoustic emissions — Applications to concrete specimens // *Ultrasonics*. 2016. V. 63. P. 155—162.
 19. *Sikdar S., Mirgal P., Banerjee S., Ostachowicz W.* Damage-induced acoustic emission source monitoring in honeycomb sandwich composite structure // *Composites Part B*. 2019. V. 158. P. 179—188.
 20. *Dong L., Li X., Xie G.* An Analytical Solution for Acoustic Emission Source Location for Known P Wave Velocity System // *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. P. 1—6. DOI: 10.1155/2014/290686
 21. *Pullin R., Baxter M., Eaton M.J., Holford K.M., Evans S.L.* Novel acoustic emission source detection // *J. Acoust. Emiss.* 2007. V. 25. P. 215—223.
-