

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЫРЕЗОВ НА ТОЧНОСТЬ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2020 г. Ю.Г. Матвиенко^{1,*}, И.Е. Васильев¹, М.А. Бубнов¹, Д.В. Чернов¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия 101990 Москва,
Малый Харитоньевский пер., 4

*E-mail: vie01@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.09.2019; после доработки 29.11.2019

Принята к публикации 13.12.2019

Проведены эксперименты по исследованию влияния размера и формы вырезов в стальных пластинах на разность времени прихода импульсов акустической эмиссии на приемные преобразователи. Полученные данные были сопоставлены с результатами численного моделирования распространения упругих волн в пластинах с различными полосовыми и круговыми вырезами. Результаты исследований свидетельствуют о том, что форма выреза в значительно меньшей степени влияет на время регистрации импульсов преобразователями антенной решетки, чем размер выреза и расположение приемного преобразователя относительно зоны затенения — кромки выреза. С учетом результатов исследований в стальной плите толщиной 40 мм с центральным отверстием 100 мм была проведена оценка точности локации источника акустической эмиссии, расположенного вблизи кромки отверстия. Проведенные исследования показали, что в этом случае для снижения погрешности измерений менее 10 % относительно базового размера антенной решетки, локационная группа должна включать не менее четырех преобразователей. Численное моделирование распространения импульсов акустической эмиссии в пластинах с полосовыми и круговыми вырезами позволило значительно сократить объем экспериментальных исследований, повысив при этом их информативность.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, импульс, групповая скорость, разность времени прихода, электронный имитатор, моделирование упругих волн, погрешность локации.

DOI: 10.31857/S0130308220020013

ВВЕДЕНИЕ

Согласно нормативным документам, регламентирующим проведение акустико-эмиссионной диагностики объектов исследования [1, 2], расчет координат событий акустической эмиссии (АЭ) осуществляют на основании измерений РВП ($\Delta\tau_{ij}$) — разности времени прихода импульсов на приемные преобразователи локационной решетки, известных расстояний между ними и установленного значения V_g — скорости распространения волнового пакета в конструкции. При этом для определения координат событий АЭ при планарной локации локационная группа должна включать не менее трех преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) [3—4].

Присутствие технологических вырезов и отверстий в исследуемых конструкциях может существенным образом сказаться на расстояниях, проходимых акустической волной от источника излучения до приемных преобразователей антенной решетки. Это может привести к существенным погрешностям координатной локации событий АЭ при пороговом методе измерения РВП, когда регистрация времени прихода импульса АЭ приемными преобразователями осуществляется по превышению фронтом набегающей волны установленного порога дискриминации сигналов (напряжения u_{th}). Уровень порога u_{th} определяется, во-первых, задачей получения максимальной информации о накоплении повреждений и степени разрушения структурных связей конструкционного материала на всех масштабных уровнях в процессе диагностики исследуемого изделия, а во-вторых, необходимостью отсеять основной массив механических, вибрационных и электромагнитных помех, возникающих в ходе мониторинга АЭ.

Как показали экспериментальные исследования [3—4], погрешность вычисления координат локации событий АЭ в основном зависит от правильности выбора скорости распространения импульса АЭ в стенке изделия и точности измерения времени его прихода на ПАЭ локационной решетки. К дополнительным причинам возникновения ошибок при планарной локации источников событий АЭ можно отнести следующее:

- отличие реальных путей распространения импульсов АЭ от расчетных;
- анизотропия акустических свойств материала изделия;
- высокий уровень затухания амплитуды импульса в стенке изделия;
- влияние дисперсии скорости на момент превышения волновым фронтом импульса установленного уровня порога дискриминации u_{th} ;

неправильная схема расстановки ПАЭ, настройки параметров системы АЭ, в том числе уровня порога дискриминации сигналов (u_{th}) и полосы пропускания цифровых фильтров (Δf).

Перед проведением АЭ диагностики исследуемого элемента изделия выполняют поверочное тестирование координатной локации событий АЭ, генерируемых электронным имитатором или источником Су-Нильсена (слоем грифеля цангового карандаша диаметром 0,3 мм). Излучение АЭ осуществляют вблизи и на удалении от ПАЭ антенной решетки и сравнивают результаты измерений с реальными координатами положения имитатора АЭ. Если точность определения координат событий АЭ не соответствует заданному уровню погрешности, оптимизируют настройки системы АЭ, изменяют базовый размер антенной решетки, количество ПАЭ в локационных группах и их взаимное расположение. После корректировки настроек системы АЭ и изменения схемы расположения ПАЭ повторно тестируют точность локации событий АЭ.

В процессе прохождения акустического канала от источника излучения до приемного преобразователя на импульс АЭ влияют такие факторы, как дисперсия, дифракция, реверберация и интерференция, в результате чего он «расплывается», трансформируясь в волновой пакет различных мод, то есть упругих волн различных типов, каждая из которых имеет свою частоту и скорость распространения в стенке изделия [3—8]. Поэтому приемные преобразователи в каждый момент времени могут регистрировать различные моды волнового пакета импульса АЭ в зависимости от того, какая из них менее затухла или исказилась в акустическом канале.

Объекты исследования обычно имеют различные конструкционные особенности: сварные швы, люки, технологические отверстия, патрубки, кромки, грани, вырезы, влияющие на геометрию распространения импульса АЭ и время его прихода на ПАЭ локационной решетки, а следовательно, РВП и скорость распространения волнового пакета. Перечисленные факторы дают основания полагать, что более корректным является подбор значений V_g , исходя из результатов предварительного тестирования исследуемого изделия, как, например, предлагается в технологии Δt -mapping [6—7], или численного моделирования распространения упругих волн в конструкции [8—9].

Задача проводимых исследований состояла в экспериментальном определении влияния размера и геометрии полосовых и круговых вырезов на время регистрации импульсов АЭ приемными преобразователями в зависимости от их положения относительно кромки выреза (зоны затенения), численного моделирования распространения акустических волн при огибании вырезов и определении погрешности координатной локации событий АЭ в зоне затенения в зависимости от количества и расположения ПАЭ в локационной группе.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Изучение влияния полосовых и круговых вырезов на распространение волн импульсов АЭ проводили на пластинах из стали 20 толщиной 20 мм с габаритными размерами 440×440 мм. В центральной части пластин фрезерованием были выполнены полосовые и круговые вырезы различного диаметра и длины, форма и размеры которых показаны в нижней половине эскизов на рис. 1. Исследовались пластины с радиусом отверстий 20, 30, ..., 100 мм. Полосовые прорезы в центральной части пластин выполнялись фрезой 20 мм и длиной до 200 мм. Таким образом при исследовании перекрывался весь ряд возможных эллиптических вырезов от 20 до 200 мм. Квадратные вырезы, в углах которых возникают высокие градиенты напряжений, как правило, не типичны для несущих элементов конструкций. Поэтому в проводимых исследованиях они не рассматривались. В ходе экспериментов в качестве генератора импульсов АЭ применялся электронный имитатор ООО «Интерюнис», оснащенный широкополосным преобразователем SE-1000 фирмы «Dunegan» с конусным излучателем диаметром 2 мм. Приемниками импульсов АЭ служили резонансные преобразователи R15- α фирмы «Mistras», которые устанавливались диаметрально на расстоянии 150 мм относительно центральной оси выреза. Для регистрации и обработки данных АЭ использовалась многопараметрическая восьмиканальная система A-line 32D производства ООО «Интерюнис-ИТ». Схема расположения излучателя сигналов — преобразователя и приемников импульсов АЭ — преобразователей R15 α (ПАЭ № 1 и ПАЭ № 2) на стальных пластинах показана на рис. 1. На шагах проводимых измерений РВП излучатель SE-1000 и ПАЭ № 1 находились от центра полосовых и круговых вырезов в пластинах на одинаковом удалении, соответственно равном 170 и 150 мм. Удаленный ПАЭ № 2, устанавливаемый на противоположенной стороне от выреза, смещался относительно его кромки с шагом 10 мм. Расстояние ΔL_j от кромки поперечного полосового выреза до центра ПАЭ № 2 на шагах проводимых измерений РВП изменялось от 10 до 140 мм. Расстояние между преобразователями и

размер ΔL_j удаления ПАЭ № 2 от кромки полосового выреза связывает следующая зависимость:
 $L_j = 160 + \Delta L_j$.

Для круговых вырезов расстояние между ПАЭ и размер удаления второго преобразователя от кромки отверстия $\Delta L_j = 20, 30, \dots, 130$ мм на шагах проводимых измерений РВП связывает следующая зависимость: $L_j = 150 + R_i + \Delta L_j$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСОВ В ИССЛЕДУЕМЫХ ПЛАСТИНАХ

Средние выборочные значения РВП импульсов АЭ на преобразователи R15а, зарегистрированные на шагах проводимых измерений для полосовых и круговых вырезов с размерами $R_i = 20, 30, \dots, 100$ мм при удалении ПАЭ № 2 от их кромки на расстояние $\Delta L_j = 10, 20, \dots, 140$ (130) мм, представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Средние выборочные значения разности времени прихода импульсов ($\Delta\tau_{R_i, L_j}$) (мкс) на преобразователи для полосовых вырезов R_i в пластинах при удалении ПАЭ № 2 от кромки выреза на ΔL_j

ΔL_j , мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	
L_j , мм	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	
R_i , мм	0	51	54	56	59	63	68	72	76	80	82	85	88	90	93
	20	72	71	72	74	76	78	80	82	85	89	92	95	98	101
	30	75	76	77	80	85	87	89	91	95	98	100	103	105	108
	40	80	81	82	84	86	88	89	91	92	94	96	99	103	110
	50	85	84	84	86	88	90	93	95	97	100	103	106	109	114
	60	85	86	87	88	90	93	96	98	101	105	109	113	116	120
	80	88	87	89	91	93	95	98	102	106	110	113	117	120	123
	100	91	93	94	96	98	101	104	106	109	111	115	119	121	126

Таблица 2

Средние выборочные значения разности времени прихода импульсов ($\Delta\tau_{R_i, L_j}$) (мкс) на преобразователи для круговых вырезов R_i в пластинах при удалении ПАЭ № 2 от кромки выреза на ΔL_j

$(R_i + \Delta L_j)$, мм	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	
L_j , мм	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	
R_i , мм	0	52	55	59	61	65	69	73	77	80	84	87	89	92
	20	65	66	68	70	72	75	77	80	83	87	90	94	97
	30		72	73	74	76	77	81	85	88	91	94	97	100
	40			84	83	84	88	90	93	95	98	102	104	106
	50				96	97	98	99	101	103	105	107	110	114
	60					104	105	106	108	109	112	115	118	122
	80							120	119	121	123	124	126	128
	100									130	129	130	131	132

В верхней половине эскизов рис. 1 показаны графики средних выборочных значений коэффициентов (K_{R_i, L_j}) возрастания времени прихода импульсов на преобразователи № 1 и № 2 в зависимости от размера выреза (R_i) и расстояния от его кромки до центра ПАЭ № 2 (ΔL_j).

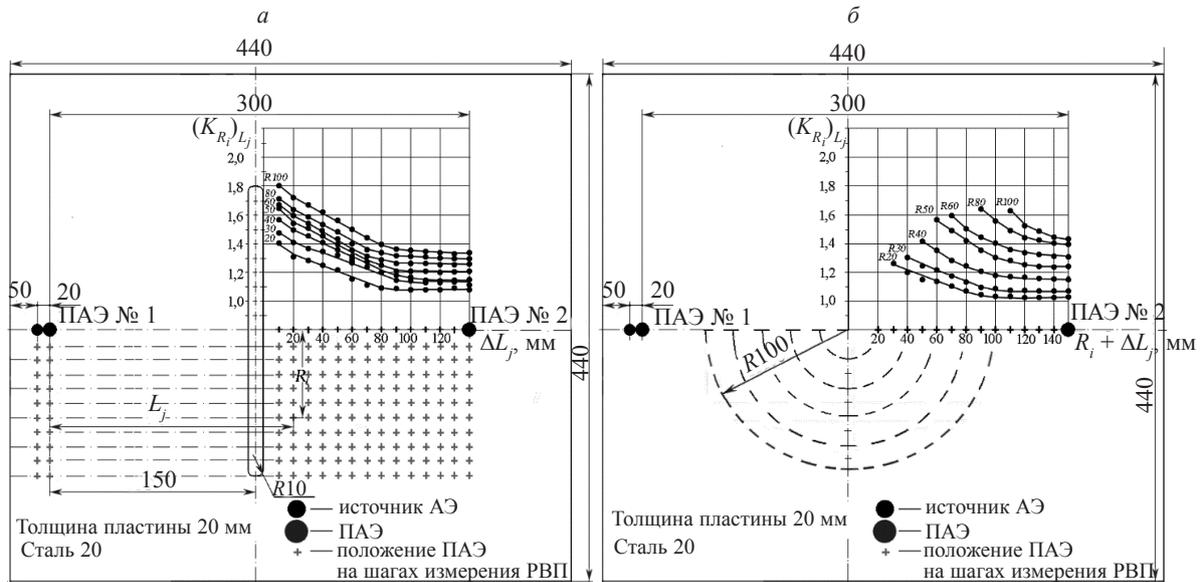


Рис. 1. Размеры пластин и графики средних выборочных значений коэффициентов $(K_{R_i})_{L_j}$ возрастания разности времени прихода импульсов $(\Delta\tau_{R_i})_{L_j}$ на преобразователи в зависимости от размера выреза (R_i) и удаления ПАЭ № 2 от его кромки (ΔL_j) относительно времени $(\Delta\tau)_{L_j}$ в отсутствие выреза, построенные по результатам измерений РВП в пластинах с полосовым (а) и круговым вырезами (б).

Величина коэффициента влияния размера выреза (R_i) и удаления ПАЭ № 2 от его кромки (ΔL_j) на разницу времени прихода импульса АЭ на приемные преобразователи подсчитывалась следующим образом:

$$(K_{R_i})_{L_j} = \frac{(\Delta\tau_{R_i})_{L_j}}{(\Delta\tau)_{L_j}},$$

где $(\Delta\tau_{R_i})_{L_j}$ — значения РВП, регистрируемые на расстоянии L_j между ПАЭ при размере выреза $2R_i$; $(\Delta\tau)_{L_j}$ — измерения РВП на расстоянии L_j в пластине при отсутствии выреза.

Как следует из сопоставления графиков $(K_{R_i})_{L_j}$ на эскизах рис. 1, построенных по результатам измерений РВП на преобразователи № 1 и № 2 в стальных пластинах с полосовыми и круговыми вырезами при размерах R_i : 20, 30, ..., 100 мм и удалении ПАЭ № 2 относительно кромки выреза в интервале $\Delta L_j = 10$ —140 мм, уровень этих коэффициентов в основном зависит от размера выреза R_i и расстояния ΔL_j . Если при значениях размера $R_i = 20$ мм максимальное значение $(\Delta\tau_{R_i})_{L_j}$ в области затенения возрастало на 30—40 % по сравнению с его величиной $(\Delta\tau)_{L_j}$, зарегистрированной на соответствующих расстояниях L_j при отсутствии выреза между ПАЭ, то при значениях $R_i = 80$ —100 мм рост уровня РВП в области кромки выреза достигал 70—80 %. Следует отметить, что при смещении ΔL_j удаленного преобразователя (ПАЭ № 2) от кромки выреза до предельного размера $\Delta L_j = 140$ —150 мм наблюдался достаточно широкий разброс значений, достигающий 25—30 % в интервале $\pm 2S$ (среднего квадратичного отклонения) при изменении размера прорези R_i от 50 до 100 мм. Однако формы кривых и средние выборочные значения коэффициентов $(K_{R_i})_{L_j}$, представленные на графиках для соответствующих точек положения ПАЭ № 2 при сопоставлении соизмеримых вырезов и отверстий в исследованных пластинах, различаются незначительно. Максимальные расхождения сопоставляемых средних значений коэффициентов не превышают 11 % от наименьшего из них, то есть форма выреза в значительно меньшей степени влияет на значение РВП, чем размер R_i выреза и расстояние ΔL_j — удаление преобразователя от зоны затенения.

Об этом также свидетельствуют результаты проведенного численного моделирования распространения волн смещения поверхности в тестовых пластинах. Расчеты проводились для моделей пластины с полосовыми и круговыми вырезами аналогичными тем, которые были в пластинах при экспериментальных исследованиях. Моделируемые источники излучения импульсов АЭ, их амплитуда и форма волн были приближены к тем, что регистрировались преобразователями R15-а на расстоянии 20 мм от источника АЭ (ПАЭ № 1) и на расстоянии $L_j = 170$ —320 мм (ПАЭ № 2). На рис. 2 приведены характерные формы импульсов, регистрируемых преобразователями и имитируемых при численном моделировании.

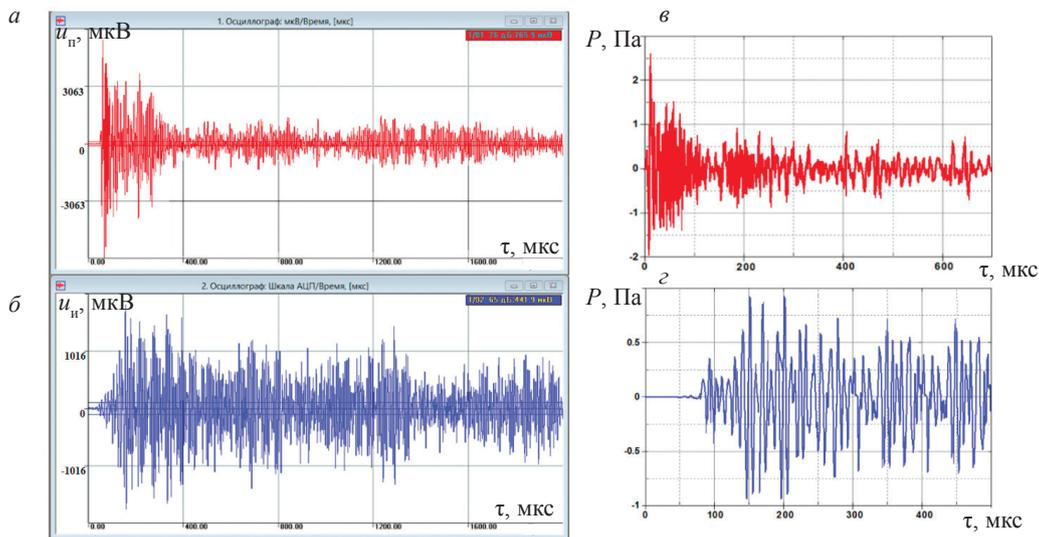


Рис. 2. Формы импульсов, регистрируемые ПАЭ № 1 (а) на расстоянии 20 мм от источника АЭ и ПАЭ № 2 (б) на расстоянии 320 мм после огибания отверстия с размером $R_i = 100$ мм, имитируемых при численном моделировании распространения волн давления в пластине с таким же вырезом на соответствующем удалении от источника (в) и (г).

Максимальный уровень амплитуды давления, принятый равным 3 Па, определялся исходя из значений параметров сигнала (амплитуды и длительности) в месте источника событий АЭ (ПАЭ № 1) и значений параметров сигналов, регистрируемых ПАЭ № 2 на удалении L_j .

Моделирование распространения импульсов АЭ в стальных пластинах толщиной 20 мм с поперечными полосовыми и круговыми вырезами осуществлялось в программной среде LS-DYNA [10] с препроцессором ANSYS Workbench [11]. При трехмерном конечно-элементном моделировании характерный размер сетки был выбран исходя из условия наличия не менее 20 элементов на длину волны, что позволяло воспроизвести точную волновую картину без влияния размера ячейки на амплитуду и частоту колебаний [12]. Длина волны для поверхностной волны Рэлея в стальной пластине толщиной 20 мм при ее фазовой скорости примерно равной 3600 м/с и основной несущей частоте излучателя SE-1000 порядка 100 кГц составит $L = V_g/f = 3600/100000 = 0,036$ м. Поэтому максимальный размер элемента сетки может быть принят равным $L/20 = 1,8$ мм. Расчетная сетка пластин содержала 450000 узлов и элементов гексаэдрического типа с шагом 1,8 мм, что позволяло осуществлять моделирование распространения волн смещения с учетом процессов дифракции, реверберации и интерференции при существенной экономии вычислительных ресурсов. Плотность материала, модуль упругости и коэффициент Пуассона для стали 20, согласно справочным данным [13], при проведении численных расчетов принимались следующими: $\rho = 7800$ кг/м³, $E = 210$ ГПа, $\nu = 0,3$. При проведении расчетов использовалась система соотношений механики сплошной среды (уравнения Эйлера для течения невязкой сплошной среды), содержащая уравнения сохранения массы, импульса и энергии, а также уравнение состояния металла [14]. Задача решалась в упругой постановке методом конечных элементов [15—17] с применением явной схемы интегрирования по времени. Внешние границы пластины и внутренняя у отверстия задавались как свободные, ограничивалось перемещение торца пластины, противоположного расположению излучателя.

На рис. 3 представлены картины распространения упругих волн в исследуемых пластинах, имитирующие смещения поверхности при обтекании волной импульса АЭ полосового (а, б) и кругового (в, г) вырезов с размером $R_i = 100$ мм, полученные в момент времени $t_1 = 50$ мкс и $t_2 = 150$ мкс после излучения. Давление в месте источника возмущения поверхностных волн было принято равным $P = 3$ Па. Аналогичные волновые картины численного моделирования огибания импульсами АЭ полосовых и круговых вырезов пластин были получены для различных размеров R_i от 20 до 80 мм.

Как видно из сравнения приведенных на рис. 3 результатов численного моделирования волновых процессов, полученных для 50 и 150 мкс распространения импульса АЭ в пластинах с полосовыми (а, б) и окружными вырезами (в, г), сопоставляемые для данных моментов времени картины волн давления и уровни амплитуды в соответствующих точках поверхности достаточно близки. Таким образом, результаты численного моделирования достаточно хорошо согласуются с экспери-

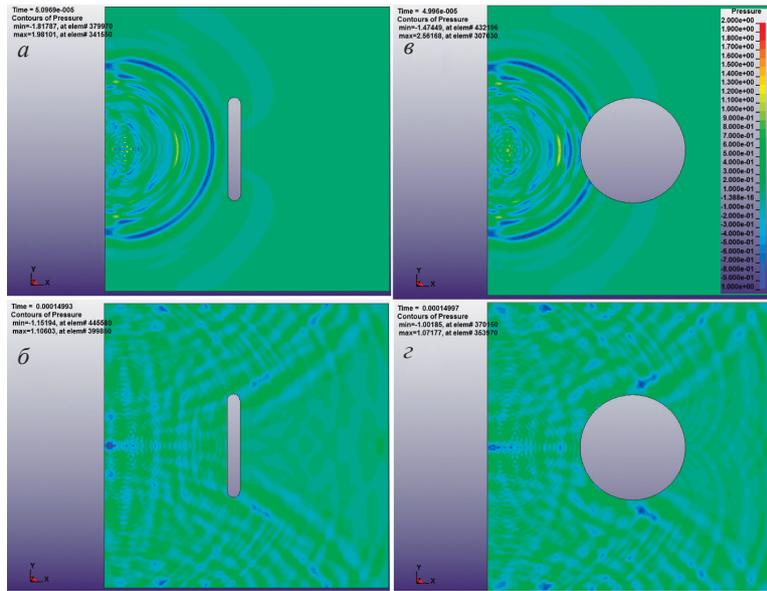


Рис. 3. Волновые картины, полученные численным моделированием для 50 и 150 мкс распространения импульса АЭ в пластинах с полосовым (а, б) и окружным (в, г) вырезами размером $R_i = 100$ мм.

ментальными данными, свидетельствующие о том, что форма выреза в существенно меньшей степени сказывается на коэффициенте $(K_{R_i})_{L_j}$ возрастания разности времени прихода импульсов $(\Delta\tau_{R_i})_{L_j}$ на ПАЭ локационной решетки, чем размер выреза R_i и расстояние ΔL_j — удаление преобразователя относительно его края.

С целью оценки влияния выреза на точность вычисления координат источника событий АЭ при планарной локации, как правило, осуществляемой по триангуляционной схеме на основании значений РВП и известной скорости распространения импульса АЭ в стенке изделия [4], были проведены следующие экспериментальные исследования. В плите из стали 20 толщиной 40 мм с габаритными размерами 430×320 мм и круговым вырезом диаметром 100 мм были осуществлены контрольные замеры координат источника событий АЭ. В качестве источника генерации импульсов АЭ использовался электронный имитатор ООО «Интерюнис», силовое нагружение пластин не проводилось. Излучатель SE-1000 располагался вблизи кромки отверстия на равном расстоянии от ПАЭ № 1 и № 2 и в зоне затенения для ПАЭ № 3, который был расположен на диаметрально противоположной стороне плиты относительно выреза. Преобразователи антенной решетки были равномерно удалены от центра выреза, образуя равносторонний треугольник со стороной $B = 300$ мм. Как следует из результатов локации источника событий АЭ, представленных на рис. 4, отклонения вычисленных

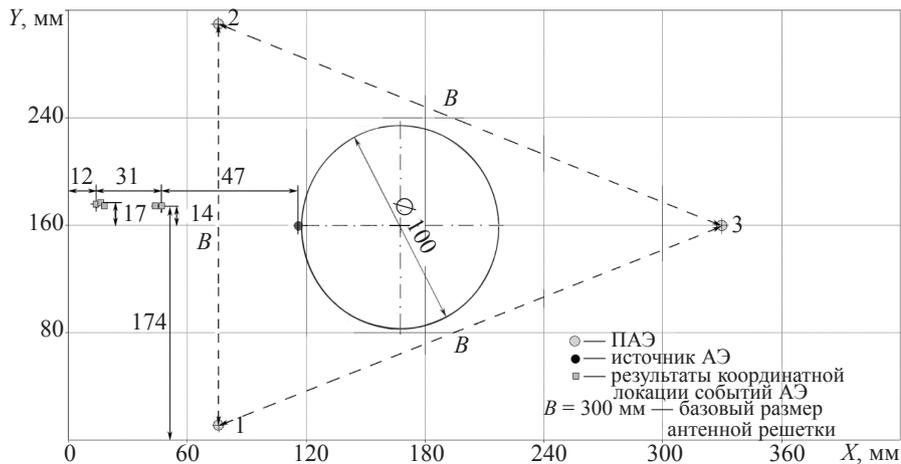


Рис. 4. Результаты координатной локации источника событий АЭ, расположенного вблизи кромки кругового выреза диаметром 100 мм в стальной плите толщиной 40 мм, полученные с применением антенной решетки из трех преобразователей R15а.

значений координат вдоль горизонтальной оси от истинного положения источника, расположенного у кромки отверстия, достигали $\Delta X = 47\text{—}78$ мм, что составляет 16—26 % относительно базового размера локационной решетки $B = 300$ мм.

На рис. 5 представлена картина численного моделирования смещений поверхности исследуемой стальной плиты на 97 мкс распространения импульса АЭ в момент достижения удаленного преобразователя антенной решетки (ПАЭ № 3), расположенного от источника АЭ на диаметрально противоположной стороне плиты относительно выреза. Как следует из результатов численного моделирования, время прихода импульса АЭ на ближние преобразователи (ПАЭ № 1 и № 2) практически на 40—45 мкс меньше времени достижения волной ПАЭ № 3. Амплитуда смещений поверхности в местах расположения ПАЭ № 1 и № 2 практически на порядок отличается от уровня амплитуды смещений поверхности в места расположения ПАЭ № 3. Таким образом, наблюдается достаточно хорошая сходимость экспериментальных данных и результатов численного моделирования, показывающих как размер выреза и положение источника в зоне затенения для ПАЭ № 3, влияют на точность локации событий АЭ.

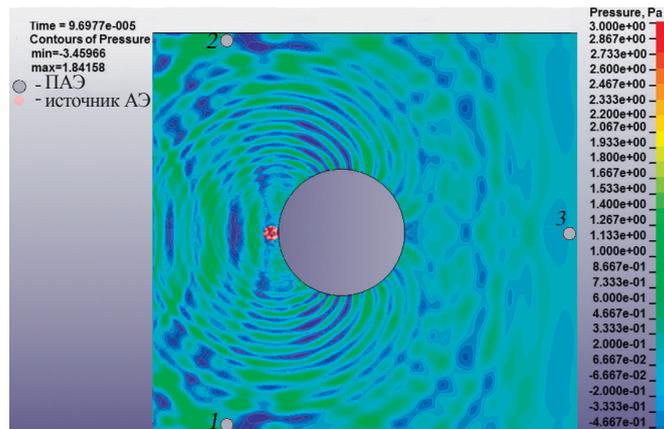


Рис. 5. Картина волн давления в плите с круговым вырезом на 97 мкс, имитирующая распространение импульса АЭ в момент достижения им удаленного преобразователя антенной решетки (ПАЭ № 3).

При использовании триангуляционной схемы локации для исключения зон затенения, возникающих при вычислении координат источников событий АЭ в области кромки больших технологических вырезов и отверстий, количество ПАЭ в антенной решетке должно быть не менее четырех. На примере исследованной стальной плиты с центральным круговым вырезом диаметром 100 мм покажем, как влияет увеличение количества ПАЭ в антенной решетке на точность локации событий АЭ.

На рис. 6 приведена антенная решетка, состоящая из четырех ПАЭ, равноудаленных от центра отверстия и расположенных по схеме квадрата при сохранении базового размера $B = 300$ мм.

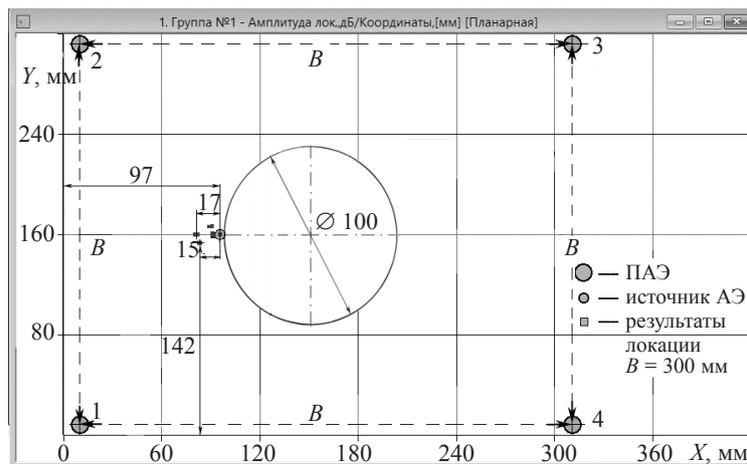


Рис. 6. Результаты координатной локации источника событий АЭ, расположенного вблизи кромки кругового выреза диаметром 100 мм в стальной плите толщиной 40 мм, полученные с применением антенной решетки из четырех преобразователей R15а.

Источник АЭ располагался также, как и в предыдущем случае, то есть вблизи кромки отверстия на горизонтальной оси.

Как видно из приведенных на рис. 6 результатов локации, наибольшее отклонение вычисляемых значений координат событий АЭ в горизонтальном направлении не превышало 17 мм от истинного положения источника событий АЭ — 6 % относительно базового размера антенной решетки, а в вертикальном направлении составляло всего лишь 8 мм — 3 %. Таким образом, увеличение количества ПАЭ с трех до четырех в локационной группе при определении координат источника событий АЭ, расположенного на кромке отверстия диаметром 100 мм в стальной плите, позволило более, чем в четыре раза снизить погрешность локации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Проведенные исследования наглядно показали, что форма выреза в значительно меньшей степени влияет на РВП импульсов на ПАЭ антенной решетки, чем размер выреза R_i и расстояние ΔL_j — удаление преобразователя от кромки выреза. Об этом также свидетельствуют результаты проведенного численного моделирования распространения волн смещения в исследуемых пластинах (см. рис. 2). Как следует из графиков значений коэффициентов $(K_{R_i})_{L_j}$ см. на рис. 1, если при размере выреза $R_i = 20\text{—}30$ мм максимальное значение $(\Delta\tau_{R_i})_{L_j}$ на кромке выреза возрастает на 30—40 % по сравнению с его величиной $(\Delta\tau)_{L_j}$, зарегистрированной на соответствующих расстояниях L_j при отсутствии выреза, то при вырезах $R_i = 80\text{—}100$ мм рост уровня РВП в зоне затенения достигает уже 70—80 %. При этом максимальные расхождения сравниваемых средних значений коэффициентов $(K_{R_i})_{L_j}$ для соответствующих точек положения ПАЭ № 2 при сопоставлении полосовых и круговых вырезов в исследованных пластинах, не превышают 11 % от наименьшего из них.

2. Использование численного моделирования для визуализации процессов распространения акустических волн возле полосовых и круговых вырезов пластин позволило существенно повысить информативность проводимых исследований. Результаты численного моделирования процессов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными на стальных пластинах с различными размерами и формой вырезов. Картины волн давления, полученные для полосовых и круговых вырезов, свидетельствуют о том, что время прихода импульсов на преобразователи антенной решетки в большей степени зависит от размера выреза и расстояния ПАЭ от зоны затенения — кромки выреза, чем от его формы. Корректность численного моделирования подтверждается совпадением расчетных форм импульсов с регистрируемыми ПАЭ при одинаковом удалении от источника АЭ (см. рис. 2).

3. Тестирование точности координатной локации событий АЭ в зоне затенения — на кромке отверстия диаметром 100 мм в стальной плите толщиной 40 мм, проведенное с применением электронного имитатора по триангуляционной схеме локации (см. рис. 4) и численного моделирования (см. рис. 5), показало достаточно хорошую сходимость результатов РВП. Увеличение количества преобразователей в локационной группе с трех до четырех ПАЭ позволяет существенно уменьшить влияние зон затенения на точность координатной локации событий АЭ, снижая максимальную погрешность в четыре раза с 26 до 6 % относительно базового размера антенной решетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследования влияния размеров и формы вырезов, расположения приемных преобразователей относительно источников АЭ в зонах затенения на разность времени прихода импульсов на ПАЭ антенной решетки, а также методика их применения может быть использована при проведении АЭ-диагностики конструктивно сложных элементов изделий, включающих технологические вырезы и отверстия. Применение численного моделирования дает возможность существенно повысить информативность проводимых исследований, отражая динамику распространения волн смещений поверхности с учетом влияния дифракции и реверберации при обтекании полосовых и круговых вырезов в различные моменты времени. Его использование для визуализации процессов распространения акустических волн в изделиях сложной конфигурации позволяет в значительной степени сократить объем необходимых экспериментальных исследований для достижения требуемой точности локации событий АЭ в зонах затенения акустических волн.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 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. 2015. 8 с.
3. *Иванов В.И., Барат В.А.* Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
4. *Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И.* и др. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / Под ред. Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. М.: Машиностроение. Полет, 2008. 440 с.
5. *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. No. 6. P. 856—863.
6. *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. N. 3. P. 1512—1520.
7. *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.
8. *Gollob S., Vogel T.* Updating cracks within a heterogeneous numerical model based on estimated AE source locations / *PROGRESS in ACOUSTIC EMISSION XVIII. JSNDI & III AE*. Kyoto. 2016. P. 281—285.
9. *Sause M.G.R.* Modeling of acoustic emission sources in fiber reinforced composites / *PROGRESS in ACOUSTIC EMISSION XVIII. JSNDI-23 & III AE*. Kyoto. 2016. P. 305—310.
10. *Hallquist John O.* LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. 2006. 498 p.
11. *Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В.* Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
12. *Немирович-Данченко М.М., Шатская А.А.* Численное моделирование распространения сейсмических волн в среде, содержащей одиночную пору или пористый слой // *Физическая мезомеханика*. 2013. № 3. С. 101—104.
13. *Берштейн М.Л., Займановский В.А.* Механические свойства металлов. М.: Металлургия. 1989. 495 с.
14. *Физика взрыва* / Под ред. Л.П. Орленко. В 2-х т. Т.1. М.: Физматлит, 2006. 304с.
15. <https://www.dynamore.de/en/downloads/infodays/dokumente/2014-Aku-ppt/3-dynamore-info-aku-huang-et-al.pdf>
16. *Ricci F.* et al. Ultrasonic Guided Waves for Hidden Damage Detection in Composite Structures / *Nondestructive testing of Materials and Structures. Proc. of NDTMS*. Istanbul. 2011. P. 579—584.
17. *Markovic N.* Numerical modeling of ultrasonic wave propagation — by using of explicit fem in abaqus // *Architecture and Civil Engineering*. 2018. V. 16. No. 1. P. 135—147.