

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Марасанов В. В., *д.т.н., профессор, профессор кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета,*
E-mail: kafedra_tk@kntu.net.ua;

Шарко А. А., *магистр Херсонского национального технического университета,*
E-mail: kafedra_tk@kntu.net.ua

Предложено математическое обоснование обеспечения построения моделей определения координат источников акустической эмиссии и алгоритмов поиска дефектов. Показано, что параметры сигналов акустической эмиссии связаны с локальными перестройками структуры материалов и процессами движения дислокаций. Дано описание строения типовых схем расположения датчиков при контроле дефектов методом акустической эмиссии. Предложены формулы локализации источников акустической эмиссии при различных вариантах расположения датчиков на плоскости.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, акустическая эмиссия, координаты дефектов*

Актуальность темы. Использование методов акустической эмиссии в устройствах неразрушающего контроля позволяет вести мониторинг разнообразных по форме и размерам металлических конструкций. Применение методов акустической эмиссии для неразрушающего контроля металлических конструкций в большинстве случаев сводится к определению места дефекта. Растущий дефект производит сигнал, который может быть обнаружен дистанционно и представляется возможным найти его местоположения путем обработки разницы времени прихода волны. По интенсивности актов эмиссии принимает заключение об опасности дефектов. С этих позиций тема работы приобретает актуальность.

Анализ публикаций по проблеме построения модели определения координат дефектов по источникам сигналов акустической эмиссии показывает, что вопросы зависимости параметров волн эмиссии от размеров дефектов, материалов, величины нагрузки и т.д. постоянно находятся в центре внимания [1–8].

Цель работы. Обоснование моделей и алгоритмов поиска дефектов путем определения координат источников сигналов акустической эмиссии.

Изложение основного материала. В процессе изучения механизма разрушения изделий было установлено, что по мере того, как материал упруго деформируется, часть накопленной энергии упругой деформации освобождается в виде волн напряжений, называемых акустической эмиссией. Акустическая эмиссия воспринимается от очень низких уровней деформации порядка 0,05 % до уровней высоких напряжений, вплоть до излома. Впервые существование эффекта акустической эмиссии было предсказано Кайзером в 1953 г. [9]. Было высказано предположение, что измеряя параметры, характеризующие излучение акустической волны, можно определить координаты места этого излучения и установить взаимосвязь параметров излучения с самими явлениями, протекающими при пластическом деформировании.

Разработанные методы диагностического контроля и необходимая для этих целей аппаратура предоставляют широкие возможности для неразрушающей диагностики сосудов давления, сварных и клеевых соединений, обнаружения усталостных трещин, изменения структуры материалов.

Тесная связь между процессами, происходящими внутри материала при разрушении, и наличием эффекта акустической эмиссии позволяет, регистрируя эффект акустической эмиссии, определить степень опасности происходящих в материале изменений.

Метод акустической эмиссии основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и разрушения контролируемых объектов. Это позволяет формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. С помощью метода акустической эмиссии можно измерять уровень напряжений и деформаций материала, обнаруживать развивающиеся дефекты, определять их координаты, оценивать степень опасности при оценке состояния конструкций и сооружений. Однако эти методы не нашли пока широкого практического применения. Объясняется это их относительной новизной, наличием ряда нерешенных еще вопросов теории и практики, а также отсутствием систематизированной информации, широкому кругу специалистов, о сущности и возможностях методов, их достоинствах и недостатках, рациональных областях применения.

Акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля в трех ключевых аспектах:

- источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, т.е. метод является пассивным;
- в отличие от других методов акустическая эмиссия обнаруживает развивающиеся наиболее опасные дефекты;
- метод является дистанционным, т. к. не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов, а лишь правильного размещения датчиков на поверхности объекта для осуществления локации источника акустического сигнала.

Анализ возникновения сигналов акустической эмиссии с точки зрения математической теории упругости позволяет сделать предположение о возможности модельного представления развития дефектов.

Параметры сигналов АЭ, связанных с локальными перестройками структуры материалов, взаимосвязаны с параметрами кинетики развития дефектов и разрушения материала. Одним из источников деформационных сигналов являются процессы движения дислокаций.

Частотный спектр сигналов акустической эмиссии простирается от области слышимых частот до десятков и сотен мегагерц. Известно, что пластические и прочностные свойства материала определяются наличием в нем дислокаций. В зависимости от направления обрыва атомной плоскости к дислокациям приписывают положительный и отрицательный знак. Их взаимодействие обуславливается упругими напряжениями, вызываемыми каждой дислокацией. Ускоренное движение и аннигиляция дислокаций вызывают акустические импульсы.

В процессе деформации в условиях эксплуатации при знакопеременных нагрузках изменяется длина дислокационной петли. Уменьшение длины дислокационных петель сказывается на уменьшении затухания и увеличении скорости акустических волн [5]. Форма дислокации при малом и большом затухании среды представлена на рис. 1.

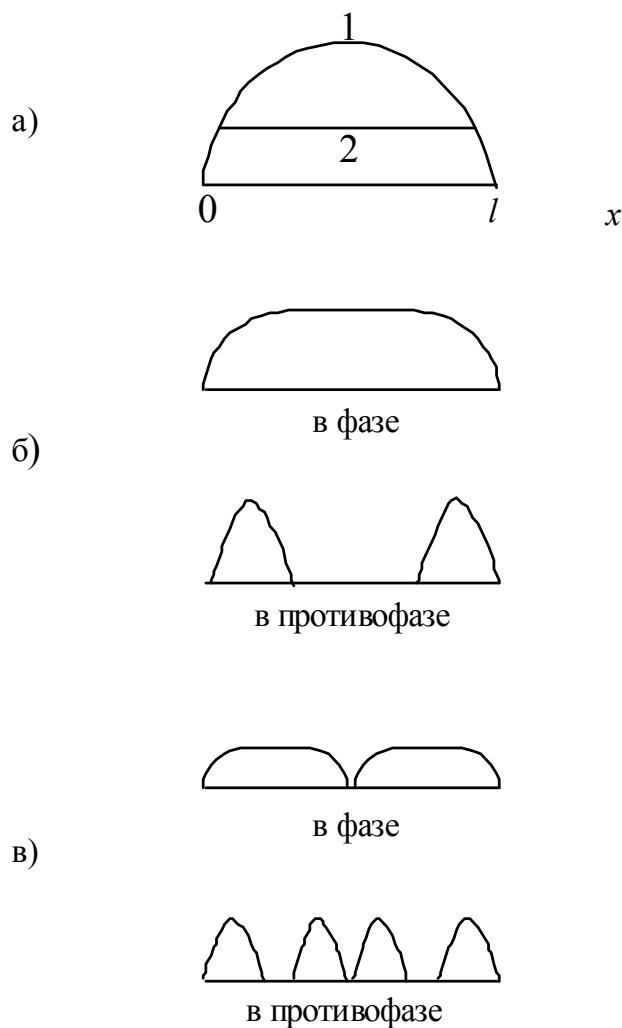


Рисунок 1 – Форма дислокации (а) при малом (1) и большом (2) затухании среды. Схема смещения дислокации под действием приложенного напряжения с двумя (б) и с тремя (в) центрами закрепления

Дислокационная петля длиной l в момент, когда приложенное напряжение равно 0, может быть представлена прямой линией, лежащей вдоль оси x от $x = 0$, до $x = l$. Под действием напряжения дислокационная петля изгибается между точками закрепления на концах (кривая 1 на рис. 1а). движение дислокации при образовании дефекта ограничивается только натяжением дислокационной линии. Точки среды, находящиеся вблизи центра закрепления дислокации имеют небольшое смещение. Поэтому они находятся в фазе с приложенным напряжением. Точки среды, находящиеся по середине дислокации отстают по фазе от приложенного напряжения на $\frac{\pi}{2}$. Это видно из рис. 1б, где представлена кривая 2, часть которой находится в фазе, а часть в противофазе с приложенным напряжением. Если длина петли l велика, то смещение вдоль большей ее части будет в противофазе.

При акустических измерениях находящееся в противофазе и находящееся в фазе смещение определяется отдельно. Смещение находящиеся в противофазе приводит к затуханию, а смещение находящееся в фазе – к изменению скорости распространения акустических волн. Если продолжать добавлять точки закрепления, то дислокационное смещение будет постоянно уменьшаться и в конце-концов составляющие смещения становятся полностью закрепленными. Уменьшение расстояния между точками

закрепления приводит к взаимодействию между ними, что и определяет обычно наблюдаемое в эксперименте изменение скорости, так как чем больше точек закрепления, тем больше сегментов, движение которых ограничено линейным натяжением.

В зависимости от конфигураций расположения группы датчиков при обнаружении развивающихся дефектов возможны следующие наиболее простые варианты их расположения на контролируемой поверхности:

- центрированного треугольника;
- ромба;
- прямоугольника;
- в виде буквы «Г»;
- равнобедренного треугольника.

Математическая модель обнаружения дефектов основывается на существовании однозначной зависимости между напряжениями в среде и смещениями при наличии развивающегося дефекта:

$$U(r,t) = f\left(\frac{1}{\sqrt{r}}, t, \Delta t, p, l, \Delta l\right),$$

где $U(r,t)$ – смещение точек среды, r – расстояние от датчика до источника сигнала, t – время зарождения сигнала, Δt – время принятия сигнала датчиком акустической эмиссии, p – скачок напряжений на границе субмикротрещин, l – размер дефекта, Δl – приращение размера дефекта в процессе развития.

Анализ экспериментального и теоретического материала обнаружил ряд трудностей и ограничений в использовании предлагаемой модели:

- интенсивность сигналов акустической эмиссии в динамическом развитии дефектов различна;
- сигналы акустической эмиссии обладают большим диапазоном изменения характерных параметров;
- значения параметров сигналов акустической эмиссии при внутренней перестройке структуры материала и его дефектности носят стохастический характер с различными законами распределения вероятностей.

Важным информативным параметром сигнала служит степень локализации источника сигнала. Степень локализации дефекта определяется измерением координат источника акустической эмиссии. В основу метода определения координат положено измерение разности времени прихода импульсов акустической эмиссии к нескольким разнесенным в пространстве точечным акустическим датчикам, регистрирующим акты акустической эмиссии. Датчики в своем расположении могут образовывать сетку, опоясывающую всю конструкцию.

Для определения координат дефектов, т. е. локализации источников акустической эмиссии датчики устанавливаются в определенной конфигурации, которая образует так называемую антенную решетку. По взаимному расположению различают зональную, линейную, плоскостную и объемную схемы локации.

Зональная локация подразумевает такую расстановку датчиков, при которой сигнал из любой точки контроля доходит хотя бы до одного датчика. Она применяется при проведении испытаний, когда не требуется определение места расположения источников акустической эмиссии.

При линейной схеме сигнал из любой точки контроля воспринимается минимум двумя датчиками. Плоскостные схемы размещения датчиков требуют выполнения регистрации сигналов минимум тремя датчиками, объемные – четырьмя.

Алгоритмы расчета координат дефекта основаны на определении разности времени прихода фронта акустической волны к нескольким приемникам акустической эмиссии.

Наиболее точную информацию об источнике акустической эмиссии дает датчик, который является самым близким к нему.

Строение типовых схем. Объекты, для которых допустимо определение только одной координаты, т.е. таких, у которых один размер (длина) во много раз больше других размеров (ширины и толщины), являются линейными.

Для определения одной координаты достаточно измерить одну разность времени прихода, следовательно, достаточно двух приемников (рис. 2).



Рисунок 2 – Контроль линейного объекта

Если начало отсчета выбрать посередине между приемниками, т.е. $x_1 = -x_0$, то на счетчике разности времени прихода будет фиксироваться координата источника в масштабе с коэффициентом $2f/V$. Если частоту генератора заполняющих импульсов f подобрать численно равной $V/2$, то на счетчике разности времени прихода можно получить координату x в виде:

$$x = (x_0 + x_1 + V\Delta t) / 2,$$

где x_0 и x_1 – соответственно координаты нулевого и первого приемников, а V – скорость распространения волн акустической эмиссии.

Для случая двумерных объектов функция расстояния до источника акустической эмиссии имеет вид:

$$R(x, y) = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}.$$

Следовательно, определение координат для этого случая сводится к решению уравнения следующего вида:

$$VT_0 + V\Delta t_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}.$$

То есть для определения координат на плоскости необходимо измерить две независимых разности времен прихода. Для этого достаточно расположение на контролируемой поверхности трех приемников акустической эмиссии (рис. 3) $D_0(0;0), D_1(x_1; y_1), D_2(x_2; y_2)$.

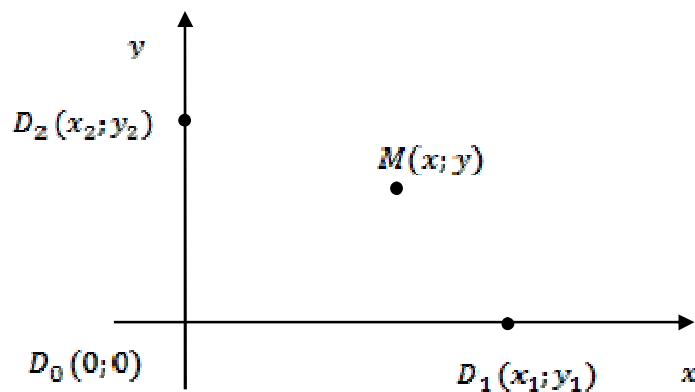


Рисунок 3 – Расположение трех приемников

Формулы для определения координат источника $M(x; y)$ находятся при использовании следующих обозначений:

$$VT_0 = R;$$

$$VT_1 = R + r_1;$$

$$VT_2 = R + r_2.$$

При расположении начала координат в точке приемника D_0 получим систему уравнений следующего вида:

$$(x - x_i)^2 - (y - y_i)^2 = (R + r_i)^2 \quad i = 0, 2.$$

Решение данной системы выглядит следующим образом:

$$x = K_1 R + A_1;$$

$$y = K_2 R + A_2;$$

$$r_1 = V\Delta t_1 = V(T_1 - T_0);$$

$$r_2 = V\Delta t_2 = V(T_2 - T_0);$$

$$K_1 = (r_1 y_2 - r_2 y_1) / (x_2 y_1 - x_1 y_2);$$

$$K_2 = (r_1 x_2 - r_2 x_1) / (x_1 y_1 - x_2 y_2);$$

$$A_1 = \frac{r_1^2 y_2 - r_2^2 y_1 + y_1 y_2 (y_2 - y_1) + x_2^2 y_2 - x_1^2 y_2}{2(x_2 y_1 - x_1 y_2)};$$

$$A_2 = \frac{r_1^2 x_2 - r_2^2 x_1 + x_1 x_2 (x_2 - x_1) + y_2^2 x_2 - y_1^2 x_2}{2(x_1 y_2 - x_2 y_1)};$$

$$R = \frac{(A_1 K_1 + A_2 K_2 \pm \sqrt{A_1^2 A_2^2 - (A_1 K_2 - A_2 K_1)^2})}{(K_1^2 K_2^2 - 1)}.$$

Представленные формулы позволяют определять координаты источника при произвольном расположении приемников.

Рассмотрим определение координат для случая симметричного расположения трех приемников:

– равнобедренный треугольник (рис. 4)

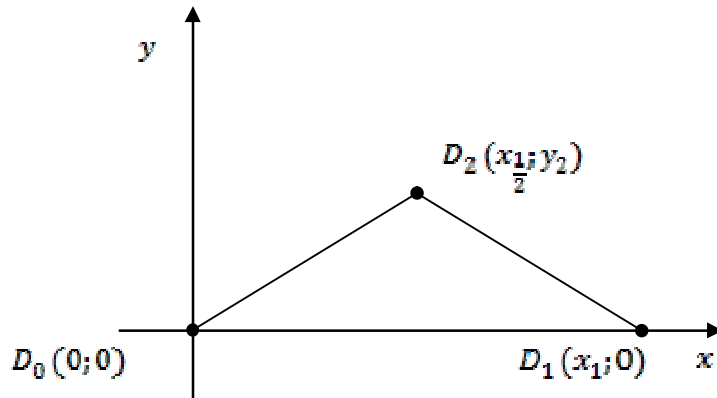


Рисунок 4 – Расположение приемников сигналов акустической эмиссии по типу равнобедренного треугольника

$$\begin{aligned}
 x &= K_1 R + A_1; \\
 y &= K_2 R + A_2; \\
 K_1 &= -r_1 / x_1; \\
 K_2 &= -r_2 / 2y_2; \\
 A_1 &= \frac{r_1^2 - x_1^2}{2x_1}; \\
 A_2 &= \frac{r_1^2 - 2r_2^2 + 2y_2^2 + 2x_1^2}{4y_2}; \\
 R_{1,2} &= \frac{(A_1 K_1 + A_2 K_2 \pm \sqrt{A_1^2 A_2^2 - (A_1 K_2 - A_2 K_1)^2})}{(K_1^2 K_2^2 - 1)};
 \end{aligned}$$

– прямоугольный треугольник (рис. 5)

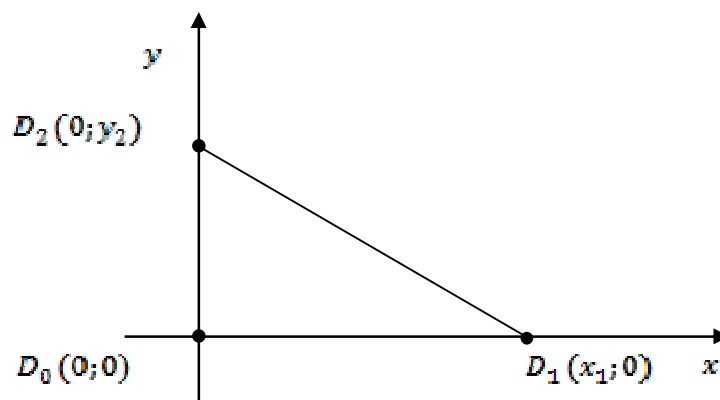


Рисунок 5 – Расположение приемников сигналов акустической эмиссии по типу прямоугольного треугольника

$$\begin{aligned}
 x &= K_1 R + A_1; \\
 y &= K_2 R + A_2; \\
 K_1 &= -r_1 / x_1; \\
 K_2 &= -r_2 / y_2; \\
 A_1 &= \frac{x_1^2 - r_1^2}{2x_1}; \\
 A_2 &= \frac{y_1^2 - r_1^2}{2y_2}; \\
 R &= \frac{(A_1 K_1 + A_2 K_2 \pm \sqrt{A_1^2 A_2^2 - (A_1 K_2 - A_2 K_1)^2})}{(K_1^2 K_2^2 - 1)};
 \end{aligned}$$

– три равноудаленных приемника сигналов акустической эмиссии на одной линии через одинаковые промежутки (рис.6)

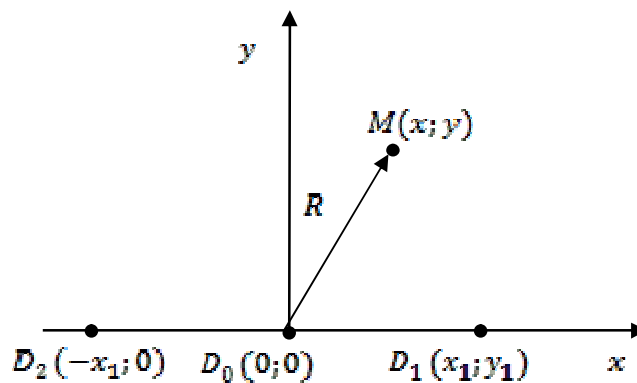


Рисунок 6 – Определение координат дефектов с помощью трех равноудаленных приемников сигналов акустической эмиссии

$$\begin{aligned}
 2R &= \frac{(r_2^2 - r_1^2 + 2x_1^2)}{r_1 - r_2}; \\
 x &= \frac{(x_1^2 - r_1(r_1 + 2R))}{2x_1} \\
 y &= \pm \sqrt{R^2 - x^2}
 \end{aligned}$$

При определении координат дефектов по трехточечной схеме необходимо измерять время распространения сигнала от приемников, образующих треугольник. Тогда источник акустической эмиссии будет находиться внутри треугольника и его координаты будут определены однозначно. Формулы для определения координат источника, становятся тем проще, чем больше координат приемников стремятся к нулю.

Выводы. Преимуществами метода акустической эмиссии перед другими методами неразрушающего контроля являются: интегральность метода, которая заключается в том, что используя один или несколько датчиков, установленных неподвижно на поверхности объекта, можно проконтролировать весь объект целиком. В отличие от сканирующих методов неразрушающего контроля метод акустической эмиссии не требует тщательной

подготовки поверхности объекта контроля. Обнаружение регистрации развивающихся дефектов позволяет классифицировать дефекты не только по их размерам, но и по степени их опасности.

Предложенное математическое обеспечение построения моделей определения координат источников акустической эмиссии позволяет локализовать дефекты, наглядно просмотреть или накопить информацию о поведении дефекта.

Метод акустической эмиссии позволяет обнаруживать дефекты структуры материала на уровне скопления дислокаций. При этом анализируются только развивающиеся дефекты. Несмотря на то, что методы акустической эмиссии еще находятся в стадии становления и развития можно с уверенностью сказать, что появился новый мощный инструмент для определения качества материала металлоконструкций. В совокупности с другими способами методы акустической эмиссии образуют неразрывный комплекс, обладающий высокой экспрессностью и информативностью. Внедрение таких комплексных систем неразрушающего контроля в практику эксплуатации металлоконструкции гарантирует высокое качество и надежность конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jiang X. U., Xiaojun T. G., Shuchun L. I., Yunqi T. O., Yongdong J. G. (2009). Space-time evolution rules study on acoustic emission location in rock under cyclic loading. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 3 (4). 422–427.
2. Неразрушающий контроль : Справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – Т.7: в 2 кн. Кн.1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. – М. : Машиностроение, 2005. – 829 с.
3. Серьезнов А.Н. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев. – М. : Машиностроение. 2004. – 392 с.
4. Бунина Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии / Н. А. Бунина. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1990. – 176 с.
5. Букетов А. В. Влияние изменения дислокационной структуры на акустические характеристики материалов / А. В. Букетов, В. Д. Нигалатий, С. А. Рожков, А. В. Шарко // Наукові нотатки. – Випуск 48. – Луцьк: ЛНТУ, 2015. – С. 220–224.
6. Кайно Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов / Г. Кайно. – М. : Мир, 1990.
7. Полесская Л. М. Об определении координат дефектов в конструкциях с произвольной поверхностью/ Л. М. Полесская, В. В. Гричук, А. А. Балабанов, В. В. Марасанов //Дефектоскопия. – 1978. – № 7. – С. 50–56.
8. Степанов Г. В. Упругопластичное деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – К. : Наукова думка, 1991. – 292 с.
9. Keiser J. Arch // Eisenhutten. – 1953. – № 1–2. – P. 43–45.

REFERENCES

1. Jiang X. U., Xiaojun T. G., Shuchun L. I., Yunqi T. O., Yongdong J. G. (2009). Space-time evolution rules study on acoustic emission location in rock under cyclic loading. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 3 (4). 422–427.
2. Klyueva V. V. (Ed.). (2005) *Nerazrushayuthiyj kontrolj : Spravochnik: v 7 t.* М. : Mashinostroenie.
3. Serjeznov A. N., Stepanova L. N., Muravjev V. V. (2004). *Diagnostika objhektov transporta metodom akusticheskoyj ehmissii.* М. : Mashinostroenie.
4. Bunina N. A. (1990). *Issledovanie plasticheskoyj deformacii metallov metodom akusticheskoyj ehmissii.* L. : Izd-vo LGU.

5. Buketov A. V., Nigalatiy V. D., Rozhkov S. A., Sharko A. V. (2015). Vliyanie izmeneniya dislokacionnoy strukturih na akusticheskie kharakteristiki materialov. *Naukovi notatki*, 48, 220–224. Lucjk: LNTU.
6. Kayjno G. (1990) *Akusticheskie volnih: Ustroyjstva, vizualizaciya i analogovaya obrabotka signalov*. M. : Mir.
7. Poleskaya L. M., Grichuk V. V., Balabanov A. A., Marasanov V. V. (1978). Ob opredelenii koordinat defektov v konstrukciyakh s proizvoljnoy poverkhnost'yu. *Defektoskopiya*, 7, 50–56.
8. Stepanov G. V. (1991) *Uprugoplastichnoe deformirovanie i razrushenie materialov pri impulsnom nagruzhennii*. K. : Naukova dumka.
9. Keiser J. (1953). *Arch. Eisenhutten*, 1–2, 43–45.

Марасанов В. В., Шарко А. О. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Запропоновано математичне забезпечення побудови моделей визначення координат джерел акустичної емісії і алгоритмів пошуку дефектів. Показано, що параметри сигналів акустичної емісії пов'язані з локальними перебудовами структури матеріалів і процесами руху дислокацій. Даний опис будови типових схем розташування датчиків при контролі дефектів методом акустичної емісії. Запропоновані формули локалізації джерел акустичної емісії при різних варіантах розташування датчиків на площині.

Ключові слова: неруйнівний контроль, акустична емісія, координати дефектів.

Marasanov V. V., Sharko A. A. MATHEMATICAL PROVIDING CONSTRUCTIONS of MODELS of DETERMINATION of CO-ORDINATES of SOURCES of ACOUSTIC EMISSION

The mathematical ground of providing of construction of models of determination of co-ordinates of sources of acoustic emission and algorithms of search of defects is offered. It is set that the parameters of signals of acoustic emission are related to local alterations of structure of materials and processes of motion of distributions. Description of structure of model layout of sensors charts is given at control of defects the method of acoustic emission. The formulas of localization of sources of acoustic emission are offered at the different variants of location of sensors on a plane.

Keywords: non-destructive control, acoustic emission, co-ordinates of defects.

© Марасанов В. В., Шарко А. О.

Статтю прийнято
до редакції 26.01.16