

Г. Г. ЛУЦЕНКО, канд. техн. наук, ген. директор УкрНИИ НК, Киев;
Д. В. ГАЛАНЕНКО, инженер-конструктор НПФ "Промприлад", Киев;
О. В. ТАЛЬКО, мл. науч. сотр. ИПМ НАН Украины, Киев

АНАЛИЗ СПЕКТРА СИГНАЛОВ АЭ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ПОВРЕЖДЁННОСТИ ЦИКЛИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО МОЩНЫМ АКУСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ МАТЕРИАЛА

В результате проведенного моделирования акустического тракта системы для выявления сигналов АЭ в процессе резонансного нагружения образцов и теоретического исследования особенностей распространения этих сигналов в упругом слое разработаны рекомендации по оптимизации толщины волновода и полосы частот приёмного тракта системы для повышения её помехоустойчивости и информативности.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, усталость материала, волны Лэмба, спектр сигнала, упругий слой, неразрушающий контроль.

Введение. Применение метода акустической эмиссии (АЭ) для контроля за процессом развития усталостной повреждённости материала при высокоскоростном резонансном циклическом деформировании его образцов в мощных акустических полях позволяет накапливать информацию о закономерностях многоциклового усталости материалов на больших базах нагружения и поэтому имеет важное значение для обеспечения безаварийной работы современных машин и механизмов [1]. Это перспективное направление развития техники неразрушающего контроля сдерживается основным недостатком метода АЭ – его слабой помехозащищённостью [2]. Поэтому использование метода АЭ в указанном направлении предполагает применение нетривиальных решений.

Анализ последних исследований и литературы. В работах [3-5] был проведен цикл исследований по созданию системы для выявления и идентификации сигналов АЭ в условиях высокоскоростного резонансного деформирования образцов листовых материалов в мощных акустических полях и её проверке на материалах, имеющих разные закономерности накопления усталостных повреждений. Отмечено, что, во-первых, эффективное выявление сигналов АЭ в условиях собственных шумов испытательной машины, начиная с ранних стадий усталости материала, возможно при оптимизации параметров системы контроля, в первую очередь, её акустического тракта, а, во-вторых, – структура сигналов АЭ в процессе разрушения материала изменяется. Поэтому одним из направлений оптимизации системы контроля может быть адаптация её параметров к особенностям структуры сигнала АЭ, генерируемого в материале на разных стадиях его разрушения, и прошедшего акустический тракт.

Испытуемые образцы листового материала, в которых генерируются сигналы АЭ, можно рассматривать как упругий слой. В упругом слое сигналы

АЭ претерпевают изменение структуры вследствие особенностей передачи импульсов волноводными модами Лэмба. Известны теоретические исследования этих явлений с использованием лучевого [6, 7] и модового [8, 9] представления поля упругих волн. Источник сигналов АЭ моделировали сосредоточенной силой [10], поперечной к слою [8] или комбинацией различно ориентированных сосредоточенных сил [7]. Наиболее полная теория возбуждения слоя объёмными силами представлена в [9]. Разным стадиям усталости материала могут соответствовать и другие модели источника АЭ: в виде спонтанного изменения плотности (источник дилатации) или спонтанного вращения (источник ротации).

Цель статьи. Цель этой работы состоит в повышении информативности и помехоустойчивости системы АЭ-контроля повреждённости циклически деформируемого мощным акустическим полем образца листового материала путём адаптации элементов акустического тракта к особенностям спектра сигнала АЭ, который генерируется в материале на разных стадиях его усталостного разрушения и проходит через акустический тракт.

Постановка проблемы. Проблема состоит в том, что при АЭ-контроле усталостной повреждённости циклически деформируемого образца листового материала в мощном акустическом поле, с одной стороны, высок уровень собственных шумов испытательной машины, маскирующих полезный сигнал, а, с другой, сигналы АЭ, которые поступают на приёмный преобразователь тракта обработки, изменяют свою структуру по мере накопления повреждений и при прохождении в акустическом тракте. Поэтому адаптация акустического тракта к особенностям этой структуры позволит обеспечить повышение помехоустойчивости системы и выявление дополнительной информации о механизмах разрушения материала.

Материалы исследований. Акустический тракт системы показан на рис. 1. Образец постоянного сечения 1 вместе с наложенным на него волноводом 2 жёстко консольно закреплён устройством крепления 3. При испытаниях на первой собственной форме изгибных колебаний зона высоких напряжений, в которой локализуется накопление усталостных повреждений материала, находится вблизи заделки образца, а на второй форме – на относительном расстоянии от заделки, равном 0,53 длины образца [11]. Размер этой зоны мал по сравнению с размером образца, причём на второй форме колебаний на порядок меньше, чем на первой.

При разрушении материала сигналы АЭ генерируются в зоне высоких напряжений, проходят образец 1, волновод 2 и попадают на преобразователь 4. С акустической точки зрения и образец, и волновод можно моделировать упругим слоем. Толщина образца обычно не превышает 5 мм и определяется условиями испытаний на усталость [11], поэтому её можно регулировать только в определённых пределах. Толщину волновода можно изменять для обеспечения наибольшего коэффициента передачи сигнала АЭ.

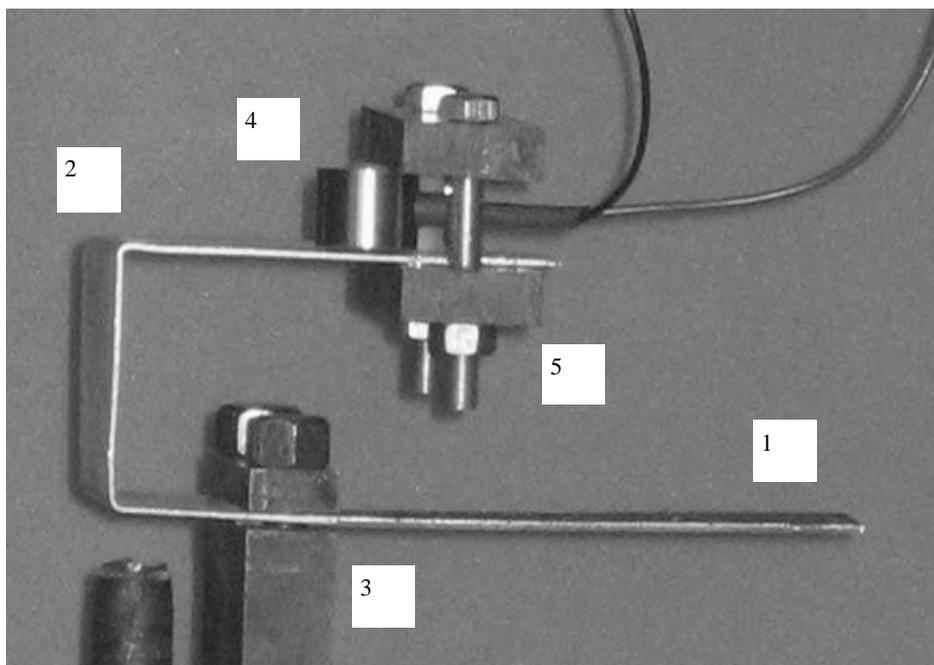


Рис. 1 – Внешний вид акустического тракта системы: 1 – испытуемый образец; 2 – волновод; 3 – устройство крепления образца с волноводом; 4 – пьезопреобразователь; 5 – устройство крепления пьезопреобразователя

Рассматривались следующие модели источников АЭ: различно ориентированных сосредоточенных сил, дилатации и ротации. Поскольку уравнение Ламэ предполагает сторонние воздействия только в виде сил, распределённых в объёме среды, источники дилатации и ротации вводили заменой уравнения Ламэ эквивалентной системой дифференциальных уравнений относительно компонент четырёхмерного вектора, составленного из горизонтального и вертикального смещений частиц среды, дивергенции и ротации [12]. Такое описание пригодно при рассмотрении двумерного движения типа P и SV волн в произвольной системе ортогональных координат [13]. Требование двумерного характера движения сужает возможности данного подхода на рассмотрение лишь таких источников, которые генерируют осесимметричное поле упругих волн в слое: вертикальные или радиальная силы, сторонние дивергенция или ротация, равномерно распределённые на поверхности вертикального цилиндра конечного радиуса и высоты (предельным переходом эти источники переводятся в точечные). Считалось, что спектральные характеристики сигналов инициированы в упругом слое воздействиями в виде коротких импульсов.

Спектр сигнала рассчитывали в виде суммы вкладов распространяющихся (для фиксированного частотного диапазона) цилиндрических волн Лэмба:

$$S(\omega, r, z_0) = \sum_m S_0(\omega) K_{m0}(\omega) K_m(\omega, r, z_0), \quad (1)$$

где $S_0(\omega)$ – спектр сигнала на источнике АЭ, $K_{m0}(\omega)$ – частотная характеристика преобразователя при приёме m -той волны, $K_m(\omega, r, z_0)$ – коэффициент передачи для m -той волны от источника с координатами $r=0, z=z_0$ в точку с координатами $r, z=H$, где H – половина толщины слоя.

Для расчёта одной из гармонических компонент поля сигнала введём четырёхмерный вектор $\mathbf{p} = \{u, c, w, d\}$, где u, w – радиальная и вертикальная (поперечная) компоненты вектора смещения, c – ненулевая компонента ротации, d – дивергенция.

Можно показать, что $\mathbf{p}(z, r)$ подчиняется следующему дифференциальному уравнению с матричными коэффициентами:

$$\mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial z} + \mathbf{B} \mathbf{p} + \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial r} = \mathbf{f} \frac{1}{r} \delta(r - r_0) \delta(z - z_0), \quad (2)$$

где: $\mathbf{A} = \{0, 0, -1, 0; 0, 0, 0, \xi^{-2}; 1, 0, 0, 0; 0, -\xi^2, 0, 0\}$; $\mathbf{B} = \{1/r, 0, 0, 1; 0, -1/r, k_s^2, 0; 0, -1, 0, 0; -k_r^2, 0, 0, 0\}$, $\mathbf{f} = \{d_0, f_z, c_0/r_0, -\xi^2 f_r/r_0\}$. Здесь k_s, k_r – волновые числа сдвиговых и продольных волн, $\xi = c_s/c_l$ – отношение скоростей этих волн. В приведенных выражениях для матриц запятые являются разделителями элементов внутри строк, а точки с запятой – разделителями строк. Правая часть уравнения (2) описывает источник, в котором сторонние силы, сторонние дивергенция и ротация распределены на кольце радиуса r_0 с соответствующими плотностями. Уравнение (2) следует дополнить условиями свободной границы при $z = \pm H$ и условиями погашаемости при $r \rightarrow \infty$.

Разыскивая решение уравнения (2) в виде интегрального преобразования Фурье-Бесселя с ядром $J_{\nu_k}(\gamma r)$ (где $\nu_k = 1$ для радиального смещения и ротации и $\nu_k = 0$ для вертикального смещения и дивергенции, γ – спектральный параметр), учитывая свойства чётности (или нечётности) компонентов вектора $\mathbf{p}(\gamma, z)$, являющегося Фурье-образом вектора $\mathbf{p}(r, z)$, и применяя известные соотношения обхода для функций Ханкеля, можно представить решение задачи в следующей интегральной форме:

$$p_k(r, z) = 1/2 \int_{-\infty}^{\infty} P_k(\gamma, z) H_{\nu_k}^{(1)}(\gamma r) \gamma d\gamma \quad (3)$$

где $P_k(\gamma, z)$ – компоненты вектора $\mathbf{P}(\gamma, z) = \mathbf{G}(\gamma, z, z_0) \mathbf{F}$; $\mathbf{F} = \{d_0 J_0(\gamma r_0), f_z J_0(\gamma r_0), c_0 J_1(\gamma r_0)/r_0, f_r J_1(\gamma r_0)/r_0\}$ – преобразованная по Фурье-Бесселю правая часть уравнения (2), $\mathbf{G}(\gamma, z, z_0)$ – матрица Грина поперечного сечения слоя, т.-е. решение системы уравнений:

$$\mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} + (\mathbf{B}_1 - \gamma \mathbf{I}) \mathbf{G} = \mathbf{I} \delta(z - z_0) \quad (4)$$

где $\mathbf{A}_1 = \{0,0,-1,0;0,0,0,\xi^{-2};-1,0,0,0;0,\xi^2,0,0\}$, $\mathbf{B}_1 = \{0,0,0,1;0,0,0,k_s^2,0;0,1,0,0;k_l^2,0,0,0\}$, \mathbf{I} – единичная матрица. Граничные условия для системы (4) имеют вид: $\mathbf{S}\mathbf{G}=0$, где $\mathbf{S} = \left\{ (-2\gamma\xi^2, 0, 0, 1) \Big|_{z=H}; (0, 1, -2\gamma, 0) \Big|_{z=H}; (-2\gamma\xi^2, 0, 0, 1) \Big|_{z=-H}; (0, 1, -2\gamma, 0) \Big|_{z=-H} \right\}$. Выражение матрицы Грина поперечного сечения через общее решение $\mathbf{Z}(z)$ уравнения (4):

$$\mathbf{G}(z, z_0, \gamma) = \frac{1}{2} \mathbf{Z}(z) (\mathbf{S}\mathbf{Z})^{-1} (\mathbf{E} \mp \mathbf{I}) (\mathbf{S}\mathbf{Z}) (\mathbf{A}_1 \mathbf{Z}(z_0))^{-1} \quad (5)$$

где $\mathbf{E} = \{1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,-1,0;0,0,0,-1\}$. Представим матрицу, обратную к $\mathbf{S}\mathbf{Z}$ в виде дроби: $(\mathbf{S}\mathbf{Z})^{-1} = \mathbf{M}(\gamma)/D(\gamma)$, где матрица $\mathbf{M}(\gamma)$ составлена из алгебраических дополнений к элементам матрицы $\mathbf{S}\mathbf{Z}$, а $D(\gamma) = \det(\mathbf{S}\mathbf{Z})$. При значениях γ , равных волновым числам волн Лэмба (симметричных и антисимметричных), определитель $D(\gamma)$ обращается в нуль. Исследуя асимптотику матрицы Грина при $|\gamma| \rightarrow \infty$, можно показать, что условия, требуемые для применения леммы Жордана при $r > r_0$, выполняются. Следовательно, матрица Грина мероморфна, и интеграл (3) сводится к вычетам, физическим содержанием которых являются цилиндрические волны Лэмба. Значение вычета матрицы Грина рассматриваем, предполагая, что корни дисперсионного уравнения для волн Лэмба $D(\gamma_k) = 0$ – простые (случаи слияния корней не рассматриваются). При обращении определителя в ноль ранг матрицы $\mathbf{S}\mathbf{Z}$ понижается на единицу и, соответственно, столбцы матрицы $\mathbf{M}(\gamma_k)$ становятся пропорциональными одному из них. Тогда $\mathbf{M}(\gamma_k) = \mathbf{m}_k \cdot \mathbf{a}_k$, где \mathbf{m}_k – один из столбцов матрицы $\mathbf{M}(\gamma_k)$, а \mathbf{a}_k – вектор-строка коэффициентов пропорциональности. Тогда вычет выражения (5) можно записать в виде:

$$\mathbf{G}_k = \frac{1}{2D'_k} \mathbf{p}_k(z) \mathbf{q}_k(z_0), \quad (6)$$

где $\mathbf{p}_k(z) = \mathbf{Z}(\gamma_k, z) \mathbf{m}_k$ – собственный вектор (столбец), $\mathbf{q}_k(z_0) = \mathbf{b}_k (\mathbf{A}_1 \mathbf{Z}(\gamma_k, z_0))^{-1}$ – собственный вектор сопряжённой задачи (строка), $\mathbf{b}_k = \mathbf{a}_k \mathbf{E} (\mathbf{S}\mathbf{Z})_k$ (повторяющиеся индексы здесь не означают суммирования). Выполняя соответствующие матричные операции, получаем расчётные формулы для коэффициента передачи k -той волны.

При расчётах учитывались распространяющиеся волны Лэмба. В отсутствие поглощения их волновые числа γ_k лежат на вещественной оси $\text{Re}(\gamma)$ и с уменьшением волновой толщины слоя $h = 2H/\lambda_s$ (частоты) движутся к началу координат $\gamma = 0$, а затем выходят на мнимую ось (кроме волн самых низших номеров: квазипродольной и изгибной). Были построены траектории волновых чисел на комплексной плоскости γ при наличии потерь в некотором диапазоне

значений параметра h . Расчёт траекторий обрывался по условию быстрого убывания амплитуды соответствующей волны: $\text{Im}(\gamma_k)/\text{Re}(K_s) > 0.1$.

Абсолютные значения коэффициента передачи $K_m(\omega, r, z_0)$ на примере стального слоя ($c_l=5960$ м/с и $c_s=3240$ м/с) толщиной 10 мм в диапазоне частот 60...1000 кГц для источников разного типа и разных типов упругих волн приведены на рис. 2. Поглощение учитывали умножением скоростей распространения упругих волн на множитель $1-i\delta$ (было принято $\delta=0.001$, $z_0=H/2$, $r=0,5$ м). Полученные соотношения позволяют оценить распределение энергии по частоте и между волнами разных номеров, но не подлежат сравнению для источников разных типов, так как значения d_0, f_z, c_0, f_r приняты равными единице, а не из соображения выравнивания мощности источников.

Результаты исследований. Зависимости, приведенные на рис. 2, можно представить как функцию волновой толщины слоя $h=2H/\lambda_s$ и зафиксировать указанный диапазон частот, тогда с их помощью можно анализировать коэффициенты передачи упругого слоя произвольной толщины. Уменьшение толщины слоя относительно 10 мм будет приводить к пропорциональному смещению коэффициентов передачи мод вправо относительно оси частот. Аналогичные характеристики для материалов, у которых коэффициент Пуассона близок к железу (многие стали и алюминиевые сплавы) будут незначительно отличаться от приведенных на рис. 2 [14].

В результате анализа рис. 2 можно сделать следующие выводы:

- при толщине слоя менее 5 мм моды выше 3-й не распространяются;
- при использовании симметричных волн для передачи сигналов АЭ в упругом слое толщиной 2,5...3,0 мм возможна оптимизация полосы частот приёмника по критерию обеспечения наибольшего отношения сигнал-помеха;
- при толщине слоя менее 2,5 мм (симметричные волны) и менее 2 мм (антисимметричные волны) распространяется только 1-я мода колебаний;
- уменьшение толщины слоя начиная с 2,5 мм приводит к резкому снижению эффективности передачи сигнала АЭ симметричными волнами и увеличению, кроме случая ротации, антисимметричными, поэтому взаимное расположение образца и волновода, волновода и преобразователя следует ориентировать на наиболее эффективное прохождение антисимметричных волн;
- при использовании антисимметричных волн для эффективной передачи сигналов АЭ, за исключением случая ротации, целесообразно использовать толщину упругого слоя 1 мм и менее; источник ротации, скорее всего, существует на стадии трения берегов трещины [6], где уровень сигнала АЭ достаточно высок, чтобы его уверенно выявлять на фоне помех, поэтому здесь оптимизация приёмного тракта не критична;
- при использовании антисимметричных волн и толщине упругого слоя менее 2 мм спектральная плотность сигнала АЭ монотонно возрастает (в случае ротации убывает) с частотой. Учитывая, что помеху в рассматриваемом диапазоне частот можно представить практически с постоянной спектральной

плотностью [4], для повышения отношения сигнал-помеха целесообразно полю частот приёма сигналов АЭ разбивать на несколько диапазонов. Так, при моделировании спектра полезного сигнала равномерно убывающей (возрастающей) функции частоты

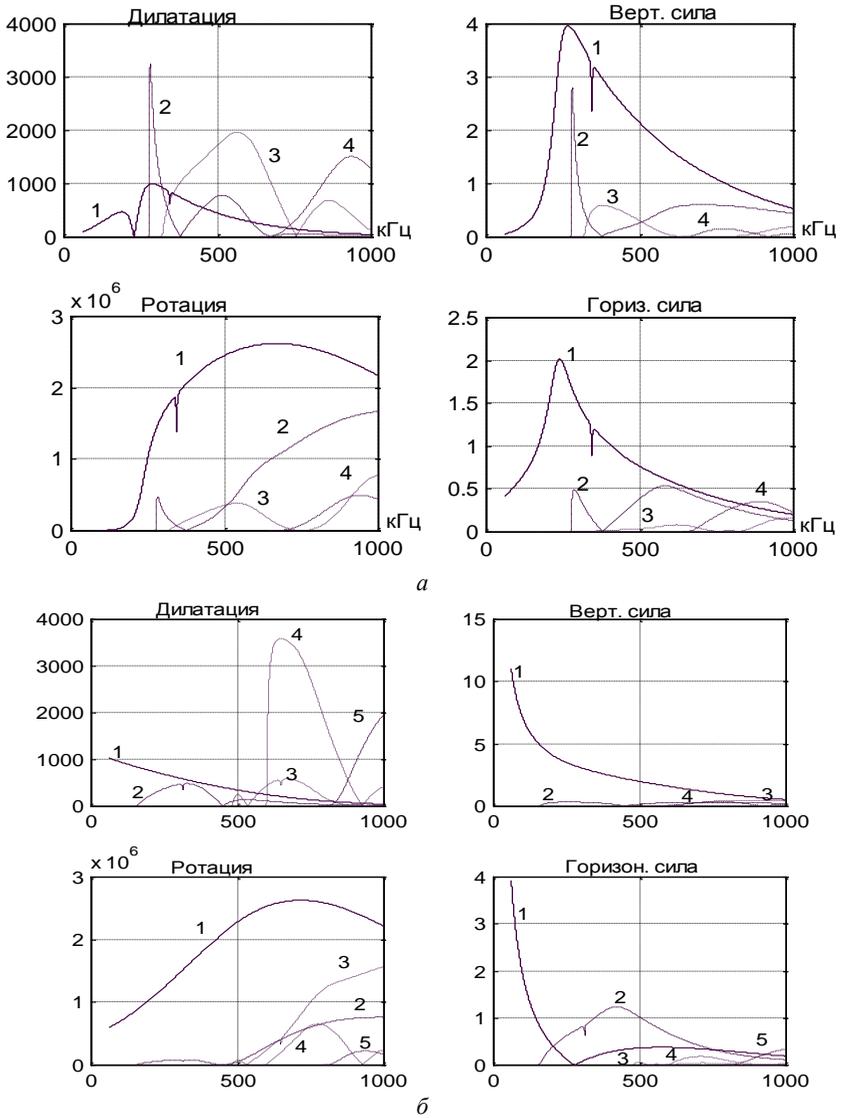


Рис. 2 – Абсолютные значения коэффициента передачи стального слоя толщиной 10 мм в диапазоне частот от 60 кГц до 1 МГц для источников АЭ разного типа: а – симметричные, б – антисимметричные волны

при равномерном спектре помехи, замена одной широкой полосы частот приёмом 4-мя узкими при изменении спектральной плотности на граничных частотах широкой полосы в 2 раза (источник вертикальной силы) даст выигрыш в соотношении сигнал-помеха в одной из узких полос по сравнению с широкой в 1,25 раз, а при изменении спектральной плотности на граничных частотах в 3 раза (источник горизонтальной силы) – в 1,75 раз;

– одновременный приём сигналов в различных диапазонах частот позволит исследовать более тонкие механизмы повреждённости материала.

В работе [5] получены экспериментальные результаты, которые хорошо согласуются с приведенными теоретическими.

Выводы. В результате проведенного моделирования акустического тракта системы для выявления сигналов АЭ в процессе резонансного нагружения образцов и теоретического исследования особенностей распространения этих сигналов в упругом слое, разработаны рекомендации по оптимизации толщины волновода и полосы пропускания приёмного тракта системы для повышения её помехоустойчивости и информативности.

Дальнейшее развитие работ в данном направлении может быть связано с исследованием особенностей отражения сигналами АЭ в различных частотных диапазонах механизмов формирования усталостного повреждения на разных стадиях его развития.

Список литературы: 1. *Безьянный Ю. Г.* Использование метода акустической эмиссии для исследования усталости материалов в процессе высокоскоростного циклического деформирования / *Ю. Г. Безьянный, Д. В. Галаненко, К. А. Комаров, О. В. Талько* // Вісник українського матеріалознавчого товариства. В. 5. 2012. – С. 63-71. 2. *Незрушаючий контроль:* Справочник: В 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с. 3. *Безьянный Ю. Г.* Развитие акустико-эмиссионного метода для исследования процесса многоциклового усталости материалов. / *Ю. Г. Безьянный, Д. В. Галаненко* // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. (Серія). Випуск 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. – 3б. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України. – 2008. – 288 с. – С. 100-106. 4. *Безьянный Ю. Г.* Адаптация метода акустической эмиссии к усталостным испытаниям материалов на высоких частотах нагружения / *Ю. Г. Безьянный, Д. В. Галаненко* // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. (Серія). Випуск 14: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. – 3б. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України. – 2009. – С. 29-35. 5. *Безьянный Ю. Г.* Особенности контроля АЭ при высокоскоростном консольном изгибе образцов / *Ю. Г. Безьянный, Д. В. Галаненко, Л. О. Тесленко* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. № 4, 2012. С. 24-32. 6. *Pao Y. H.* Acoustic emission and transient waves in an elastic plate./ *Y. H. Pao, R. R. Gajevski, A. N. Geranoglu.* // Journ. Acoust. Soc. Am. – v. 65. – 1979. – 1. – P. 96-105. 7. *Geranoglu A. N.* Propagation of elastic pulses and acoustic emission in a plate./ *A. N. Geranoglu, Y. H. Pao.* // Appl. Mech.. – v. 48. – 1981. – P. 125-135. 8. *Weaver R. L.* Spectra of transient waves in elastic plates. / *R. L. Weaver, Y. H. Pao.* // Journ. Acoust. Soc. Am.. – v. 72. – 1982. – 6. – P. 1933-1941. 9. *Свиридов Ю. Б.* О построении динамического тензора Грина для твёрдого слоя. // Акуст. ж-л. – т. 21. – 1985. – в. 2. – С. 246-254. 10. *Burridge R.* Body force equivalents for seismic dislocations / *R. Burridge, L. Knopoff* // Bull. Seism. Soc. Am. – v. 54. – 1964. – P. 1875-1914. 11. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В. А. Кузьменко. – К.: Наук. думка, 1979. 336 с. 12. *Галаненко В. Б.* Обобщен-

ние метода поперечных сечений на задачу распространения волн в упругом слое с плавно изменяющимися параметрами // Акуст. вісн. – 1998. – т. 1. – № 2. – С. 41–47. 13. Galanenko V. B. On coupled modes theory of two-dimensional wave motion in elastic waveguides with slowly varying parameters in curvilinear orthogonal coordinates. // J. Acoust. Soc. Am. – 103. – No. 4. – 1998. – С. 1752-1762. 14. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

Поступила в редколлегию 15.04.2013

УДК 620.179.17

Анализ спектра сигналов АЭ в системе контроля повреждённости циклически деформируемого мощным акустическим полем материала / Г. Г. Луценко, Д. В. Галаненко, О. В. Талько // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 99–107. – Бібліогр.: 14 назв.

В результаті проведеного моделювання акустичного тракту системи для виявлення сигналів АЕ в процесі резонансного навантаження зразків і теоретичного дослідження особливостей поширення цих сигналів у пружному шарі розроблено рекомендації з оптимізації товщини хвилеводу та полоси частот приймального тракту системи для підвищення її перешкодозахищеності й інформативності.

Ключові слова: акустична емісія, втома матеріалу, хвилі Лемба, спектр сигналу, пружний шар, неруйнівний контроль.

Recommendations for optimization of waveguide thickness and the wave range of the reception path of the system have been developed to increase noise stability and ability to give information of that system. The recommendations have been resulted from modeling the acoustic path of the system performed to detect acoustic emission signals in the course of resonant loading the specimens and theoretical investigations of peculiarities of signal propagation in the elastic layer.

Keywords: acoustic emission, material fatigue, Lamb waves, signal spectrum, elastic layer, nondestructive testing.