



ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Сообщение 2

А.Я. НЕДОСЕКА, С.А. НЕДОСЕКА, О.И. БОЙЧУК

ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены особенности распространения в тонком стержне упругих волн, вызванных мгновенным приложением импульсной нагрузки к одному из его торцов. Проанализировано влияние на параметры сканирующих волн распределения дефектов в некотором локальном протяженном объеме и оценены возможные преимущества учета указанного фактора. Получена математическая модель распространения АЭ волны в коротком стержне с областями, пораженными дефектами. Разработаны оптимальные способы расчета и созданы необходимые программы для MS Windows, позволившие выполнять расчетные работы в оптимальные сроки и с приемлемой для оценок физического явления точностью. Программы реализованы таким образом, чтобы исследователь мог достаточно просто оперировать настройками и получать результаты расчетов в виде графиков с возможностью их перестраивания в наиболее удобную для анализа форму. Установлено, что наличие протяженной области локально распределенных дефектов структуры материала, например, при его деформировании, меняет характер распространяющейся по стержню волны. Показана зависимость характерных особенностей этого изменения от протяженности поврежденного участка, что дает возможность анализа этого фактора при оценке появления и развития дефектов в материалах. Показано, что наличие в стержне сосредоточенных дефектов в тонком поперечном сечении образца или в протяженной области меняет форму проходящей акустической волны в сторону снижения амплитуды и уменьшения крутизны переднего фронта. Полученное решение предоставляет возможность оценивать накопление повреждений (дефектов) в материалах образцов по результатам их сканирования акустическими импульсами. Библиогр. 6, рис. 8.

Ключевые слова: АЭ, АЭ сканирование, импульсная нагрузка, дефект, сопротивление среды, аналитический расчет, стержень, программа

Влияние дефектов структуры материала на распространение упругих волн в случае сосредоточения всех дефектов, появившихся в материале, в локальной тонкой плоскости, перпендикулярной оси стержня, было рассмотрено в работе [1]. Были обнаружены особенности в характере распространяющейся волны и показана возможность использования разработанной методики при контроле состояния конструкций с дефектами путем их сканирования акустическими сигналами, возбуждаемыми датчиками АЭ (метод АЭ сканирования [2, 3]). В настоящей работе проанализировано влияние на параметры сканирующих волн распределения дефектов в некотором локальном протяженном объеме и оценены возможные преимущества учета указанного фактора.

Итак, пусть, как и в работе [1], к одному из торцов стержня мгновенно приложена нагрузка P , вызывающая такую же мгновенную начальную деформацию ϵ_0 (рис. 1). Указанная деформация вызовет появление в стержне упругой волны, описать которую можно дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - [S(z - b_2) - S(z - b_1)] \beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0.$$

Предположим, что дефекты структуры мате-

риала распределены равномерно в исследуемом объеме от b_1 до b_2 и создаваемое ими сопротивление материала стержня распространению упругих волн может быть описано при помощи коэффициента β . Здесь, как и ранее, C_1 – скорость распространения базовой волны, см/с; u – продольные перемещения сечений стержня, см; t – время, с; S – единичная функция; b_1 и b_2 – координаты области повышенного сопротивления распространению акустической волны.

Функция $[S(z - b_2) - S(z - b_1)]$ имеет особенности в точках b_1 и b_2 . Чтобы избежать трудностей, связанных с этими особенностями при решении уравнения, изменим его, представив в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \delta(z - z_0) \beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0.$$

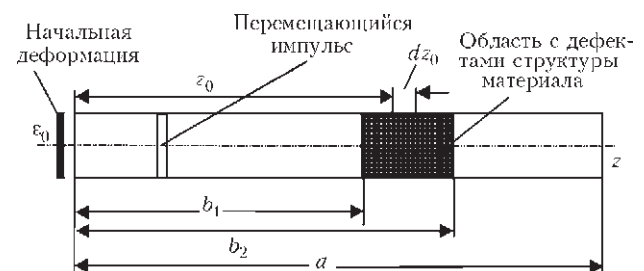


Рис. 1. Цилиндрический тонкий стержень с локально распределенной областью дефектов структуры



Решение этого уравнения в предположении бесконечно тонкой прослойки с дефектами на расстоянии z_0 от начала стержня получено ранее [1]. Воспользовавшись этим решением, определим изменение u в зависимости от изменения β . Найдя эту зависимость, проинтегрируем полученный результат по β и координате z_0 в пределах от b_1 до b_2 .

После выполнения преобразования Лапласа по времени и прямого, а затем обратного преобразования Фурье по координате z получим (здесь a – длина стержня, см; ε_0 – начальный импульс относительно пере­мещения переднего торца стержня) [3–6]:

$$\bar{u}_n = \left\{ \frac{4\varepsilon_0\beta C_1^2 p \cos^2(\omega_n z_0)}{a^2 \left(\omega_n^2 + \frac{p^2}{C_1^2} \right) \left[p^2 + 2p\beta C_1^2 \frac{\cos^2(\omega_n z_0)}{a} + \omega_n^2 C_1^2 \right]} - \frac{2\varepsilon_0}{a \left(\omega_n^2 + \frac{p^2}{C_1^2} \right)} \right\} \cos(\omega_n z).$$

Найдем приращение функции u_n в зависимости от β в виде дифференциала. Последний будет равен:

$$du_n = \frac{\partial \bar{u}_n}{\partial \beta} d\beta = \frac{4\varepsilon_0 C_1^4 \cos^2(\omega_n z_0) \cos(\omega_n z)}{a^2} \times \frac{p}{\left[p^2 + 2p\beta C_1^2 \frac{\cos^2(\omega_n z_0)}{a} + \omega_n^2 C_1^2 \right]^2} d\beta.$$

После интегрирования по β и выполнения обратного преобразования Лапласа полученного выражения в предположении, что $du = \varepsilon_p dz$, где ε_p – равномерно распределенное по координате z_0 значение перемещений du , для u получим:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{b_1}^{b_2} \frac{2\varepsilon_0 C_1 \cos(\omega_n z) \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 t}{a} \cos^2(\omega_n z_0)\right)}{a(b_2 - b_1) \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta C_1^2}{a^2} \cos^2(\omega_n z_0)}} \times \sin\left(C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{\beta C_1}{a} \cos^2(\omega_n z_0)\right)^2}\right) dz_0,$$

Если $\omega_n^2 - \left(\frac{\beta C_1}{a} \cos^2(\omega_n z_0)\right)^2 > 0$, и

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{b_1}^{b_2} \frac{2\varepsilon_0 C_1 \cos(\omega_n z)}{a(b_2 - b_1)} \times \frac{\exp\left(-\frac{\beta C_1^2 t}{a} \cos^2(\omega_n z_0)\right)}{\sqrt{\left(\omega_n^2 - \frac{\beta C_1^2}{a^2} \cos^2(\omega_n z_0)\right)^2 - \omega_n^2}} \times$$

$$\times \text{sh}\left(C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{\beta C_1}{a} \cos^2(\omega_n z_0)\right)^2}\right) dz_0,$$

если $\omega_n - \frac{\beta C_1}{a} \cos^2(\omega_n z_0) < 0$.

Величины ω_n являются корнями трансцендентного уравнения $\sin(\omega_n a) = 0$.

Следующим важным этапом в исследовании процессов распространения упругих волн в стержнях стал вопрос создания необходимого инструмента для выполнения расчетов по приведенным формулам. Рассматриваемые физические процессы достаточно сложны и описываются весьма сложными математическими зависимостями. К сожалению, других, более простых путей решения данной проблемы авторам неизвестно. В этой ситуации разработка оптимальных способов расчета, создание необходимых программ и выбор соответствующих компьютерных средств приобретают самостоятельное важное значение.

Как видно из полученных аналитических выражений, расчет перемещений в стержне является достаточно громоздким и требует специальных программ, которые бы давали возможность выполнить расчетные работы в оптимальные сроки и с приемлемой для оценок физического явления точностью. Необходимо, чтобы исследователь мог достаточно просто оперировать такой программой и получать результаты расчетов в виде графиков с возможностью их перестройки в более удобные к требованиям анализа формы.

Такая программа была создана для персональных компьютеров с операционной системой Microsoft Windows (протестирована в версиях Windows 7 и 8). Расчетная программа написана при помощи пакета Microsoft Visual Studio, для вывода окончательных результатов в виде таблиц и графиков она интегрирована через COM – интерфейс с пакетом Microsoft Office 10.

На рис. 2 показано рабочее окно программы. Как видим, оператору необходимо только установить исходные параметры для расчета, подобранные в зависимости от требуемого результата и точности, с которой он должен быть получен (параметры числа разбиений в интеграле и число членов суммы). Таким образом, установив количество членов суммы в поле ввода числовых данных для ω_n , число разбиений подынтегральной функции в поле N и введя необходимые исходные данные расчета для решения той или иной задачи, получаем графики, описывающие математическую модель исследуемого явления. Меняя исходные данные и пользуясь табличными и графическими возможностями Microsoft Excel, можно получить достаточный объем информации и



Рис. 2. Рабочее окно программы для расчета продольных перемещений в тонком длинном стержне с дефектами структуры материала

ее удобное наглядное представление для анализа процессов распространения волн при прозвучивании стержней с дефектами структуры.

Получив необходимые математические зависимости и средства их реализации в практических задачах, приступим к анализу влияния расположения и плотности дефектов в длинных тонких стержнях на характер и амплитуды упругих волн. В качестве исходных данных расчета были приняты следующие величины: $a = 10$ см; $C_1 \epsilon_0 = 10^{-4}$ см; $\omega_n = 400$ см. Остальные данные приводятся на соответствующих графиках. Значение величины ϵ_0 выбирали из условия воздействия силы на торец стержня в начале координат, равной $P = 0,5 \cdot 10^{-4}$ кг при площади поперечного сечения стержня, равной $F = 0,5$ см² ($\epsilon_0 = P/EF$).

Анализируя графики на рис. 3, можно увидеть, что сопротивление материала стержня, заполненного внутренними дефектами в виде несплошностей структуры или, иными словами, накопленными в материале повреждениями, приводит к существенному изменению переднего фронта рас-

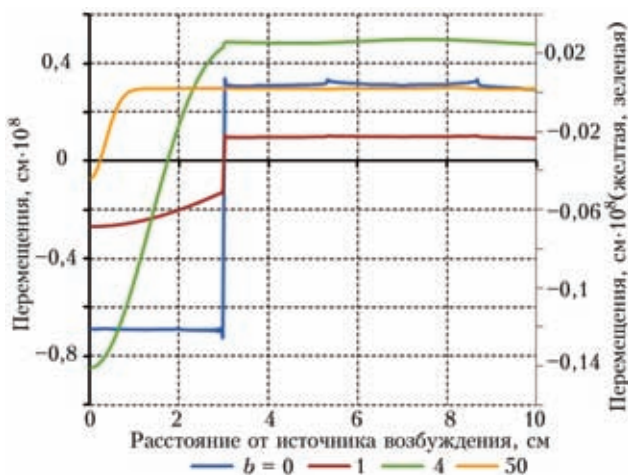


Рис. 3. Перемещения в стержне при постоянном значении b по всей длине стержня, $C_1 t = 4$ см

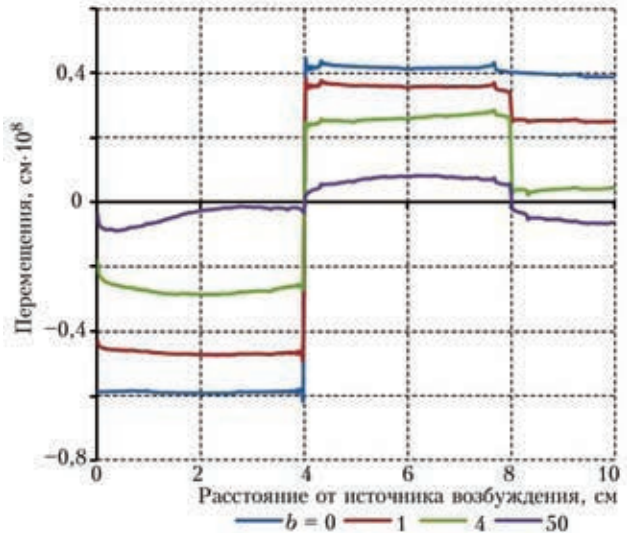


Рис. 4. Перемещения в стержне при сосредоточении дефектов в плоскости на расстоянии $z_0 = 8$ см; $C_1 t = 4$ см; $\epsilon_0 C_1 = 1$ см простирающейся по стержню волны.

Чем больше определяющий степень поврежденности материала коэффициент $b = C_1 \beta$, тем более пологой становится волна, тем менее выраженным становится передний фронт. Эта тенденция хорошо видна на графике при $b = 4$ и $b = 50$. Резко выраженный фронт волны становится плавным, распределенным по длине стержня.

Если дефекты сосредоточены в некоторой небольшой локальной области стержня (например, при $z_0 = 8$, как показано на рис. 4), то картина меняется, и крутой передний фронт волны сохраняется при всех значениях коэффициента b . При этом изменяется лишь его значение, уменьшаясь по мере увеличения b .

Если область с дефектами имеет определенную протяженность, которой нельзя пренебречь

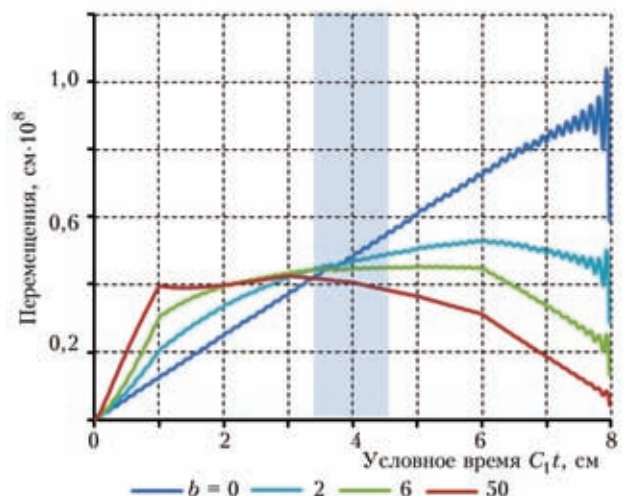


Рис. 5. Перемещения на торце стержня при $z = 8$ см в зависимости от времени и коэффициента $b = C_1 \beta$

* Графики на рис. 3 и 4 получены по формулам, приведенными в работе [1]

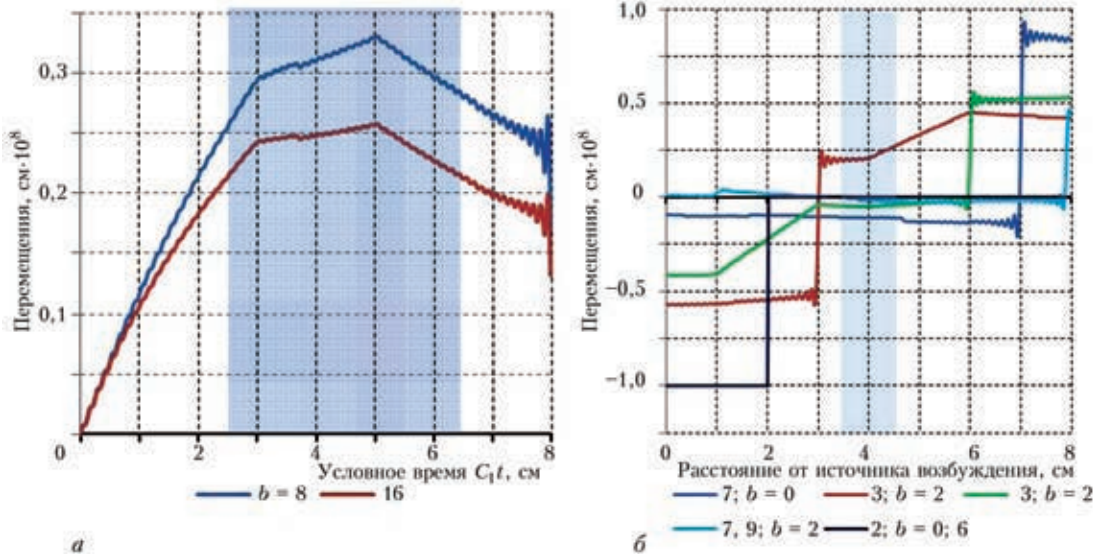


Рис. 6. Перемещения в стержне длиной 8 см в более широкой области с дефектами (а), ширина областей затемнена; b – постепенное движение импульса АЭ вдоль стержня ($C_1 t$ – первая цифра в обозначениях под графиком) и распределение перемещений в стержне при коэффициенте $b = 0$ и 2, $C_1 \epsilon_0 = 1 \text{ см}^{-1}$. В обоих случаях при $b = 0$; ∞ стержень полубесконечный, $C_1 \epsilon_0 = 1 \text{ см}^{-1}$

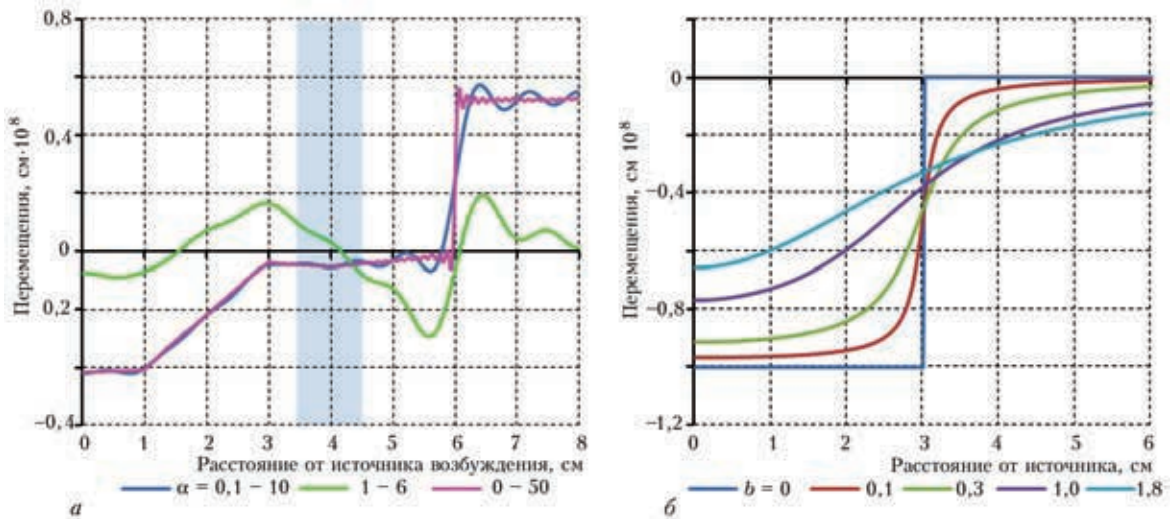


Рис. 7. Влияние частотной характеристики АЭ датчиков на амплитуду перемещений в стержне. Под рисунками приведены значения частотных характеристик трех типов датчиков с полосой пропускания сигналов α равной 0,1...10; 1...6 и 0...50 см^{-1}

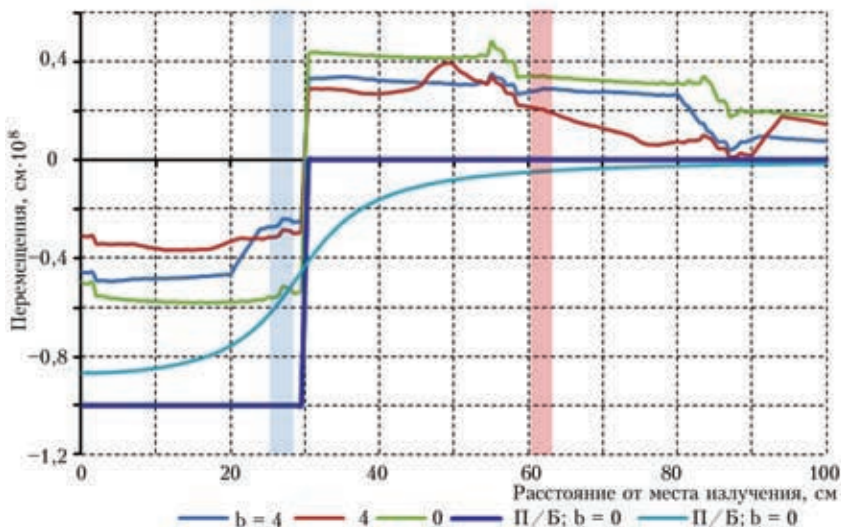


Рис. 8. Перемещения, вызванные волной, распространяющейся в длинных стержнях. Синим и красным цветом показаны области с дефектами (цвет соответствует кривой распределения); Темно-синим и голубым цветом показаны перемещения движущейся волны в стержне полубесконечных размеров (П/Б)



в расчетах (показана на рис. 1 между координатами b_1 и b_2), то результат изменения параметров акустической волны в этом случае следует получать с учетом фактора протяженности по приведенным выше формулам. На рис. 5 представлены результаты расчета для случая, когда область с дефектами сосредоточена в объеме с координатами границ $b_1 = 3,5$ см и $b_2 = 4,5$ см. Как видно из рисунка, местное протяженное распределение дефектов оказывает существенное влияние на распространение волны по сравнению со случаем равномерного распределения дефектов и случаем, когда дефекты сконцентрированы на очень малой длине. Сосредоточение дефектов в локальной области стержня приводит к излому кривых распределения перемещений по сравнению с бездефектным образцом. При этом наклон кривых распределения в сторону оси тем больший, чем выше коэффициент b . Графики на рис. 6 показывают влияние протяженности области с дефектами на перемещения поперечных сечений стержня. Увеличенная по длине область включает в себя большее количество дефектов. Из рис. 6, а видно, как изменяются перемещения на конечном торце стержня с увеличением дефектности образца за счет их протяженности и количества. Видно, что с увеличением области повышенного сопротивления и роста числа дефектов амплитуда импульсов уменьшается. Графики также наглядно показывают, что на величину перемещений оказывает влияние положение фронта распространяющейся волны.

Плотность дефектов, как было сказано, определяется величиной коэффициента $b = C_1\beta$ и рассматривалась в двух вариантах: $b = 8$ и 16 . Рис. 6, б с областью распределенных дефектов с $b = 0$ и 2 , расположенной в центре стержня, показывает уменьшение амплитуды импульса с увеличением коэффициента b . Графики, приведенные на рис. 6, показывают, что на конечном торце стержня (образца) в зависимости от объема дефектной области существенно изменяются величины перемещений, что позволяет описать процесс накопления дефектов в материале при его деформировании. Если на конечном торце разрушаемого образца установить датчик акустической эмиссии, а на начальном торце излучатель, то такое сканирование материала, постепенно накапливающего дефекты, позволит отслеживать этот процесс и оценивать его критичность. Там же на графике (рис. 6, б) представлена волна, распространяющаяся в стержне полубесконечных размеров. Видно, что величина амплитуды сигнала в связи с отсутствием сопротивления b и отражающей сигнал границы неизменна.

Графики на рис. 7, а показывают, что частота пропускания датчика заметно влияет на результат сканирования по сравнению с широкополосным

датчиком. Незначительное сужение полосы несущественно влияет на результат (на графике синяя и розовая кривые). Сужение полосы пропускания до $1 \dots 6$ см⁻¹ приводит к сильному искажению кривой распределения перемещений в стержне (кривая зеленого цвета), что необходимо учитывать при выборе датчика и излучателя.

На графиках рис. 7, б приведены также значения амплитуд импульсов АЭ, распространяющихся в стержне полубесконечных размеров. Видно, что с увеличением сопротивления материала стержня распространению волны происходит достаточно интенсивное ее затухание. В то же время необходимо отметить, что волновое поле в этом случае не подвержено искажению за счет отраженных волн, их не существует. Сжимающий импульс начального воздействия на свободный торец стержня передается по стержню без искажений в случае отсутствия сопротивления материала стержня и с плавно уменьшающейся амплитудой при наличии затухания. Расчеты выполнялись по формуле, полученной при решении приведенного выше дифференциального уравнения в предположении, что стержень полубесконечен. Формула в этом случае принимает вид:

$$u = -\frac{2\epsilon_0 C_1}{\pi\sqrt{1-\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}} \times \left[\frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\beta C_1^3 t^2 \sqrt{1-\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}}{\left(\frac{\beta C_1^2 t}{2} - (C_1 t)^2 \left(1-\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2\right) + S \frac{\pi}{2}\right)} \right) \right]$$

Следует отметить, что если $\left(\frac{\beta C_1^2 t}{2}\right)^2 - (C_1 t)^2 \left(1-\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2\right) + z^2 < 0$, то $s = 1$;
если $\left(\frac{\beta C_1^2 t}{2}\right)^2 - (C_1 t)^2 \left(1-\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2\right) + z^2 \geq 0$, то $s = 0$,
 $1-\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2 > 0$.

На рис. 8 представлены перемещения в стержне конечных размеров длиной 100 см. Как видно из рисунка, наличие границ приводит к появлению отраженных волн и искажению основных волн, которые в начальные моменты времени передают заданный сжимающий импульс, а далее происходит наложение волн и перемещения меняют знак. В полубесконечном стержне этого не происходит. На рисунке приведено распределение перемещений в стержне с отсутствующим конеч-



ным торцом (полубесконечный стержень) для двух случаев – без сопротивления материала стержня распространению волны и при наличии такого сопротивления с коэффициентом $b = 0,5$. Отрицательный импульс в первом случае продолжает двигаться не изменяясь, во втором – амплитуда плавно меняется, а импульс теряет свой явно выраженный передний фронт. Как можно заметить, амплитуда импульсов в обоих случаях не меняет знак, оставаясь все время отрицательной. Расположение области с дефектами незначительно влияет на распределение перемещений на конечном торце ограниченных по размеру стержней. Расчет перемещений для этих стержней выполнялся при длине области с дефектами, равной 1 см, а сами области располагались на расстоянии 25 и 60 см от переднего торца стержня.

В заключение отметим, что характер распределения дефектов в образцах при их растяжении и наличие конечного торца стержня оказывают существенное влияние на форму и амплитуду распространяющейся акустической волны, а аналитическая модель, построенная на базе проделанных работ, позволяет в широком диапазоне изменения параметров сканирования качественно и количественно показать как именно это происходит.

Приведенный на графиках характер изменения акустических параметров в целом соответствует результатам уже проведенных экспериментальных исследований и численного моделирования, выполнявшегося авторами ранее (в частности, имеется в виду структурная модель накопления

повреждений и его влияния на параметры АЭ сканирования [2, 3]).

Выводы

Получена математическая модель распространения генерируемой АЭ волны в коротком стержне с областями, пораженными дефектами.

Показано, что наличие в стержне сосредоточенных дефектов в тонком поперечном сечении образца или в протяженной области меняет форму проходящей акустической волны в сторону снижения амплитуды и уменьшения крутизны переднего фронта.

Полученное решение предоставляет возможность оценивать накопление повреждений (дефектов) в материалах образцов по результатам их сканирования акустическими импульсами.

1. Недосека А. Я., Недосека С. А. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 1 // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2013. – №2. – С. 3–8.
2. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А. Моделирование процесса накопления повреждений в деформируемом материале по его акустическим свойствам // Вестник Севастоп. гос. ун-та. – 2000. – С. 38–42
3. Недосека С. А. Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии. Дис. ... д-ра техн. наук. – Киев. – 2010. – 469 с.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под редакцией Б.Е. Патона. – Киев: Инд-пром, 2008. – 815 с.
5. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
6. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.

The paper deals with the features of propagation of elastic waves in a thin rod caused by instantaneous application of pulsed load to one of its edges. Influence of defect distribution in a certain local extended volume on scanning wave parameters is analyzed, and possible advantages of allowing for the above factor are evaluated. Mathematical model of AE wave propagation in a short rod with regions affected by defects was derived. Development of optimum calculation procedures and required programs for MX Windows was performed that allowed conducting calculation operations in optimum terms and with an accuracy acceptable for evaluation of a physical phenomenon. Programs are realized so that an investigator could readily enough perform the adjustments and obtain calculation results in the form of graphs with the possibility of their re-adjustment in a form convenient for analysis. It is established that presence of an extended region of locally-distributed defects of material structure, for instance at its deformation, changes the nature of the wave propagating through the rod. Dependence of characteristic features of this change on the damaged area extent is shown that enables analyzing this factor at evaluation of defect initiation and propagation in materials. It is shown that presence of concentrated defects in a rod in a thin sample cross-section or in an extended area changes the shape of passing acoustic wave towards amplitude lowering and reduction of leading front steepness. Derived solution enables assessment of damage (defect) accumulation in sample materials by the results of their scanning by acoustic pulses. 6 References, 8 Figures.

Keywords : AE, AE scanning, pulsed load, defect, medium resistance, analytical calculation, rod, program

Поступила в редакцию
28.02.2013