



# ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

## Сообщение 1

А.Я. НЕДОСЕКА, С.А. НЕДОСЕКА

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

Рассмотрены изменения параметров сигналов при АЭ сканировании протяженных элементов конструкций типа стержней с дефектами, сосредоточенными в некоторой ограниченной области. Предполагается, что совместное применение методов АЭ и АЭ сканирования может повысить точность прогнозирования состояния диагностируемых материалов. Получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать возбужденное внешним источником волновое поле в стержне с учетом влияния коэффициента сопротивления среды на параметры сигнала АЭ. При этом расчеты можно выполнять как с постоянным сопротивлением среды по всей длине образца, так и сосредоточенным в некотором сечении с координатой  $z_0$ . Получены численные значения коэффициента сопротивления среды для различных объемов дефектов, накопленных в процессе разрушения образцов из стали 20. Показано, что ограниченная область материала с дефектами структуры оказывает существенное влияние на распространение АЭ волны. Локальное скопление дефектов вызывает искажение распространяющейся звуковой волны с ярко выраженными особенностями, которые могут быть использованы при оценке состояния элементов конструкций методом сканирования. Результаты применения аналитической модели сканирования образцов в широком спектре излучения позволили расширить диапазон оценок выявления мест с повышенным содержанием дефектов и показали удовлетворительную сходимость с данными эксперимента, что свидетельствует о возможности применения метода для совершенствования общей технологии оценки состояния конструкций. Библиогр. 9, табл. 1, рис. 8

*Ключевые слова:* АЭ, АЭ сканирование, дефект, сопротивление среды, аналитический расчет, стержень

Многолетний опыт работы ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по оценке состояния сварных конструкций методом АЭ и созданные для этих целей технологии контроля дали положительные результаты по достоверности таких оценок, а использование теории распознавания образов в алгоритмах прогноза позволили нормировать эти оценки с определенной заданной вероятностью и погрешностями [1]. В то же время исследования сканирования материалов в широком спектре частот, характеризующих АЭ [2-5], показали, что эта методика может быть использована для повышения точности и надежности таких оценок. При этом АЭ и АЭ-сканирование могут применяться совместно, дополняя друг друга [6, 7]. Незначительные объемы выполненных экспериментальных исследований пока не позволяют сделать окончательные выводы по нормированному применению методики на реальных конструкциях. Ожидаемые результаты требуют более детальной проработки вопроса. Требуемый объем этих исследований достаточно велик, как и их стоимость. Поэтому весьма актуальным становится наряду с экспериментами использовать технологию математического моделирования процессов сканирования с тем, чтобы заполнить те пробелы в эксперименте, которые по тем или иным причинам затруднительно перекрыть опытным путем. Моделирование в данной работе проведено приме-

нительно к длинным стержням, характерным для многих сварных конструкций, и позволяет уточнить экспериментальные данные на образцах с тем, чтобы в последующем перейти к реальным конструкциям.

Пусть имеется стержень длиной  $a$ , в котором на расстоянии  $z_0$  в результате деформирования в небольшой области материала возникло повышенное сопротивление передвижению АЭ импульса. Указанное изменение свойств материала в сечении  $z = z_0$  можно оценить изменением скорости распространения акустической волны в этом сечении по сравнению с базовой скоростью  $C_1$  (рис. 1). Дифференциальное уравнение, описывающее кинетику колебаний стержня при указанных условиях, будет:

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

где  $u$  – перемещения материала стержня в направлении оси  $z$ , см;  $C_1$  – скорость распространения волн в бездефектном материале, см/с;  $\beta$  – коэффициент сопротивления среды перемещающемуся АЭ импульсу;  $\delta(z - z_0)$  – дельта функция, определяющая сосредоточенность и координату области сопротивления, 1/см.

Выражение (1) показывает, что в определенном сечении стержня на расстоянии  $z_0$  от источника излучения интегрально сосредоточены дефекты структуры материала. Другими словами, сечение

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, 2013



$z = z_0$  является условно сборным для всех дефектов, расположенных в непосредственной близости к сечению  $z_0$  с двух сторон от него.

Выполнив прямые интегральные преобразования Лапласа по времени и конечное преобразование Фурье по координате  $z$  [6, 7], после необходимых алгебраических вычислений и обратных преобразований получим для перемещения  $u$  следующие выражения<sup>1</sup>:

$$u = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varepsilon_0 C_1 \cos(\omega_n z)}{\sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2}}} \times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 \cos^2(\omega_n z_0)}{a} t\right) \times \sin\left(C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2}}\right), \quad (2)$$

$$\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2} > 0;$$

$$u = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varepsilon_0 C_1 \cos(\omega_n z)}{\sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2}}} \times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 \cos^2(\omega_n z_0)}{a} t\right) \times \operatorname{sh}\left(C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2}}\right), \quad (3)$$

$$\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2} < 0.$$

Здесь  $\omega_n$  – положительные корни трансцендентного уравнения

$$\sin(\omega_n a) = 0.$$

Таким образом, распространение сигнала АЭ в стержне описывается последовательно двумя аналитическими выражениями. Первое из них соответствует случаю, когда величина волнового числа  $\omega_n$  меньше правой части подкоренного выражения. В этом случае перемещения распространяются без колебаний. Второе выражение вступает в силу, когда  $\omega_n$  становится больше правой части и обеспечивает колебательный процесс распространения упругой волны АЭ. Как видно из формулы, АЭ сигнал затухает с течением времени. Этот процесс усиливается с увеличением коэффициента  $\beta$ , харак-

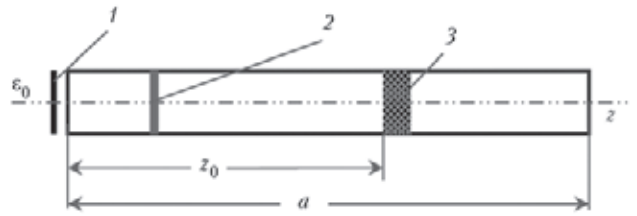


Рис. 1. Цилиндрический стержень с областью повышенного сопротивления материала распространению волны: 1 – начальная деформация  $\varepsilon_0$ ; 2 – перемещающийся АЭ импульс; 3 – область повышенного сопротивления

теризующего плотность дефектов, возникающих в структуре материала при его деформировании. Перемещения стержня также зависят от его длины, уменьшаясь с ее увеличением. Следует также отметить, что наличие границ стержня по его длине вызывает возникновение колебательного процесса в перемещениях.

Исследование особенностей распространения АЭ волн в стержне с дефектами структуры материала проводили на модели длиной 10,6 см. При этом исследовалось влияние величины коэффициента сопротивления среды распространению сигнала в дефектной области  $\beta$  и места ее расположения на оси  $z$ . Экспериментальную часть работы выполняли на стандартных цилиндрических образцах (рис. 2). Образец из стали 20 растягивался на разрывной машине до определенных реперных точек, показанных на графике (рис.3, б, точки на зеленой кривой). После этого испытания останавливали, образец освобождали из захватов машины и выполнялось его сканирование, как показано на рис. 2. Затем образец вновь устанавливали в захватах разрывной машины и продолжалось его растяжение до следующей реперной точки. Процедуру повторяли, обеспечив прохождение всей шкалы деформирования, вплоть до разрушения.

В таблице представлены значения коэффициентов  $b$ , полученные при сканировании образцов из стали 20 на различных стадиях деформирования ( $\varepsilon$ ). Результаты поэтапного сканирования фиксировались аппаратурой ЕМА 3.9. Типичные графики акустической активности материала в процессе накопления повреждений при растяжении образцов из стали 20 и результаты средних значений параметров АЭ сканирования для 20 таких образцов представлены на рис. 3. Из графика рис. 3, а видно, что накопление повреждений в материале образца постепенно увеличивается с

Значения коэффициентов сопротивления среды  $b = C_1 \beta$

$\varepsilon, \%$	1,5	2,5	6,0	7,5	9,0	13	19	22,5	25	27	28
$b = C_1 \beta$	0,1	0,4	0,44	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,94	4	6
$\beta \cdot 10^6, \text{с/см}$	0,2	0,8	0,88	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	1,88	8	12

<sup>1</sup> Подробные выкладки по выводу формул для расчета перемещений  $u$  не приводим из-за их громоздкости. Вывод выражений (2), (3) читатель может легко сделать по методике, описанной в работах [1, 5, 8].

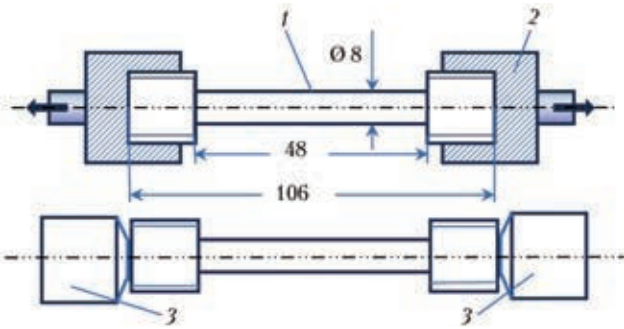


Рис. 2. Образец в захватах разрывной машины P20 и схема сканирования: 1 – образец; 2 – захваты машины P20; 3 – излучающий и принимающий АЭ датчики

ростом его деформации, приобретая лавинообразный характер на заключительных стадиях. Этот процесс достаточно хорошо отображает поэтапное АЭ сканирование материала, фиксирующее постепенное ослабление амплитуды сигнала АЭ и увеличение его длительности по мере увеличения количества дефектов (рис. 3, б).

На следующем этапе были выполнены аналитические расчеты с тем, чтобы определить величины коэффициентов сопротивления среды  $\beta$ , обусловленные увеличением количества пустот, связанных с деформированием образца в соответ-

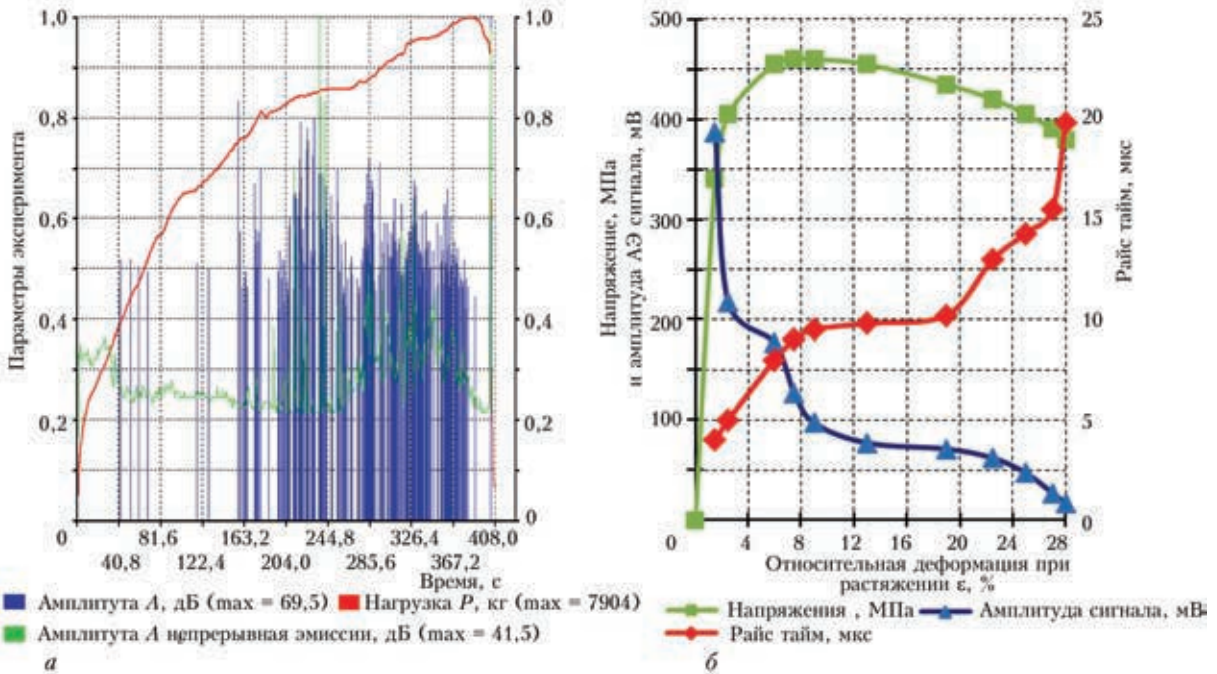


Рис. 3. АЭ в процессе накопления повреждений и разрушения образца из стали 20 при растяжении на машине P20 (а) и результаты АЭ сканирования серии цилиндрических образцов с разными концентраторами из стали 20 на разных стадиях деформирования (б)[7]

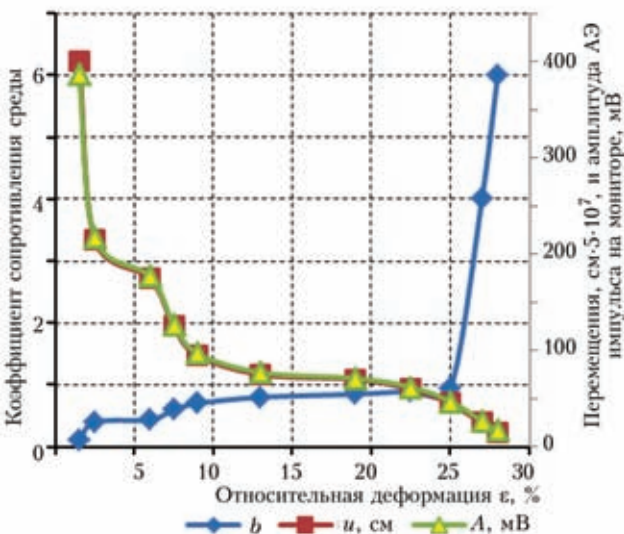


Рис. 4. Условный коэффициент сопротивления среды  $b = \beta C_1$  в зависимости от величины деформации образца, перемещения конечного торца образца  $u$  и амплитуда А сигнала АЭ импульса при соответствующей данной деформации величины  $b$

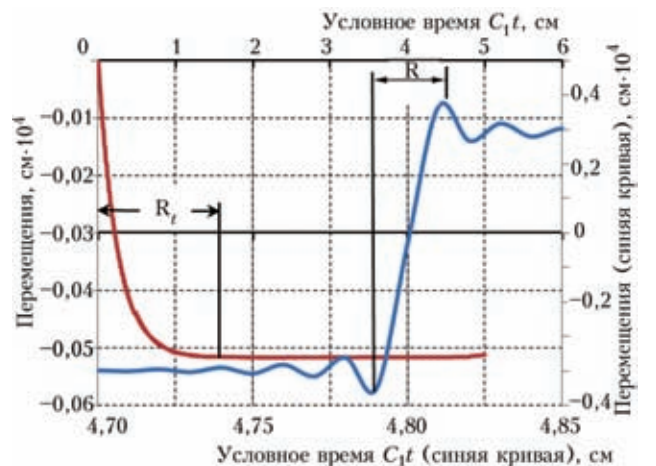


Рис. 5. Изменение параметра Райс тайм ( $R$ ) для двух точек деформирования образцов –  $\beta C_1 = 0,44$  (синяя кривая) и  $\beta C_1 = 4$  (красная)



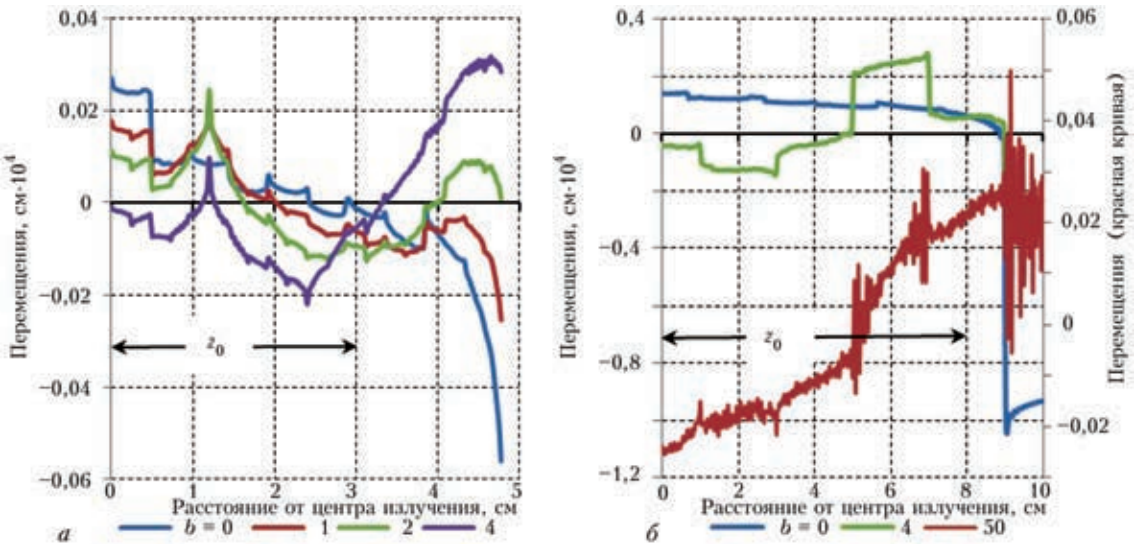


Рис. 6. Перемещение волны АЭ в стержне длиной 4,8 (а) и 10 см (б) при различных значениях коэффициента  $C_1\beta$  и координаты локального сосредоточения дефектов  $z_0$ . Условное время  $C_1t = 4,8$  см ( $t = 9,6$  мкс) и  $C_1t = 1$  см (22 мкс)

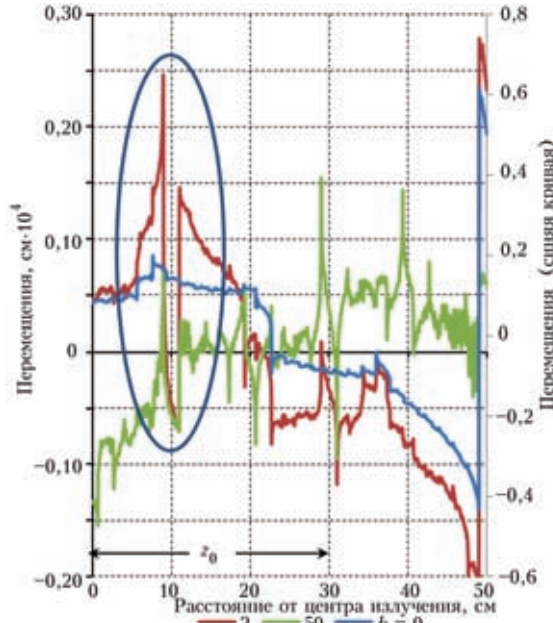


Рис. 7. Распространение АЭ волны в стержне длиной 50 см. Координата сечения с повышенным сопротивлением показана на графике, на срезе момент времени  $t = 98$  мкс

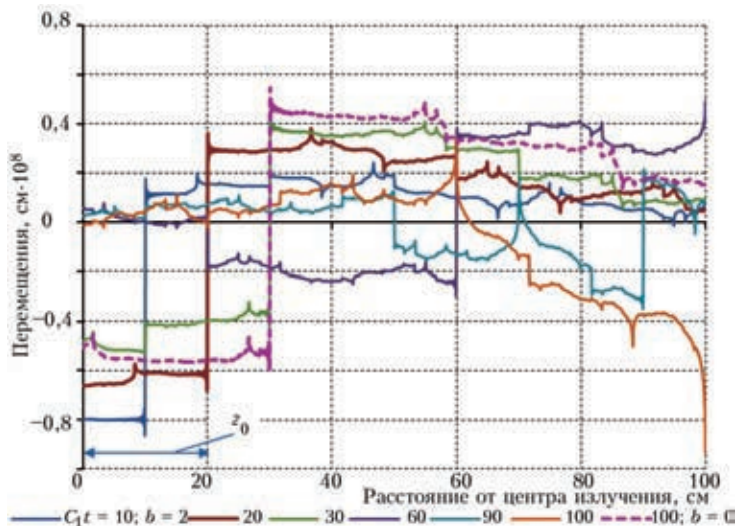


Рис. 8. Влияние постепенного перемещения переднего фронта волны по стержню длиной 100 см на амплитуду АЭ сигнала в конечном его торце ( $b = 2$ ;  $\epsilon_0 C_1 = 1$  см;  $z_0 = 20$  см)



ствии с проведенными экспериментами. На рис. 4 представлены результаты расчетов коэффициента  $\beta$  (на графике  $b = \beta C_1$ ) в зависимости от относительной деформации  $\epsilon$  и показано его влияние на величину амплитуды импульса АЭ и перемещения, формирующиеся на выходном торце образца. Расчеты параметров АЭ выполнялись по приведенной ниже формуле, где  $\beta$  есть постоянное по всей длине стержня значение коэффициента сопротивления среды. Формула получена в результате решения дифференциального уравнения (1) для случая, когда параметр локальности  $\delta(z - z_0)$  отсутствует:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\epsilon_0 C_1}{\sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2}{4}}} \times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2}{2} t\right) \sin(\text{sh})\left(C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2}{4}}\right) \times \cos(\omega_n z). \quad (4)$$

В случае, если под корнем отрицательное число, то вместо (sin) подставляется (sh).

Аналитические исследования хорошо коррелируют с данными эксперимента, полученными при сканировании 20 образцов из стали 20, приведенными на рис. 3, б. Аналитические исследования изменения времени нарастания АЭ импульса ( $Rt$ ) представлены на рис. 5 и показали существенное отличие от экспериментальных данных по величине, хотя тенденция по росту  $Rt$  с увеличением степени деформации образца сохранилась. Можно полагать, что разница между результатами эксперимента по сравнению с аналитическими расчетами может скрываться в особенностях методики измерения параметра  $Rt$  прибором АЭ. В то же время, как и в эксперименте, с увеличением величины пластической деформации  $\epsilon$  растет время нарастания АЭ сигнала до его максимального значения.

Следует отметить, что при незначительных величинах коэффициента  $\beta$  на конце стержня появляется достаточно четко выраженный импульс АЭ (рис. 5, синяя кривая). С увеличением величины  $\beta$  импульс постепенно исчезает и процесс распространения АЭ волны становится плавным без скачков, время изменения сигнала АЭ становится длительным (рис. 5, красная кривая). Такая ситуация естественно скажется на приеме волны АЭ датчиком. Датчик может просто не среагировать на столь медленное изменение сигнала.

Расчет распространения АЭ волн в случае, когда дефекты сосредотачиваются локально в определенных местах несущих элементов конструкций, был выполнен по формулам (1), (2) с использованием полученных выше значений коэффициента

$\beta$ . Расчеты выполнялись для противоположного удару торца образца при  $z = a$ , где устанавливается АЭ датчик, принимающий сигнал. Установлено достаточно существенное влияние замедляющей распространение АЭ волны преграды. Как видно из приведенных на рис. 6 графиков, это влияние выражается в резком по сравнению с бездефектным материалом изменением распределения перемещений вдоль образца. Двигающаяся волна как бы отражается от препятствия, находящегося на расстоянии  $z_0$ . Из рисунка также видно уменьшение амплитуды сигнала АЭ на противоположном торце стержня с увеличением  $b$ . Чем выше это сопротивление, тем меньше амплитуда суммарного сигнала на торце стержня. Перемещение полосы сопротивления ближе к противоположному торцу стержня также сказывается на параметрах АЭ импульса. На графиках рис.6 для стержня длиной 10 см показано распределение амплитуд сигналов АЭ по оси  $z$  при очень больших значениях величины  $b$ . Видно, что сигнал практически не преодолевает сопротивления и становится ничтожно малым (рис. 6, б, красная кривая).

При сканировании стержня длиной 50 см картина распределения перемещений по его длине на первый взгляд мало отличается от рассмотренных выше стержней длиной 4,8 и 10 см. Исключение составляют торцы на расстояниях 10 и 50 см от начала координат для стержней длиной 10 и 50 см, где более резко проявляются пиковые значения амплитуд. Видна также достаточно четкая зависимость амплитуды сигнала от величины коэффициента  $b$ , уменьшающаяся с увеличением этого коэффициента и увеличивающаяся с ростом длины стержня. Особенности распределения амплитуд АЭ сигнала появляются с появлением области с повышенным сопротивлением среды перемещению импульса. На рис.6 и 7 это хорошо видно. Там, где распространяющаяся волна при отсутствии сопротивления ( $b = 0$ ) не имеет «провалов», например, участок в районе 10 см (рис.7), при появлении сопротивления в этом месте появляется «провал» амплитуды, увеличивающийся с ростом коэффициента  $b$ . На рис. 7 эта область заключена внутри эллипса. На рис. 8 приведены графики волны, распространяющейся в стержне длиной 100 см, для случая, когда область повышенного сопротивления (дефектная область) расположена на расстоянии 20 см от источника возбуждения. Постепенное со временем перемещение переднего фронта волны приводит к существенным изменениям амплитуды АЭ сигнала на конечном торце. Сравнивая графики на рис. 6–8, можно заметить влияние длины стержня на величину и характер продольных перемещений.



В заключение следует отметить, что характер распределения перемещений по длине и на торцах стержня достаточно сложный, зависит от многих параметров и для выявления особенностей, связанных с появлением и ростом дефектности структуры материалов, требует более детального анализа на базе полученных аналитических зависимостей. Объем настоящей статьи не позволяет представить такие исследования, хотя полученные аналитические зависимости носят общий характер и дают эту возможность.

Формулы для расчета перемещений, вызванных воздействием начального импульса на переднем торце стержня, сложны и требуют специальных подходов для реализации на персональных компьютерах. Скорость счета и ошибки в его результатах в сильной мере зависят от построения программы для ЭВМ. Поэтому для проведения вычислений была создана и исследована специальная программа. Программа позволила выполнить эти вычисления. Основной трудностью при организации компьютерного счета является достаточно слабая сходимость суммы по волновым числам  $\omega_n$ . В программе учтены эти особенности и для стержней незначительной длины точность расчетов укладывается в принятые нормы до 5%. Далее программа передавала информацию в MS Excel для представления результатов в виде таблиц и графиков.

### Выводы

Получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать возбужденное внешним источником волновое поле в стержне с учетом влияния коэффициента сопротивления среды  $\beta$  на параметры сигнала АЭ. При этом расчеты можно выполнять как с постоянным значением  $\beta$  по всей длине образца, так и сосредоточенным в некотором сечении с координатой  $z_0$ .

The paper deals with changes of signal parameters at AE scanning of extended structural elements of the type of rods with defects, concentrated in a certain limited region. It is anticipated that simultaneous application of AE and AE scanning methods can increase the accuracy of prediction of diagnosed material state. Analytical dependencies were derived, allowing calculation of a wave field excited by an external source in a rod, taking into account the coefficient of medium resistance to AE signal parameters. Calculations can be performed both at constant medium resistance along the entire sample length, and with resistance concentrated in a certain section with coordinate  $z_0$ . Numerical values of the coefficient of medium resistance were derived for various volumes of defects, accumulated during failure of samples from steel 20. It is shown that a limited area of material with structural defects has an essential influence on AE wave propagation. Local defect accumulation causes a distortion of the propagating sound wave with pronounced features, which can be used at evaluation of the condition of structural elements by the method of scanning. Results of application of analytical model of sample scanning in a broad radiation spectrum allowed widening the range of assessment of detection of locations with an increased defect number, and demonstrated a satisfactory convergence with the experimental data that is indicative of applicability of the method to improve the general technology of evaluation of the structure condition.

*Keywords:* AE, AE scanning, defect, medium resistance, analytical calculation, rod

Получены численные значения коэффициента  $\beta$  для различных объемов дефектов, накопленных в процессе разрушения образцов из стали 20.

Ограниченная область материала с дефектами структуры оказывает существенное влияние на распространение АЭ волны.

Результаты применения аналитической модели сканирования образцов в широком спектре излучения позволили расширить диапазон оценок выявления мест с повышенным содержанием дефектов и показали удовлетворительную сходимость с данными эксперимента. Последнее свидетельствует о возможности применения метода для совершенствования общей технологии оценки состояния конструкций.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е.Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
2. Недосека С. А., Богинич И. О. Применение аппаратуры «ЕМА» для оценки поврежденности стали 20 акустическим методом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1995. – №1. – С. 66–69.
3. 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. – №2. – С. 18–21.
4. Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования / А.А.Лебедев, А.Я.Недосека, Н.Г.Чаусов, С.А.Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2001. – № 1. – С. 8–12.
5. Механіка руйнування і міцність матеріалів/ Під ред. В.В. Панасюка. Довід. посіб. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т.Назарчука. – Львів: ФМІ, 2001. – 1132 с.
6. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. – 2010. – № 1. – С. 9–16.
7. Недосека С. А. Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии. Дис....д-ра техн. наук. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2010. – 469 с.
8. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. –М.: Наука, 1971. – 288 с.
9. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.

Поступила в редакцию  
08.01.13