

УДК 621.0

НЕКОТОРЫЕ ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ БЕЗНУЛЕВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ

© К.В. Курашкин, В.В. Мишакин

Нижегородский филиал Института машиноведения РАН
Россия, Нижний Новгород

Аннотация. В статье предлагаются подходы для осуществления безнулевой акустической тензометрии (измерения механических напряжений без разгрузки конструкций). Исследовалась связь между структурной текстурой и параметром акустической анизотропии. Определялись коэффициенты акустоупругости основного металла и материала зоны термического влияния сварного шва.

Ключевые слова: механические напряжения, акустоупругий эффект, безнулевая акустическая тензометрия.

1. Введение. Для определения реального технического состояния конструкции и обеспечения ее безопасной эксплуатации важна оценка действующих механических напряжений.

В настоящее время для определения напряжений применяются различные методы неразрушающего контроля [1], среди которых акустический выделяется своей надежностью, низкой стоимостью, безопасностью, возможностью измерения акустических параметров непосредственно на объекте. Однако существующие методики оценки механических напряжений акустическим методом требуют предварительные измерения акустических параметров объекта в разгруженном состоянии или на образцах, вырезанных из исследуемой конструкции, что не всегда возможно. Весьма перспективным направлением исследований представляется разработка методов безнулевой акустической тензометрии.

Для оценки величины упругих напряжений акустическим методом используют эффект акустоупругости, который отражает нелинейную связь между напряжениями и деформациями и, как следствие, влияние напряжений на скорости упругих волн. В случае двусносного напряженного состояния зависимости скоростей объемных упругих, волн распространяющихся перпендикулярно поверхности листового проката, от напряжений (главные напряжения ориентированы вдоль и поперек направления проката) описываются следующими соотношениями [2]:

$$\begin{aligned}\rho V_1^2 &= \rho V_{01}^2 + d_1 \sigma_1 + d_2 \sigma_2, \\ \rho V_2^2 &= \rho V_{02}^2 + d_3 \sigma_1 + d_4 \sigma_2, \\ \rho V_3^2 &= \rho V_{03}^2 + d_5 \sigma_1 + d_6 \sigma_2,\end{aligned}\tag{1}$$

где V_1 и V_2 – скорости поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката соответственно, V_3 – скорость продольной волны,

$V_{0i} = V_i (\sigma = 0)$, d_i – константы, выражаемые через упругие модули второго и третьего порядков.

Учитывая, что $\Delta V_i / V_{0i} \ll 1$, можно получить следующие соотношения:

$$\frac{V_1}{V_{01}} = 1 + k_1 \sigma_1 + k_2 \sigma_2 = \frac{h}{h_0} \frac{t_{01}}{t_1},$$

$$\frac{V_2}{V_{02}} = 1 + k_3\sigma_1 + k_4\sigma_2 = \frac{h}{h_0} \frac{t_{02}}{t_2}, \quad (2)$$
$$\frac{V_3}{V_{03}} = 1 + k_5\sigma_1 + k_6\sigma_2 = \frac{h}{h_0} \frac{t_{03}}{t_3},$$

где k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты акустоупругой связи, которые могут быть определены экспериментально при одноосном нагружении образцов из исследуемого материала, $t_{0i} = t_i$ ($\sigma = 0$), t_i – время задержки упругих волн в материале.

Для одноосного напряженного состояния связь σ_1 с отношением скоростей поперечных волн поляризованных вдоль и поперек оси нагружения может быть выражена из первых двух уравнений системы (2):

$$\sigma_1 = k(A - A_0), \quad (3)$$

где $A = \frac{2(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)}$ – параметр акустической анизотропии, A_0 – значение параметра

акустической анизотропии при $\sigma_1 = 0$, k – коэффициент.

Значение A_0 определяется, в основном, кристаллографической текстурой. Параметр акустической анизотропии линейно связан с коэффициентом W_{420} функции распределения ориентировок кристаллов в поликристаллическом материале [3].

Величина механических напряжений не может быть определена акустическим методом, если неизвестно значение анизотропии в разгруженном материале.

Один из предлагаемых подходов для оценки значения начальной акустической анизотропии A_0 заключается в использовании ее связи с параметром структурной текстуры

$D = \frac{2(d_2 - d_1)}{d_2 + d_1}$, где d_1 и d_2 – средний размер зерен в продольном и поперечном направлениях.

Формоизменение зерен, возникающее в результате пластической обработки при прокатке, на порядок выше, чем формоизменение под влиянием упругих напряжений. При схожей термической и пластической обработке материала, величина структурной текстуры коррелирует с начальной акустической анизотропией.

Величину акустической анизотропии можно оперативно измерять на плоских элементах конструкций при одностороннем доступе к ним. Значение структурной текстуры можно определять, используя переносной металлографический комплекс и программный пакет металлографического анализа MicroconMet 5.7.

Для оценки напряжений в сварном соединении может быть также использовано различие коэффициентов акустоупругости в зоне термического влияния (ЗТВ) и в основном металле. Алгоритм применим в том случае, когда механические напряжения в ЗТВ и в зонах основного металла, расположенных вблизи ЗТВ, мало отличаются. Это характерно для участков вблизи ЗТВ, в которых отсутствует сильная концентрация напряжений.

В основном металле и в ЗТВ сварного шва вследствие различного структурного состояния материала величина акустической анизотропии может существенно различаться. Если в процессе обучающего эксперимента установить связь между A_0 и A_0^* (A_0^* – значение параметра акустической анизотропии в ЗТВ при $\sigma_1 = 0$) то исключая A_0 из формулы (3), можно при одноосном напряженном состоянии определить величину σ_1 с помощью выражения:

$$\sigma_1 = kk^* \frac{A^* - \alpha A}{k - \alpha k^*}, \quad (4)$$

где k^* – значение коэффициента k в зоне термического влияния, $\alpha = A_0^*/A_0$.

Величина A_0^* может предварительно определяться на тестовых образцах после их термической обработки, соответствующей формированию структуры в ЗТВ в процессе сварки.

В случае двухосного напряженного состояния для оценки напряжений предложенным способом необходимо предварительно определить соотношения скоростей или времени распространения упругих волн в ЗТВ и в основном металле.

Применяя уравнения (2) для зоны основного металла и зоны термического влияния и исключая толщину, можно получить следующие выражения:

$$\begin{aligned} \frac{t_{01}}{t_1} \frac{t_3}{t_{03}} &= \frac{1 + k_1 \sigma_1 + k_2 \sigma_2}{1 + k_5 \sigma_1 + k_6 \sigma_2}, \\ \frac{t_{02}}{t_2} \frac{t_3}{t_{03}} &= \frac{1 + k_3 \sigma_1 + k_4 \sigma_2}{1 + k_5 \sigma_1 + k_6 \sigma_2}, \\ \frac{t_{01}^*}{t_1^*} \frac{t_3^*}{t_{03}^*} &= \frac{1 + k_1^* \sigma_1 + k_2^* \sigma_2}{1 + k_5^* \sigma_1 + k_6^* \sigma_2}, \\ \frac{t_{02}^*}{t_2^*} \frac{t_3^*}{t_{03}^*} &= \frac{1 + k_3^* \sigma_1 + k_4^* \sigma_2}{1 + k_5^* \sigma_1 + k_6^* \sigma_2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где k_i и k_i^* – коэффициенты для основного металла и металла в ЗТВ.

Для численной оценки напряжений можно воспользоваться следующими формулами, полученными из соотношений (5):

$$\begin{aligned} a \frac{t_1}{t_1^*} \frac{t_3}{t_3^*} &= \frac{1 + k_1^* \sigma_1 + k_2^* \sigma_2}{1 + k_1 \sigma_1 + k_2 \sigma_2} \frac{1 + k_5 \sigma_1 + k_6 \sigma_2}{1 + k_5^* \sigma_1 + k_6^* \sigma_2}, \\ b \frac{t_2}{t_2^*} \frac{t_3}{t_3^*} &= \frac{1 + k_3^* \sigma_1 + k_4^* \sigma_2}{1 + k_3 \sigma_1 + k_4 \sigma_2} \frac{1 + k_5 \sigma_1 + k_6 \sigma_2}{1 + k_5^* \sigma_1 + k_6^* \sigma_2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $a = \frac{V_{03}^*}{V_{01}^*} \frac{V_{01}}{V_{03}} = \frac{t_{01}^*}{t_{03}^*} \frac{t_{03}}{t_{01}}$, $b = \frac{V_{03}^*}{V_{02}^*} \frac{V_{02}}{V_{03}} = \frac{t_{02}^*}{t_{03}^*} \frac{t_{03}}{t_{02}}$ – соотношения скоростей и времени

распространения упругих волн в зоне термического влияния (индекс-*) и в основном металле.

Напряжения σ_1 и σ_2 вычисляются из системы уравнений (6). Учитывая структурную неоднородность материала ЗТВ, необходимы дополнительные измерения для определения границ ЗТВ и соответствующего расположения пьезопреобразователя внутри нее.

2. Объекты и методика исследований. В работе исследовались образцы стали 09Г2С. Образцы были вырезаны из труб газопровода. Химический состав стали 09Г2С: 0,09÷0,12% С; 0,5÷0,8% Si; 1,3÷1,7% Mn; не более 0,3% Cr. Предел текучести стали 09Г2С $\sigma_T = 265 \div 330$ МПа.

Время распространения упругих волн измеряли эхо-импульсным методом. Использовались пьезоэлектрические преобразователи, возбуждающие продольные и

поперечные объемные упругие волны, распространяющиеся перпендикулярно поверхности материала. Диаметр преобразователей – 8 мм, центральная частота – 4,6 МГц. Длительность зондирующего сигнала – около 4 мкс. Полученные данные были обработаны в программе MathCad 11.0.

Значение параметра акустической анизотропии определяли из соотношения времен распространения поперечных упругих волн:

$$A = \frac{2(t_2 - t_1)}{t_2 + t_1}, \quad (7)$$

где t_1 и t_2 – времена распространения поперечных упругих волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката соответственно.

Относительная погрешность измерения времени распространения упругих волн составляла не более 2×10^{-4} , погрешность измерения параметра акустической анизотропии не превышала 10^{-4} .

Средний размер зерен в продольном и поперечном направлениях определяли хордовым методом с помощью программного пакета металлографического анализа MicroconMet 5.7. Количество зерен, обрабатываемых при измерении среднего размера зерна в одном направлении, составляло не менее 300. Точность определения среднего размера зерна не менее 0,2 мкм. Для каждого исследованного образца была определена величина структурной текстуры в месте установки датчика упругих волн. Погрешность определения значения структурной текстуры не превышала 0,02.

Для испытаний на растяжение был выбран плоский образец из стали 09Г2С со стыковым сварным соединением размерами 260x40x11 мм (рис. 1).

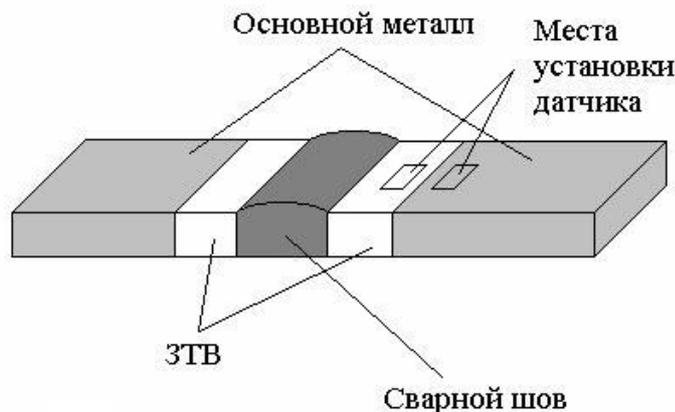


Рис. 1. Образец со сварным соединением встык.

Образец подвергался одноосному растяжению в упругой области на испытательной машине ГРМ-1. Шкала ГРМ-1 N 550 с ценой деления 50 кг, диапазон измерений от 0 до 50 т. Испытания проводились при комнатной температуре.

Акустические исследования проводились в основном материале и в околошовной зоне.

3. Результаты исследований. На рис. 2 представлена зависимость параметра акустической анизотропии A_0 от величины структурной текстуры D для трубной стали 09Г2С. Эта зависимость хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$A_{0\text{расч}} = -0,252D^2 - 0,004D. \quad (8)$$

Значения A_0 , полученные с помощью выражения (7) для случая $\sigma_1 = 0$ и оценка $A_{0\text{расч}}$ по формуле (8), отличаются не более, чем на 4×10^{-4} .

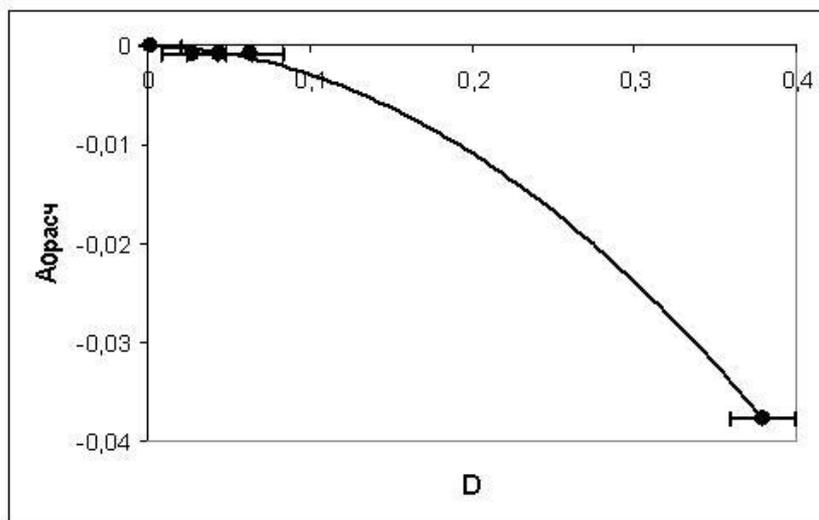


Рис. 2. Связь начальной акустической анизотропии и структурной текстуры.

Изменение акустической анизотропии основного металла на 4×10^{-4} соответствует напряжению $\sigma_1 \approx 50$ МПа (рис. 3).

При испытании образца из стали 09Г2С на одноосное растяжение была получена линейная зависимость изменения акустической анизотропии от величины напряжения $\sigma = \sigma_1$ (рис. 3).

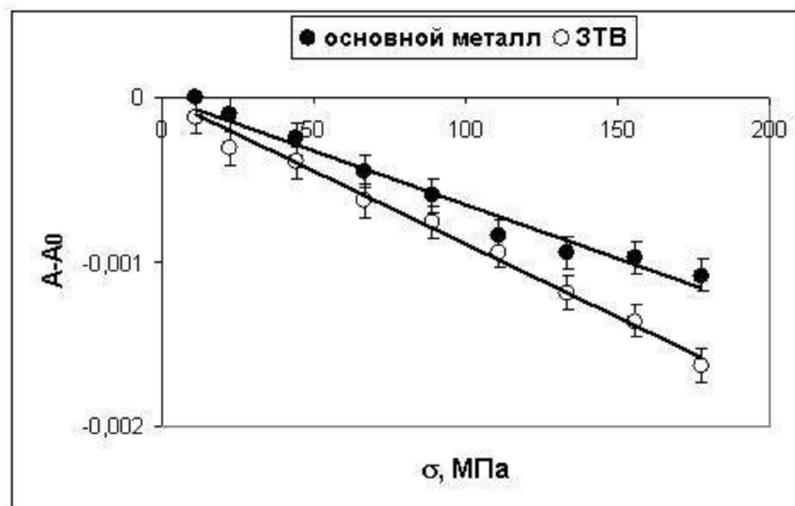


Рис. 3. Зависимость изменения акустической анизотропии в основном металле и ЗТВ от напряжения.

Параметр связи начальной анизотропии в зоне основного материала и в ЗТВ $A_0^*/A_0 = 0,136 \pm 0,028$. Коэффициенты: $k = 152 \pm 4$ ГПа, $k^* = 112 \pm 2$ ГПа. Точность определения напряжений при данных коэффициентах приблизительно 40 МПа. Повышения точности можно добиться, определив связь параметра $\alpha = A_0^*/A_0$ со структурным состоянием ЗТВ и основного металла.

Заключение.

Предложены пути осуществления безнулевой акустической тензометрии. Один из подходов заключается в определении связи параметра начальной акустической анизотропии со структурной текстурой. Определение связи выполняется после предварительных исследований на образцах. Найденная связь может использоваться для оценки напряжений на элементах конструкций, выполненных из тех же материалов, что и исследуемые образцы, и имеющих схожую термическую и пластическую обработку. Структурная текстура определяется непосредственно на объекте с помощью переносного металлографического комплекса.

Другой подход, базируется на различии коэффициентов акустоупругости основного металла и металла зоны термического влияния сварного шва.

Использование предлагаемых алгоритмов может дать информацию о состоянии нагруженных элементов конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-97058-р_поволжье_a и грант № 08-08-97057-р_поволжье_a).

Литература:

1. В.В. Ключев: Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. // Москва: Машиностроение, 1995. - 488 с.
2. J. Chatellier and M. Touratier: A new method determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates. // J Acoust. Sce. Am. 1988. V 63. № 1 January. pp. 109-117.
3. C. Sayers: Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates. // Appl. Phys. 1982. V. 15. pp. 2157-2167.

Поступила: 30.09.09.