

УДК 534.222

## СПОСОБ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ

© Константин Владимирович Курашкин, Василий Васильевич Мишакин,  
Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Нижний Новгород, Россия  
[imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru)

**Аннотация.** Предложен способ определения уровня остаточных сварочных напряжений в режиме безнулевой акустической тензометрии. Способ основан на измерении коэффициентов Пуассона через соотношения времен распространения поперечных и продольных упругих волн. В катаном структурно неоднородном материале обнаружена линейная зависимость между коэффициентами Пуассона. Отклонение от линейной зависимости характеризует уровень остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, акустический метод неразрушающего контроля, безнулевая тензометрия

## A WAY OF ACOUSTIC CONTROL OF LEVEL OF RESIDUAL STRESSES IN PIPES' WELDED JOINTS

© Konstantin Kurashkin, Vasily Mishakin,  
Nizhny Novgorod branch of the Institute of Mechanical Engineering RAS, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** A way for determining the level of residual welding stresses in the mode of acoustic nonzero tensometry is proposed. The technique is based on measuring Poisson's ratios by use the times of propagation of shear and longitudinal elastic waves. In the rolled structurally heterogeneous material a linear relationship between the Poisson's ratios is found. Deviation from linear relation characterizes the level of residual stresses.

**Keywords:** residual stresses, the acoustic method of nondestructive testing, nonzero tensometry

В последние десятилетия требования безопасности сделали необходимой разработку новых методов определения остаточных напряжений. Существуют ситуации, когда, нет возможности применения традиционных разрушающих и достаточно развитых в настоящее время расчетных методов определения напряжений, а вероятность внезапного разрушения объекта с тяжелыми последствиями велика. Пример таких объектов – магистральные трубопроводы нефти и газа. Причиной многих экологических катастроф в нашей стране и за рубежом часто являются разрывы их линейных участков. Известно, что высокий уровень остаточных напряжений в сварных соединениях труб может стать одной из причин разрушения трубопровода. В связи с этим актуальна задача создания неразрушающих методов контроля остаточных напряжений, позволяющих получать информацию в условиях эксплуатации, оперативно, с требуемой точностью.

В настоящее время для определения напряжений применяются различные методы неразрушающего контроля, среди которых акустический метод выделяется простотой, надежностью, точностью, низкой стоимостью и безопасностью [1]. Перспективность использования акустического метода для контроля механических напряжений признается

всеми специалистами [2]. Однако существующие алгоритмы оценки механических напряжений с помощью ультразвука [3,4] требуют проведения измерений на разгруженном объекте или на образцах, вырезанных из исследуемой конструкции. Проблема безнулевой акустической тензометрии остается открытой. Очевидна потребность в аппаратуре и методологии контроля абсолютных значений напряжений, а не их приращений.

Применение акустического метода для определения напряженного состояния материала основано на эффекте акустоупругости, который отражает нелинейную связь между напряжениями и деформациями и, как следствие, влияние напряжений на скорости распространения упругих волн. Во многих элементах конструкций реализуется плоское напряжённое состояние, или его можно с большой степенью точности считать плоским. В случае плоского напряженного состояния система уравнений акустоупругости выглядит следующим образом [5]:

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

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – главные напряжения, действующие вдоль осей ортотропного материала,  $V_1$  и  $V_2$  – скорости поперечных волн, поляризованные вдоль осей ортотропного материала,  $V_3$  – скорость продольной волны,  $V_{0i} = V_i (\sigma_1 = 0; \sigma_2 = 0)$ ,  $d_i$  – коэффициенты акустоупругости, выражаемые через упругие модули второго и третьего порядков,  $\rho$  – плотность материала.

При одностороннем доступе к объекту, когда неизвестна длина акустического пути, удобно использовать относительные величины, выражаемые через времена распространения объемных упругих волн.

$$A = \frac{2(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} = \frac{2(t_2 - t_1)}{(t_1 + t_2)}, \quad (2)$$

$$v_{31} = \frac{0,5 - (V_1/V_3)^2}{1 - (V_1/V_3)^2} = \frac{0,5 - (t_3/t_1)^2}{1 - (t_3/t_1)^2}, \quad (3)$$

$$v_{32} = \frac{0,5 - (V_2/V_3)^2}{1 - (V_2/V_3)^2} = \frac{0,5 - (t_3/t_2)^2}{1 - (t_3/t_2)^2}, \quad (4)$$

где  $A$  – параметр акустической анизотропии,  $v_{31}$  и  $v_{32}$  – коэффициенты Пуассона,  $t_1$  и  $t_2$  – времена распространения поперечных волн,  $t_3$  – время распространения продольной волны.

С помощью элементарных алгебраических операций из формул (1) – (4) можно получить зависимости параметра акустической анизотропии и коэффициентов Пуассона от напряжений:

$$A = A_0 + D_1 \sigma_1 + D_2 \sigma_2 \quad (5)$$

$$v_{31} = v_{31}^0 + m_1 \sigma_1 + m_2 \sigma_2, \quad (6)$$

$$v_{32} = v_{32}^0 + m_3 \sigma_1 + m_4 \sigma_2, \quad (7)$$

где  $D_i$ ,  $m_i$  – коэффициенты, выражаемые через упругие модули второго и третьего порядков,  $A_0$ ,  $v_{31}^0$  и  $v_{32}^0$  – значения параметра анизотропии и коэффициентов Пуассона в материале без напряжений,  $A_0 = A (\sigma_1 = 0; \sigma_2 = 0)$ ,  $v_{3i}^0 = v_{3i} (\sigma_1 = 0; \sigma_2 = 0)$ .

В настоящей работе проводились акустические исследования сварных соединений в элементе трубы магистрального газопровода. Диаметр трубы – 1420 мм, толщина стенки трубы – 16 мм. Материал – сталь 09Г2С. Время распространения упругих волн измеряли импульсным эхо-методом с помощью пьезоэлектрических преобразователей продольных и поперечных упругих волн V110 и V156 Panametrics. Диаметр преобразователей – 6 мм,

частота – 5 МГц. Для обеспечения ввода упругих волн в материал поверхность в месте установки преобразователя шлифовалась, обезжиривалась спиртом и смазывалась эпоксидной смолой. Измерения в каждой зоне повторялись 12 раз. Исследования проводились при комнатной температуре. Для получения амплитудно-временной диаграммы серии отраженных импульсов использовался цифровой осциллограф PCS500 Velleman. Полученные данные обрабатывались в программе MathCad. Время распространения упругих волн измеряли между первым и четвертым отраженными импульсами. Относительная погрешность измерения времени распространения поперечных волн составила  $0.00 \div 0.02\%$ , продольных волн –  $0.01 \div 0.04\%$ . Значения параметра акустической анизотропии и коэффициентов Пуассона рассчитывали через времена распространения упругих волн по формулам (2) – (4). Абсолютные значения погрешностей определения параметра акустической анизотропии и коэффициентов Пуассона не превышали  $10^{-4}$  и  $2 \times 10^{-4}$  соответственно.

В результате акустических измерений были получены распределения параметра акустической анизотропии (рис. 1) и коэффициентов Пуассона (рис. 2) в направлении, перпендикулярном сварному шву.

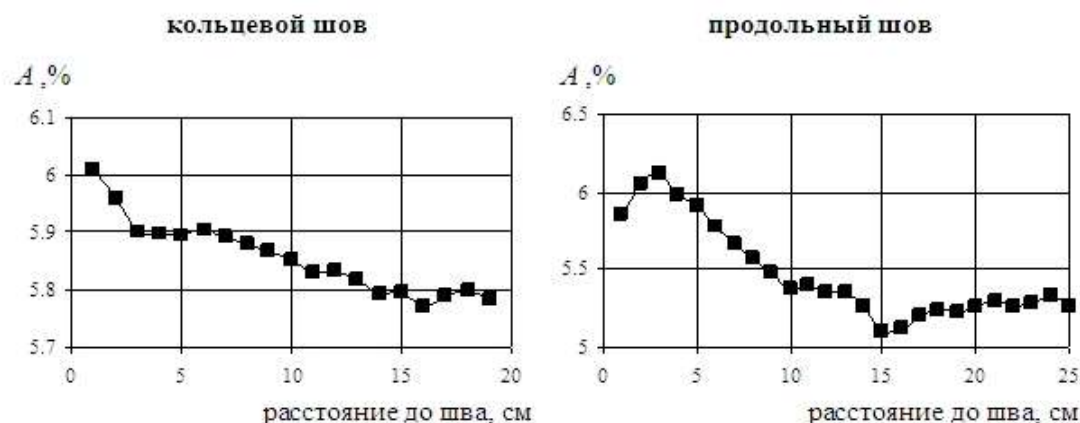


Рис. 1. Зависимость параметра акустической анизотропии от расстояния до сварного шва

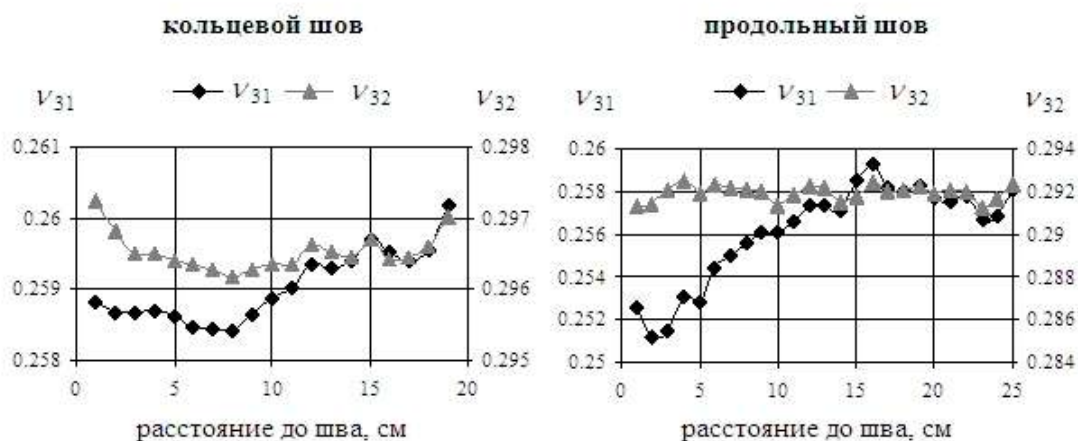


Рис. 2. Зависимость коэффициентов Пуассона от расстояния до сварного шва

Зависимости коэффициентов Пуассона и параметра акустической анизотропии от расстояния до сварного шва определяются особенностями формирования текстуры проката листового сплава, из которого изготовлена труба, изменениями в зоне термического влияния шва и влиянием остаточных напряжений. В результате акустических исследований установлено, что две трубы, соединенные кольцевым сварным швом, имеют разные упругие свойства. По-видимому, это связано с разной степенью прокатки материала.

Для материала вблизи кольцевого шва:

$$A_0 = 5.77 \div 5.80\%, \nu_{31}^0 = 0.2594 \div 0.2602, \nu_{32} = 0.2964 \div 0.2970.$$

Для материала вблизи продольного шва:

$$A_0 = 5.23 \div 5.28\%, \nu_{31}^0 = 0.2567 \div 0.2582, \nu_{32} = 0.2913 \div 0.2922.$$

На рис. 1 и далее подписи “кольцевой шов” и “продольный шов” относятся к двум разным материалам.

На рис. 3 показана связь коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$  в материале трубы. В зонах, в которых напряжения отсутствуют, коэффициенты Пуассона линейно связаны (белые точки). Эти зоны находятся на расстоянии 14 см от шва и дальше. Уравнение прямой:

$$\nu_{32}^0 = B\nu_{31}^0 + Q. \quad (8)$$

Влияние остаточных сварочных напряжений приводит к отклонению точек  $\{\nu_{31}; \nu_{32}\}$  от прямой (черные точки):

$$\delta\nu = \nu_{32} - B\nu_{31} - Q. \quad (9)$$

$B$  и  $Q$  – коэффициенты, определяемые структурой материала.

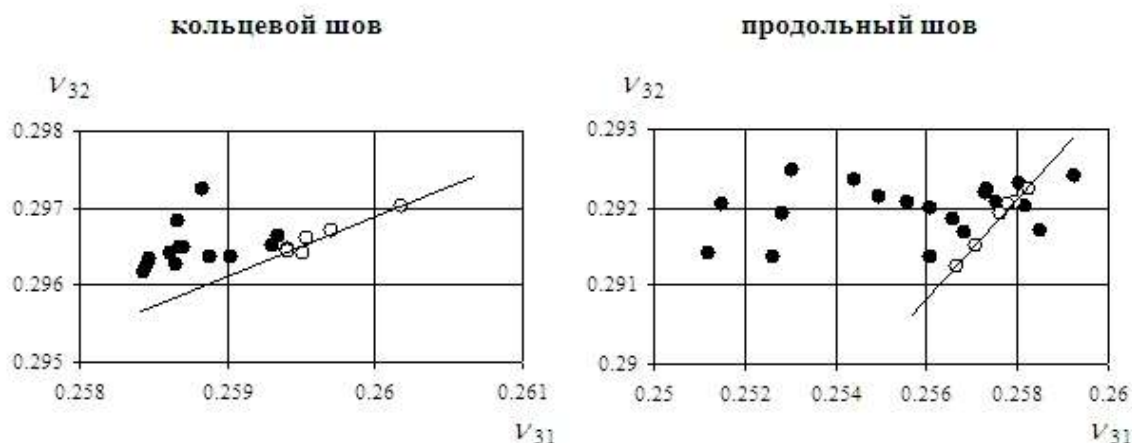


Рис. 3. Взаимосвязь коэффициентов Пуассона в материале трубы

Из уравнений (6) – (9) легко получить зависимость параметра  $\delta\nu$  от величины механических напряжений:

$$\delta\nu = (m_3 - Bm_1)\sigma_1 + (m_4 - Bm_2)\sigma_2. \quad (10)$$

Коэффициенты  $m_i$ , входящие в (6) – (10), имеют следующие значения:

$$m_1 = 9.1 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}, m_2 = 1.7 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}, m_3 = 1.6 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}, m_4 = 5.4 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}.$$

Значения  $m_i$ , были рассчитаны по данным [2] для стали X70 с собственной анизотропией  $A_0 = 5.25\%$ .

Значения  $B$  и  $Q$ , полученные в результате акустических измерений:

$$B = 0.77, Q = 0.10 \text{ – для материала вблизи кольцевого шва}$$

$$B = 0.63, Q = 0.13 \text{ – для материала вблизи продольного шва}$$

Для кольцевого шва

$$\begin{aligned} m_3 - Bm_1 &= -5.43 \pm 0.89 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}, \\ m_4 - Bm_2 &= 4.06 \pm 0.15 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}. \end{aligned}$$

Для продольного шва

$$\begin{aligned} m_3 - Bm_1 &= -4.15 \pm 0.27 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}, \\ m_4 - Bm_2 &= 4.30 \pm 0.05 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}. \end{aligned}$$

С учетом полученных численных значений коэффициентов уравнение (10) можно переписать в следующем виде:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \frac{\delta\nu}{C}, \quad (11)$$

где  $C \approx -(m_3 - Bm_1) \approx m_4 - Bm_2$ ,  $C = 4.1 \pm 0.2 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}$  – для материала вблизи кольцевого сварного соединения,  $C = 4.3 \pm 0.1 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}$  – для материала вблизи продольного сварного соединения.

Соотношение (11) может быть использовано для оценки уровня остаточных напряжений, действующих в данном материале, в режиме безнулевой тензометрии. В случае, использования аналитических соотношений между  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  для конкретных сварных соединений или метода конечных элементов [6], можно разделить значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ .

В некоторых источниках для оценки уровня напряжений предлагается использовать соотношение

$$\sigma_2 - \sigma_1 = k(A - A_0), \quad (12)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Однако, по нашему мнению, расчет напряжений по формуле (12) приведет к значительным ошибкам. Во-первых, как показывают проведенные исследования, значения  $A_0$  отличаются от точки к точке вследствие неоднородности материала. Например, неточность в определении величины  $A_0$ , равная 0.05%, при оценке напряжений по формуле (12) при  $k = 100 \text{ ГПа}$  приведет к ошибке 50 МПа. Во-вторых, в анизотропном материале коэффициенты  $D_1$  и  $D_2$  в формуле (5) могут сильно различаться. По данным [2] для стали с собственной анизотропией  $A_0 = 5.25\%$ :

$$D_1 = -13.3 \pm 2.0 \text{ МПа}^{-1}, \quad D_2 = 8.2 \pm 0.4 \text{ МПа}^{-1}.$$

Коэффициент  $k$  может принимать значения 75 или 122 ГПа. Среднее значение 98 ГПа. Различие составляет 47 ГПа. В этом случае использование формулы (12) может привести к ошибке в определении величины напряжений около 50%.

При использовании формулы (11) погрешность составляет примерно 35 МПа или 10% от предела текучести стали 09Г2С.

На рис. 4 представлено распределение разности главных напряжений в материале сварного соединения. Расчет проводили по формуле (11). Параметр  $\delta\nu$  вычисляли по формуле (9) через измеренные величины  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{32}$ ,  $B$  и  $Q$ .

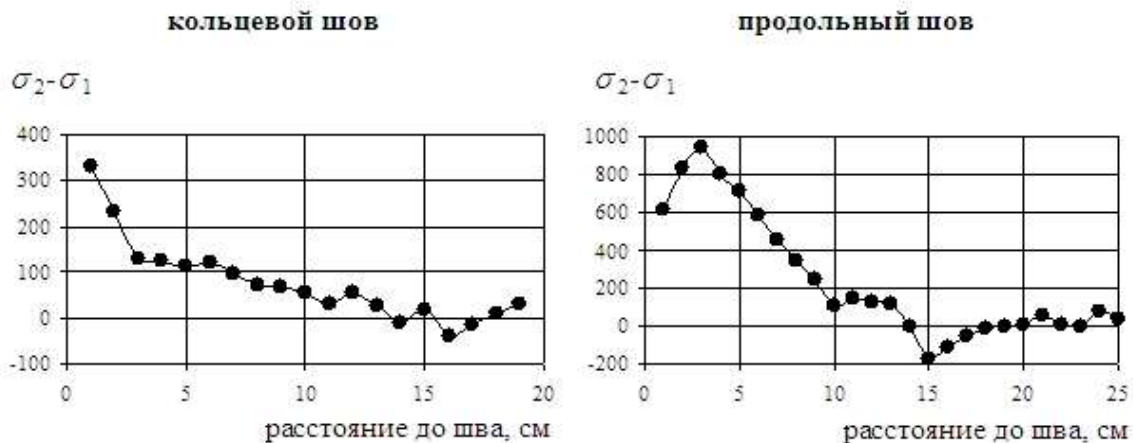


Рис. 4. Распределение напряжений

Предел текучести для стали 09Г2С составляет 345 МПа. На рис. 4 остаточные напряжения  $\sigma_2 - \sigma_1$  от продольного шва превышают 690 МПа. Это может быть связано с пластической деформацией или отличием свойств материала в зоне термического влияния. Кроме того, при расчетах использовались коэффициенты, измеренные для стали Х70.

### Заключение

Предложен способ определения остаточных механических напряжений в сварном соединении в режиме безнулевой акустической тензометрии. Способ основывается на измерении коэффициентов Пуассона через соотношения времен распространения поперечных и продольных упругих волн. В зонах, удаленных от сварного шва, где  $\sigma_1 = 0$  и  $\sigma_2 = 0$ , определяется линейная зависимость между коэффициентами Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$ . Прямая связь коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$  связана с особенностями формирования текстуры проката листового материала. Наличие остаточных напряжений приводит к отклонению точек  $\{\nu_{31}; \nu_{32}\}$  от линейной зависимости. Величина отклонения пропорциональна разности главных напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1$ .

Алгоритм был опробован на сварных соединениях в элементе трубы магистрального газопровода.

Использование предложенного алгоритма позволяет осуществлять оперативный контроль остаточных напряжений в сварном соединении непосредственно на объекте с помощью измерения времени распространения объемных упругих волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 11-08-97070-р\_поволжье\_а).

### Литература

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев [и др.]; Под ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с. – ISBN 5-217-02711-8.
2. Углов, А.Л. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А.Л. Углов, В.И. Ерофеев, А.Н. Смирнов. – М.: Наука, 2009. – 279 с. – ISBN 978-5-02-035764-8.



3. ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. – Введ. 2007–01–10. – М.: Стандартиформ, 2007. – IV, 8 с.
4. ГОСТ Р 52890-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. – Введ. 2010–01–01. – М.: Стандартиформ, 2009. – IV, 12 с.
5. Chatellier, J.-Y. A new method for determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates / J.-Y. Chatellier, M. Touratier // J. Acoust. Soc. Am. – 1988. – Vol. 83, № 1. – P. 109–117.
6. Винокуров, В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

*Поступила: 10.11.11.*