УДК 534.222

ОЦЕНКА УРОВНЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2011 г.

К.В. Курашкин

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

imndt31@mts-nn.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Приведены результаты акустических исследований сварных соединений элементов магистрального газопровода из стали 09Г2С. Предложен способ определения уровня остаточных механических напряжений в сварном соединении.

Ключевые слова: акустический метод, остаточные напряжения, коэффициенты Пуассона листового материала.

Оценка остаточных механических напряжений в сварных соединениях металлических конструкций важна для обеспечения их безопасной эксплуатации. Для определения напряженного состояния материала может применяться акустический метод, который отличается надежностью, простотой, низкой стоимостью и безопасностью [1]. Однако существующие способы оценки механических напряжений с помощью ультразвука требуют проведения измерений акустических параметров объекта в разгруженном состоянии или на образцах, вырезанных из исследуемой конструкции, что является существенным недостатком и ограничивает использование акустического метода на практике. Перспективным направлением исследований в этой области представляется разработка методик, которые позволят определять напряженное состояние без разгружения конструкции.

Акустическая тензометрия основана на эффекте акустоупругости, который отражает нелинейную связь между напряжениями и деформациями и, как следствие, влияние напряжений на скорости распространения упругих волн. Для ортотропных материалов, какими являются катанные листовые сплавы, в случае двухосного напряженного состояния зависимости скоростей объемных упругих волн, распространяющихся перпендикулярно плоскости проката, от механических напряжений описываются следующими соотношениями [2]:

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

где σ_1 и σ_2 – главные напряжения, действующие вдоль осей ортотропного материала, 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 – коэффициенты акустоупругости, выражаемые через упругие модули второго и третьего порядков, ρ – плотность материала.

Известно, что структурная неоднородность материала, возникающая при его производстве, приводит к неоднородному по объему распределению упругих характеристик и, следовательно, акустических параметров [3, 4]. Однако проведенные нами исследования показали, что в прокатных листовых сплавах распределение упругих характеристик не случайно. При прокатке текстура формируется таким образом, что коэффициенты функции распределения ориентировок взаимосвязаны [5]. Эта особенность прокатного материала проявляется в частности в том, что между коэффициентами Пуассона ν_{31} и ν_{32} существует линейная зависимость [6]:

$$\nu_{32} = B\nu_{31} + Q, \qquad (2)$$

где B и Q – коэффициенты.

Коэффициенты Пуассона материала выражаются через соотношения скоростей объемных упругих волн:

$$\nu_{31} = \frac{0.5 - (V_1/V_3)^2}{1 - (V_1/V_3)^2}, \quad \nu_{32} = \frac{0.5 - (V_2/V_3)^2}{1 - (V_2/V_3)^2}. \qquad (3)$$

При одинаковой длине акустического пути отношения скоростей объемных волн определяются отношениями времен распространения:

$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{t_3}{t_1}, \quad \frac{V_2}{V_3} = \frac{t_3}{t_2}, \qquad (4)$$

где t_1 и t_2 – времена распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката, t_3 – время распространения продольной волны.

Зависимость коэффициентов Пуассона от напряжений описывается следующими соотношениями:

$$\nu_{31}^{\sigma} - \nu_{31}^{0} = p_1\sigma_1 + p_2\sigma_2, \quad \nu_{32}^{\sigma} - \nu_{32}^{0} = p_3\sigma_1 + p_4\sigma_2, \tag{5}$$

где p_i – константы материала, выражаемые через упругие модули второго и третьего порядков.

На рис. 1 приведена связь коэффициентов ν_{31} и ν_{32} в трех фрагментах трубы магистрального газопровода из стали 09Г2С до и после снятия остаточных сварочных напряжений.

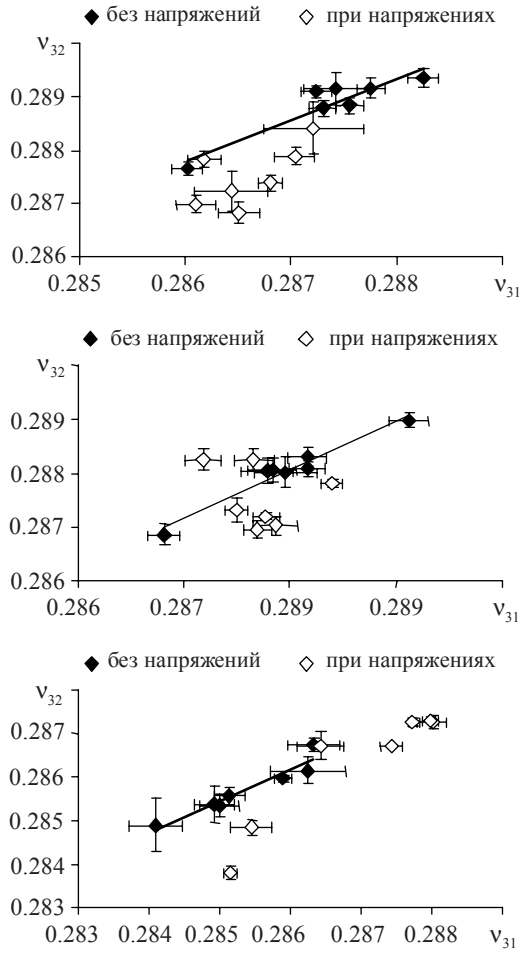

Рис. 1

Время распространения объемных упругих волн измерялось эхо-импульсным методом. Описание методики измерений приведено в [4]. Измерения проводились поперек сварного шва в семи точках, начиная с расстояния 20 мм от шва, с шагом 10 мм. Коэффициенты Пуассона ν_{31} и ν_{32} вычисляли по формуле (3). Точки вблизи прямой соответствуют измерениям в отсутствии остаточных напряжений. Наличие остаточных напряжений приводит к отклонению точек от прямой линии.

Отклонение точек на графиках относительно прямой линии позволяет судить об уровне остаточных напряжений. Формула для расчета комбинации напряжений может быть получена из соотношений (2) и (5):

$$\sigma_1(p_3 - Bp_1) + \sigma_2(p_4 - Bp_2) = \nu_{32}^{\sigma} - B\nu_{31}^{\sigma} - Q. \tag{6}$$

Для численной оценки значений осевых σ_1 и кольцевых σ_2 напряжений в отдельности необходимо знать их соотношение σ_2/σ_1 в каждой точке измерений. Такая связь для конкретного сварного соединения может быть рассчитана методом конечно-элементного анализа.

Заключение

Показано, что в прокатном листовом материале существует линейная зависимость между коэффициентами Пуассона ν_{31} и ν_{32}. Установлено, что присутствие в материале остаточных механических напряжений приводит к отклонению точек на плоскости ν_{32} (ν_{31}) от исходной прямой. Предложено использовать данный факт для оценки уровня остаточных напряжений в сварных соединениях. Приведено аналитическое выражение для двухосного напряженного состояния.

Список литературы

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. М.: Машиностроение, 1995.

2. Chatellier J.-Y., Touratier M. A new method for determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V. 83, No 1. P. 109–117.

3. Курашкин К.В., Мишакин В.В. Использование ультразвуковых волн для оценки механических напряжений в материале сварных соединений // Сб. трудов XXII сессии РАО. М.: ГЕОС, 2010. Т. 2. С. 106–110.

4. Мишакин В.В., Гончар А.В., Курашкин К.В., Данилова Н.В. Исследование разрушения при статическом нагружении сварных соединений акустическим методом // Журн. тяж. маш. 2009. № 7. С. 27–30.

5. Allen D.R., Sayers C.M. The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique // Ultrasonics. 1984. V. 22. P. 179–188.

6. Курашкин К.В., Мишакин В.В. Использование структурной неоднородности материала при оценке механических напряжений // Прикладная механика и технологии машиностроения. Сб. науч. трудов. Н. Новгород: Интелсервис, 2010. №2 (17). С. 230–235.

EVALUATION OF THE LEVEL OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS BY ACOUSTIC MEASUREMENTS

K.V. Kurashkin

The results of acoustic investigations of welded joints of the elements of a main gas pipeline made of steel 09G2S are given. A method for determining the level of residual stress in welded joints is proposed.

Keywords: acoustic method, residual stresses, Poisson's ratios of sheet material.