

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-4-8

### Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением\*

*И. В. Булдакова*, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Л. В. Волкова*, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В. В. Муравьев*, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова; ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН Физико-технический институт, Ижевск, Россия

*Напряжения в зоне термического влияния и сварного соединения связаны с наличием внутренних напряжений, возникновение которых связано с различными причинами. Основными из них являются неравномерность нагрева и усадки сварного шва, а также структурные изменения металла и околошовной зоны в процессе сварки. Эти напряжения могут складываться с эксплуатационными напряжениями, что в свою очередь приводит к ускорению скорости зарождения трещин в зоне сварного соединения. Произведена оценка двухосных напряжений в основном металле и в зоне сварных соединений магистральных трубопроводов на основе явления акустоупругости с использованием трех типов волн различных поляризации (продольной и двух поперечных с ортогональной поляризацией) и электромагнитно-акустического преобразования ввода приема ультразвуковых волн.*

*В осевом направлении ближе к краям вырезки значения напряжений ниже, чем по центру, что объясняется уменьшением напряжений при удалении связей. Похожая картина наблюдается для окружного  $\sigma_2$  направления. В образцах со сварным соединением наблюдается резкое уменьшение значения относительных напряжений в зоне термического влияния сварного соединения по сравнению с напряжениями в области основного металла.*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, акустоупругость, электромагнитно-акустическое преобразование, сварное соединение трубопровода.

#### Введение

Одним из основных источников поврежденных при эксплуатации металлических конструкций, в том числе магистральных газопроводов, являются зоны концентрации напряжений. К наиболее опасным из них можно отнести коррозионное растрескивание под напряжением и трещины в сварных соединениях [1].

Напряжения в зоне термического влияния и сварного соединения связаны с наличием внутренних напряжений, возникновение которых связано с различными причинами. Основными из них являются неравномерность нагрева и усадки сварного шва, а также структурные изменения металла и околошовной зоны в процессе сварки. Эти напряжения могут складываться с эксплуатационными напряжениями, что в свою очередь приводит к ускорению скорости зарождения трещин в зоне сварного соединения.

Очевидно, что разработка средств и способов контроля по оценке механических напряжений в элементах труб магистральных трубопроводов является весьма актуальной [2]. Предлагаются

устройства для их контроля (патент 2631236) и конструкции преобразователей [3].

Для безопасной эксплуатации газопроводов большой интерес представляют современные методы контроля напряженного состояния металла, а именно методы и средства неразрушающего контроля [4–6]. В настоящее время при контроле механических напряжений особое место занимает метод акустоупругости [7, 8].

Целью работы является оценка остаточных двухосных напряжений в зоне сварных соединений магистральных трубопроводов с использованием трех типов волн различных поляризации (продольной и двух поперечных с взаимно перпендикулярной поляризацией) и бесконтактного электромагнитно-акустического преобразователя.

#### Исходные положения. Методика измерений

В качестве объекта исследования применялись образцы – вырезки магистральных газопроводов диаметрами 1020, 1220, 1420 мм, толщиной стенки 15,6–18,5 мм, изготовленные из стали 09Г2С без сварного шва и со сварным соединением (рис. 1).

© Булдакова И. В., Волкова Л. В., Муравьев В. В., 2020

\* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

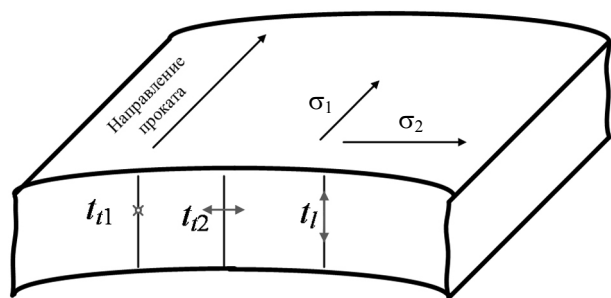


Рис. 1. Образец-вырезка из трубы магистрального газопровода

Измерение времен распространения ультразвуковых волн проводилось на поверхности образцов не менее чем в 15 точках с шагом 20 мм, а в образцах со сварным соединением – в основном металле и зоне термического влияния.

В качестве измерительных средств использовались акустический структуроскоп СЭМА [9, 10] с электромагнитно-акустическим преобразователем (ЭМА) (рис. 2), а также высокочастотный дефектоскоп DIO 1000 с прямым пьезоэлектрическим преобразователем (рабочая частота 10 МГц).

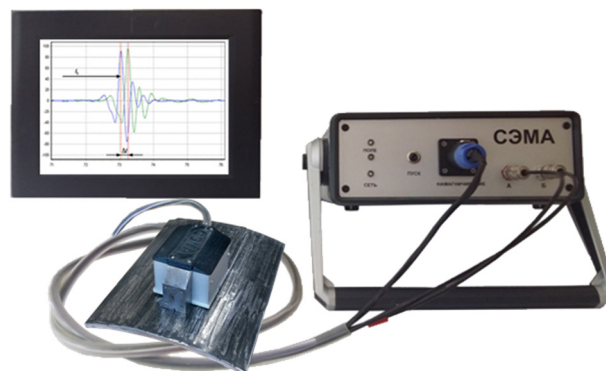


Рис. 2. Структуроскоп СЭМА с установленным на образце электромагнитно-акустическим преобразователем

Структуроскоп реализует эхо-импульсный метод и обеспечивает возможность бесконтактного ЭМА возбуждения-приема двух ортогонально-поляризованных поперечных волн. Работа структуроскопа СЭМА осуществляется специализированным программным обеспечением «Принц» [11]. Регистрируемый СЭМА сигнал представляет собой серию многократно отраженных импульсов поперечных горизонтально поляризованных волн по двум каналам (рис. 3).

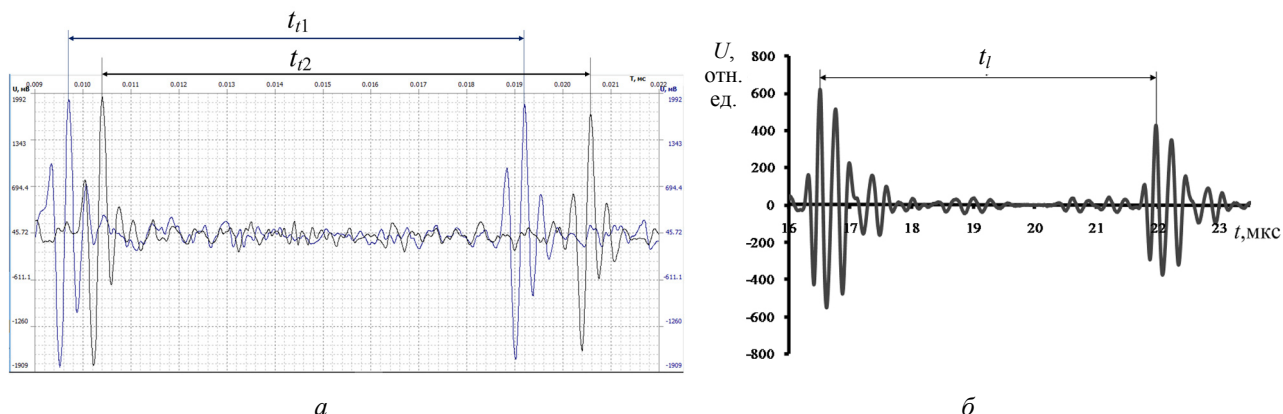


Рис. 3. Многократно отраженные импульсы поперечных горизонтально-поляризованных волн по двум каналам (а), донные эхо-импульсы продольных волн на третьем отражении, регистрируемые дефектоскопом DIO 1000 (б)

Методика оценки механических напряжений в элементах трубопровода базируется на методе акустоупругости, в основе которого лежит зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от внутренних напряжений [12].

Оценка двухосных остаточных напряжений при плоском напряженно-деформированном состоянии в трубах производится в соответствии с ГОСТ Р 52731–2007 «Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования». Методика основана на измерении времен распространения продольной волны и временных интервалов между

многократно отраженными импульсами двух сдвиговых волн с ортогональными плоскостями поляризации, совпадающими с главными напряжениями в анизотропном материале, с учетом коэффициентов акустоупругости материала. Осевые  $\sigma_1$  и окружные  $\sigma_2$  напряжения определяются согласно формулам

$$\sigma_1 = K_1 \cdot \left( \frac{t_{01}t_3}{t_{03}t_1} - 1 \right) - K_2 \cdot \left( \frac{t_{02}t_3}{t_{03}t_2} - 1 \right),$$

$$\sigma_2 = K_1 \cdot \left( \frac{t_{02}t_3}{t_{03}t_2} - 1 \right) - K_2 \cdot \left( \frac{t_{01}t_3}{t_{03}t_1} - 1 \right),$$

где  $t_1, t_2, t_3$  – значения временных задержек с вектором поляризации вдоль образующей ( $t_1$ ), вдоль окружности ( $t_2$ ) и продольной волны (поляризация по толщине) ( $t_3$ ),  $t_{01}, t_{02}, t_{03}$  – нулевые значения временных задержек соответствующих типов волн («нули отсчета»),  $K_1, K_2$  – коэффициенты упруго-акустической связи материала объекта ( $K_1 = -102$  ГПа,  $K_2 = -12$  ГПа).

Начальные значения задержек  $t_{01}, t_{02}, t_{03}$ , как правило, определяются при измерении времен распространения ультразвуковых волн на образце из исследуемого материала, подвергнутом отпуску. В качестве начальных значений возможно применение времен, измеренных на любом участке исследуемого образца, на котором по результатам расчета получаем минимальное значение напряжения:

$$\frac{\Delta\sigma_{1,2}}{|\Delta\sigma_{\min 1,2}|} = \frac{\Delta\sigma_{1,2} - |\Delta\sigma_{\min 1,2}|}{|\Delta\sigma_{\min 1,2}|}$$

Стоит отметить, что рассматриваемая методика позволяет определить усредненные по толщине объекта значения механических напряжений.

#### Результаты и их обсуждение

На рис. 4 приведено распределение средних по площади значений относительных напряжений исследуемых образцов без сварного соединения. Наблюдается неравномерность распределения напряжений как в осевом  $\sigma_1$ , так и в окружном  $\sigma_2$  направлениях. В осевом направлении ближе к краям вырезки значения напряжений ниже, чем по центру, что объясняется уменьшением напряжений при удалении связей после вырезки. Похожая картина наблюдается для окружного  $\sigma_2$  направления.

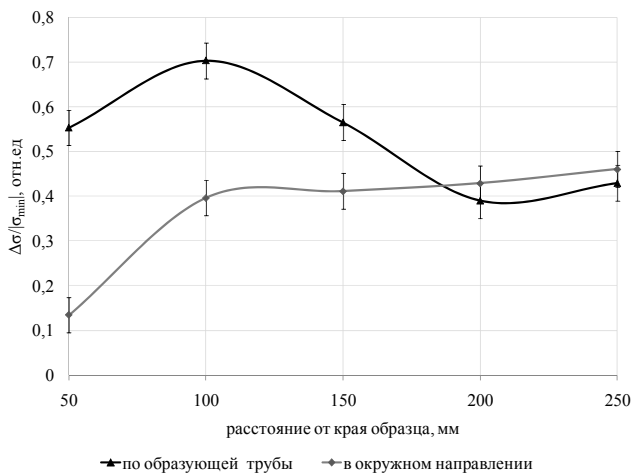


Рис. 4. Распределение средних значений остаточных напряжений, измеренных в образцах без сварного соединения в осевом  $\sigma_1$  и в окружном  $\sigma_2$  направлениях

В образцах со сварным соединением и в основном материале также наблюдается неоднородность распределения значений остаточных напряжений (рис. 5). Существенно резкое снижение напряжений отмечено для остаточных напряжений в области сварного шва, при пересечении сварного шва в осевом  $\sigma_1$  и в окружном  $\sigma_2$  направлениях.

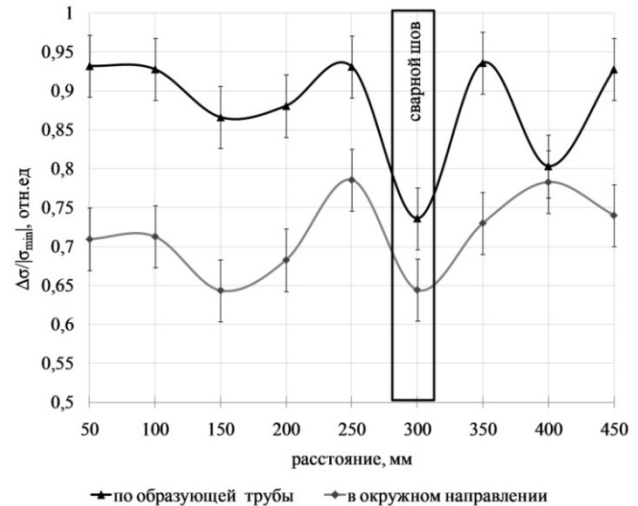


Рис. 5. Распределение средних значений остаточных напряжений, измеренных в образцах со сварным швом в осевом  $\sigma_1$  и в окружном  $\sigma_2$  направлениях

В образцах со сварным соединением наблюдается уменьшение значения относительных напряжений в зоне термовлияния сварного соединения по сравнению с напряжениями в области основного металла.

Расчеты показывают, что косвенная погрешность определения напряжений и их изменения с использованием предлагаемой методики составляет  $\delta_\sigma = 2,5\%$ , а изменения напряжений  $\delta_{\Delta\sigma} = 0,04\%$ .

#### Выводы

Произведена оценка двухосных напряжений в основном металле и в зоне сварных соединений магистральных трубопроводов на основе явления акустоупругости с использованием трех типов волн различных поляризаций (продольной и двух поперечных с ортогональной поляризацией) и электромагнитно-акустического преобразования ввода-приема ультразвуковых волн.

В осевом направлении ближе к краям вырезки значения напряжений ниже, чем по центру, что объясняется уменьшением напряжений при удалении связей. Похожая картина наблюдается для окружного  $\sigma_2$  направления.

В образцах со сварным соединением наблюдается резкое уменьшение значения относительных напряжений в зоне термовлияния сварного соединения по сравнению с напряжениями в области основного металла.

### Библиографические ссылки

1. Антонов А. А. Исследование полей остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварочное производство. 2013. № 12. С. 13–17.

2. Автоматизированный ультразвуковой контроль труб большого диаметра / Н. П. Алешин, Ю. Л. Гобов, А. В. Михайлов и др. // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 3–11.

3. Петров К. В., Соков М. Ю., Муравьева О. В. Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 135–146.

4. Kamat A.M., Pei Y. An analytical method to predict and compensate for residual stress-induced deformation in overhanging regions of internal channels fabricated using powder bed fusion // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 29. P. 100796. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100796.

5. Wang J., Mirzaee-Sisan A. The effect of plasticity on residual stress generation and redistribution in offshore pipelines // International journal of pressure vessels and pipelines. 2018. Vol. 159. P. 101–110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.11.011>.

6. Ramasamy R., Ibrahim Z., Chai H.K. Numerical investigations of internal stresses on carbon steel based on ultrasonic LCR waves // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 908. No. 1. P. 012044. DOI: 10.1088/1742-6596/908/1/012044.

7. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород : ТАЛАМ, 2005. 208 с.

8. Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Vol. 51. No. 3. Pp. 171–178. DOI: 10.1134/S1061830915030079.

9. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 12. С. 34–37.

10. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова, Л. В. Гущина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 13–23. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.

11. Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Пряхин А. В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 159–166. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166.

12. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.

### References

1. Antonov A.A. [Welding production *Svarochnoe proizvodstvo*]. 2013, no. 12, pp. 13–17 (in Russ.).

2. Aleshin N.P., Gobov Yu. L., Mihajlov A. V. i dr. [Automated ultrasonic inspection of large diameter pipes]. *Defektoskopiya*. 2014. No. 3. Pp. 3–11 (in Russ.).

3. Petrov K. V., Sokov M.Yu., Muraveva O.V. [The influence of the design features of the passage electromagnetic-acoustic transducer on the results of the control of cylindrical objects]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2018. Vol. 21. No. 2. Pp. 135–146 (in Russ.).

4. Kamat A.M. (2019). *Additive Manufacturing*, vol. 29, p. 100796. (DOI: 10.1016/j.addma.2019.100796).

5. Wang J., Mirzaee-Sisan A. (2018). *International journal of pressure vessels and pipelines*, vol. 159, pp. 101–110. (<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.11.011>).

6. Ramasamy R., Ibrahim Z., Chai H.K. (2017). *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 908, no. 1, p. 012044 (DOI: 10.1088/1742-6596/908/1/012044)

7. Nikitina N.E. *Akustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya* [Experience of practical application]. N. Novgorod, TALAM Publ., 2005 (in Russ.).

8. Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V.. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 171–178. DOI: 10.1134/S1061830915030079.

9. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Gromov V.E., Glezer A.M. [Assessment of residual stresses in rails using an electromagnetic-acoustic wave input-receive method]. *Deformacija i razrushenie materialov* [Deformation and destruction of materials], 2015, no. 12, pp. 34–37 (in Russ.).

10. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Buldakova I.V., Gushhina L.V. [Studies of the structural and stress-strain state of rails of current production using acoustoelasticity]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018. Vol. 21, no. 2, pp. 13–23 (in Russ.) DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.

11. Strizhak V.A., Hasanov R.R., Prjahin A.V. [Features of the excitation of an electromagnetic-acoustic transducer with a waveguide control method]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018. Vol. 21, no. 2, pp. 159–166 (in Russ.) DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166.

12. Nikitina N.E. *Akustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya* [Experience of practical application]. N. Novgorod, TALAM Publ., 2005 (in Russ.).

\* \* \*

**Stress Distribution in Pipe Samples of Gas Pipelines with Welded Joints***I. V. Buldakova*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia*L. V. Volkova*, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia*V. V. Muravyev*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

*Stresses in the heat affected zone and welded joint are associated with the presence of internal stresses, the occurrence of which is associated with various reasons. The main ones are uneven heating and shrinkage of the weld, as well as structural changes in the metal and the heat-affected zone in the welding process. The stresses can add up to operational stresses, which in turn leads to an acceleration of the rate of crack initiation in the weld zone.*

*Biaxial stresses in the base metal and in the zone of welded joints of the main pipelines were estimated based on the phenomenon of acoustoelasticity using three types of waves of different polarizations (longitudinal and two transverse with orthogonal polarization), and using the electromagnetic-acoustic transformation of input-reception of ultrasonic waves.*

*In the axial direction, closer to the edges of the notch, the stress values are lower than in the center, which is explained by a decrease in stresses when bonds are removed. A similar pattern is observed for the circumferential direction  $\sigma_2$ .*

*In samples with a welded joint, a sharp decrease in the value of relative stresses in the heat affected zone of the welded joint is observed compared to stresses in the region of the base metal.*

**Keywords:** residual stresses, acoustoelasticity, electromagnetic-acoustic transformation, welded joint of the pipeline.

Получено: 13.02.2020