

УДК 620.179.16

Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов

Л.В. Волкова¹, О.В. Муравьева^{1,2}, В.В. Муравьев^{1,2}, И.В. Булдакова¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. им. Татьяны Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 06.12.2018

Принята к печати 04.02.2019

Одним из основных условий безопасной эксплуатации магистральных газопроводов является использование неразрушающих методов контроля, что особенно актуально при решении задач ранней оперативной диагностики материала труб. Цель работы – разработка методик акустической оценки напряженно-деформированного состояния, упругих модулей и анизотропии свойств материала трубопровода и исследование этих характеристик в вырезках магистральных трубопроводов с использованием прибора на основе бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей.

Методики реализуются с использованием структуроскопа СЭМА и бесконтактных преобразователей. В качестве объекта исследований использованы вырезки магистральных газопроводов с кольцевыми сварными швами, с коррозионным растрескиванием под напряжением и без видимых повреждений.

Методика определения плоского напряженно-деформированного состояния элементов трубопровода основана на явлении акустоупругости. Методика определения упругих характеристик материалов и анизотропии их свойств основана на связи скоростей ультразвуковых волн с упругими свойствами среды. Методики реализуются за счет прозвучивания образца с использованием продольной волны и двух сдвиговых волн с взаимно перпендикулярными поляризациями, совпадающими с главными напряжениями.

Показано, что распределение напряженного состояния является неравномерным, что обусловлено особенностями образцов. Анизотропия свойств большинства образцов находится в диапазоне 12–14 % по модулю сдвига, 9–10 % по модулю Юнга, 13–15 % по коэффициенту Пуассона. Для образцов с коррозионным растрескиванием под напряжением наблюдается резкое уменьшение коэффициента анизотропии, что позволяет использовать указанные характеристики в качестве информативных параметров при выявлении коррозионного растрескивания под напряжением.

Особенностью предложенных методик является высокая точность, обусловленная отсутствием необходимости определения плотности материала и прецизионного измерения его толщины, погрешность измерения которых известными методами значительна.

Ключевые слова: магистральный газопровод, модули упругости, акустическая анизотропия свойств, двухосное напряженно-деформированное состояние, продольные и поперечные волны.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

Адрес для переписки:

Л.В. Волкова
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Address for correspondence:

L.V. Volkova
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Для цитирования:

Л.В. Волкова, О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, И.В. Булдакова.
Прибор и методики измерения акустической анизотропии
и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 1. – С. 42–52.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

For citation:

L.V. Volkova, O.V. Murav'eva, V.V. Murav'ev, I.V. Buldakova.
[Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and
the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 42–52 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal

L.V. Volkova¹, O.V. Murav'eva^{1,2}, V.V. Murav'ev^{1,2}, I.V. Buldakova¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

²Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tatiana Baramzinoy str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 06.12.2018

Accepted for publication 04.02.2019

Abstract

One of the main conditions of safe operation of gas pipelines is the use of non-destructive diagnostic methods. Particularly important problem is the earlier operational diagnosis of pipes' material of main gas pipelines based on the evaluation of the stress-strain state, elastic moduli and properties anisotropy by acoustic methods. The aim of the work is to develop methods for acoustic assessment of the stress-strain state, the elastic moduli and the properties anisotropy of pipeline material and to study these characteristics in different sections of main pipelines using a device based on contactless *EMA* transducers.

Methods are implemented using specialized equipment (the structurescope *SEMA*) and non-contact electromagnetic acoustic transducers. As an object of research, we used fragments – the cuttings of gas pipelines with circumferential welds both after fabrication and removed from service with stress corrosion cracking, including ones with corrosion damage and without visible damage.

The method of determining the plane stress-strain state of pipeline elements is based on the phenomenon of acoustoelasticity – the dependence of the propagation velocity of ultrasonic waves on mechanical stresses. The method for determining the elastic characteristics of materials and the anisotropy of their properties is based on the relationship between the velocities of ultrasonic waves and the elastic properties of the medium. Both techniques are implemented by sounding the sample in one section using a longitudinal wave and two shear waves with mutually perpendicular polarization planes coinciding with the main stresses, and measuring their propagation times.

It is shown that the stress state distribution both in the circumferential direction and along the generatrix is uneven which is caused by the peculiarities of samples (presence of a welded joint, stress corrosion cracking, long-term operation). The smallest acoustic anisotropy is observed for the Young's modulus. The anisotropy of the properties of most samples is in the range of 12–14 % for shear modulus, 9–10 % for Young's modulus, 13–15 % for Poisson's ratio. For samples with stress corrosion cracking a sharp decrease in the anisotropy coefficient is observed which makes it possible to use the indicated characteristics as informative parameters in detecting stress corrosion cracking.

A feature of the proposed methods is high accuracy, due to the absence of necessity to determine the material density and precision measurement of its thickness, the measurement error of which is significant by known methods.

Keywords: main gas pipeline, elastic moduli, acoustic anisotropy of properties, the biaxial stress-strain state, longitudinal and transversal waves.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

Адрес для переписки:

Л.В. Волкова
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Address for correspondence:

L.V. Volkova
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Для цитирования:

Л.В. Волкова, О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, И.В. Булдакова.
Прибор и методики измерения акустической анизотропии
и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 1. – С. 42–52.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

For citation:

L.V. Volkova, O.V. Murav'eva, V.V. Murav'ev, I.V. Buldakova.
[Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and
the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 42–52 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

Введение

Одним из основных условий безопасной эксплуатации газопроводов является использование неразрушающих методов контроля, среди которых как традиционно развиваемые методы магнитной внутритрубной диагностики [1], так и перспективные ультразвуковые методы с использованием бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей [2], преобразователей с сухим точечным контактом, низкочастотные акустические методы волноводного контроля [3–4] и другие [5–8]. Большинство методов современного контроля и диагностики ориентировано на выявление дефектов в виде несплошностей, снижающих прочность изделий. Однако, несмотря на высокую техническую и методическую оснащенность неразрушающего контроля объектов трубопроводного транспорта, техногенные аварии продолжают продолжаться. Наиболее опасными факторами эксплуатации магистральных газопроводов являются коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), возникающее при совместном действии коррозионной среды и растягивающих напряжений в металле, и трещины в сварных соединениях. Причиной развития КРН является высокий уровень внутренних структурных напряжений, обусловленных особенностями технологии изготовления трубопроводов, а также механические напряжения, вызванные температурным воздействием окружающей среды и внутренним давлением содержимого газопровода [9]. Трещины в сварном соединении и в зоне термического влияния возникают из-за высокой неоднородности распределения напряжений как по длине, так и поперек шва.

На технологические и эксплуатационные характеристики и деформационное поведение материалов также оказывает влияние коэффициент Пуассона и анизотропия механических свойств (текстурная анизотропия) проката. Известно, что величина коэффициента Пуассона связана с деформационной прочностью, трещиностойкостью и плотностью энергии пластического деформирования при возникновении в материале напряженно-деформированного состояния [10–12].

Анизотропия механических свойств проката приводит к снижению прочности, плохой штампуемости и может явиться причиной

появления дефектов. Имеются данные о связи упругой анизотропии материала с его механическими характеристиками (пределы прочности, текучести и относительного удлинения) [13].

Поэтому задача ранней оперативной диагностики, основанной на оценке напряженно-деформированного состояния, упругих модулей и анизотропии свойств материала элементов труб магистральных газопроводов представляется особо актуальной.

Перспективные варианты оценки структурного и напряженно-деформированного состояния металлов связаны с магнитными [14–15] и акустическими методами, основанными на измерении характеристик упругих волн в контролируемой среде [16–20].

К преимуществам акустических методов, основанных на измерении характеристик упругих волн в контролируемой среде, следует отнести возможность определения поверхностных и внутренних напряжений, накопления микроповреждений в объеме материала; многопараметровость контроля за счет многообразия типов используемых волн и регистрируемых параметров; оперативность контроля, достаточно высокую разрешающую способность и возможность проведения измерений непосредственно на контролируемых объектах в процессе эксплуатации. Благодаря использованию упругих волн, возможно получение наиболее достоверных связей со структурно-механическими параметрами материалов изделий.

Целью работы являлась разработка и апробация методик оценки напряженно-деформированного состояния, упругих модулей и анизотропии свойств материала трубопровода, основанных на использовании трех типов волн различных поляризаций (продольных и поперечных с взаимно перпендикулярной горизонтальной поляризацией), и прибора для их реализации с использованием бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей.

Оборудование

Для исследований использовался специализированный структуроскоп СЭМА (свидетельство об утверждении типа средства измерения *RU.C.36.003.A* № 60174). Структуроскоп реализует эхо-импульсный метод и обеспечивает возможность бесконтактного ЭМА возбуждения-приема двух поперечных волн ортогональных

горизонтальных поляризаций [21]. Усиленные сигналы поступают на плату аналого-цифрового преобразователя (разрядность 12 бит, частота дискретизации) структуроскопа СЭМА и преобразуются в цифровой сигнал, наблюдаемый на экране персонального компьютера. Работа структуроскопа СЭМА производится под управлением специализированного программного обеспечения «Принц».

На рисунке 1 показана серия регистрируемых структуроскопом СЭМА донных эхо-импульсов поперечных горизонтально-поляризованных волн по двум каналам (а) и выделенный фрагмент между вторым и третьим донными эхо-импульсами (b). С увеличением номера отражения наблюдается пропорциональное расхождение между временами прихода эхо-импульсов по двум каналам.

Высокая частота дискретизации аналого-цифрового преобразования (100 МГц), возможность получения серии многократных отражений и последующая интерполяция обеспечивают точность определения временных интервалов 1,25 нс.

Излучение-прием продольной волны обеспечивался с помощью прямого пьезоэлектрического преобразователя с рабочей частотой 10 МГц, подключаемого к стандартному высокочастотному дефектоскопу *DIO 1000*, особенностью которого является возможность сохранения регистрируемых сигналов (рисунок 1с) с частотой дискретизации до 200 МГц, что обеспечивает точность определения временных интервалов 5 нс.

При определении временной задержки продольной волны учитывалось время распространения волны в протекторе и контактной жидкости с использованием эталонной меры СО-2 (отражатель – донная поверхность 59 мм, 20 мкс).

В качестве объекта исследований использованы фрагменты – вырезки магистральных газопроводов диаметрами 1020, 1220, 1420 мм, толщиной стенки 15,6–18,5 мм, изготовленных из стали 09Г2С. Среди исследуемых образцов – вырезки с кольцевыми сварными швами, полученными электродуговой сваркой, после изготовления, а также фрагменты трубопроводов, изъятых из эксплуатации с КРН, коррозионными повреждениями без видимых повреждений (таблица).

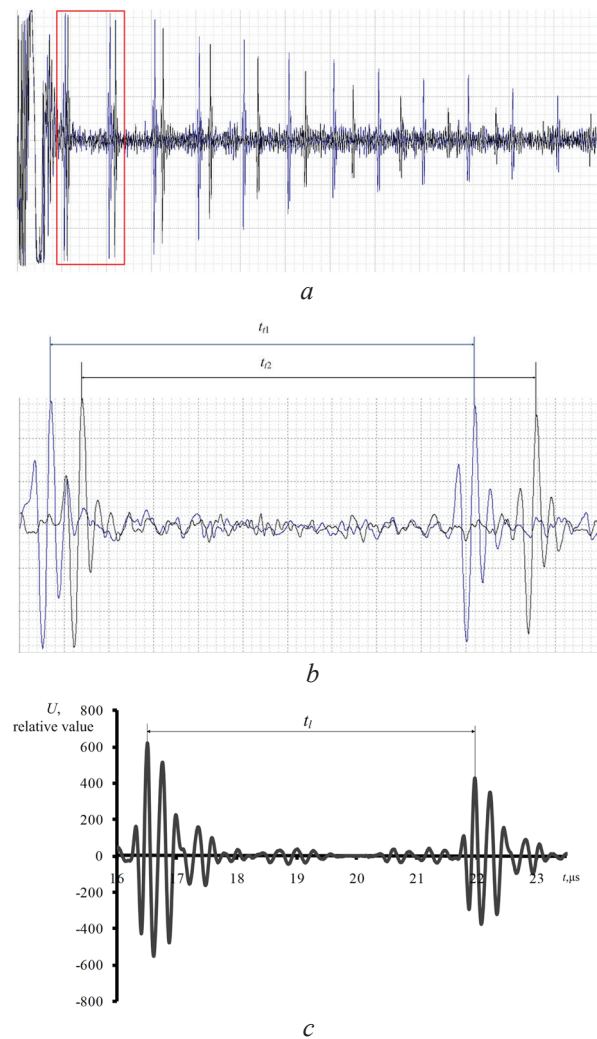


Рисунок 1 – Серия донных эхо-импульсов по двум каналам (а); выделенный фрагмент между первым и вторым эхо-импульсами, регистрируемыми структуроскопом СЭМА, (b); выделенный фрагмент между вторым и третьим донными эхо-импульсами продольных волн, регистрируемых дефектоскопом *DIO 1000* (с)

Figure 1 – A series of bottom echo pulses through two channels (a); of transversal waves and a selection between the first and the second echo pulses recorded by the SEMA structuroscope (b); bottom echo pulses of longitudinal waves between the second and the third echo pulses recorded by the *DIO 1000* detector (c)

Методика определения плоского напряженно-деформированного состояния

В основу методики определения напряженно-деформированного состояния элементов трубопровода положен метод акустоупругости, основанный на зависимости скоростей распространения ультразвуковых волн от механических напряжений [22].

Оценка двухосных остаточных напряжений при плоском напряженно-деформированном

состоянии в трубах производится согласно ГОСТу Р 52731-2007 «Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования». Методика основана на измерении времен распространения продольной волны и двух сдвиговых волн с взаимноперпендикулярными плоскостями поляризации, совпадающими с главными напряжениями в анизотропном материале, с учетом коэффициентов акустоупругости материала. Осевые σ_1 и окружные σ_2 напряжения определяются согласно формулам:

$$\sigma_1 = K_1 (\gamma_{0r1,0l} \gamma_{t1,l}^{-1} - 1) - K_2 (\gamma_{0r2,0l} \gamma_{t2,l}^{-1} - 1); \quad (1)$$

$$\sigma_2 = K_1 (\gamma_{0r2,0l} \gamma_{t2,l}^{-1} - 1) - K_2 (\gamma_{0r1,0l} \gamma_{t1,l}^{-1} - 1), \quad (2)$$

где $\gamma_{t1,l} = \frac{t_{t1}}{t_l}$; $\gamma_{t2,l} = \frac{t_{t2}}{t_l}$; $\gamma_{t2,t1} = \frac{t_{t2}}{t_{t1}}$; $\gamma_{0r1,0l} = \frac{t_{0r1}}{t_{0l}}$;
 $\gamma_{0r2,0l} = \frac{t_{0r2}}{t_{0l}}$;

t_{t1} , t_{t2} , t_l – значения временных задержек сдвиговых горизонтально-поляризованных волн с вектором поляризации вдоль образующей трубы (в направлении проката) (t_{t1}), вдоль окружности трубы (поперек проката) (t_{t2}) и продольной волны (поляризация по толщине) (t_l); t_{0r1} , t_{0r2} , t_{0l} – нулевые значения временных задержек соответствующих типов волн (в отсутствии напряженно-деформированного состояния); K_1 , K_2 – коэффициенты упругоакустической связи материала объекта.

Коэффициенты упругоакустической связи рассчитываются на основе известных модулей упругости Ламе и Мурнагана или могут быть измерены экспериментально. В частности, для труб магистральных газопроводов (сталь 09Г2С) коэффициенты $K_1 = -102$ ГПа, $K_2 = -12$ ГПа [22].

За начальные значения задержек t_{01} , t_{02} и t_{03} могут быть приняты времена, измеренные на предварительно отпущенном образце из исследуемого материала. При отсутствии начальных значений возможно оценить изменение напряженно-деформированного состояния на различных участках исследуемого образца, например относительно минимального (по модулю) напряжения:

$$\frac{\Delta\sigma_{1,2}}{|\sigma_{\min 1,2}|} = \frac{\sigma_{1,2} - |\sigma_{\min 1,2}|}{|\sigma_{\min 1,2}|}. \quad (3)$$

Благодаря прозвучиванию одного и того же участка с использованием различных типов волн, возможно определение напряжений для участков любой толщины за счет измерения времен их распространения, что существенно уменьшает погрешность оценки. Относительная

неисключенная систематическая погрешность определения напряжений δ_σ может быть найдена по правилам вычисления погрешностей при косвенных измерениях из следующего соотношения:

$$\delta_\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial(\sigma)}{\partial t_i} \Delta t_i \right)^2}, \quad (4)$$

где t_i – измеряемые параметры (времена t_{t1} , t_{t2} , t_l , t_{0r1} , t_{0r2} , t_{0l}); Δt_i – неисключенные систематические погрешности измеряемых параметров времени ($\Delta t_i = 5$ нс, $\Delta t_i = 7$ нс); n – число измеряемых параметров.

Расчеты показывают, что косвенная погрешность определения напряжений с использованием предлагаемой методики составляет $\delta_\sigma = 2,5\%$, а изменения напряжений $\delta_{\Delta\sigma} = 0,04\%$. При этом случайная погрешность $\Delta\sigma$ по результатам 5 измерений в одной точке не превышает 0,1%.

Следует отметить, что имеет место неоднородность упругих напряжений по толщине стенки, возникающая как на стадии изготовления, так и при эксплуатации объекта. Измеряемая согласно предлагаемой методике величина времени пробега при прозвучивании толщины стенки трубы различными типами волн характеризует некоторое «эффективное» (усредненное по толщине с отличающимися уровнями напряжений по слоям) значение. Поэтому, согласно методике, следует говорить об оценке усредненных по толщине стенки остаточных напряжений и коэффициентов анизотропии на данном участке.

Методика определения упругих модулей и анизотропии свойств материала

Разрушающие методы по ГОСТу 1497-84 «Металлы. Метод испытаний на растяжение» являются на сегодняшний момент основными методами оценки модулей упругости и анизотропии свойств, обладающими недостаточно высокой точностью их определения. При этом использование указанных методов для материалов и изделий в процессе эксплуатации невозможно. Методика определения упругих характеристик материалов неразрушающими методами описана в [19].

При прозвучивании образца в одном сечении с использованием различных типов волн появляется возможность определения коэффициента Пуассона вне зависимости от толщины образца:

$$\nu = \frac{1 - 2\gamma^2}{2(1 - \gamma^2)}, \quad (5)$$

где $\gamma^2 = \frac{C_t^2}{C_l^2} = \frac{t_l^2}{t_t^2}$ – отношение скоростей поперечной и продольной волн, пропорциональное отношению времен их распространения.

Использование поперечных волн различной поляризации (вдоль и поперек направления прокатки) позволяет определить анизотропию акустических свойств (по модулю Юнга $\Delta E/E_1$, модулю сдвига $\Delta G/G_1$, коэффициенту Пуассона $\Delta \nu/\nu_1$):

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\nu_1 - \nu_2}{\nu_1} = \frac{1 - \gamma_{t2,t1}^2}{(\gamma_{t1,t1}^2 - 2)(\gamma_{t2,t1}^2 - \gamma_{t1,t1}^{-2})}; \quad (6)$$

$$\frac{\Delta G}{G_1} = \frac{G_1 - G_2}{G_1} = 1 - \frac{t_{t2}^2}{t_{t1}^2} = 1 - \gamma_{t2,t1}^2; \quad (7)$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{4\gamma_{t2,t1}^2 + 4\gamma_{t1,t1}^2 + 3\gamma_{t2,t1}^4 - 4\gamma_{t2,t1}^2 \gamma_{t2,t1}^2 - 3\gamma_{t1,t1}^2 \gamma_{t2,t1}^2 - 4}{(3\gamma_{t2,t1}^2 - 4)(\gamma_{t2,t1}^2 - 1)}, \quad (8)$$

где $\nu_{1,2}$, $E_{1,2}$, $G_{1,2}$ – коэффициент Пуассона, модуль сдвига и модуль Юнга вдоль и поперек направления проката соответственно.

Расчеты показывают, что косвенная погрешность определения анизотропии акустических свойств составляет для $\Delta G/G_1$ – 0,05 %, для $\Delta E/E_1$ – 0,03 %, для $\Delta \nu/\nu_1$ – 0,04 %, для абсолютного значения коэффициента Пуассона – 0,006 %. В то время как погрешность определения абсолютных значений упругих модулей Юнга и сдвига согласно формулам (6)–(8) составляет 2 ГПа, 3 ГПа или 1,5 % и 2,5 % соответственно. При этом случайная погрешность по результатам 5 измерений в одной точке не превышает 0,1 %.

Следует отметить, что на абсолютное значение скорости волн влияет микродефектность, накопленные повреждения, структурное состояние металла. Предлагаемая методика за счет измерения разности времен пробега трех типов волн по одному участку позволяет не учитывать ряд мешающих факторов, имеющих место при измерении абсолютного значения скорости.

Результаты и их обсуждение

Напряженно-деформированное состояние

Результаты оценки относительного распределения остаточных напряжений по площади вырезки для некоторых из исследованных образцов иллюстрирует рисунок 2. По площади образцов распределение напряженного состояния как в осевом направлении σ_1 , так и в окружном направлении σ_2 является весьма неравномерным и различается для образцов со сварным швом и

при наличии КРН. Наличие коррозионного растрескивания в образцах № 1 и № 3 привело к существенному изменению распределения напряженного состояния. Образец № 1, частично (справа) зачищенный от КРН, привел к снижению напряжений в этой области, в отличие от зоны КРН, где напряжения значительно выше. Отметим, что осевые напряжения в зонах КРН с ориентацией трещин вдоль огибающей существенно выше окружных, что объясняется концентрацией осевых растягивающих напряжений трещинами КРН. Образец № 3 обладает значительным коррозионным растрескиванием по всей площади, что привело к крайне неравномерному распределению напряженного состояния по окружности трубы, при этом напряженное состояние по образующей трубы не претерпевает существенных изменений. Для образца со сварным соединением № 9 наблюдается снижение напряжений (как окружных, так и осевых) в зоне термовлияния в сравнении с напряженным состоянием при удалении от сварного шва, что объясняется снятием напряжений в зоне термовлияния и не противоречит результатам измерений остаточных напряжений в зоне сварного шва. Образец № 7 с поверхностной коррозией также характеризуется существенной неравномерностью по площади образца. Следует отметить, что для всех исследованных образцов неравномерность осевых напряжений преобладает над изменением окружных напряжений.

Упругие модули и анизотропия свойств

Результаты определения коэффициентов Пуассона вдоль и поперек направления проката, а также анизотропии акустических свойств, осредненных по всем секторам, представлены в таблице. Отклонение от рассчитанных средних значений не превышало 2,5 %.

Наименьшая акустическая анизотропия имеет место для модуля Юнга, характеризующего сопротивление деформации растяжения-сжатия. Более высокие значения акустической анизотропии характерны для модуля сдвига, описывающего сопротивление сдвиговым деформациям и коэффициента Пуассона, описывающего сопротивление поперечным деформациям. Исследования показывают, что анизотропия свойств большинства образцов находится в диапазоне 12–14 % по модулю сдвига, 9–10 % – по модулю Юнга, 13–15 – по коэффициенту Пуассона.

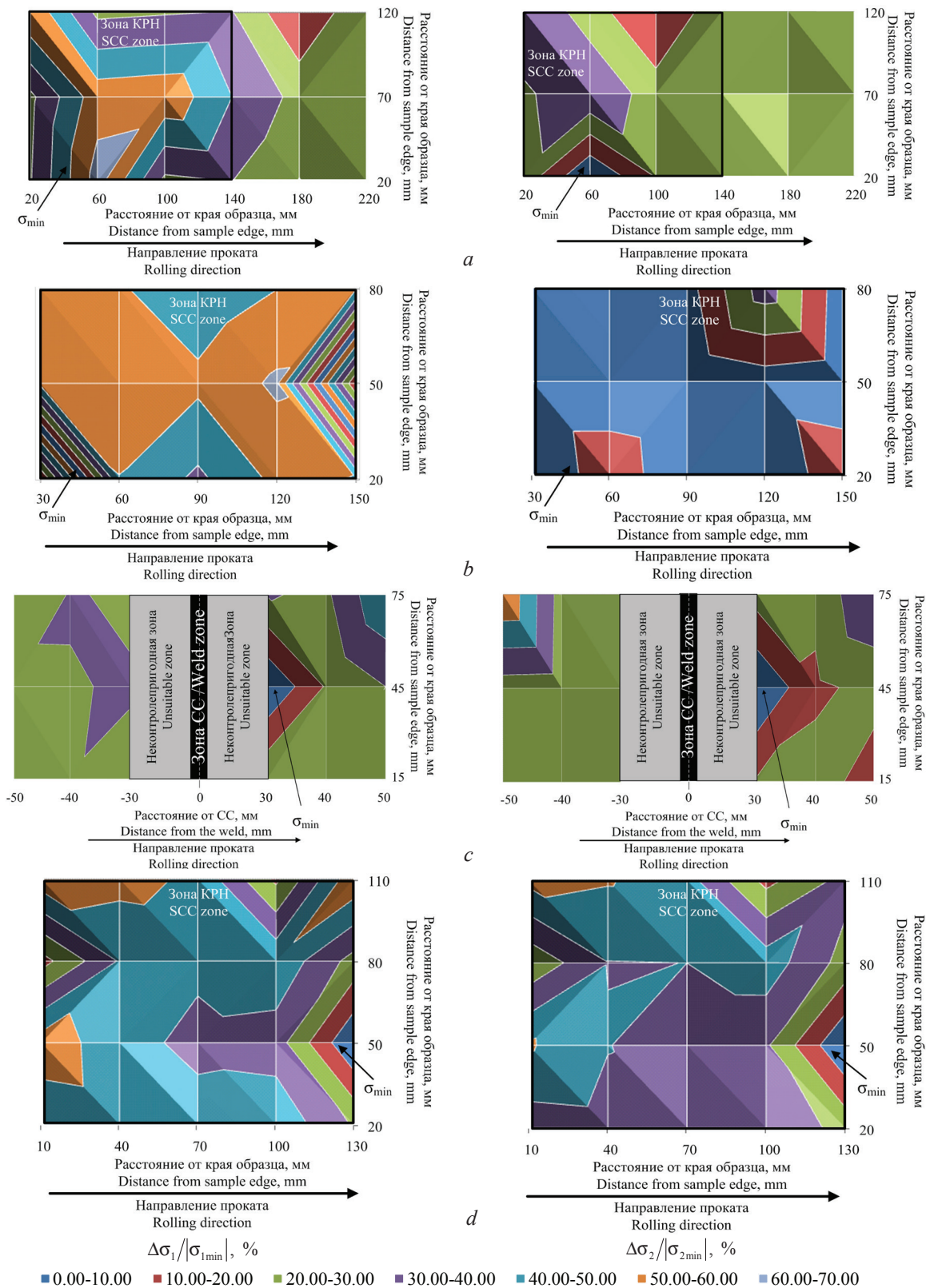


Рисунок 2 – Относительное изменение напряженного состояния в продольном (осевом) и поперечном (по огибающей) направлении по площади образцов магистральных газопроводов: *a* – образец № 1 с коррозионным растрескиванием под напряжением; *b* – образец № 3 с коррозионным растрескиванием под напряжением; *c* – образец № 9 с кольцевым сварным соединением; *d* – образец № 7 с поверхностной коррозией

Figure 2 – Relative change of stress state in the longitudinal (axial) and transverse (in the envelope) direction over the area of main gas pipelines' samples in percent: *a* – sample no 1 with stress-corrosion cracking; *b* – sample no 3 with stress-corrosion cracking; *c* – sample no 9 with annular weld; *d* – sample no 7 with surface corrosion

Полученные значения не противоречат измеренным данным по модулям упругости в различных кристаллографических направлениях и эквивалентны значениям, приведенным в [2].

Таблица/Table

Упругие модули и анизотропия акустических свойств исследуемых образцов
Elastic moduli and anisotropy of the acoustic properties of the samples under study

№ Образца No of the sample	Внешний диаметр/Толщина стенки, мм Outer diameter / Wall thickness, mm Характеристика образца Characteristics of the sample	\bar{v}_1	\bar{v}_2	$\frac{\Delta \bar{G}}{G_1}, \%$	$\frac{\Delta \bar{E}}{E_1}, \%$	$\frac{\Delta \bar{v}}{v_1}, \%$
1	1020 / 17,7 КРН, изъят из эксплуатации SCC, removed from service	0,259	0,290	9	7	12
2	1220 / 18,5 КСС, ЭС, без эксплуатации Annular weld, arc welding, without exploitation	0,248	0,286	12	10	14
3	1220 / 15,9 КРН, изъят из эксплуатации SCC, removed from service	0,276	0,297	7	7	7
4*	1220 / 16 КСС, ЭС, без эксплуатации Annular weld, arc welding, without exploitation	0,257	0,296	13	9	13
5	1420 / 15,6 Без видимых повреждений, изъят из эксплуатации No visible damage, removed from service	0,246	0,291	12	10	15
6	1420 / 15,7 Без видимых повреждений, изъят из эксплуатации No visible damage, removed from service	0,247	0,290	14	9	15
7*	1420 / 15,7 С поверхностной коррозией, изъят из эксплуатации Surface corrosion, removed from service	0,249	0,293	12	9	15
8	1420 / 16 Без видимых повреждений, изъят из эксплуатации No visible damage, removed from service	0,247	0,291	14	10	15
9*	1420 / 18,5 КСС, ЭС, без эксплуатации Annular weld, arc welding, without exploitation	0,246	0,285	12	10	14

* проведены измерения напряженно-деформированного состояния

* measurements of the stress-strain state

КСС – кольцевой сварной шов; ЭС – электродуговая сварка
CW – cup weld; EAW – electric-arc welding

Исключение составляют образцы с КРН (№ 1 и № 3), в которых наблюдается существенное уменьшение коэффициента анизотропии по всем трем упругим модулям, при этом наибольшее отклонение соответствует модулю сдвига и коэффициенту Пуассона. Последнее позволяет использовать указанные характеристики в качестве информативных параметров при выявлении КРН. Согласно [17] размер и форма зерен, искажения в кристаллической решетке материала влияют на модули упругости, поэтому предложенные параметры могут использоваться в качестве тонкого инструмента для оценки микроструктуры материала.

Заключение

Разработанные методики, основанные на использовании трех типов волн различных поляризации (продольных и поперечных с взаимно-перпендикулярной горизонтальной поляризацией), и прибор для их реализации с использованием бесконтактных ЭМА-преобразователей обеспечивают оценку двухосного напряженно-деформированного состояния, упругих модулей и их анизотропии.

Измеряемая согласно предлагаемой методике величина времени пробега при прозвучивании толщины стенки трубы различными типами волн характеризует некоторое «эффективное» (усредненное по толщине с отличающимися уровнями напряжений по слоям) значение.

Особенностью предложенных методик является высокая точность, обусловленная отсутствием необходимости определения плотности материала и прецизионного измерения его толщины, погрешность в измерении которых известными методами значительна.

Предложенные методика и прибор апробированы на образцах – вырезках магистральных трубопроводов. Результаты экспериментальных исследований образцов магистральных газопроводов позволили оценить влияние зоны сварного соединения, коррозионного растрескивания и эксплуатации на распределение остаточных напряжений. Показано, что для образцов с коррозионным растрескиванием под напряжением наблюдается резкое уменьшение коэффициента анизотропии, что позволяет использовать указанные характеристики в качестве информативных параметров при выявлении коррозионного растрескивания под напряжением.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) в части разработки методики и исследований напряженно-деформированного состояния; по проекту № 3.5705.2017/ВУ по государственному заданию Министерства науки и высшего образования ФБГОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» на 2017–2019 гг.

Список использованных источников

1. Мелёхин, О.Н. Автоматизированный неразрушающий контроль магистральных газопроводов с применением наружных сканеров дефектоскопов / О.Н. Мелёхин [и др.] // Газовая промышленность. – 2015. – № S2(724). – С. 44–48.
2. Matvienko, A.F. The quality control of underground gas pipelines via the electromagnetic and acoustic method / A.F. Matvienko [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no. 9. – P. 546–553.
DOI: 10.1134/S1061830915090077
3. Wenbo Duan Spectral subtraction and enhancement for torsional waves propagating in coated pipes / Wenbo Duan [et al.] // NDT & E International. – 2018. – Vol. 100. – P. 55–63.
DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.08.009
4. Murav'eva, O.V. Torsional waves excited by electromagnetic-acoustic transducers during guided-wave acoustic inspection of pipelines / O.V. Murav'eva, S.A. Murashov, S.V. Len'kov // Acoustical Physics. – 2016. – Vol. 62, no. 1. – P. 117–124.
DOI: 10.7868/S032079191506009X
5. Davydov, V.V. A contactless method for testing inner walls of pipelines / V.V. Davydov [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, no. 3. – P. 213–221. DOI: 10.1134/S1061830918030051
6. Hyung, M.K. Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform / M.K. Hyung, C. Doo-Hyun // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52, no. 3. – P. 175–183. DOI: 10.1134/S1061830916030049
7. Краснов, А.Н. Прогнозирование динамических нагрузок в газопроводах на основе методов идентификации / А.Н. Краснов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – Т. 15, № 4. – С. 83–88.
8. Тымчик, Г.С. Алгоритм обработки данных системы контроля монтажа клеесварной муфты на магистральном трубопроводе / Г.С. Тымчик, А.А. Подолян // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1(8). – С. 63–67.

9. Басиев, К.Д. Влияние упругой энергии сжатого газа на развитие коррозионных и коррозионно-механических трещин в магистральных газопроводах / К.Д. Басиев [и др.] // Газовая промышленность. – 2018. – № 7(771). – С. 96–100.

10. Gonchar, A.V. Variation of elastic characteristics of metastable austenite steel under cycling straining / A.V. Gonchar [et al.] // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 62, no. 4. – P. 537–541. DOI: 10.1134/S1063784217040089

11. Mishakin, V.V. Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel / V.V. Mishakin, V.A. Klyushnikov, A.V. Gonchar // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 60, no. 5. – P. 665–668. DOI: 10.1134/S1063784215050163

12. Мишакин, В.В. Измерение характеристик текстуры конструкционной стали 15ЮТА акустическим методом при усталостном разрушении / В.В. Мишакин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 7. – С. 30–34. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-30-34

13. Murav'eva, O.V. Methodological peculiarities of using sh- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats / O.V. Murav'eva, V.V. Murav'ev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52, no. 7. – P. 363–369. DOI: 10.1134/S1061830916070056

14. Матюк, В.Ф. Контроль качества термообработки изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей на основе двухполярного импульсного перемагничивания / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1(8). – С. 57–62.

15. Filinov, V.V. Monitoring stressed state of pipelines by magnetic parameters of metal / V.V. Filinov, A.N. Kuznetsov, P.G. Arakelov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53, no. 1. – P. 51–61. DOI: 10.1134/S1061830917010065

16. Uglov, A.L. On the inspection of the stressed state of anisotropic steel pipelines using the acoustoelasticity method / A.L. Uglov, A.A. Khlybov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no. 4. – P. 210–216. DOI: 10.1134/S1061830915040087

17. Smirnov, A.N. Acoustic evaluation of the stress-strained state of welded carbon steel joints after different modes of heat input / A.N. Smirnov [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, no. 1. – P. 37–43. DOI: 10.1134/S1061830918010072

18. Муравьев, В.В. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В.В. Муравьев [и др.] // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 13–23. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23

19. Babkin, S.E. The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method / S.E. Babkin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no. 5. – P. 303–307.

DOI: 10.1134/S1061830915050022

20. Murav'ev, V.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of lamb waves / V.V. Murav'ev, O.V. Murav'eva, L.V. Volkova // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46, no. 10. – P. 752–756. DOI: 10.3103/S0967091216100077

21. Стрижак, В.А. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В.А. Стрижак [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(17). – С. 243–250.

22. Nikitina, N.E. Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines / N.E. Nikitina, A.V. Kamyshev, S.V. Kazachek // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – Vol. 45, iss. 12. – P. 861–866. DOI: 10.1134/S1061830909120043

Acknowledgments

The research was funded by the Russian Science Foundation (project no. 18-79-10122) in the part of technique's development and research of residual stresses; and by the Ministry of Science and Higher Education in the frame of the project no. 3.5705.2017/6.7 of the state order for Kalashnikov Izhevsk State Technical University for the period of 2017–2019.

References

1. Melehin O.N., Vjalyh I.L., Lazarev V.L., Zotov D.A., Remizov A.E., Lipovik A.V., Dejneko S.V. [Major gas pipeline automated nonintrusive testing practices using external flaw locator scanners]. *Gazovaja promyshlennost'* [Gas Industry], 2015, no. S2(724), pp. 44–48 (in Russian).

2. Matvienko A.F., Loskutov V.E., Babkin S.A., Korzunin G.S. The quality control of underground gas pipelines via the electromagnetic and acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, Vol. 51, no. 9, pp. 546–553. DOI: 10.1134/S1061830915090077

3. Duan W., Kanfoud J., Deere M., Mudge P., Gan T.-H. Spectral subtraction and enhancement for torsional waves propagating in coated pipes. *NDT & E International*, 2018, vol. 100, pp. 55–63. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.08.009

4. Murav'eva O.V., Murashov S.A., Len'kov S.V. Torsional waves excited by electromagnetic-acoustic

transducers during guided-wave acoustic inspection of pipelines. *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no 1, pp. 117–124. DOI: 10.7868/S032079191506009X

5. Davydov V.V., Myazin N.S., Logunov S.E., Fadeenko V.B. A contactless method for testing inner walls of pipelines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 213–221.

DOI: 10.1134/S1061830918030051

6. Hyung M.K., Doo-Hyun C. Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 175–183.

DOI: 10.1134/S1061830916030049

7. Krasnov A.N. [Forecasting dynamic loads in gas pipelines based on identification methods]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual Systems in Manufacturing], 2017, vol. 15, no. 4, pp. 83–88 (in Russian).

8. Tymchik G.S., Podolian A.A. [Monitoring system data processing algorithm of weld-bonded coupling installation of the main pipelines]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, vol. 8, no. 1, pp. 63–67 (in Russian).

9. Basiev K.D., Dzioev K.M., Alborov A.D., Dzutsev T.M. [Influence of elastic strain energy of compressed gas on the development of corrosion and mechanical-corrosion cracks in the main gas pipelines]. *Gazovaya promyshlennost'* [GAS Industry of Russia], 2018, no. 7(771), pp. 96–100 (in Russian).

10. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Kurashkin K.V. Variation of elastic characteristics of metastable austenite steel under cycling straining. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 537–541.

DOI: 10.1134/S1063784217040089

11. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V. Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 665–668.

DOI: 10.1134/S1063784215050163

12. Mishakin V.V., Serebryany V.N., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A. [Acoustic study of the texture characteristics of 15YuTA construction steel in fatigue failure conditions]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory], 2018, vol. 84, no. 7, pp. 30–34 (in Russian).

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-30-34

13. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Methodological peculiarities of using sh- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats. *Russian Journal of*

Nondestructive Testing, 2016, vol. 52, no. 7, pp. 363–369.

DOI: 10.1134/S1061830916070056

14. Matyuk V.F., Burak V.A. [Quality testing of heat treatment of medium-carbon steel construction items based on the bipolar pulsed remagnetization]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, vol. 8, no. 1, pp. 57–62 (in Russian).

15. Filinov V.V., Kuznetsov A.N., Arakelov P.G. Monitoring stressed state of pipelines by magnetic parameters of metal. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 51–61.

DOI: 10.1134/S1061830917010065

16. Uglov A.L., Khlybov A.A. On the inspection of the stressed state of anisotropic steel pipelines using the acoustoelasticity method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 210–216.

DOI: 10.1134/S1061830915040087

17. Smirnov A.N., Knyazkov V.L., Abakov N.V., Ozhiganov E.A., Koneva N.A., Popova N.A. Acoustic evaluation of the stress-strained state of welded carbon steel joints after different modes of heat input. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 37–43. DOI: 10.1134/S1061830918010072

18. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Buldakova I.V., Gushchina L.V. [Investigations of the structural and strain-stress state of the rails of current production by the acoustic elasticity method]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], 2018, vol. 21, no. 2, pp. 13–23 (in Russian).

DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23

19. Babkin S.E. The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 303–307. DOI: 10.1134/S1061830915050022

20. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of lamb waves. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 752–756.

DOI: 10.3103/S0967091216100077

21. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Obukhov S.A., Efremov A.B. [The information and measuring system for excitation, detection, registration and processing of signals from electromagnetic-acoustic transducers]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual Systems in Manufacturing], 2011, no. 1(17), pp. 243–250 (in Russian).

22. Nikitina N.E., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 45, no. 12, pp. 861–866. DOI: 10.1134/S1061830909120043