

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-62-66

УДК (UDC) 620.179.162

О СПОСОБЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ¹

© Константин Владимирович Курашкин

Институт проблем машиностроения РАН — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: imndt31@mts-nn.ru

Статья поступила 21 марта 2017 г.

Рассмотрен способ ультразвукового контроля механических напряжений, учитывающий неоднородность структуры материала и не требующий разгрузки конструкции или использования образцов эталонов. Способ основан на измерении эхо-методом времен распространения объемных упругих волн и определении относительных величин v_{31} и v_{32} , связанных со структурой материала и механическими напряжениями. Установлено, что в катаном материале между параметрами v_{31} и v_{32} в отсутствие механических напряжений существует линейная связь, которая нарушается в присутствии напряжений. На базе данного эффекта построен способ определения разности главных напряжений. Показаны основные отличия разработанного способа от известных методов ультразвукового контроля напряжений, теоретически обоснован эффект, позволяющий учитывать неоднородность структуры материала, приведен пример апробации. На основе выражений для скоростей распространения объемных упругих волн в ортотропном материале, состоящем из кубических кристаллитов, и допущении о наличии сформировавшейся при прокатке металла простой пропорциональной связи между коэффициентами функции распределения ориентировок получено аналитическое выражение, которое описывает связь между параметрами v_{31} и v_{32} в отсутствие механических напряжений. Приведены результаты математического моделирования, которые подтверждают экспериментально наблюдаемую линейную связь между параметрами v_{31} и v_{32} в отсутствие механических напряжений. Приведен пример использования способа для определения остаточных напряжений в стальной сварной пластине. Проведено сравнение результатов ультразвуковых и электротензометрических измерений. Отмечены особенности описанного способа определения напряжений и обозначены границы применимости.

Ключевые слова: ультразвуковой эхо-метод; механические напряжения; упругие волны; структурная неоднородность; текстура.

ON THE METHOD OF ULTRASONIC CONTROL OF MECHANICAL STRESSES

© Konstantin V. Kurashkin

Mechanical Engineering Research Institute of RAS — branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Research Center The Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences” (MERI RAS), Russia, Nizhny Novgorod; e-mail: imndt31@mts-nn.ru

Submitted March 21, 2017.

A method of ultrasonic control of the mechanical stresses which takes into account the heterogeneity of the material structure and does not require unloading of the structure or using reference samples is considered. The procedure is based on echo-method of measuring time of the bulk elastic wave propagation and determination of the relative values v_{31} and v_{32} related to the material structure and mechanical stresses. It is shown that stresses violate the linearity of the relationship observed between the parameters in the absence of the mechanical stresses in the rolled material. This effect formed a basis for developing a method of the deviator stress determination. The purpose of the study is to demonstrate the main advantages of the developed method against the known ultrasonic techniques used for evaluation of the mechanical stresses, give theoretical grounds to the effect which allows taking into account the heterogeneity of the material structure, and also to exemplify the procedure. An analytical expression is derived using bulk elastic wave velocity in an orthotropic material composed of cubic crystallites and an assumption on the existence of simple proportional relationship between the

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013 – 2020 гг. по теме № 0035-2014-0402, номер государственной регистрации 01201458047 и при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта № 163860148-мол_а_дк.

coefficients of the orientation distribution function in rolled metal. Presented results of the mathematical modeling confirm the experimentally observed linear dependence between the parameters v_{31} and v_{32} in the absence of mechanical stresses. The results of evaluating residual stresses in a welded steel plate are presented as an example of the applicability of the developed procedure. Data of ultrasonic technique and data of strain gage measurements are compared. The features of the described method of stress determination are marked and the applicability limits are specified.

Keywords: ultrasonic echo-method; mechanical stresses; elastic waves; structural heterogeneity; texture.

Анализ напряженного состояния материала — сложная научно-техническая проблема, решение которой необходимо для обеспечения безопасной эксплуатации машин и конструкций. Высокие механические напряжения в материале, как известно, могут стать одной из причин разрушения.

В настоящее время при определении механических напряжений в элементах конструкций широко применяют различные методы неразрушающего контроля. Ультразвуковой контроль напряженного состояния основан на эффекте акустоупругости, который отражает влияние механических напряжений на скорости распространения упругих волн. Теоретические основы применения акустоупругого эффекта, влияние на него различных факторов, а также расчетные алгоритмы для вычисления напряжений по результатам измерения скоростей или времен распространения упругих волн в реальных конструкционных материалах подробно рассмотрены, например, в работах [1 – 4]. Однако существующие способы определения механических напряжений с помощью ультразвука, в том числе инженерные методики, регламентируемые национальными стандартами [5, 6], требуют проведения измерений начальных (собственных) значений скоростей или времен распространения упругих волн, связанных со структурой материала; при этом предполагается, что объект контроля должен находиться в разгруженном состоянии.

Несмотря на многочисленные исследования, проблема разделения влияния механических напряжений и структуры на параметры распространения упругих волн остается одной из важнейших при определении напряженного состояния реальных конструкционных материалов ультразвуковым методом и широко обсуждается в научном сообществе. Разработка способа ультразвукового контроля механических напряжений, учитывающего влияние структурной неоднородности материала и не требующего разгрузки конструкции, представляет очевидный научный и коммерческий интерес.

Ранее уже был предложен и запатентован ультразвуковой способ оценки остаточных напряжений I рода в основном металле сварных соединений без разгрузки конструкции [7, 8].

Цели данной работы — показать основные преимущества разработанного способа перед известными методами ультразвукового контроля напряжений, теоретически обосновать эффект, позволяющий учитывать неоднородность структуры материала, и привести пример апробации способа.

При одностороннем доступе к плоским элементам конструкции с высокой точностью эхо-методом измеряют времена распространения объемных упругих волн. Через времена распространения упругих волн выражают относительные величины, которые используют для оценки механических напряжений:

$$v_{31} = \frac{0,5 - (v_1/v_3)^2}{1 - (v_1/v_3)^2} = \frac{0,5 - (t_3/t_1)^2}{1 - (t_3/t_1)^2}, \quad (1)$$

$$v_{32} = \frac{0,5 - (v_2/v_3)^2}{1 - (v_2/v_3)^2} = \frac{0,5 - (t_3/t_2)^2}{1 - (t_3/t_2)^2}, \quad (2)$$

где v_1 и v_2 — скорости поперечных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях; v_3 — скорость продольной волны; t_1 и t_2 — времена распространения поперечных волн; t_3 — время распространения продольной волны. Для изотропного материала $v_{31} = v_{32} = \nu$, где ν — коэффициент Пуассона.

Результаты экспериментальных исследований образцов из катаных листовых сталей (рис. 1) показывают, что в отсутствие остаточных напряжений в катаном материале существует линейная связь между величинами v_{31} и v_{32} :

$$v_{32} = Bv_{31} + Q, \quad (3)$$

где коэффициенты B и Q определяют методом наименьших квадратов.

Абсолютное значение погрешности определения величин v_{31} и v_{32} с помощью ультразвукового эхо-метода не превышает $2 \cdot 10^{-4}$, что существенно ниже, чем разброс данных величин в исследованных образцах. Методика ультразвуковых измерений изложена в работе [7].

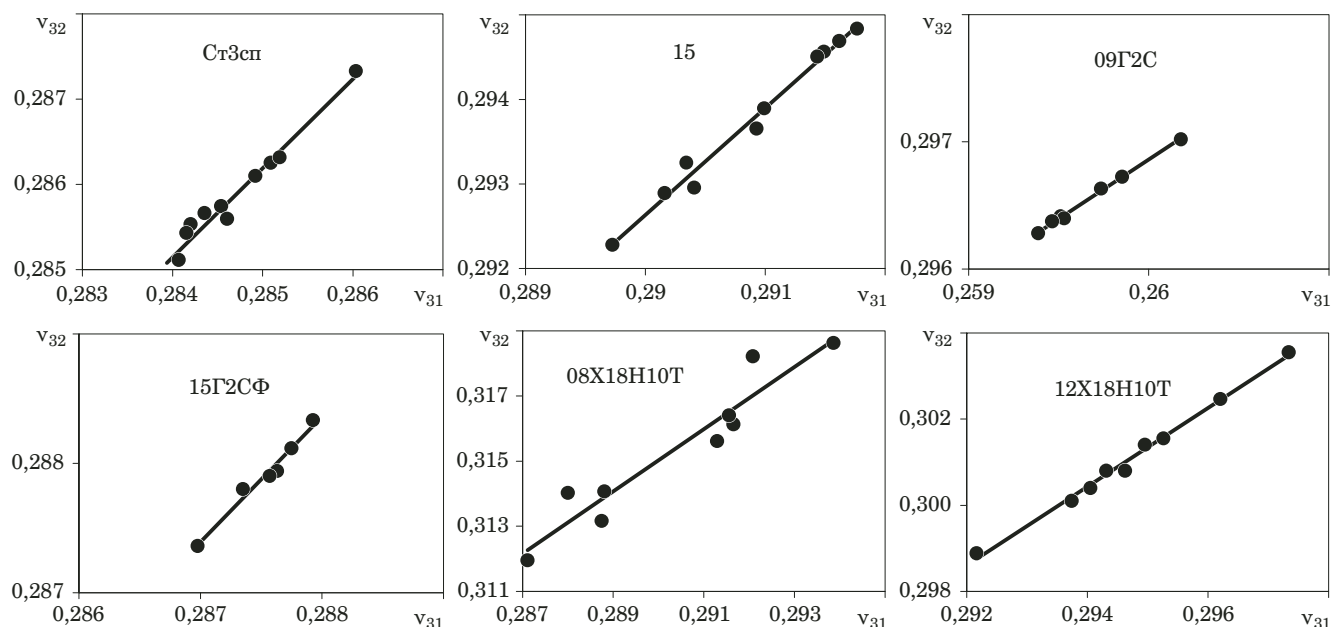


Рис. 1. Связь между величинами v_{31} и v_{32} в образцах из листовых сталей разных марок

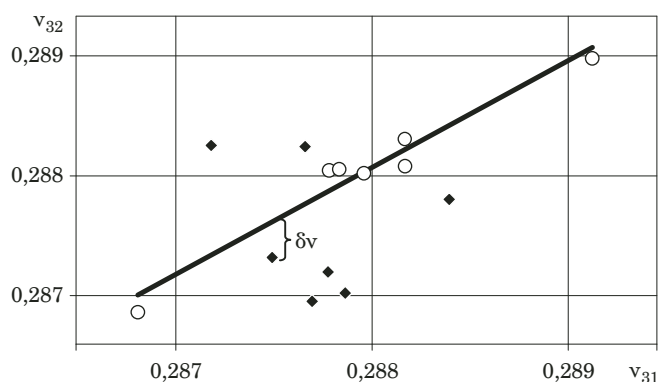


Рис. 2. Связь между величинами v_{31} и v_{32} в основном металле сварного соединения из стали 15Г2СФ: $\circ$ и $\blacklozenge$ — в отсутствие и в присутствии напряжений

Присутствие механических напряжений приводит к отклонению значений v_{31} и v_{32} от прямой (рис. 2):

$$\delta v = v_{32} - Bv_{31} - Q. \quad (4)$$

В формуле (3) под v_{31} и v_{32} имеются в виду значения, определенные в отсутствие напряжений, а в формуле (4) — значения, найденные в присутствии остаточных напряжений.

Как показано в [7], величина отклонения от прямой зависит от разности главных напряжений

$$\sigma_2 - \sigma_1 = k_v \delta v, \quad (5)$$

где k_v — коэффициент пропорциональности, определяемый для исследуемого материала в ходе обучающего эксперимента. Для исследованных листовых сталей СтЗсп, 15, 20, 09Г2С, 15Г2СФ

значения коэффициента оказались весьма близкими и практически не зависящими от степени проката листа: $k_v = 200 - 240$ ГПа.

В каждой зоне исследуемого участка конструкции, где требуется получить распределение остаточных напряжений, ультразвуковым эхометодом измеряют времена распространения упругих волн и определяют величины v_{31} и v_{32} . Необходимо, чтобы измерения были проведены также в зонах, где влияние остаточных напряжений заведомо мало, например, на значительном удалении от сварного шва. Затем анализируют корреляционное поле точек $\{v_{31}; v_{32}\}$ и строят прямую, соответствующую зонам, где напряжения отсутствуют ($\sigma_1 \approx 0$; $\sigma_2 \approx 0$). Далее методом наименьших квадратов определяют коэффициенты B и Q и рассчитывают отклонения от прямой для всех остальных зон. Затем в каждой зоне на исследуемом участке конструкции с помощью выражения (5) оценивают разность главных напряжений.

Описанный способ использовали для определения остаточных напряжений в сварной пластине из стали 20. Полученное распределение значений разности главных напряжений в нескольких точках совпало с результатами, полученными электротензометрическим методом (рис. 3).

Известно, что структурная неоднородность материала, возникающая при его производстве, приводит к неоднородному распределению упругих характеристик [9]. Результаты ультразвуковых исследований большого количества плоских образцов из листовых сталей показывают, что распределение величин v_{31} и v_{32} , характеризующих упругие свойства материала, не случайно.

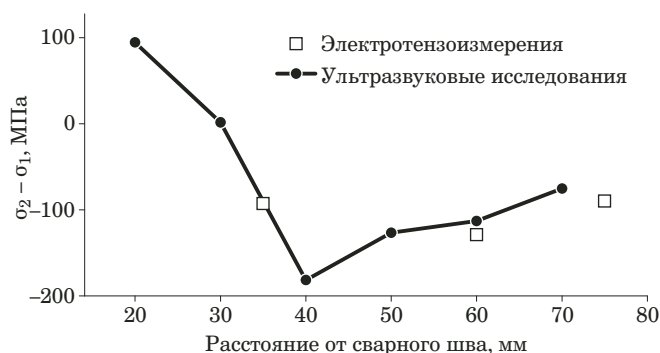


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в основном металле сварной плиты

Корреляционное поле $\{v_{31}; v_{32}\}$ для каждого образца (см. рис. 1) аппроксимируется прямой с коэффициентом корреляции более 0,95.

Существование в отсутствие напряжений линейной связи между величинами v_{31} и v_{32} , по-видимому, связано с особенностями кристаллографической текстуры, сформировавшейся при прокатке металла. Если текстура образовалась в результате определенного вида обработки, например прокатки, то можно ожидать, что компоненты текстуры взаимосвязаны [10].

В работе [10] на основании исследования большого количества пластинок из горячекатаной стали сделан вывод о наличии простой пропорциональной связи между коэффициентами функции распределения ориентировок W_{400} и W_{420} :

$$W_{420} = RW_{400}, \quad (6)$$

где R — коэффициент пропорциональности.

Для образцов, прокатанных при температурах выше и ниже эвтектической, были получены разные значения R : $R_1 = -0,13$ и $R_2 = -0,71$ [10]. Очевидно, коэффициент R должен зависеть от химического и фазового составов сплава.

Для листового материала, состоящего из кубических кристаллов, справедливы следующие выражения для скоростей упругих волн, распространяющихся по толщине [6]:

$$\rho v_1^2 = G - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} C \left(W_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right), \quad (7)$$

$$\rho v_2^2 = G - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} C \left(W_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right), \quad (8)$$

$$\rho v_3^2 = K + \frac{4}{3} G + \frac{32\sqrt{2}\pi^2}{35} C W_{400}, \quad (9)$$

где K — модуль объемной упругости; G — модуль сдвига; C — фактор анизотропии кристалла; ρ — плотность.

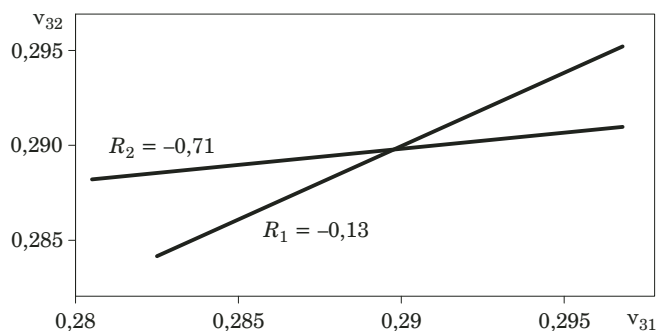


Рис. 4. Связь между величинами v_{31} и v_{32} , полученная аналитически

Из совместного решения уравнений (1), (2), (6) – (9) следует связь между величинами v_{31} и v_{32} в отсутствие напряжений:

$$v_{32} = \frac{(9\sqrt{5}RK + 3\sqrt{2}K + 10\sqrt{2}G)v_{31} - 6\sqrt{5}RK + 4\sqrt{5}RG}{(12\sqrt{5}RK + 4\sqrt{5}RG)v_{31} - 9\sqrt{5}RK + 3\sqrt{2}K + 10\sqrt{2}G}. \quad (10)$$

Выражение (10) не содержит плотности ρ и фактора анизотропии кристалла C . При $R = 0$ оно дает $v_{31} = v_{32}$. В диапазоне реальных изменений величин v_{31} и v_{32} зависимость (10) может считаться линейной.

На рис. 4 показаны зависимости (10), построенные при $R_1 = -0,13$ и $R_2 = -0,71$ для материала с модулями упругости $K = 167,8$ ГПа и $G = 82,0$ ГПа, исследованного в работе [10].

Поскольку модули K и G и коэффициент R зависят от химического и фазового составов, следует ожидать, что зависимость (10) уникальна для каждого конкретного материала.

Аналитическое выражение (10) объясняет экспериментально наблюдаемую в разных листовых сталях линейную связь между величинами v_{31} и v_{32} в отсутствие механических напряжений. Факт отсутствия линейной связи между величинами v_{31} и v_{32} в листовом материале указывает на наличие механических напряжений.

В заключение отметим основные отличия описанного способа от классических методов определения напряжений методом акустоупругости [1 – 6] и обозначим границы его применимости.

Реализация способа не требует разгрузки конструкции или использования образцов эталонов для определения параметров распространения упругих волн, связанных со структурой материала. Структурная неоднородность в данном случае учитывается, когда используется линейная связь между параметрами v_{31} и v_{32} , которая существует в катаном материале в отсутствие механических напряжений. Существование такой связи связано с особенностью кристаллографической текстуры прокатки — наличием пропорцио-

нальной связи между коэффициентами функции распределения ориентировок W_{400} и W_{420} . Таким образом, для реализации способа необходимо получить распределение величин v_{31} и v_{32} на участке, где требуется оценить напряжения, а также на участке, где напряжения отсутствуют или заведомо малы. Например, чтобы определить остаточные напряжения в трубе от кольцевого сварного шва, необходимо проводить измерения также и на значительном удалении от шва. Способ применим только для конструкций из катаного металла, например труб, и позволяет определять разность главных напряжений при двухосном напряженном состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. — Киев: Наукова думка, 1977. — 160 с.
2. Гузь А. Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Общие вопросы. — Киев: Наукова думка, 1986. — 376 с.
3. Бобренко В. М., Вангели М. С., Куценко А. Н. Акустическая тензометрия (теория и практика). — Кишинев: Штиинца, 1991. — 248 с.
4. Никитина Н. Е. Акустоупругость: Опыт практического применения. — Н. Новгород: Талам, 2005. — 208 с.
5. ГОСТ Р 52731–2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2007. — 8 с.
6. ГОСТ Р 52890–2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2009. — 12 с.
7. Курашкин К. В., Мишакин В. В. Оценка остаточных напряжений с помощью ультразвука / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 4. С. 54 – 58.
8. Пат. 2598980 С2 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Ультразвуковой способ определения остаточных напряжений в сварных соединениях трубопроводов / Курашкин К. В., Мишакин В. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиностроения Российской академии наук. — № 2014143229/28; заявл. 27.10.2014; опубл. 10.10.2016. Бюл. № 28.
9. Мишакин В. В., Гончар А. В., Курашкин К. В., Данилова Н. В. Исследование разрушения при статическом нагружении сварных соединений акустическим методом / Тяжелое машиностроение. 2009. № 7. С. 27 – 30.
10. Allen D. R., Sayers C. M. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique / Ultrasonics. 1984. Vol. 22. N 7. P. 179 – 188.

REFERENCES

1. Guz' A. N., Makhort F. G., Gushcha O. I. Introduction to acoustoelasticity. — Kiev: Naukova dumka, 1977. — 160 p. [in Russian].
2. Guz' A. N. Elastic waves in bodies with initial stresses. General questions. — Kiev: Naukova dumka, 1986. — 376 p. [in Russian].
3. Bobrenko V. M., Vangeli M. S., Kutsenko A. N. Acoustic tensometry (theory and practice). — Kishinev: Știința, 1991. — 248 p. [in Russian].
4. Nikitina N. E. Akustouprugost': Acoustoelasticity — experience of practical use. — N. Novgorod: Talam, 2005. — 208 p. [in Russian].
5. RF State Standard GOST R 52731–2007. Non-destructive testing. Stress evaluation by ultrasound. General requirements. — Moscow: Standartinform, 2007. — 8 p. [in Russian].
6. RF State Standard GOST R 52890–2007. Non-destructive testing. Evaluation of stresses in material of pipelines by ultrasound. General requirements. — Moscow: Standartinform, 2009. — 12 p. [in Russian].
7. Kurashkin K. V., Mishakin V. V. Ultrasonic estimation of the residual stresses / Inorg. Mater. 2014. Vol. 50. N 15. P. 1506 – 1510.
8. RF Pat. N 2598980 C2. MПК G01N 29/04. Ultrasonic method for determination of residual stresses in welded joints of pipelines / Kurashkin K. V., Mishakin V. V.; applicant and owner FGBUN institut problem mashinostroeniya Rossiiskoi akademii nauk. — N 2014143229/28; appl. 27.10.2014; publ. 10.10.2016, Bull. N 28 [in Russian].
9. Mishakin V. V., Gonchar A. V., Kurashkin K. V., Danilova N. V. The joint weld destruction study after static loading by acoustic method / Tyazh. Mashinostr. 2009. N 7. P. 27 – 30 [in Russian].
10. Allen D. R., Sayers C. M. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique / Ultrasonics. 1984. Vol. 22. N 7. P. 179 – 188.