

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

**К. В. Курашкин**

канд. техн. наук,
Институт проблем
машиностроения РАН –
Филиал ФГНУ «Федеральный
исследовательский центр
Институт прикладной
физики РАН», Н. Новгород,
Россия.
E-mail: imndt31@mts-nn.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований акустоупругого эффекта в плоских сварных образцах из сталей 20, 15Г2СФ и 09Г2С. Показано, что параметр собственной акустической анизотропии и коэффициенты акустоупругости существенно изменяются с расстоянием от сварного шва, что необходимо учитывать при оценке напряжений акустическим методом.

Ключевые слова: акустоупругий эффект, сварное соединение, оценка напряжений.

K. V. Kurashkin
(Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy
of Science, Nizhny Novgorod, Russia)

THE STRESS EVALUATION IN THE WELDED JOINTS BY THE ACOUSTIC METHOD

The article deals with the actual problem of stress evaluation in the welded joints. The results of experimental studies of acoustoelastic effect in the plane welded samples made from steels 20, 15G2SF and 09G2S are presented. The samples are subjected to uniaxial loading in the elastic region. The propagation time of bulk transverse elastic waves corresponding to the current stress are measured by pulse echo-method. It is shown that the parameter of own acoustic anisotropy and the coefficients of acoustoelasticity change significantly with distance from the weld. This fact need to be taken into account for the stress evaluation by the acoustic method. The differences of values of parameter of own acoustic anisotropy and coefficients of acoustoelasticity at different distances from the weld are explained by the heterogeneity of the structural condition of material on the weld zone. The value of the parameter of own acoustic anisotropy is determined primarily by the crystallographic texture of material. The structural condition of the material has also a great influence on the values of the coefficients of acoustoelasticity. It is shown in the example of steel weld 15G2SF that the error of the stress evaluation may be 42 % without considering the changes in the heat affected zone.

Keywords: acoustoelastic effect, welded joint, stress evaluation.

Статья поступила в редакцию 21.04.2016

Received 21.04.2016

Анализ напряженного состояния материала представляет собой сложную научно-техническую проблему и имеет большое прикладное значение для обеспечения надежности и безопасности машин и конструкций. В сварных соединениях металлоконструкций задача оценки напряжений усложняется из-за неоднородности физических свойств, которые изменяются в процессе сварки под влиянием температуры, деформаций, структурных превращений и других факторов.

В настоящее время для определения напряжений применяются различные методы неразрушающего контроля. Широкое распространение получил акустический метод, который обладает надежностью, при-

емлемой точностью, высокой скоростью и простотой измерений, низкой стоимостью проведения работ, удобством использования в полевых условиях.

Применение акустического метода для определения напряженного состояния материала основано на эффекте акустоупругости, который отражает влияние напряжений на скорости распространения упругих волн.

Большинство существующих способов акустического контроля напряжений, среди которых как инженерные методики, регламентируемые национальными стандартами [1, 2], так и перспективные научные разработки [3 – 6], используют измерение времени распространения упругих волн.



Применение импульсного эхометода измерения времени распространения объемных упругих волн с помощью прецизионных малогабаритных пьезоэлектрических преобразователей позволяет избежать ошибки, связанной с измерением длины акустического пути, и достичь требуемых точности, чувствительности и разрешающей способности для исследования напряженного состояния материала сварных соединений.

Относительное изменение времени распространения поперечных упругих волн в материале под влиянием напряжения описывает следующая система уравнений [3]:

$$\frac{t_1}{t_{01}} - 1 = k_1 \sigma; \quad (1)$$

$$\frac{t_2}{t_{02}} - 1 = k_2 \sigma, \quad (2)$$

где σ – величина одноосного напряжения; t_1 и t_2 – времена распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси действия напряжения соответственно; t_{01} и t_{02} – времена распространения поперечных волн в отсутствии напряжения; k_1 и k_2 – коэффициенты акустоупругости, которые определяются в результате акустомеханических испытаний.

Для оценки одноосного напряженного состояния удобно применять параметр акустической анизотропии – относительную величину, которая определяется соотношением скоростей или времен распространения поперечных упругих волн. Напряжение можно вычислить по следующей формуле [1 – 3]:

$$\sigma = K_A (A - A_0), \quad (3)$$

где A – параметр акустической анизотропии напряженного материала, определяемый при $\sigma \neq 0$:

$$A = 2 \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_1}; \quad (4)$$

A_0 – параметр собственной акустической анизотропии материала, определяемый при $\sigma = 0$:

$$A_0 = 2 \frac{t_{02} - t_{01}}{t_{02} + t_{01}}; \quad (5)$$

K_A – коэффициент упругоакустической связи для одноосного напряженного состояния:

$$K_A = \frac{1}{k_2 - k_1}. \quad (6)$$

Значение параметра собственной акустической анизотропии материала связано с его структурным состоянием и определяется в основном кристалло-

графической текстурой. Например, для листового проката значение параметра собственной акустической анизотропии линейно связано с коэффициентом W_{420} функции распределения ориентировок [7]. Структурное состояние материала также оказывает большое влияние на значения коэффициентов акустоупругости. Нелинейные упругие свойства материала определяются модулями упругости третьего порядка, которые сильно зависят от структурного состояния [8, 9].

Структура металла, сформировавшаяся на различных участках сварного соединения, неоднородна, что приводит к неоднородному распределению параметра собственной акустической анизотропии [10] и коэффициентов акустоупругости [11]. В околошовной зоне значения параметра собственной акустической анизотропии и коэффициентов акустоупругости могут существенно меняться с расстоянием от сварного шва и сильно отличаться от соответствующих значений для основного металла [11]. Исследование изменений параметра собственной акустической анизотропии и коэффициентов акустоупругости в околошовной зоне позволит повысить эффективность акустического метода контроля напряженного состояния сварных соединений.

Объекты и методика исследований

В настоящей работе исследовали акустоупругий эффект в плоских сварных образцах при одноосном растяжении. Характеристики исследованных образцов приведены в табл. 1.

Образцы подвергали одноосному растяжению в упругой области со скоростью 5 мм/мин на испытательной машине Tinius Olsen H100KU (максимальная нагрузка 10 т, класс точности 0,5). Напряжение в образце контролировали с точностью ± 1 МПа. Испытания проводили при комнатной температуре.

1. Характеристики исследованных образцов

Параметр	Марка стали		
	20	15Г2СФ	09Г2С
Размеры образца, мм	250×30×10	380×40×11	450×30×16
σ_T , МПа	245	400	343
Исходный объект	Сварная пластина	Элемент трубы газопровода	Элемент трубы газопровода
Вид сварки	Электро-дуговая	Контактная стыковая	Контактная стыковая
Полуширина шва, мм	5	10	15

В ходе эксперимента к поверхности образца крепили пьезоэлектрический преобразователь V156 Panametrics-NDT (прямой совмещенный, частота 5 МГц, диаметр пьезоэлемента 6 мм), с помощью которого измеряли время распространения поперечных упругих волн, соответствующее текущей нагрузке. Для обеспечения ввода упругих волн в материал поверхность в месте установки преобразователя шлифовали и обезжировали спиртом. В качестве контактной жидкости использовали эпоксидную смолу без отвердителя. Акустические исследования проводили в околошовной зоне и в зоне основного металла. В зоне шва исследования не проводили.

Время распространения упругих волн измеряли импульсным эхометодом с помощью собранной установки. Для генерации электрических импульсов, возбуждающих пьезоэлектрический преобразователь, использовали ультразвуковой дефектоскоп А1212 «Мастер». Для получения временной развертки сигналов от пьезоэлектрического преобразователя использовали цифровой осциллограф

ЛА-n10USB и приложение ADCLab. Разрешение развертки по времени составляло 10 нс. Полученную временную развертку вместе с данными о масштабе записывали в файл данных для последующего анализа. Полученные данные обрабатывали в программе MathCad.

Каждый файл содержал около 100 серий импульсов, отраженных от обратной поверхности образца. Время распространения упругих волн измеряли между первым и четвертым отраженными импульсами. Таким образом, получали около 100 усредняемых значений времени, соответствующих текущей нагрузке. Относительная погрешность измерения не превышала 0,01 %.

Значения параметра акустической анизотропии A и A_0 вычисляли по формулам (4) и (5). Погрешность не превышала 10^{-4} .

Значения коэффициентов акустоупругости k_1 и k_2 определяли с помощью линейной регрессии в программе Microsoft Office Excel. Входной интервал данных – значения напряжения, выходной интервал – значения относительного изменения времени распространения упругой

волны в напряженном материале. Выбранная доверительная вероятность составляла 0,95. Достоверность линейной аппроксимации оценивали по значению коэффициента корреляции. Для полученных зависимостей значения коэффициента корреляции составляли 0,94...0,99.

Значения коэффициента упругоакустической связи K_A вычисляли по формуле (6).

Результаты

На рис. 1 и в табл. 2 представлены результаты акустомеханических испытаний плоских сварных образцов. Значения параметра акустической анизотропии и коэффициентов акустоупругости измеряли на разном расстоянии L от центра сварного шва.

Отличия значений параметра собственной акустической анизотропии A_0 и коэффициента упругоакустической связи K_A на разных расстояниях от сварного шва объясняются неоднородностью структурного состояния материала околошовной зоны.

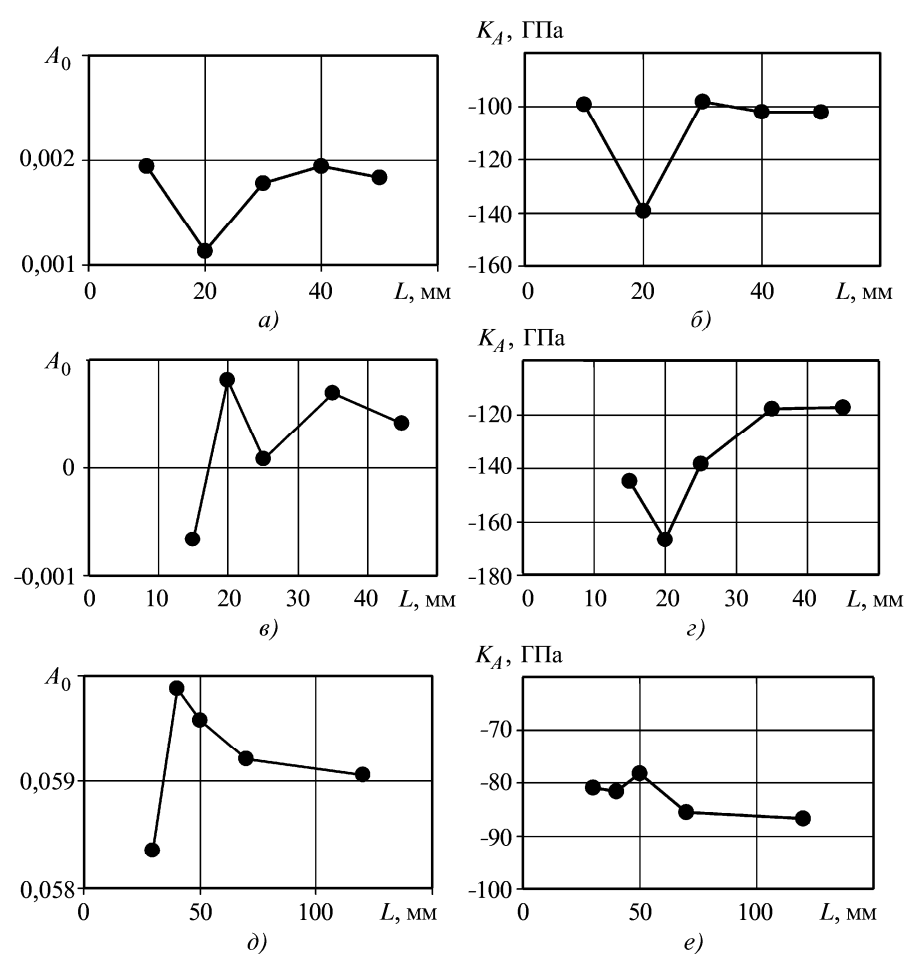


Рис. 1. Распределения значений параметра собственной акустической анизотропии A_0 и коэффициента K_A в сварных образцах из сталей 20 (а, б), 15Г2СФ (в, г) и 09Г2С (д, е)

2. Результаты акустомеханических испытаний

Марка стали	L , мм	A_0		k_1 , 10^{-6} МПа $^{-1}$		k_2 , 10^{-6} МПа $^{-1}$		K_A , ГПа	
20	10	0,00194	$\pm 0,00003$	7,76	$\pm 0,13$	-2,33	$\pm 0,04$	-99	± 1
	20	0,00113	$\pm 0,00004$	6,16	$\pm 0,15$	-1,03	$\pm 0,10$	-139	± 3
	30	0,00178	$\pm 0,00001$	7,17	$\pm 0,04$	-3,02	$\pm 0,02$	-98	± 1
	40	0,00195	$\pm 0,00002$	7,89	$\pm 0,07$	-1,91	$\pm 0,03$	-102	± 1
	50	0,00184	$\pm 0,00001$	7,47	$\pm 0,03$	-2,32	$\pm 0,03$	-102	± 1
15Г2СФ	15	-0,00067	$\pm 0,00004$	4,16	$\pm 0,17$	-2,75	$\pm 0,05$	-145	± 4
	20	0,00081	$\pm 0,00005$	4,01	$\pm 0,21$	-2,00	$\pm 0,08$	-167	± 6
	25	0,00008	$\pm 0,00003$	5,07	$\pm 0,08$	-2,16	$\pm 0,10$	-138	± 2
	35	0,00069	$\pm 0,00002$	5,59	$\pm 0,07$	-2,91	$\pm 0,09$	-118	± 2
	45	0,00041	$\pm 0,00003$	6,57	$\pm 0,14$	-1,96	$\pm 0,04$	-117	± 2
09Г2С	30	0,05835	$\pm 0,00005$	8,94	$\pm 0,03$	-3,42	$\pm 0,06$	-81	± 1
	40	0,05988	$\pm 0,00009$	9,01	$\pm 0,05$	-3,24	$\pm 0,08$	-82	± 1
	50	0,05958	$\pm 0,00008$	9,04	$\pm 0,05$	-3,74	$\pm 0,11$	-78	± 1
	70	0,05921	$\pm 0,00008$	8,84	$\pm 0,06$	-2,85	$\pm 0,08$	-86	± 1
	120	0,05907	$\pm 0,00007$	8,84	$\pm 0,09$	-2,70	$\pm 0,05$	-87	± 1

Для повышения точности оценки напряжений в сварных соединениях металлоконструкций необходимо учитывать, что значения параметра собственной акустической анизотропии и коэффициентов акустоупругости существенно отличаются на разном расстоянии от сварного шва.

На рис. 2 для примера представлены зависимости напряжения от параметра акустической анизотропии для основного металла (45 мм от центра

шва) и для зоны термического влияния (ЗТВ) (20 мм от центра шва) в образце из стали 15Г2СФ. Значения коэффициентов упругоакустической связи в этих зонах отличаются на 50 ГПа или на 42 %. Значения параметра собственной акустической анизотропии отличаются на 0,0004 или в 2 раза. На рис. 2 показано, что максимальная ошибка $\Delta\sigma_{\max}$ при оценке напряжения в зоне термического влияния без учета изменений параметра A_0 и коэффициента K_A может составить 166 МПа.

Заключение

Неоднородность упругих свойств материала на различных участках сварного соединения может привести к большим ошибкам при оценке напряжений акустическим методом. Для корректного определения напряжений в околошовной зоне необходимо учитывать значения параметра собственной акустической анизотропии и коэффициентов акустоупругости на разном расстоянии от сварного шва.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-38-60148-мол_а_дк.

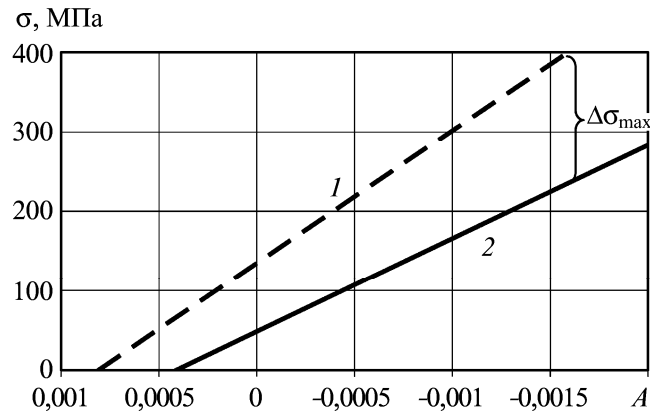


Рис. 2. Связь между напряжением и параметром анизотропии для стали 15Г2СФ: 1 – ЗТВ; 2 – основной металл

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52731–2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 8 с.
2. ГОСТ Р 52890–2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.
3. Углов А. Л., Ерофеев В. И., Смирнов А. Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009. 279 с.
4. Курашкин К. В., Мишакин В. В. Метод ультразвукового контроля остаточных напряжений на основе измерений коэффициентов Пуассона // Контроль. Диагностика. 2013. № 6. С. 14 – 18.
5. Курашкин К. В., Мишакин В. В. Оценка остаточных напряжений с помощью ультразвука // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 4. С. 54 – 58.
6. Хлыбов А. А., Углов А. Л., Родюшкин В. М. и др. Определение механических напряжений с помощью поверхностных волн Рэлея, возбуждаемых магнитоакустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 3 – 10.
7. Sayers C. M. Ultrasonic Velocities in Anisotropic Polycrystalline Aggregates // J. Phys. D: Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157 – 2167.
8. Руденко О. В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 77 – 95.
9. Nazarov V. E., Ostrovsky L. A., Soustova I. A., Sutin A. M. Nonlinear acoustics of microinhomogeneous media // Phys. Earth & Planet. Interiors. 1988. V. 50. N 1. P. 65 – 73.
10. 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.
11. Курашкин К. В., Мишакин В. В. Использование ультразвуковых волн для оценки механических напряжений в материале сварных соединений // Сб. тр. XXII сессии РАО. М.: ГЕОС, 2010. Т. 2. С. 106 – 110.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52731–2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 8 с.
2. ГОСТ Р 52890–2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.
3. Углов А. Л., Ерофеев В. И., Смирнов А. Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009. 279 с.
4. Курашкин К. В., Мишакин В. В. Метод ультразвукового контроля остаточных напряжений на основе измерений коэффициентов Пуассона // Контроль. Диагностика. 2013. № 6. С. 14 – 18.
5. Курашкин К. В., Мишакин В. В. Оценка остаточных напряжений с помощью ультразвука // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 4. С. 54 – 58.
6. Хлыбов А. А., Углов А. Л., Родюшкин В. М. и др. Определение механических напряжений с помощью поверхностных волн Рэлея, возбуждаемых магнитоакустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 3 – 10.
7. Sayers C. M. Ultrasonic Velocities in Anisotropic Polycrystalline Aggregates // J. Phys. D: Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157 – 2167.
8. Руденко О. В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 77 – 95.
9. Nazarov V. E., Ostrovsky L. A., Soustova I. A., Sutin A. M. Nonlinear acoustics of microinhomogeneous media // Phys. Earth & Planet. Interiors. 1988. V. 50. N 1. P. 65 – 73.
10. 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.
11. Курашкин К. В., Мишакин В. В. Использование ультразвуковых волн для оценки механических напряжений в материале сварных соединений // Сб. тр. XXII сессии РАО. М.: ГЕОС, 2010. Т. 2. С. 106 – 110.