АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 65, № 3, с. 382–388

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.6,534.8,620.179.162

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОУПРУГОГО ЭФФЕКТА В АНИЗОТРОПНОМ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОМ МАТЕРИАЛЕ

© 2019 г. К. В. Курашкин*, **

Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН” 603024 Россия, Нижний Новгород, ул. Белинского 85

**e-mail: imndt31@mts-nn.ru*

***e-mail: kurashkinkv@yandex.ru*

Поступила в редакцию 19.02.2018 г.
После доработки 19.09.2018 г.
Принята к публикации 26.12.2018 г.

Обсуждается зависимость двулучепреломления поперечных упругих волн от приложенного механического напряжения и предварительной пластической деформации материала. Описывается методика прецизионных акустических эхо-импульсных измерений и программной обработки получаемой временной развертки сигналов от пьезоэлектрического преобразователя, позволяющая определять время распространения упругих волн с точностью не менее 0.5 нс. Исследуются зависимости параметра собственной акустической анизотропии и коэффициента акустоупругости от пластической деформации в образце из углеродистой стали. После пластического деформирования образца на 12% среднее значение коэффициента акустоупругости изменяется на 30%, среднее значение параметра собственной акустической анизотропии – на 60%. Между значениями параметра собственной акустической анизотропии и коэффициента акустоупругости наблюдается корреляционная связь. В рамках теории распространения упругих волн в твердом теле полученные экспериментальные данные объясняются проявлением акустоупругого эффекта и влиянием структурного состояния на эффективные упругие свойства. Приводится количественная оценка влияния пластической деформации на точность определения напряжения. Ошибка определения напряжения при пластической деформации 1% составляет около 40 МПа, т.е. 13% от предела текучести для данного материала в исходном состоянии.

Ключевые слова: акустоупругий эффект, параметр акустической анизотропии, коэффициент акустоупругости, механическое напряжение, пластическая деформация

DOI: 10.1134/S0320791919030055

ВВЕДЕНИЕ

Большое значение для обеспечения безопасной эксплуатации машин и конструкций имеет определение напряженного состояния материала. Для решения этой задачи применяются не только традиционные расчетные и механические, но и различные физические методы. На практике широко используется акустический метод контроля напряженного состояния, основанный на акустоупругом эффекте – зависимости скорости распространения упругих волн от приложенных механических напряжений. Теоретические основы акустоупругого эффекта и расчетные алгоритмы для вычисления напряжений по результатам измерения скоростей распространения упругих волн подробно рассмотрены, например, в работах [1–4].

Акустоупругий эффект является проявлением нелинейных упругих свойств материала [5]. В твердом теле с дефектами и неоднородностями мезоскопического масштаба имеют место физическая, геометрическая и структурная нелинейности [6]. Физическая нелинейность связана с нелинейностью сил межатомного взаимодействия и формально определяется модулями упругости третьего порядка [7]. Геометрическая нелинейность определяется нелинейной связью между компонентами тензора деформации и частными производными по координатам от компонент вектора смещения [7]. Причиной структурной нелинейности твердого тела являются различные дефекты и неоднородности [5]. В металлах структурная нелинейность связана с накоплением пластической деформации [6].

При пластическом деформировании поликристаллического металла происходят изменения структурного состояния (накопление микродефектов, эволюция дислокационной структуры, фрагментация зерен, изменение текстуры, выде-

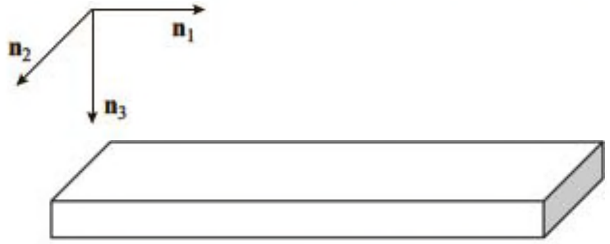

Рис. 1. Выбор координатных осей.

ление новых фаз и др.), которые заметно влияют на эффективные линейные и нелинейные упругие свойства и скорости распространения упругих волн [8–10], и, следовательно, должны влиять на коэффициенты акустоупругости. Структурная чувствительность коэффициентов акустоупругости отмечается, например, в работах [11–13]. Для дальнейшего развития акустического метода контроля напряженного состояния актуально исследовать влияние пластического деформирования на параметры акустоупругого эффекта.

ТЕОРИЯ

В конструкционных сталях относительное изменение скорости распространения упругих волн под влиянием механического напряжения не превышает 1% даже при напряжении, близком к пределу текучести [14]. С помощью лазерного оптико-ультразвукового метода удается достичь относительной точности измерения скорости поверхностных волн 0.02–0.15% [15], объемных волн 0.02–0.06% [16]. Точность измерения скорости определяется, в основном, точностью измерения длины акустического пути. Время распространения упругих волн измеряется на порядок точнее, чем скорость. Современная аппаратура обеспечивает относительную точность измерения времени 0.0085% для поверхностных волн [17], 0.004% для объемных волн [18].

Существующие в России и за рубежом стандартные инженерные методики акустического контроля напряжений [19–22] используют относительные величины, которые выражаются через времена распространения упругих волн. Например, для определения одноосного напряжения удобно использовать параметр акустической анизотропии – относительную величину, которая определяется эффектом двулучепреломления поперечных упругих волн со взаимно-ортогональными поляризациями. Уравнение акустоупругости в этом случае можно представить в виде [1]

$$A = A_0 + B\sigma, \tag{1}$$

где σ – механическое напряжение, A – параметр акустической анизотропии напряженного материала, определяемый при $\sigma \neq 0$, A_0 – параметр собственной акустической анизотропии материала, определяемый при $\sigma = 0$, B – коэффициент акустоупругости, характеризующий двулучепреломление поперечных упругих волн под действием механического напряжения σ.

С практической точки зрения методика определения напряжения с помощью акустического двулучепреломления имеет преимущества над методикой, использующей измерение скорости. Во-первых, параметр акустической анизотропии не зависит от температуры [23]. Во-вторых, для определения параметра акустической анизотропии нет необходимости измерять толщину материала, достаточно измерить времена распространения двух поперечных упругих волн со взаимно-ортогональными поляризациями, поэтому данная методика применима для конструкций с односторонним доступом [23].

Рассмотрим образец ортотропного материала, такого как катаный металлический лист. Выберем координатные оси так, как показано на рис. 1, чтобы ось $\mathbf{n}_1$ совпадала с направлением прокатки, а ось $\mathbf{n}_3$ – с направлением распространения упругих волн по толщине, нормально к плоскости прокатки. Параметр акустической анизотропии выражается через соотношения скоростей или времен распространения поперечных упругих волн [1, 9, 11, 13, 14, 18–23].

В отсутствие механического напряжения

$$A_0 = 2\frac{V_{01} - V_{02}}{V_{01} + V_{02}} = 2\frac{t_{02} - t_{01}}{t_{02} + t_{01}}, \tag{2}$$

где V_{01} и V_{02} – скорости, t_{01} и t_{02} – времена распространения поперечных волн, поляризованных в направлениях $\mathbf{n}_1$ и $\mathbf{n}_2$ соответственно, распространяющихся в направлении $\mathbf{n}_3$, при $\sigma = 0$.

Если к образцу приложено механическое напряжение, то

$$A = 2\frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} = 2\frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_1}, \tag{3}$$

где V_1 и V_2 – скорости, t_1 и t_2 – времена распространения поперечных волн при $\sigma \neq 0$.

Если механическое напряжение приложено к образцу в направлении, совпадающем с направлением прокатки $\mathbf{n}_1$, то, используя результаты работы [24], коэффициент акустоупругости B можно выразить через модули упругости следующим образом:

$$\begin{gathered} B = [(S_{11} - S_{12})(C_{55} + C_{44}) + S_{13}(C_{55} - C_{44}) + \\ + S_{11}(C_{155} - C_{144}) + \\ + S_{12}(C_{255} - C_{244}) + S_{13}(C_{355} - C_{344})]/(C_{55} + C_{44}), \end{gathered} \tag{4}$$

где C_{ij} и S_{ij} – компоненты тензора упругой жесткости и тензора упругой податливости соответственно (модули упругости второго порядка), C_{ijk} – модули упругости третьего порядка.

Параметр собственной акустической анизотропии также можно выразить через модули упругости [24, 25]

$$A_0 = \frac{C_{55} - C_{44}}{C_{55} + C_{44}}. \qquad (5)$$

В катаной стали анизотропия упругих свойств связана с текстурой [24]. Кроме текстуры на модули упругости поликристаллического материала оказывает влияние накопление структурной поврежденности – различного рода дефектов и неоднородностей [8, 9].

Поскольку пластическое деформирование поликристаллического материала приводит к изменению текстуры и накоплению структурной поврежденности, что заметно отражается на модулях упругости, то в соответствии с выражениями (4) и (5) должны меняться параметр собственной акустической анизотропии A_0 и коэффициент акустоупругости B. Определение параметра собственной акустической анизотропии через модули упругости (5) входит в выражение для коэффициента акустоупругости (4), поэтому между ними возможно существование корреляционной связи.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе исследовался акустоупругий эффект в плоском образце из углеродистой стали Ст3сп до и после пластического деформирования. Начальные размеры образца 480 × 30 × × 8 мм. Химический состав стали – 98.7% Fe, 0.18% C, 0.65% Mn, 0.20% Si. Предел текучести – 310 МПа. Образец был вырезан вдоль направления прокатки. Измерения проводились в центральной части образца в трех зонах шириной по 10 мм. Расстояние между центрами зон составляло 20 мм. Все испытания проводились при температуре окружающей среды +20°C.

Для исследования акустоупругого эффекта применялся импульсный эхо-метод измерения времени распространения упругих волн в материале, что позволило избежать ошибки, связанной с измерением длины акустического пути. Толщина металла в ходе эксперимента не измерялась. Оценочные значения скоростей поперечных упругих волн в образце до механических испытаний – $V_{01} = 3270$ м/с и $V_{02} = 3230$ м/с.

Проводились акустомеханические испытания образца в исходном состоянии и при пластических деформациях 3.5 и 12%. Образец подвергался одноосному растяжению в упругой области со скоростью 2 мм/мин на электромеханической машине Tinius Olsen H100KU. Напряжение в образце контролировалось с точностью ±2 МПа. К поверхности образца крепился малогабаритный

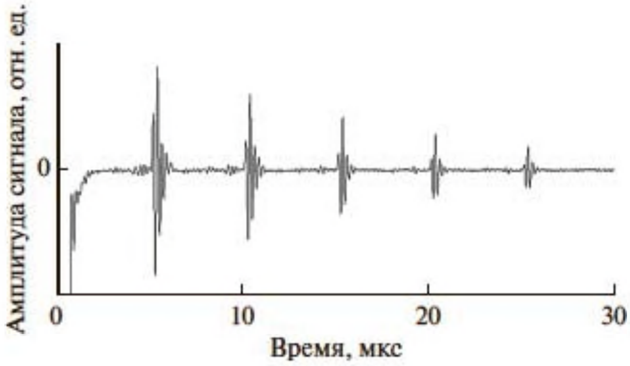

Рис. 2. Пример амплитудно-временной диаграммы.

пьезоэлектрический преобразователь V156 Panametrics-NDT (прямой, совмещенный, центральная частота 5 МГц, диаметр пьезоэлемента 6 мм). В качестве контактной жидкости применялась эпоксидная смола без отвердителя. Точность позиционирования преобразователя обеспечивалась с помощью специального трафарета. Время распространения в образце поперечных упругих волн, соответствующее текущей нагрузке, измерялось с помощью измерительно-вычислительного программно-аппаратного комплекса. Для генерации электрических импульсов, возбуждающих пьезоэлектрический преобразователь, использовался ультразвуковой дефектоскоп А1212 "Мастер". Для получения временной развертки сигналов от пьезоэлектрического преобразователя использовался цифровой осциллограф ЛА-н10USB и приложение ADCLab. Частота дискретизации цифрового осциллографа составляла 100 МГц, соответственно, разрешение развертки по времени составляло 10 нс. Полученная временная развертка сохранялась в файл данных для анализа и обработки в программе MathCAD. Каждый файл содержал около 100 серий импульсов (рис. 2), отраженных от обратной поверхности образца. Для повышения точности измерений данные интерполировались сплайнами. После обработки разрешение по времени составляло 0.1 нс.

С одной стороны, вследствие частотно-зависимого затухания, расхождения ультразвукового пучка и многократных отражений существенно уменьшается амплитуда и искажается форма импульсов. С другой стороны, относительная ошибка измерений времени тем меньше, чем больше база измерений между импульсами. Время распространения упругих волн измерялось между первым и пятым отраженными импульсами по точкам перехода нуля между минимумом и максимумом в импульсе (рис. 3). Пятый отраженный импульс был последним импульсом, амплитуда которого оставалась на порядок выше случайных шумов. Размер ближней зоны составлял около 14 мм. Первый отраженный импульс проходил

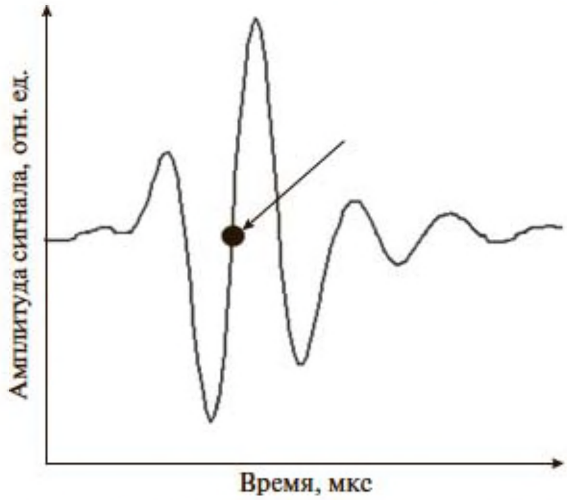

Рис. 3. Точка перехода нуля между минимумом и максимумом в импульсе.

около 16 мм в недеформированном образце и около 15 мм в образце после наибольшей деформации 12%. Таким образом, все измерения выполнялись в дальней зоне. Получалось около 100 значений времени задержки, которые усреднялись. Погрешность измерения времени составляла не более 0.5 нс. На базе около 20 мкс относительная ошибка измерений не превышала 0.0025%.

Параметр акустической анизотропии вычислялся через времена распространения поперечных упругих волн по формулам (2) и (3). Погрешность определения параметра акустической анизотропии не превышала 4×10^{-5}.

Коэффициент акустоупругости B вычислялся в программе Microsoft Office Excel с помощью линейной регрессии. Входные данные – значения механического напряжения и соответствующие значения параметра акустической анизотропии. Выбранная доверительная вероятность составляла 0.95. Для всех зависимостей коэффициент корреляции был более 0.99. Максимальная погрешность определения коэффициента акустоупругости составила 6×10^{-13} Па$^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований при пластических деформациях образца 0, 3.5 и 12% для каждой зоны были построены зависимости параметра акустической анизотропии от приложенного напряжения σ (рис. 4) и вычислены соответствующие коэффициенты акустоупругости.

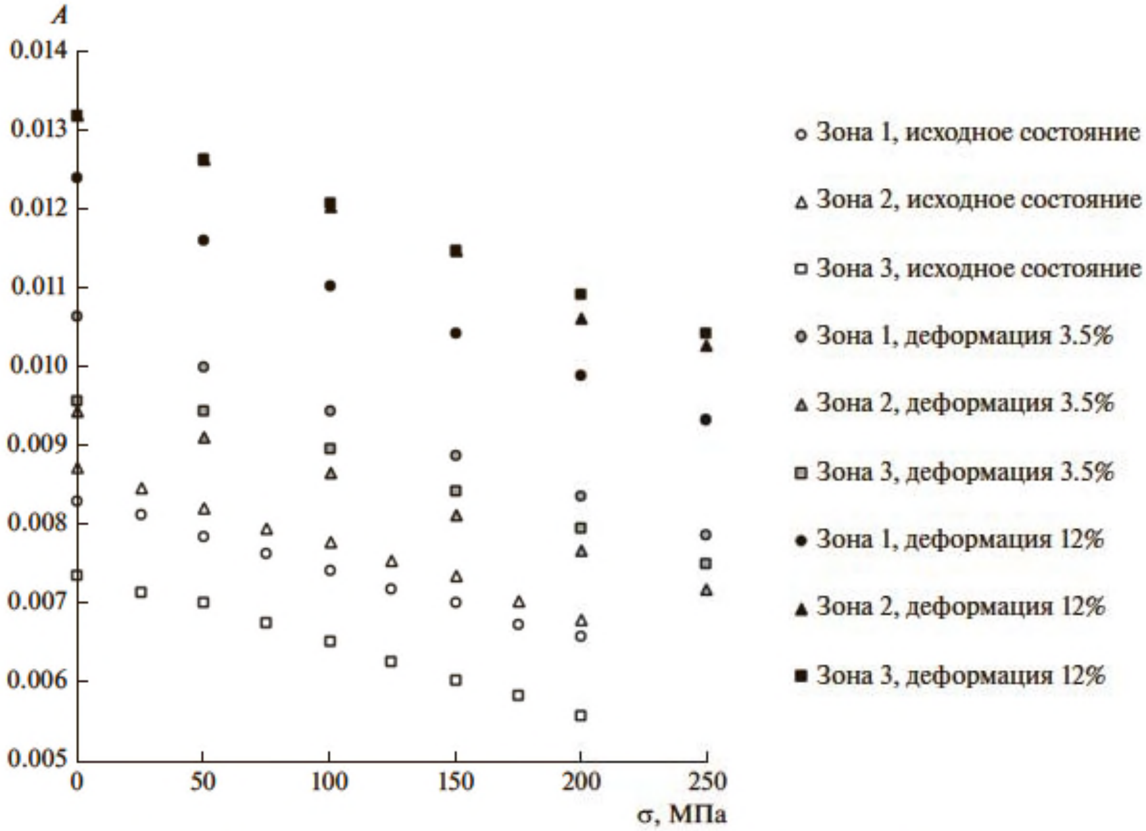

Рис. 4. Зависимости параметра акустической анизотропии от приложенного напряжения.

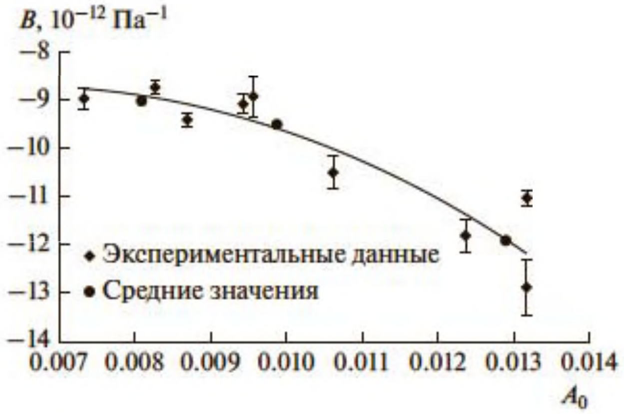

Рис. 5. Корреляционная связь между параметром собственной акустической анизотропии и коэффициентом акустоупругости.

Даже в исходном состоянии материала значения параметра собственной акустической анизотропии и коэффициента акустоупругости в каждой зоне существенно различаются, что свидетельствует о некоторой начальной структурной неоднородности. Между значениями коэффициента акустоупругости и параметра собственной акустической анизотропии наблюдается корреляционная связь (рис. 5). Несмотря на значительный разброс экспериментальных данных, связанный с неоднородностью структурного состояния материала, средние значения хорошо ложатся на аппроксимирующую кривую. Таким образом, определяя параметр акустической анизотропии для данного материала, можно оценить коэффициент акустоупругости.

В среднем, после пластического деформирования образца на 12% коэффициент акустоупругости B изменился на 30% (рис. 6а), параметр собственной акустической анизотропии A_0 – на 60% (рис. 6б). Выражение (5) показывает, что параметр A_0 связан с линейными упругими свойствами и, в первую очередь, зависит от текстуры материала. При пластическом деформировании текстура изменяется и соответственно изменяется анизотропия. Коэффициент акустоупругости B, как показывает выражение (4), зависит от линейных и нелинейных упругих характеристик. При пластическом деформировании абсолютное значение коэффициента акустоупругости увеличивается вследствие накопления структурной нелинейности.

Выполним оценочный расчет влияния пластической деформации на точность определения напряжения в исследуемом материале. В исходном состоянии до пластического деформирования средние значения коэффициента акустоупругости и параметра собственной акустической анизотропии составляют соответственно $B = 9.1 \times 10^{-12}$ Па$^{-1}$ и $A_0 = 0.0081$. При пластическом деформировании образца на 1% относительное изменение коэффициента акустоупругости приблизительно равно $\delta B = 2.5\%$, относительное изменение параметра собственной акустической анизотропии $\delta A_0 = 5\%$. Поварьируем значения A и рассчитаем напряжения с учетом и без учета влияния пластической деформации (рис. 7):

$$\sigma = \frac{A - A_0}{B}, \tag{6}$$

$$\sigma^* = \frac{A - A_0(1 + \delta A_0)}{B(1 + \delta B)}. \tag{7}$$

Разница значений, полученных по формулам (6) и (7), позволяет оценить влияние пластической деформации. Вычисленная таким образом ошибка определения напряжения при пластической деформации 1% составила около 40 МПа, т.е. 13% от предела текучести для данного материала.

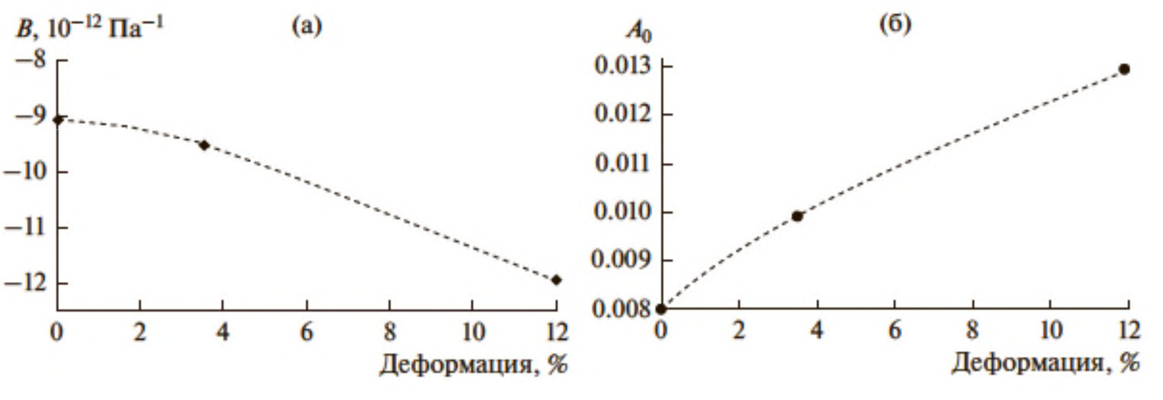

Рис. 6. Зависимости средних значений (а) коэффициента акустоупругости и (б) параметра собственной акустической анизотропии от пластической деформации образца.

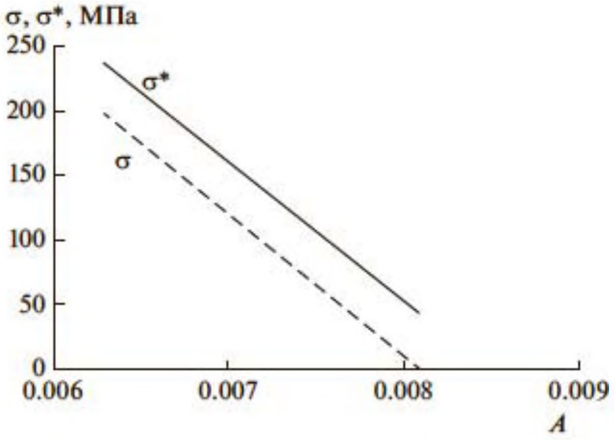

Рис. 7. Напряжения, вычисленные с учетом и без учета влияния пластической деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при пластическом деформировании материала параметр собственной акустической анизотропии и коэффициент акустоупругости существенно изменяются, что объясняется накоплением структурной поврежденности и изменением текстуры и их влиянием на эффективные характеристики упругости. Установлено, что между параметром собственной акустической анизотропии и коэффициентом акустоупругости существует корреляционная связь. Оценено влияние пластического деформирования на параметры акустоупругого эффекта и на точность определения напряжения.

Автор выражает благодарность своим коллегам В.В. Мишакину, А.В. Гончару и В.А. Клюшникову за помощь в проведении экспериментов, плодотворную дискуссию и консультации при подготовке данной работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013–2020 гг. по теме № 0035-2014-0402, номер государственной регистрации 01201458047.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Okada K.* Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique // J. Acoust. Soc. Japan (E). 1980. V. 1. № 3. P. 193–200.
2. *Thompson R.B., Lee S.S., Smith J.F.* Angular dependence of ultrasonic wave propagation in a stressed, orthorhombic continuum: theory and application to the measurement of stress and texture // J. Acoust. Soc. Am. 1986. V. 80. № 3. P. 921–931.
3. *Chatellier J.-Y., Touratier M.* A new method for determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V. 83. № 1. P. 109–117.
4. *Guz' A.N., Makhort F.G.* The physical fundamentals of the ultrasonic nondestructive stress analysis of solids // International Applied Mechanics. 2000. V. 36. № 9. P. 1119–1147.
5. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
6. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
7. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Нелинейные явления при распространении упругих волн в твердых телах // УФН. 1970. Т. 102. № 12. С. 549–586.
8. *Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Нин В.* Экспериментальные исследования упругой нелинейности в структурно-неоднородных материалах // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 5. С. 663–671.
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. *Гончар А.В., Мишакин В.В., Клюшников В.А., Курашкин К.В.* Изменение упругих характеристик метастабильной аустенитной стали при циклическом деформировании // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 4. С. 518–521.
11. *Мишакин В.В.* Исследование влияния пластического деформирования на эффект акустоупругости // Нелинейный мир. 2009. Т. 7. № 10. С. 787–791.
12. *Mishakin V.V., Dixon S., Potter M.G.D.* The use of wide band ultrasonic signals to estimate the stress condition of materials // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. № 21. P. 4681–4687.
13. *Курашкин К.В.* Оценка напряжений в сварных соединениях с помощью акустического метода // Контроль. Диагностика. 2016. № 10. С. 52–56.
14. *Никитина Н.Е., Камышев А.В., Казачек С.В.* Использование явления акустоупругости при исследовании напряженного состояния технологических трубопроводов // Дефектоскопия. 2009. № 12. С. 53–59.
15. *Девиченский А.Ю., Ломоносов А.М., Жаринов С.Е., Михалевич В.Г., Лямшев М.Л., Иванова Т.О., Меркулова Н.С.* Диагностика остаточных напряжений в металлах с помощью широкополосных поверхностных акустических импульсов // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 1. С. 39–46.
16. *Ивочкин А.Ю., Карабутов А.А., Лямшев М.Л., Пеливанов И.М., Рохатги У., Субудхи М.* Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптико-акустическим методом // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 4. С. 540–547.
17. *Хлыбов А.А., Углов А.Л., Родюшкин В.М., Катасонов Ю.А., Катасонов О.Ю.* Определение механических напряжений с помощью поверхностных волн Рэлея, возбуждаемых магнитоакустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 3–10.

18. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В., Балобанов Е.Н., Волкова Л.В.* Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2011. № 8. С. 16–28.
19. ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.
20. ГОСТ Р 52890-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009. 16 с.
21. ГОСТ 32207-2013. Колеса железнодорожного подвижного состава. Методы определения остаточных напряжений. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
22. EN 13262:2004 (E). European Standard. Railway applications – Wheelsets and bogies – Wheels: Product requirements. CEN, 2004. 46 p.
23. *Szelazek J.* Ultrasonic evaluation of residual hoop stress in forged and cast railroads wheels – differences // J. Nondestruct. Eval. 2015. V. 34. № 1. Article 1.
24. *Sayers C.M., Allen D.R.* The influence of stress on the principal polarization directions of ultrasonic shear waves in textured steel plates // J. Phys. D: Appl. Phys. 1984. V. 17. № 7. P. 1399–1413.
25. *Hirao M., Hara N., Fukuoka H.* Anisotropy measured with shear and Rayleigh waves in rolled plates // Ultrasonics. 1987. V. 25. № 2. P. 107–111.