

DOI: 10.5862/JPM.10111

УДК: 620.179.162

*В.К. Бельченко, А.М. Лобачев, В.С. Модестов,
Д.А. Третьяков, Л.В. Штукин*

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Работа посвящена исследованию возможности применения метода акустоупругости для оценки напряженно-деформированного состояния при циклическом нагружении. Обнаружено, что с увеличением числа циклов нагружения равномерные распределения акустической анизотропии вдоль рабочей части алюминиевого образца, а также скоростей продольной и поперечных ультразвуковых волн, становятся существенно неравномерными, причем наибольшие по абсолютной величине значения акустической анизотропии приходятся на точки, в которых наблюдаются наибольшие пластические деформации, в частности, на область разрыва образца. Эффект регистрировался с ранних стадий нагружения образца вплоть до его разрушения.

МЕТОД АКУСТОУПРУГОСТИ, АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА, ЦИКЛИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ, ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.

Введение

Эхо-импульсный метод акустоупругости, нашедший широкое применение в промышленности, берет свое начало в 1959 году, после опубликования фундаментальной работы американских ученых Р.В. Бенсона и В.Дж. Рилсона [1]. Ими был предложен новый акустический метод определения напряжений в изотропном материале. Он основан на явлении, которое заключается в различии скоростей поперечных волн, поляризованных параллельно и перпендикулярно направлению действия напряжений в материалах под нагрузкой, т. е. в анизотропии среды с действующими напряжениями. Данное явление было названо акустоупругим эффектом, а метод оценки напряженно-деформированного состояния элементов конструкций — методом акустоупругости.

Целью настоящей работы является получение и анализ экспериментальных данных о пространственно-временной динамике изменения акустической анизотропии и скоростей продольной и поперечных ультразвуковых волн в случае одноосного циклического нагружения при наличии упругопластических деформаций.

Методическая часть

Особенности метода измерения. Исследованию акустоупругого эффекта был посвящен целый ряд исследований как отечественных, так и зарубежных авторов [2 – 4], среди которых следует отметить работу японских ученых Токуока и Сайто [5], использовавших для описания эффекта нелинейно-упругую модель сплошной среды Мурнагана. Ими получено следующее простое соотношение для одноосно нагруженного изотропного материала:

$$\frac{V_1 - V_2}{V_0} = \frac{4\mu + n}{8\mu^2} (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

где V_1, V_2 – скорости поперечных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях относительно действующей нагрузки; V_0 – скорость поперечной волны в ненагруженном материале; σ_1, σ_2 – главные напряжения; μ – константа Ламе второго порядка; n – константа упругости третьего порядка.

Параметром акустической анизотропии служит безразмерная величина a , которая рассчитывается через скорости поперечных ультразвуковых волн взаимно перпендикулярной поляризации V_1 и V_2 :

$$a = \frac{V_1 - V_2}{(V_2 + V_1) / 2}. \quad (2)$$

Метод акустоупругости предназначен для исследования таких квазистатических процессов, в которых изменение напряженно-деформированного состояния происходит достаточно медленно, по сравнению со временем изменения акустических параметров исследуемого материала. Отметим, что для измерения скоростей необходимо знать толщину материала в исследуемой области и время пробега ультразвуковых волн. Для вычисления же акустической анизотропии достаточно знать только время распространения волн, поскольку акустическая анизотропия есть относительная величина и в области применения метода акустоупругости толщина из формулы акустической анизотропии может быть исключена [6]:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{(V_2 + V_1) / 2} = \frac{h(1/t_1 - 1/t_2)}{h(1/t_2 + 1/t_1) / 2} = \frac{t_2 - t_1}{(t_2 + t_1) / 2}. \quad (3)$$

Следует отметить, что основной недостаток прямого измерения скоростей ультразвуковых волн связан с тем, что на величину скорости оказывает влияние ряд факторов, основными среди которых являются:

изменение длины акустического пути, вызванное упругопластическими деформациями материала;

изменение поля температуры исследуемой области;

влияние внутренних дефектов микроструктуры на характер распространения излучаемых ультразвуковых импульсов;

действие главных и касательных напряжений.

Вклад каждого из данных факторов зачастую невозможно оценить на практике, а их комплексное воздействие может приводить к существенным искажениям в величину скоростей ультразвуковых волн и, следовательно, в величину акустической анизотропии. Это стало причиной того, что, несмотря на обширный фактический материал [8, 9], опубликованный в различные годы в периодической литературе, разработка метода акустоупругости в области неупругих деформаций далека от своего завершения.

Образец для проведения испытаний. Для испытаний был изготовлен образец размером $510 \times 70 \times 15$ мм из катаного алюминиевого листа малолегированного сплава марки АМц, с направлением проката, перпендикулярным направлению приложения нагрузки. Выбор материала обусловлен тем, что он обладает высокой пластичностью и коррозионной стойкостью, близок по своим характеристикам к чистому алюминию.

Применение алюминиевого проката удобно для изучения характера изменения акустической анизотропии в процессе упругопластического деформирования. Это связано с тем, что в результате проката материал в процессе изготовления подвергается значительным начальным пластическим деформациям, что приводит к образованию строго ориентированной вдоль направления проката зеренной структуры. Вследствие этого в недеформированных образцах возникает начальная (собственная) акустическая анизотропия, превышающая по абсолютной величине значения, характерные для сталей, от десяти до ста раз [10]. Предел текучести используемого материала составил 75 МПа, предел прочности на растяжение – 135 МПа.

Аппаратное обеспечение метода. Значения величин акустической анизотропии и скоростей распространения ультразвуковых волн в образце были получены при помощи

отечественного ультразвукового прибора ИН-5101А. Его работа основана на принципе генерации ультразвуковых зондирующих импульсов и регистрации параметров отраженных упругих волн, возбуждаемых в контролируемых объектах, в том числе времени пробега отраженных волн по толщине материала [11]. Данный прибор содержит генератор высокочастотных импульсов, приемник отраженных сигналов, трехкомпонентный пьезопреобразователь, который обеспечивает излучение и прием двух поперечных волн взаимно перпендикулярной поляризации и одной продольной волны. Прибор оснащен программно-вычислительным комплексом, осуществляющим обработку и представление результатов измерений. Особенностью ИН-5101А является та, что реализация метода акустоупругости осуществляется при помощи одного приемопередающего датчика, а не нескольких, что значительно снижает погрешность измерений. При проведении испытаний использовался стандартный датчик с собственной частотой 5 МГц и уровнем зондирующего импульса 50 В.

Испытания на циклическое нагружение.

Испытания проводились на гидравлической машине «Instron-8850» путем задания мягкого нагружения при положительной отнулевой нагрузке с ее последовательным

увеличением. График изменения величины внешней нагрузки представлен на рис. 1.

Всего было реализовано пять этапов диагностирования (точки на рис. 1), на каждом из которых проводилось измерение акустической анизотропии и скоростей продольной и поперечных ультразвуковых волн. Исследования проводились на разгруженном образце в 23 точках, расположенных вдоль его рабочей части, крайние из которых были выбраны вблизи концентраторов напряжений. Схема расположения точек представлена на рис. 2.

Первые 50 тыс. циклов были реализованы при отнулевой нагрузке с верхним пределом от $0,76\sigma_{0,2}$ до $1,04\sigma_{0,2}$; при этом образец не приобрел остаточных пластических деформаций (с точностью до погрешности измерений), что было связано с его упрочнением, о котором можно было также судить по отсутствию гистерезиса кривой нагружения. Последующие циклы нагружения были реализованы также при отнулевой нагрузке, превышающей предел текучести, тем самым механизм упругопластических деформаций реализовывался на каждом цикле нагружения.

Результаты и их обсуждение

Перед проведением испытаний на не-

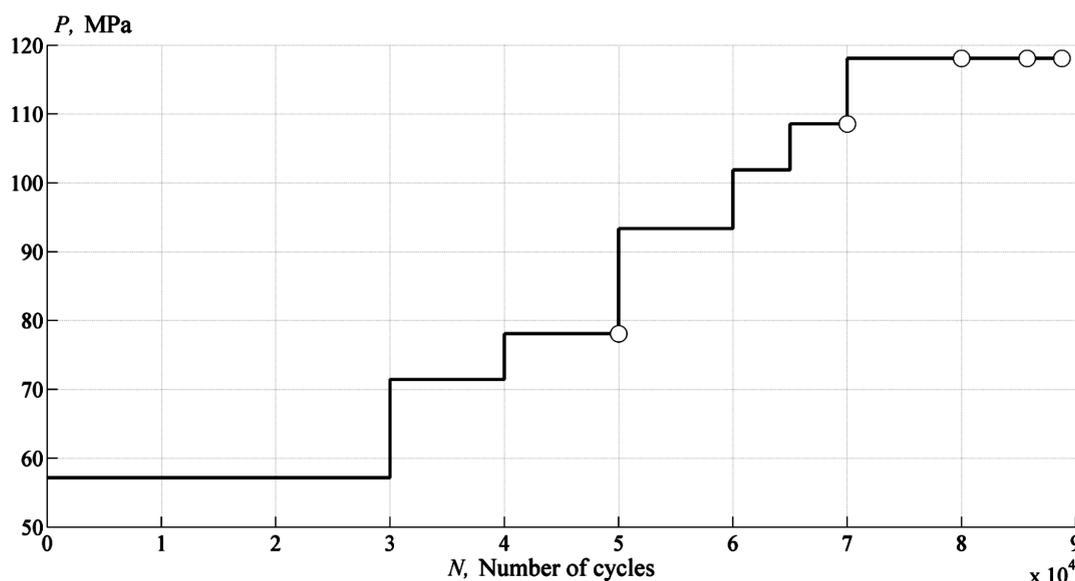


Рис. 1. Ступенчатая кривая нагружения образца. Точками отмечены этапы диагностирования

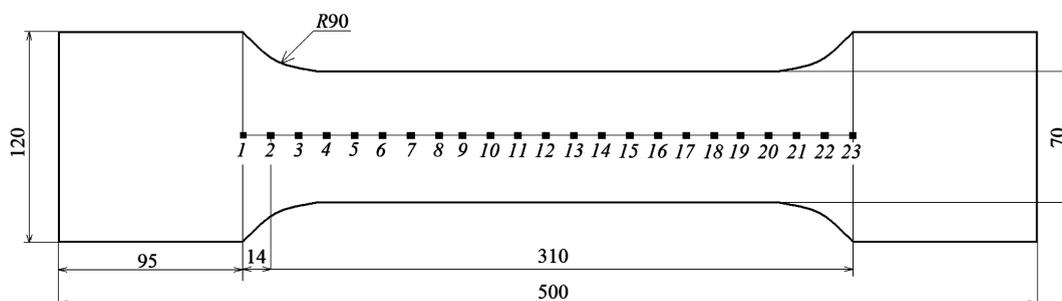


Рис. 2. Чертеж образца со схемой расположения рабочих точек, в которых проводились исследования

деформированном образце были проведены измерения акустической анизотропии, которые дали во всех исследуемых точках значения, равные 0,52 % с точностью до погрешности измерения. Скорость продольной волны в данных точках составила 6,3610 мм/мкс. Далее описаны результаты испытаний.

На рис. 3 представлены графики распределения акустической анизотропии, полученные после проведения 50 тыс. и 70 тыс. циклов нагружения, когда величина внешней нагрузки достигла 108,6 МПа, что соответствует величине $1,44\sigma_{0,2}$ (слабо выраженный характер гистерезиса кривой нагружения при этом сохранялся). По полученным кривым видно, что после проведения 50 тыс. циклов нагружения акустиче-

ская анизотропия в материале уже не имеет постоянного распределения и существуют области, где происходит ее монотонный рост по абсолютной величине. После 70 тыс. циклов данная тенденция проявляется отчетливой, при этом происходит перераспределение акустической анизотропии из средних точек рабочей части образца, где она начинает убывать, в точки, приходящиеся на области вблизи галтельного перехода, где продолжается ее рост.

Таким образом, уже на ранних этапах деформирования образца удалось обнаружить малые устойчивые изменения величины акустической анизотропии вблизи концентраторов напряжений относительно начального уровня в пределах от 0,47 до 0,58 %.

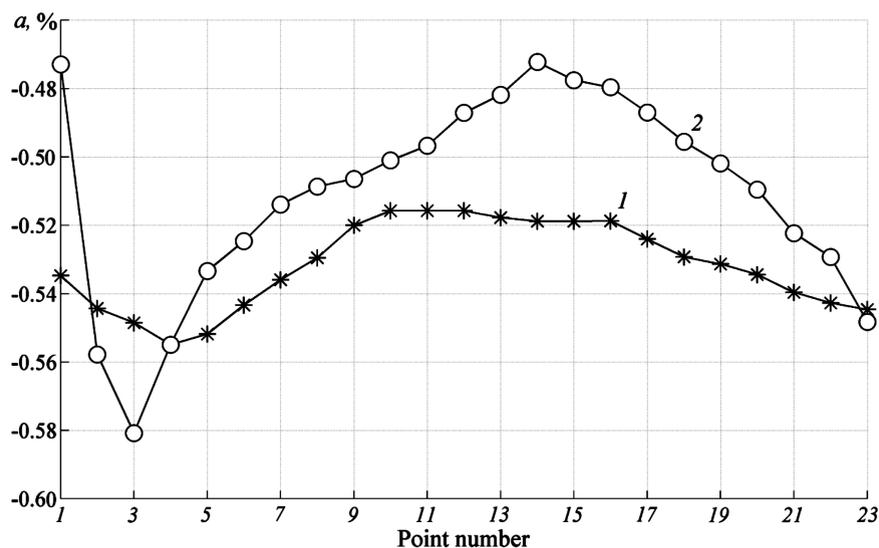


Рис. 3. Акустическая анизотропия после 50 тыс. (1) и 70 тыс. (2) циклов нагружения

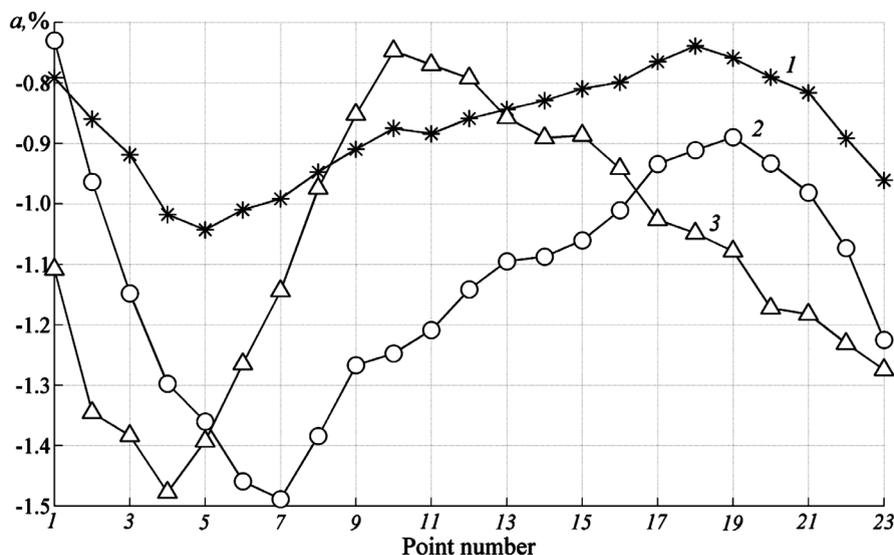


Рис. 4. Распределение акустической анизотропии по образцу после 80000 (кривая 1), 85740 (2) и 88790 (3) циклов нагружения

Далее было проведено три этапа измерения акустической анизотропии и скоростей продольной и поперечных ультразвуковых волн после 80 000, 85 740 и 88 790 циклов нагружения, при величине внешней нагрузки, соответствующей 118,1 МПа ($1,57\sigma_{0,2}$). Последний этап измерений был реализован за 170 циклов, вплоть до разрыва испытуемого образца.

Измерения толщины и абсолютного удлинения показали, что образец приобрел значительные относительные остаточные деформации, составившие на трех этапах 2,4, 6,6 и 10,6 % соответственно. Наибольшие остаточные пластические деформации пришлось на точки рабочей части образца, ближайшие к галтельным переходам. Разрыв произошел после 88960 циклов нагружения, с образованием шейки вблизи места разрушения, в области точек 4 – 5. Результаты измерений акустической анизотропии на каждом из указанных этапов представлены на рис. 4.

Из полученных распределений следует, что обнаруженные на ранних этапах нагружения тенденции приобрели устойчивый однозначный характер: акустическая анизотропия на участках, на которые пришлось наибольшие пластические деформации, превышает анизотропию в средних точках рабочей части по абсолютной вели-

чине почти в два раза (см. кривые 2 и 3 на рис. 4).

Анализ результатов измерения скоростей плоской поперечной ультразвуковой волны V_1 , поляризованной вдоль направления действия нагрузки, позволяет дать общую оценку ее поведения в процессе циклического упругопластического деформирования. На рис. 5 представлены графики скорости V_1 на этапах, предшествующих разрушению образца. Для измерения акустической анизотропии, как было указано выше, достаточно ограничиться измерением времени пробега ультразвуковых волн, что удалось сделать во всех точках 1 – 23. Для вычисления скоростей необходимо также проводить измерение толщины исследуемой области. В точках 1, 2 и 22, 23 кривизна поверхности оказалась такой, что измерение толщины с требуемой точностью, к сожалению, осуществить не удалось. Поэтому на рис. 5 и 6 показаны распределения скоростей ультразвуковых волн только в точках 3 – 21.

Полученные результаты измерений позволяют заключить, что, во-первых, скорость поперечной волны V_1 не только не постоянна, но и имеет области монотонного возрастания и убывания. Во-вторых, данная скорость имеет четко выраженную тенденцию к убыванию в областях боль-

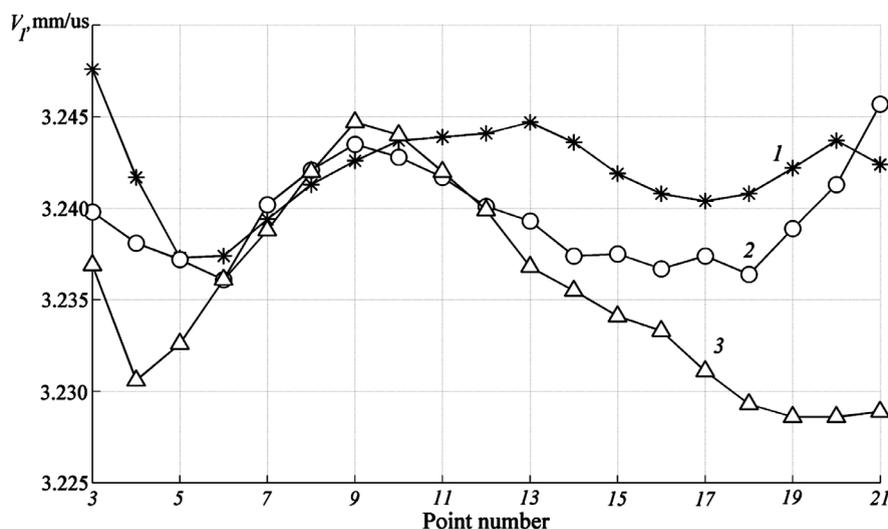


Рис. 5. Распределение скорости поперечной волны V_1 по образцу после 80000 (кривая 1), 85740 (2) и 88790 (3) циклов нагружения

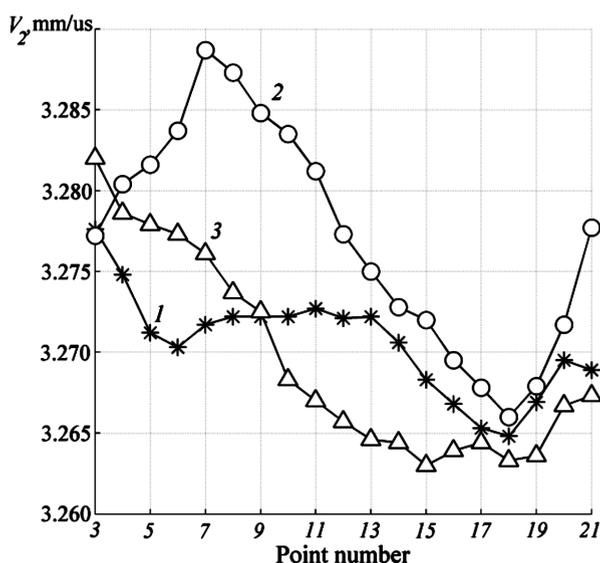
ших пластических деформаций и непосредственно в области, где произошло образование шейки и разрыв образца. Наконец, характер изменения скорости коррелирует с характером изменения акустической анизотропии в образце в целом. Таким образом, имеет место макроскопический процесс, который затрагивает всю рабочую часть образца.

Дальнейшее исследование эффекта, свя-

занного с убыванием скорости поперечной волны V_1 в зонах больших пластических деформаций и вблизи места разрушения, может иметь значение при разработке методики обнаружения опасных со стороны напряженно-деформированного состояния областей в диагностируемых конструктивных элементах.

Графики распределения скорости поперечной волны V_2 (рис. 6, а), поляризо-

а)



б)

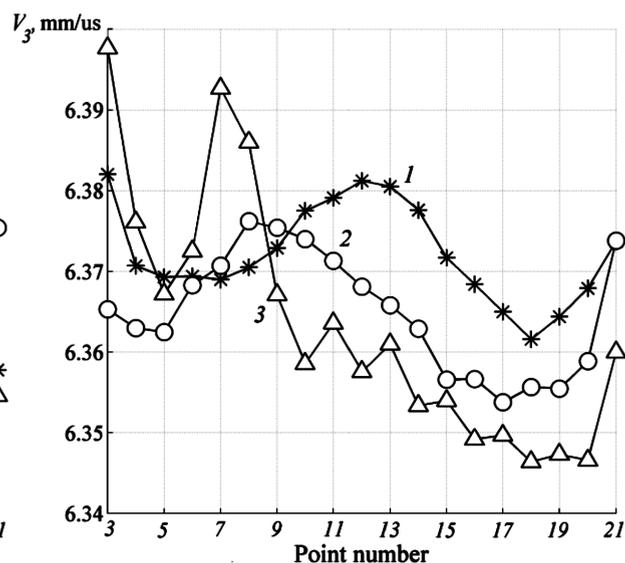


Рис. 6. Распределения скоростей V_2 поперечной (а) и V_3 продольной (б) волн по образцу после 80000 (1), 85740 (2) и 88790 (3) циклов нагружения

ванной перпендикулярно направлению действия нагрузки, а также скорости продольной ультразвуковой волны V_3 (рис. 6, *b*) также были получены для указанных точек на аналогичных этапах измерений. Как и в случае с поперечной скоростью V_1 , они не являются постоянными величинами и имеют участки как монотонного снижения, так и монотонного роста.

Если в случае скорости продольной волны можно констатировать ее общее убывание на участке точек $9 - 21$, приходящемся на средние точки рабочей части и на зону больших пластических деформаций, то в случае поперечной волны V_2 , несмотря на качественно близкий характер построенных кривых, пока нельзя сделать вывод о каком-либо однозначном поведении скорости. Исследование характера изменения скорости поперечной волны V_2 и скорости продольной волны V_3 требует проведения дополнительных испытаний.

Представленные результаты измерений показывают устойчивую динамику изменения акустической анизотропии в областях, подверженных пластическим деформациям. Кроме этого, не исключено влияние возможных начальных или приобретенных дефектов микроструктуры, учет которых требует проведения дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Benson R.W., Raelson V.J.** From ultrasonics to a new stress-analysis technique // *Acoustoelasticity. Product. Eng.* 1959. Vol. 30. Pp. 56 – 59.

[2] **Беляев А.К., Лобачев А.М., Модестов В.С., Пивков А.В., Полянский В.А., Семенов А.С., Третьяков Д.А., Штукин Л.В.** Оценка величины пластической деформации с использованием акустической анизотропии // *Механика твердого тела.* 2016. № 5. С. 124 – 131.

[3] **Smith R.T.** Stress-induced anisotropy in solids – the acousto-elastic effect // *Ultrasonics.* 1963. Vol. 3. No. 1. Pp. 135 – 147.

[4] **Pao Y.H.** Theory of acoustoelasticity and acoustoplasticity // *Solid mechanics research for quantitative non-destructive evaluation.* Netherlands. Springer. 1987. Pp. 257–273.

[5] **Tokuoka T., Saito M.** Elastic wave propagations and acoustical birefringence in stressed crystals // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1969. Vol. 25. No. 5. Pp. 1241–1246.

Заключение

В результате проведенных исследований экспериментально обнаружено, что с увеличением числа циклов нагружения начальное равномерное распределение акустической анизотропии вдоль рабочей части образца приобретает существенно неравномерный характер.

Наибольшие по абсолютной величине значения акустической анизотропии получены в тех местах исследуемого объекта, где наблюдались наибольшие пластические деформации, в частности в области разрыва образца. Аналогичные закономерности были обнаружены как для скорости продольной волны V_3 , так и скорости поперечной волны V_1 , поляризованной вдоль направления действия нагрузки.

Установленные закономерности были выявлены именно на ранних стадиях времени жизни образца, при сравнительно малых остаточных пластических деформациях, что имеет большую прогностическую ценность. Дальнейшие исследования, включающие измерения акустической анизотропии, позволят разработать критерии оценки остаточного ресурса деталей конструкций.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №15-19-00091).

[6] **Никитина Н.Е.** Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТА-ЛАМ, 2005. 208 с.

[7] **Камышев А.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В.** Расчетно-инструментальный метод оценки напряженно-деформированного состояния с определением силовых граничных условий методом акустоупругости и его применение для анализа повреждаемости сварного соединения № 111 парогенераторов АЭС с РУ ВВЭР // *Тяжелое машиностроение.* 2016. № 1-2. С. 11–18.

[8] **Kobayashi M.,** Acoustoelastic theory for plastically deformed solids // *JSME International Journal.* Ser. 1. 1990. Vol. 33. No. 3. Pp. 310 – 318.

[9] **Hirao M., Pao Y.H.,** Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam // *The Journal of the Acoustical Society of America.* 1985. Vol. 77. No. 5. Pp. 1659–1664.

[10] **Никитина Н.Е.** Влияние собственной



анизотропии материала на точность измерения напряжений методом акустоупругости // Дефектоскопия. 1996. № 4. С. 77–85.

[11] Прибор для измерения механических напряжений ИН-5101А. Руководство по эксплуатации. ИНКО. 468160.008 РЭ.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛЬЧЕНКО Владимир Константинович – лаборант Испытательного центра «Политехтест» Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
belchenko239@gmail.com

ЛОБАЧЕВ Александр Михайлович – ассистент кафедры «Механика и процессы управления» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
lobachev_am@spbstu.ru

МОДЕСТОВ Виктор Сергеевич – ведущий инженер кафедры «Механика и процессы управления» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
modestov@compmechlab.com

ТРЕТЬЯКОВ Дмитрий Алексеевич – студент Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
dmitry.tretyakov93@yandex.ru

ШТУКИН Лев Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Механика и процессы управления» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
lvtvsh4749@gmail.com

Belchenko V.K., Lobachev A.M., Modestov V.S., Tretyakov D.A., Shtukin L.V. AN ESTIMATION OF THE STRAIN-STRESS STATE UNDER CYCLIC LOADING BY THE ACOUSTOELASTICITY METHOD.

The paper studies the applicability of the acoustoelasticity method to estimation of the strain-stress state under cyclic loading. It has been found that the uniform distributions of the acoustic anisotropy along the working part of the sample and of the velocities of longitudinal and transverse ultrasonic waves become non-uniform substantially with an increase in the number of stress cycles. Moreover, the largest absolute values of the acoustic anisotropy fell on the points with the largest plastic deformations, in particular, in the area of the sample dispersion. The effect was being recorded from the early stages of the sample loading till the fracture of the sample.

ACOUSTOELASTICITY METHOD, ACOUSTIC ANISOTROPY, SUPERSONIC INSPECTION, CYCLIC LOADING, PLASTIC DEFORMATION.

REFERENCES

[1] R.W. Benson, V.J. Raelson, From ultrasonics to a new stress-analysis technique, Acoustoelasticity, Product. Eng. 30 (1959) 56–59.

[2] A.K. Belyayev, A.M. Lobachev, V.S. Modestov, et al., Otsenka velichiny plasticheskoy deformatsii s ispolzovaniyem akusticheskoy

anizotropii [Measurements of the plastic deformation using acoustic anisotropy], *Mekhanika tverdogo tela*. (5) (2016) 124–131.

[3] **R.T. Smith**, Stress-induced anisotropy in solids – the acousto-elastic effect, *Ultrasonics*. 1(3) (1963) 135–147.

[4] **Y.H. Pao**, Theory of acoustoelasticity and acoustoplasticity, *Solid mechanics research for quantitative non-destructive evaluation*, Springer, Netherlands (1987) 257–273.

[5] **T. Tokuoka, M. Saito**, Elastic wave propagations and acoustical birefringence in stressed crystals, *J. Acoust. Soc. Amer.* 45(5) (1969) 1241–1246.

[6] **N.E. Nikitina**, *Akustouprugost. Opyt prakticheskogo primeneniya* [Acoustoelasticity, experience of practical use], N. Novgorod: TALAM, 2005.

[7] **A.V. Kamyshev, L.A. Pasmanik, V.A. Smirnov, V.S. Modestov, A.V. Pivkov**, Raschetno-instrumentalnyy metod otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya s opredeleniyem silovykh granichnykh usloviy metodom akustouprugosti i yego primeneniye dlya analiza

povrezhdayemosti svarnogo soyedineniya № 111 parogeneratorov AES s RU VVER [An instrumental method of assessment of the stress-strain state with the definition of boundary conditions by the acoustoelasticity method and its application to the analysis of damage to the welded joint], *Tyazheloye mashinostroyeniye*. (1-2) (2016) 11 – 18.

[8] **M. Kobayashi**, Acoustoelastic theory for plastically deformed solids, *JSME International Journal*, Ser. 1. 33(3) (1990) 310–318.

[9] **M. Hirao, Y.H. Pao**, Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam, *The Journal of the Acoustical Society of America*. 77(5) (1985) 1659–1664.

[10] **N.E. Nikitina**, Vliyaniye sobstvennoy anizotropii materiala na tochnost izmereniya napryazheniy metodom akustouprugosti [An influence of natural anisotropy on the measuring of stresses by the acoustoelasticity method], *Defektoskopiya*. (4) (1996) 77–85.

[11] Pribor dlya izmereniya mekhanicheskikh napryazheniy IN-5101A [IN-5101A device for measuring mechanical stresses], *Rukovodstvo po ekspluatatsii*. INKO. 468160.008 RE.

THE AUTHORS

BELCHENKO Vladimir K.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
belchenko239@gmail.com

LOBACHEV Aleksander M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
lobachev_am@spbstu.ru

MODESTOV Viktor S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
modestov@compmechlab.com

TRETYAKOV Dmitriy A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
dmitry.tretyakov93@yandex.ru

SHTUKIN Lev V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
lvtvsh4749@gmail.com