

Д.А. Третьяков¹, Д.Б. Куатхина²

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В АЛЮМИНИИ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТОУПРУГОГО ЭФФЕКТА



¹Дмитрий Алексеевич Третьяков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (962)707-6338, E-mail: tretyakov_da@spbstu.ru



²Дарья Борисовна Куатхина,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (996)759-6978, E-mail: kuathina.db@edu.spbstu.ru.

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования акустоупругого эффекта при упруго-пластической деформации алюминиевых образцов с начальной анизотропией упругих свойств, изготовленных из промышленного проката. Предложен подход, позволяющий определять заранее неизвестную ориентацию осей главных напряжений и анизотропии механических свойств путем поворота системы ортогонально поляризованных поперечных волн. Он основан на построении и анализе угловых диаграмм акустической анизотропии. Было установлено, что на характерная форма угловых диаграмм определяется степенью поврежденности материала, что является диагностическим признаком. Предложенный подход может быть использован при входном неразрушающем контроле магистральных трубопроводов, парогенераторов, другой металлопродукции из проката, а также материалов, имеющих ориентированную внутреннюю структуру.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустоупругость, акустическая анизотропия, ультразвук, пластические деформации, разрушение.

Введение

Возникновение пластических деформаций и развитие микродефектов оказывают влияние на прочностные характеристики металлов, вызывают деградацию механических свойств и являются предвестниками разрушения. Их своевременное обнаружение является условием для обеспечения безопасной эксплуатации промышленных узлов и деталей машин. В настоящее время активно развиваются технологии акустического неразрушающего контроля металлов, в частности, методы акустической тензометрии [1]. Они используются для определения текущего напряженно-деформированного состояния без предварительной разгрузки. В основе таких методов лежит исследование акустоупругости – свойства, характеризующего анизотропию распространения упругих продольных и поперечных волн, вызванную внутренними напряжениями материала [2].

Акустоупругий эффект был предсказан теоретически в работах Г. Грина [3] и Л. Бриллюэна [4] и экспериментально обнаружен в металлах и горных породах П. Бриджменом [5] и Ф. Берчем [6]. Его физическое объяснение было построено на основе модели нелинейно-упругого материала с использованием упругого потенциала Ф. Мурнагана [7,8]. Теоретические модели, описывающие линейную акустоупругость, связаны с работами Д. Хьюза и Дж. Келли [9], Р. Тупина и Б. Бернштейна [10], К. Трусделла [11], Р. Смита [12], Д. Креккрафта [13], Т. Токуока и М. Сайто [14], Ю. Ивашимидзу [15], К. Окада [16], Х. Фукуока [17] и других.

Количественной характеристикой акустоупругого эффекта является параметр акустической анизотропии [18]. Расчет параметра акустической анизотропии связан с нахождением величины относительной разности скоростей плоско поляризованных поперечных волн взаимно ортогональной поляризации. Способ оценки главных напряжений посредством измерений параметра акустической анизотропии для одноосного и двухосного напряженного состояния был предложен Р. Бенсоном и В. Рилсоном [2]. Согласно действующим стандартам [19,20], вместо скоростей волн прецизионно измеряются временные задержки t_1 , t_2 между n отраженными волновыми пакетами. Расчет акустической анизотропии проводится по формуле:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_{cp}} = \frac{V_1 - V_2}{(V_1 + V_2)/2} \cong \frac{t_2 - t_1}{(t_1 + t_2)/2} = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}}$$

Для удобства параметр акустической анизотропии, как правило, рассчитывается в процентах:

$$a, \% = \frac{t_2 - t_1}{(t_1 + t_2)/2} \cdot 100\%$$

Современные результаты в области акустической тензометрии на базе акустоупругого эффекта были получены отечественными научными группами под руководством и при участии Н.Е. Никитиной [21,22],

А.О. Ватульяна [23], В.И. Ерофеева [24], В.В. Мишакина, А.В. Гончара и К.В. Курашкина [25-28], А.Л. Углова и А.А. Хлыбова [29-32], А.В. Федорова и И.В. Беркутова [33], Л.Н. Степановой [34], В.В. Муравьева и Л.В. Волковой [36-39], и ряда зарубежных исследователей [40-43].

В классических моделях акустоупругости предполагается, что вызванная наличием упругих напряжений и деформаций анизотропия упругих волн на порядок величины превосходит влияние других факторов. Для учета начальной текстуры и малых пластических деформаций Г. Джонсоном [44], М. Хирао и Ю. Пао [45], М. Кобаяши [46] были разработаны модели слабо-анизотропного нелинейно-упругого материала и модели нелинейно-упруго-пластического материала с упрочнением, объединенные под общим названием акустопластичности.

Новейшие эксперименты в металлах с начальной анизотропией упругих свойств, к числу которых относится промышленный прокат, выявили преимущественное влияние текстуры и пластических деформаций на акустическую анизотропию по сравнению с чисто упругими деформациями [47-50]. Это ранее было предсказано в работах Л.Б. Зуева [51]. Однако остается актуальной задача исследования акустической анизотропии при больших упруго-пластических деформациях металлов с ненулевой начальной анизотропией упругих свойств.

В статьях Н.Е. Никитиной [21,22] и других авторов направление действия нагрузки было заранее известно, были определены главные напряжения и их оси, а скорости поперечных волн были ориентированы строго вдоль них. Этот случай хорошо описан в теории акустоупругости [18,52]. Более сложным является случай, когда направления действия главных напряжений в материале заранее неизвестно.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования акустической анизотропии в условиях больших упруго-пластических деформаций образцов из алюминиевого проката. Для определения ориентации осей главных напряжений и осей анизотропии упругих модулей предлагается подход, основанный на расчете и анализе угловых диаграмм параметра акустической анизотропии. По содержанию он близок к способу построения индикатрис скоростей волн Лэмба, предложенному В.В. Муравьевым при изучении тонколистового проката электромагнитно-акустическим методом [53,54].

Методы

Для расчета угловых диаграмм параметра акустической анизотропии используется плоская поперечная волна, направленная вдоль оси n_3 по толщине материала, плоскость распространения которой определяется осью n_1 . В начальном состоянии ось n_1 волны 1 (она совпадает с продольной осью датчика) и продольная ось $n_{||}$ образца расположены коллинеарно друг

другу. Для исследуемого участка наносится разметка с равным шагом $\Delta\varphi$ по углу (см. центральную точку образца на рис. 1). Далее, осуществляется поворот оси n_1 относительно оси $n_{||}$ на угол φ . Начальное значение $\varphi = 0^\circ$ выбирается для угла, соответствующего нулю тригонометрического круга. Положительное изменение $\Delta\varphi > 0$ угла φ отсчитывается при повороте плоскости поляризации поперечной волны против часовой стрелки (на рис. 2). Шаг, с которым осуществляется поворот, отсчитывается от 90° по формуле (1):

$$90^\circ/m = 2\Delta\varphi, \quad (1)$$

где m – целое число ($m = 1, 2, 3 \dots$).

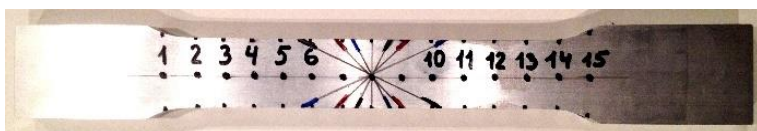


Рис. 1. Разметка в алюминиевом образце для измерения угловых диаграмм

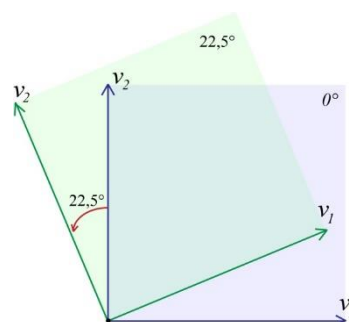


Рис. 2. Направление поворота осей

Измерения временных задержек рекомендуется проводить одним пьезоэлектрическим блоком ультразвукового датчика (на рис. 3) путем его поворота (на рис. 4), либо с помощью многокристальных (лепестковых) пьезодатчиков, устройство которых позволяет осуществлять излучение волн вдоль различных направлений при фиксированном положении излучателя. Требуется выполнение условия на малые погрешности результатов измерений при одних и тех же значениях угла φ в начале и конце каждого этапа измерений.

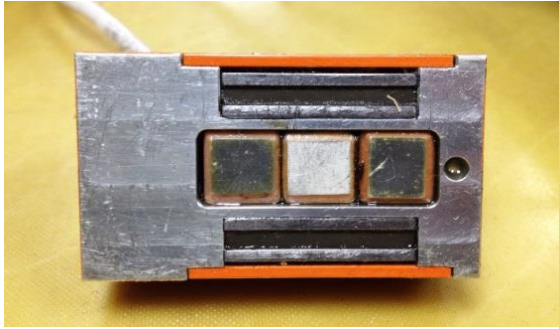


Рис. 3. Ультразвуковой датчик для исследования акустической анизотропии поперечных волн

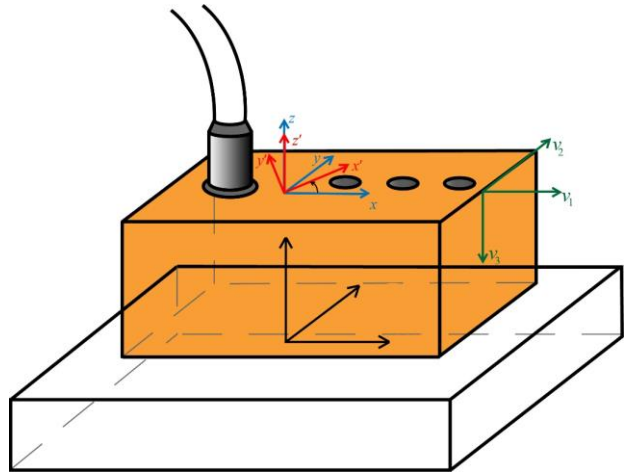


Рис. 4. Поворот датчика в процессе измерений для получения угловой диаграммы с равным угловым шагом

Для расчета угловых диаграмм необходима определенная форма расчета величины параметра акустической анизотропии. Фактически, в процессе измерений наблюдается одна поперечная волна, компоненты скорости которой V меняются при повороте плоскости ее поляризации на угол φ . В начальном положении, когда $\Delta\varphi = 0^\circ$ (пусть $m = 2$), измеряется скорость V_1 :

$$V^{2 \cdot m \cdot \Delta\varphi} |_{\Delta\varphi=0, m=2} = V_1^{0^\circ},$$

при повороте на угол 90° ($\Delta\varphi = 22.5^\circ$) рассматривается скорость V_2 :

$$V^{2 \cdot m \cdot \Delta\varphi} |_{\Delta\varphi=22.5^\circ, m=2} = V_2^{90^\circ},$$

что соответствует случаю, когда орт n_1 волны 1 совпадает с ортом n_2 волны 2, ориентированным в перпендикулярном направлении, и с ортом $n_\perp$ поперечной оси образца. Примем в качестве угла антисимметрии $\varphi = 90^\circ$, а в качестве угла симметрии $\varphi = 180^\circ$, и введем следующее обозначение (2):

$$\varphi = 2 \cdot m \cdot \Delta\varphi \quad (2)$$

Для расчета акустической анизотропии необходимо выполнение условия на ортогональность волн (3):

$$a^\varphi = (V^\varphi - V^{\varphi+90^\circ}) / ((V^\varphi + V^{\varphi+90^\circ}) / 2) \quad (3)$$

При поляризации волны $V^{2 \cdot m \cdot \Delta\varphi}$ вдоль направления действия одноосной растягивающей нагрузки (главного напряжения σ_1 , случай $\Delta\varphi = 0^\circ$), формула (3) принимает известный вид (4):

$$a^{0^\circ} = (V^{0^\circ} - V^{90^\circ}) / ((V^{0^\circ} + V^{90^\circ}) / 2) = (V_1 - V_2) / ((V_1 + V_2) / 2) \quad (4)$$

Измерения при значениях $\Delta\varphi \neq 0^\circ$ позволяют получить информацию об акустической анизотропии при отличных от $\varphi = 0^\circ$ углах ориентации системы ортогонально поляризованных поперечных волн V^φ и $V^{\varphi+90^\circ}$, где $\varphi = 2m\Delta\varphi$. Таким образом, целью подхода к построению угловых диаграмм является изучение акустической анизотропии a^φ при повороте

системы $\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\}$ плоских поперечных волн взаимно ортогональной поляризации относительно осей нагружения и осей анизотропии материала.

С учетом перехода к расчету величины a^{0° через временные задержки, соотношение (4) примет вид (5):

$$a^\varphi = (t^{\varphi+90^\circ} - t^\varphi) / ((t^{\varphi+90^\circ} + t^\varphi) / 2) \quad (5)$$

Аналогично находится (6) при $\varphi = 0^\circ$:

$$a^{0^\circ} = (t^{90^\circ} - t^{0^\circ}) / ((t^{90^\circ} + t^{0^\circ}) / 2) = (t_2 - t_1) / ((t_2 + t_1) / 2) \quad (6)$$

Исследование угловых диаграмм позволяет анализировать начальную (на рис.5) и деформационно-обусловленную анизотропию скоростей поперечных волн в материале (на рис.6). Диаграммы акустической анизотропии могут строиться либо по модулю ($|a^\varphi|$), либо с учетом знака (на рис.5), который сменяется на противоположный при антисимметричном преобразовании системы $\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\}$ путем поворота на 90° (7):

$$a\{V^{\varphi+90^\circ}, V^{\varphi+180^\circ}\} = -a\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\} \quad (7)$$

Напротив, поворот системы $\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\}$ на 180° для любого угла φ приводит к симметричному преобразованию (8):

$$a\{V^{\varphi+180^\circ}, V^{\varphi+270^\circ}\} = a\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\} \quad (8)$$

Использование правил (7) и (8) позволяет строить угловые диаграммы акустической анизотропии a^φ для диапазона углов $[0^\circ, 360^\circ]$.

Результаты акустических измерений при одноосном монотонном упруго-пластическом нагружении

В работе исследовались алюминиевые образцы марки АМц двух партий: 500x70x20 мм с пределом текучести $\sigma_{T1} = 65 \div 70$ МПа (партия №1) и 300x30x15 мм с $\sigma_{T2} = 55 \div 60$ МПа (партия №2). Испытания на одноосное (вдоль оси $n_{||}$) монотонное растяжение образцов из партии №1 осуществлялись на машине INSTRON-8850, из партии №2 – на машине INSTRON-8801. Для измерения локальных деформаций использовался индукционный тензодатчик с базой измерений 10 мм и точностью 10^{-4} мм.

Сначала подход к построению угловых диаграмм был применен в опытах на растяжение алюминиевого образца партии №1 (на рис.1), вырезанного поперек направления проката. Образец был разгружен без разрушения после больших пластических деформаций (осевая деформация $\varepsilon^{e-p} = 16.6\%$) до достижения предела прочности $\sigma_{пр1}$.

Для измерения временных задержек и расчета параметра акустической анизотропии был использован прибор ИН-5101А [55]. Он реализует эхо-импульсный метод неразрушающего контроля механических напряжений методом акустоупругости [18]. В экспериментах использовался контактный датчик с частотой зондирующего импульса 5 МГц (на рис.3).

Измерения временных задержек осуществлялись в центральной точке (образец с разметкой на рис.1) при 7-ми значениях углов φ с равным шагом $\Delta\varphi = 22.5^\circ$ в диапазоне $0^\circ \div 157.5^\circ$. При построении угловых диаграмм a^φ использовалось соотношение (5), а также правила симметрии (8) и антисимметрии (7). Серия угловых диаграмм, полученных по итогам 7-ми этапов нагружения образца при фиксированных значениях деформаций ε^{e-p} представлена на рис. 5.

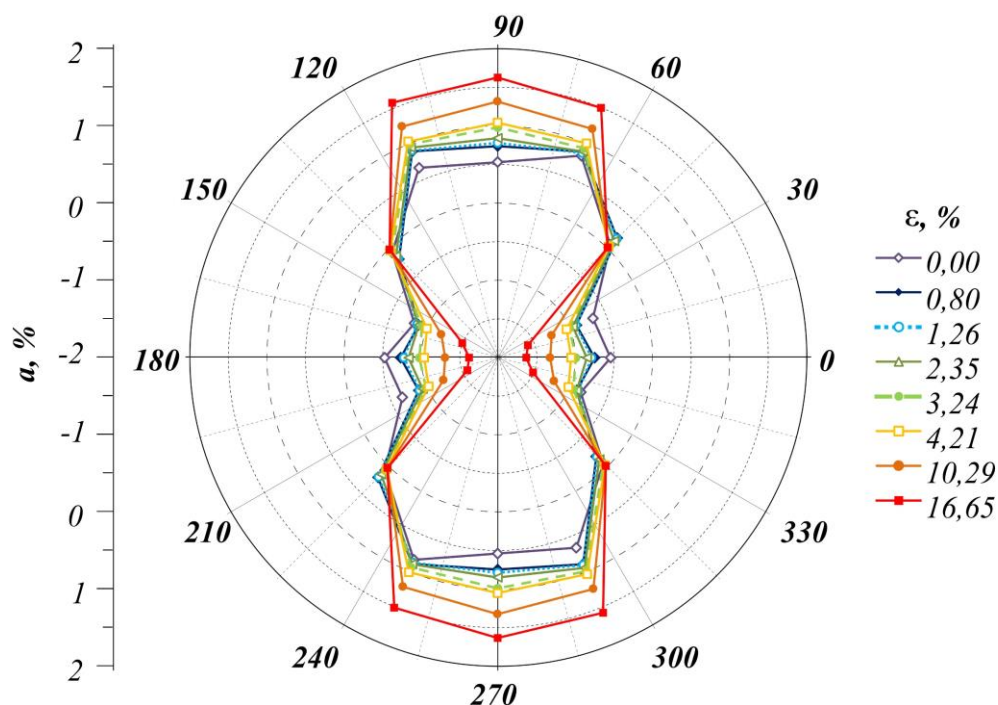


Рис. 5. Угловые диаграммы акустической анизотропии с ростом упруго-пластических деформаций алюминиевого образца партии №1

На рис.6 представлены графики изменения величины акустической анизотропии с ростом деформаций ε^{e-p} для углов $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 67.5^\circ$, $\varphi_3 = 90^\circ$ и $\varphi_4 = 112.5^\circ$. Наибольшие значения деформационно-обусловленной анизотропии наблюдаются для угла $\varphi_3 = 90^\circ$ и равны 1.095%. Максимальные значения анизотропии при углах поворота датчика 67.5° и 112.5° , то есть расположенных симметрично относительно φ_3 с шагом $\Delta\varphi = \pm 22.5^\circ$, составляют 0.671% и 0.911% соответственно. Их отличие может быть вызвано асимметрией напряженного состояния в процессе испытаний, когда растяжение образца осуществляется только с верхнего захвата испытательной машины, в то время как нижний остается неподвижным, представляя собой жесткую заделку.

В то же время для угла $\varphi_1 = 45^\circ$ значения анизотропии не превышают 0.125%, а с ростом деформаций выше уровня $\varepsilon^{e-p} \cdot 100\% \geq 0.8\%$ и вовсе

начинают убывать к величине, близкой к нулю (на рис. 6). Таким образом, при повороте системы ортогональных поперечных волн $\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\}$ на угол $\varphi = 45^\circ$, а также смежные с ним направления, полученные по формулам (7) и (8), параметр акустической анизотропии оказывается нечувствительным к деформациям ε^{e-p} за пределами малых упруго-пластических деформаций ($\varepsilon^{e-p} \cdot 100\% < 1\%$). Это означает, что даже погрешность в пределах $10^\circ \div 20^\circ$ при установке акустического датчика относительно ориентации осей главных напряжений σ_1, σ_2 может привести к большим ошибкам при проведении неразрушающего контроля. Для определения фактической ориентации осей главных напряжений может быть использован подход к построению угловых диаграмм акустической анизотропии a^φ (на рис. 5).

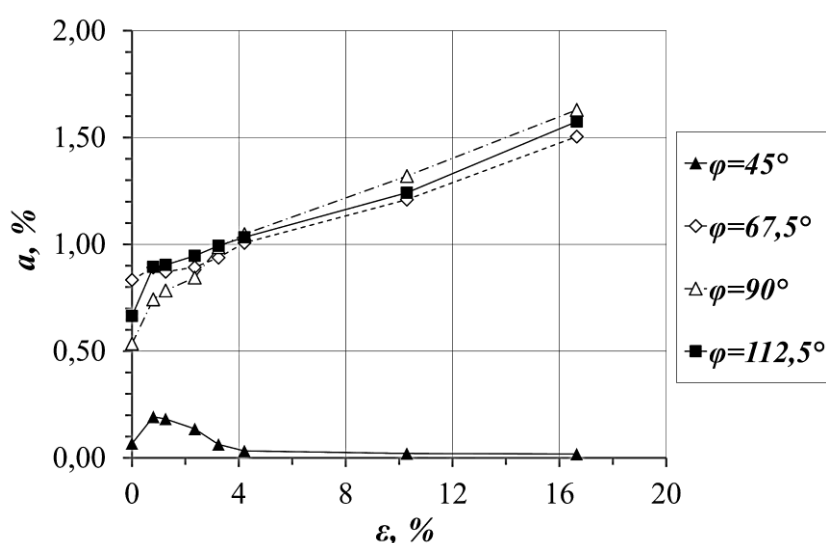


Рис. 6. Акустическая анизотропия для отдельных углов φ поворота системы поперечных волн $\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\}$ в образце партии №1

Результаты акустических измерений при шлифовке поверхности после пластического разрушения

Исследования влияния повреждений на акустическую анизотропию проводились на образце партии №2 после разгрузки в результате пластического разрушения (разрыва). Было размечено $n = 8$ участков, расположенных на расстоянии $l = 24$ мм друг от друга (на рис.7). Толщина образца до нагружения составляла в среднем величину $\bar{h}_0 = 20.5$ мм. После разрушения наблюдалось монотонное убывание толщины от $h_1 = 20.4$ мм в точке №1 до $h_1 = 16.8$ мм в точке №7.

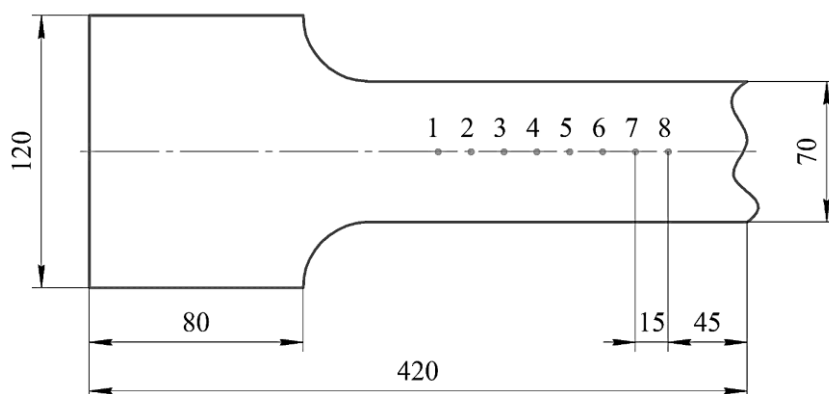


Рис. 7. Схема расположения исследуемых точек в образце партии №2 после разрушения

Были получены угловые диаграммы параметра акустической анизотропии для углов поворота ультразвукового датчика на $\varphi = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ$ и 157.5° при его последовательном перемещении от точки №1, расположенной у галтельного перехода в месте закрепления образца захватами испытательной машины, до точки №8 вблизи места разрушения (на рис.7). На рис.8 представлены диаграммы без симметричного отражения из предположения $a^{\Delta\varphi} = a^{\Delta\varphi+180^\circ}$.

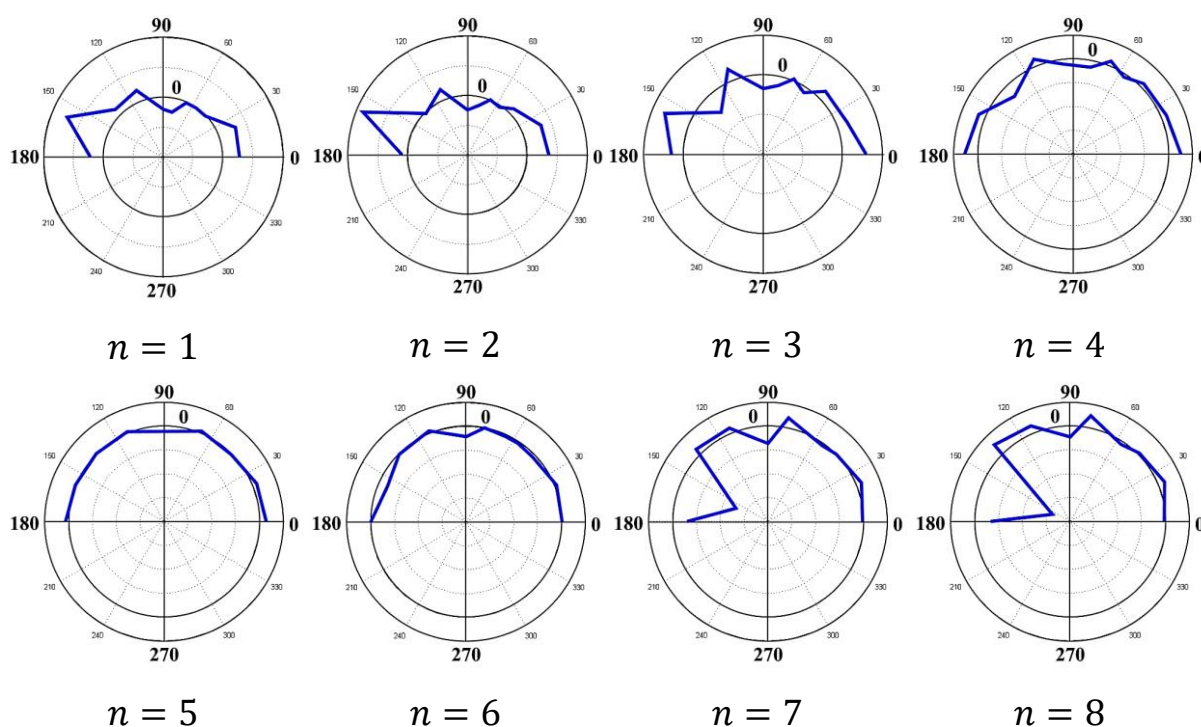


Рис. 8. Диаграммы акустической анизотропии в $n = 8$ точках образца партии №2 после разрушения

Были проведены опыты по шлифовке алюминиевого образца, при этом на каждом этапе шлифовки в точках 1-7 рассчитывались линейные распределения акустической анизотропии, а в точке №5 строились угловые диаграммы. Всего было проведено 8 этапов шлифовки с одной стороны образца. Средняя толщина $\overline{\Delta h}$ удаленного слоя на 8 этапах составила 65, 140, 220, 275, 440, 570, 670 и 690 микрон соответственно. Линейные распределения акустической анизотропии в точках вдоль оси образца после этапов 1-4 и этапов 5-8 шлифования образца представлены на рис. 9 и рис. 10.

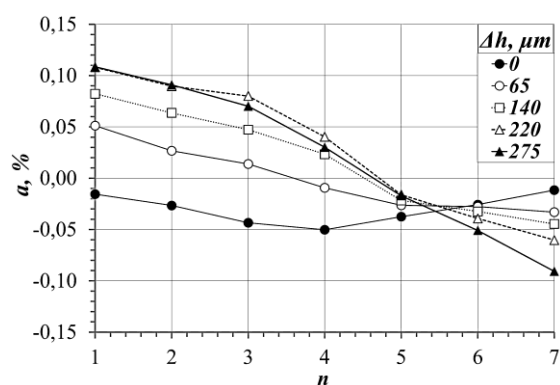


Рис. 9. Акустическая анизотропия в образце партии №2 после 1-4 этапов шлифования

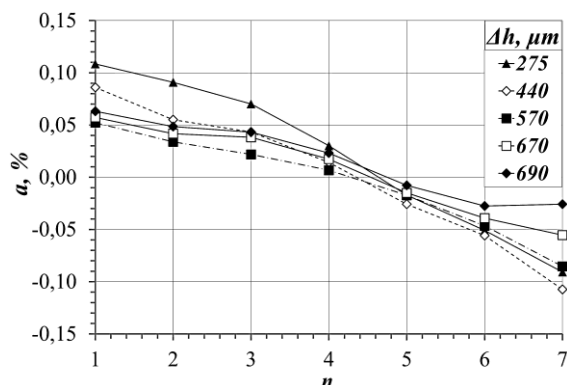


Рис. 10. Акустическая анизотропия в образце партии №2 после 4-8 этапов шлифования

График изменения величины акустической анизотропии в точках 1-5 образца в зависимости от толщины сошлифованного поверхностного слоя представлен на рис. 11.

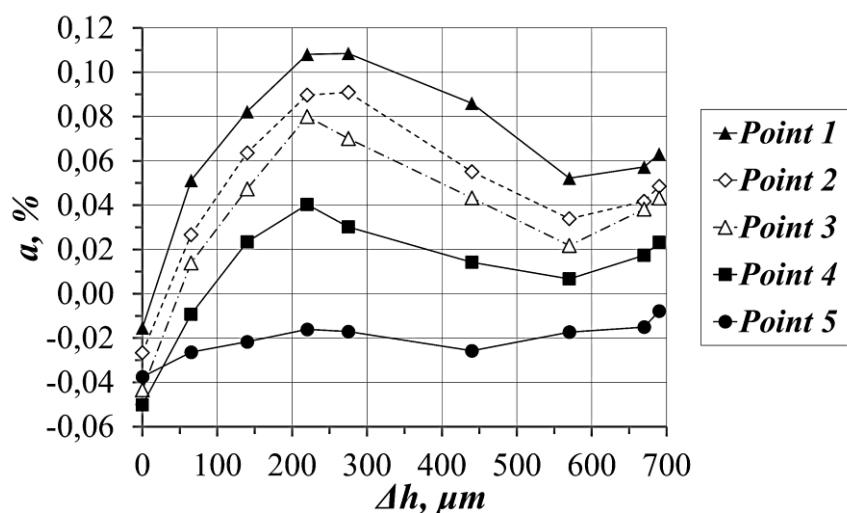


Рис. 11. Зависимость анизотропии от толщины сошлифованного слоя в точках 1-5 образца партии №2

На рис. 12 представлено семейство угловых диаграмм акустической анизотропии, построенное по результатам измерений в точке 5 на расстоянии 75 мм от места разрыва до испытаний, а также на этапах №2, 4, 6 и 8 шлифовки образца.

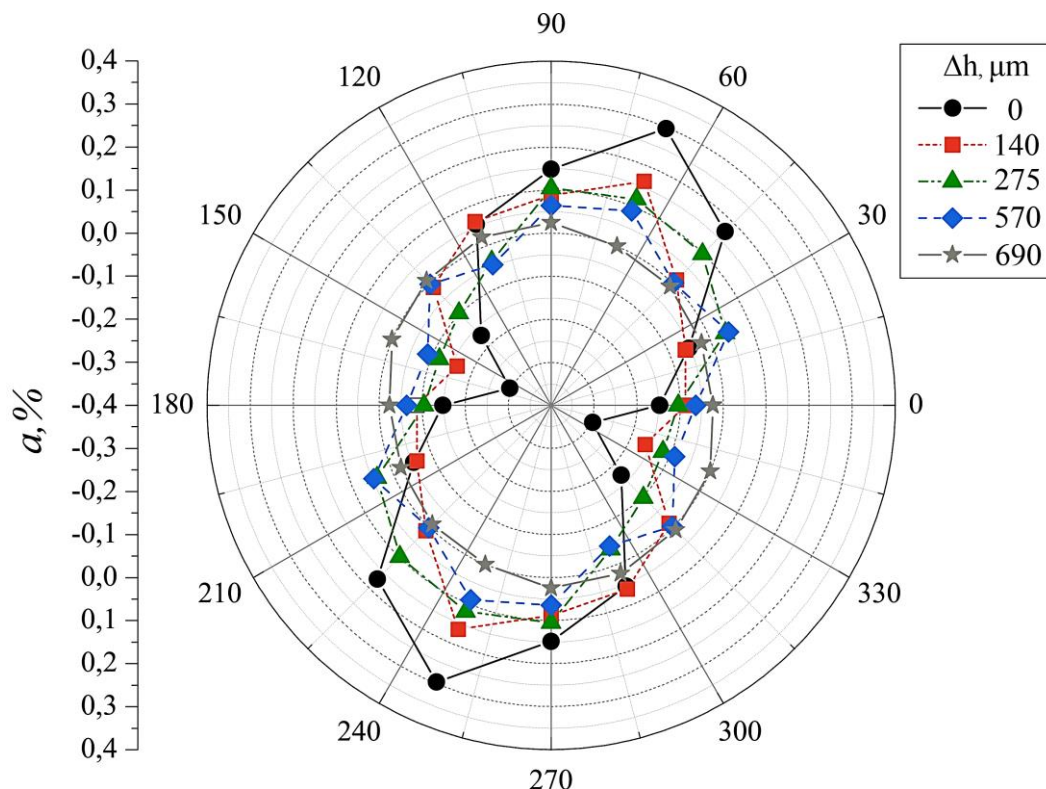


Рис. 12. Угловые диаграммы акустической анизотропии в точке №5 до и после 2,4,6 и 8-го этапов шлифования образца партии №2

Обсуждение

Исходя из вида диаграмм на рис.5 можно сделать вывод о том, что характер углового распределения акустической анизотропии a^φ определяется эффектом от начальной анизотропии упругих модулей. На него накладывается эффект деформационно-обусловленной анизотропии, вызванный упруго-пластическими деформациями ε^{e-p} образца. В случае алюминиевого проката эти два эффекта оказываются сопоставимы между собой по абсолютной величине (на рис.6). Построение угловых диаграмм при $\varepsilon^{e-p} = 0\%$ (на рис.5) позволяет установить ориентацию осей анизотропии материала и избежать ошибок при определении величины начальной (собственной) акустической анизотропии металла в соответствии со стандартами [19,20].

Можно видеть, как в уже разрушенном и разгруженном образце при переходе от одного участка измерений к другому (слева направо на рис.8) наблюдается эволюция угловых диаграмм с образованием характерных

изломов, предположительно вызванных влиянием накопленных в результате пластического разрушения повреждений.

На основании распределений на рис.9 и на рис.10 можно сделать вывод о том, что послойное удаление поврежденного поверхностного слоя приводит к неодинаковому изменению акустической анизотропии на различных участках образца не только по величине, но и по знаку, а также о смене характера распределения акустической анизотропии по всему образцу. Так, на этапах 1-4 приращение $\Delta a > 0$ наблюдается в точках №1-4 ($\Delta a \cong +0.13\%$ по величине), в то время как между точками №5 и №6 имеется участок, на котором происходит убывание величины акустической анизотропии $\Delta a < 0$ (в самих точках №5 и 6 $\Delta a \cong \pm 0.03\%$). Смена тренда Δa наступает на этапах 5-8 шлифования, причем сразу по всему образцу ($\Delta a < 0$ становится в точках №1-4 и, наоборот, $\Delta a > 0$ в точках №5-7). Таким образом, влияние поврежденного слоя на величину $a, \%$ оказывается неоднозначным, это видно по разности значений акустической анизотропии для фиксированных n точек на рис.9 и рис.10.

Влияние повреждений на акустическую анизотропию по мере удаления поверхностного слоя сверх определенной толщины (предположительно, коррелирующей со средним размером зерна металла) имеет затухающий характер. Так, если на этапах 1-3 шлифовки при среднем значении удаленного слоя $\overline{\Delta h_{1-3}} = 220$ микрон максимальное изменение составило $|\Delta a_{\max 1-3}| = 0.124\%$, то после удаления дополнительных $\overline{\Delta h_{4-8}} = 470$ микрон поверхности изменение акустической анизотропии оказалось равным только $|\Delta a_{\max 4-8}| = 0.058\%$.

Характер затухания эффекта по мере удаления поверхностного слоя (на рис.11) имеет осциллирующий вид, который качественно сохраняется, однако меняет свою амплитуду при приближении к месту разрыва образца (на рис.7) при движении от точки 1 к точке 5.

В результате шлифования меняется характер угловых диаграмм акустической анизотропии. На рис.12 видно, что изменяется не только размер и форма, но и ориентация угловых диаграмм в одной и той же области материала, а именно происходит “разворот” в положение, соосное с осями анизотропии механических свойств материала. В результате этапе 8 шлифовки (690 микрон удаленного слоя) устанавливается эллиптическая форма диаграммы (на рис.12), обусловленная влиянием текстурирования материала – как начального, так и приобретенного в ходе пластической деформации.

Смена характера угловых диаграмм вызвана ослаблением влияния поврежденного слоя металла. Стабилизация формы и размеров диаграмм в результате шлифовки может являться диагностическим признаком того, что поврежденный поверхностный слой более не оказывает существенного влияния на результаты измерений акустической анизотропии. При этом изменение величины параметра акустической анизотропии относительно

своего начального уровня при шлифовании поверхностного слоя металла является признаком накопленной поврежденности в процессе деформации. Удаление 200-300 микрон поверхностного слоя металла не оказывает существенного влияния на несущую способность конструкций ввиду малой глубины шлифования. В ряде случаев очистка и шлифовка поверхности являются необходимыми условиями при проведении ультразвукового контроля.

Заключение

В работе был рассмотрен подход к построению угловых диаграмм акустической анизотропии. Он позволил установить ориентацию осей анизотропии материала в случае металлического проката, определить направления действия максимальных напряжений и установить характер анизотропии механических свойств.

Был сделан вывод о том, что характер угловых диаграмм акустической анизотропии определяется начальной анизотропией упругих модулей, величиной деформационно-обусловленной анизотропии поперечных волн, а также степенью поврежденности металла.

Стабилизация формы и размеров угловых диаграмм в результате послойной шлифовки поверхностного слоя на глубину нескольких размеров зерна может являться диагностическим признаком снижения влияния поверхностных повреждений металла на результаты ультразвуковой диагностики металла по всей его толщине.

Предлагаемый подход позволяет оценивать величину упругих напряжений и пластических деформаций в конструкции без ее разгрузки. Он может быть использован при входном неразрушающем контроле труб, проката, другой металлопродукции, а также материалов, имеющих ориентированную внутреннюю структуру. Требованием к его реализации является обеспечение качества контакта пьезопреобразователей с поверхностью образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. 51, pp. 171–178. <https://doi.org/10.1134/S1061830915030079>
- [2] Benson R.W., Raelson V.J. Acoustoelasticity. Production Engineering. 1959. 30(29), pp. 56-59.
- [3] Green G. An Essay on the Determination of the Exterior and Interior attractions of Ellipsoids of Variable Densities. Mathematical Papers of George Green, New York, Chelsea. 1828.

- [4] Brillouin L. Sur les tensions de radiation. *Annales de Physique*. 1925. 10(4), pp. 528-586. <https://doi.org/10.1051/anphys/192510040528>
- [5] Bridgman P. W. The effect of pressure on the rigidity of several metals. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, American Academy of Arts & Sciences*. 1929. 64(3), pp. 39-49. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674287822.c28>
- [6] Birch F. The effect of pressure on the modulus of rigidity of several metals and glasses. *Journal of Applied Physics*. 1937. 8(2), pp. 129-133. <https://doi.org/10.1063/1.1710264>
- [7] Murnaghan F. D. Finite deformations of an elastic solid. *American Journal of Mathematics*. 1937. 59(2), pp. 235-260. <https://doi.org/10.2307/2371405>
- [8] Birch F. The effect of pressure upon the elastic parameters of isotropic solids, according to Murnaghan's theory of finite strain. *Journal of Applied Physics*. 1938. 9(4), pp. 279-288. <https://doi.org/10.1063/1.1710417>
- [9] Hughes D.S., Kelly J.L. Second-order elastic deformation of solids. *Physical Review*. 1953. 92(5), pp. 1145-1149. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145>
- [10] Toupin R. A., Bernstein B. Sound waves in deformed perfectly elastic materials. Acoustoelastic effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1961. 33(2), pp. 216-225. <https://doi.org/10.1121/1.1908623>
- [11] Truesdell C. General and exact theory of waves in finite elastic strain. *Archive for rational mechanics and analysis*. 1961. 8(1), pp. 263-296. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88691-1_5
- [12] Smith R.T. Stress-induced anisotropy in solids – the acousto-elastic effect. *Ultrasonics*. 1963. 1(3), pp. 135-147. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(63\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(63)90003-9)
- [13] Crecraft D. I. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. *Journal of Sound and Vibration*. 1967. 5(1), pp. 173-192. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(67\)90186-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90186-1)
- [14] Tokuoka T., Saito M. Elastic wave propagations and acoustical birefringence in stressed crystals. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1969. 45(5), pp. 1241-1246. <https://doi.org/10.1121/1.1911595>
- [15] Iwashimizu Y., Kubomura K. Stress-induced rotation of polarization directions of elastic waves in slightly anisotropic materials. *International Journal of Solids and Structures*. 1973. 9(1), pp. 99-114. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(73\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0020-7683(73)90035-8)
- [16] Okada K. Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*. 1980. 1(3), pp. 193-200. <https://doi.org/10.1250/ast.1.193>
- [17] Fukuoka H., Toda H., Naka H. Nondestructive residual-stress measurement in a wide-flanged rolled beam by acoustoelasticity. *Experimental Mechanics*. 1983. 23(1), pp. 120-128. <https://doi.org/10.1007/BF02328690>

- [18] Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАН. 2005. 208 с.
- [19] ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. Москва: Стандартинформ. 2007.
- [20] ГОСТ Р 52890-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. Москва: Стандартинформ. 2008.
- [21] Nikitina N.E., Kazachek S.V. Theoretical and experimental study of stress concentration during stretching of a plate with a cut. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2008. 37, pp. 38–41. <https://doi.org/10.1007/s12001-008-1009-9>
- [22] Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2009. 45, pp. 861–866. <https://doi.org/10.1134/S1061830909120043>
- [23] Vatul'yan A.O. The theory of inverse problems in the linear mechanics of a deformable solid. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2010. 74(6), pp. 648–653. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2011.01.004>
- [24] Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A. et al. Ultrasonic Sensing Method for Evaluating the Limit State of Metal Structures Associated with the Onset of Plastic Deformation. *Physical Mesomechanics*. 2020. 23, pp. 241–245. <https://doi.org/10.1134/S102995992003008X>
- [25] Курашкин К. В. Исследование акустоупругого эффекта в анизотропном пластически деформированном материале. *Акустический журнал*. 2019. 65(3), с. 382-388. <https://doi.org/10.1134/S0320791919030055>
- [26] Kurashkin K.V., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Use of Texture-Dependent Ultrasonic Parameter as Indicator of Degradation of Hot-Rolled Thin-Sheet Steel Under Uniaxial Tension. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2022. 41(2), p. 46. <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00879-w>
- [27] Gonchar A.V., Sergeeva O.A., Kurashkin K.V. Metallographic and ultrasonic studies of fatigue failure of ASTM 1020 steel in the base metal and heat affected zone. *Procedia Structural Integrity*. 2022. 40, pp. 166-170. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.04.022>
- [28] Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Acoustic Birefringence Changes in the Base Metal and Heat Affected Zone of ASTM 1020 Steel under Plastic Deformation and Fatigue. *E3S Web of Conferences*. 2023. 398, pp. 01044. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339801044>
- [29] 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. 51, pp. 210–216. <https://doi.org/10.1134/S1061830915040087>

- [30] Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Uglov A.L., Anosov M.S., Shatagin D.A. Usage of the acoustic method for monitoring of the gaz pipelines stress. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1499, pp. 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1499/1/012044>
- [31] Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A. On the specific features of using the phenomenon of acoustoelasticity when testing the stress state of anisotropic material of technical objects at subzero temperatures. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. 57, pp. 21-30. <https://doi.org/10.1134/S1061830921010083>
- [32] Khlybov A.A., Uglov A.L. On an Acoustic Testing Method for Monitoring the Spatial Inhomogeneity of Plastic Deformation in Weakly Anisotropic Orthotropic Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. 59(1), pp. 22-32. <https://doi.org/10.1134/S1061830923700183>
- [33] Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E. et al. Development of Acoustic Methods of Control of the Stress-Strain State of Threaded Connections. Measurement Techniques. 2018. 61, pp. 297–302. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1424-3>
- [34] Степанова Л.Н., Бехер С.А., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. (7), с. 103-109.
- [35] Муравьев В.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. 82(12), с. 52-57.
- [36] Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В., Булдакова И.В. Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов. Приборы и методы измерений. 2019. 10(1), с. 42-52. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52>
- [37] Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Volkova L.V. et al. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. Additive Manufacturing. 2022. 51, pp. 102-635. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102635>
- [38] Волкова Л.В., Муравьева О.В., Колпаков К.В. Сравнительный анализ акустической анизотропии труб и листов с использованием SH- и TH-волн. Дефектоскопия. 2023. (8), с. 68-70. <https://doi.org/10.31857/S0130308223080092>
- [39] Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Nagovitsyn A.A. Investigation of acoustic parameters of dispersion-hardening corrosion-resistant steel XM-12. AIP Conference Proceedings. 2023. 2605(1), pp. 020021. <https://doi.org/10.1063/5.0122757>
- [40] Castellano A., Foti P., Fraddosio A., Marzano S., Paparella F., Piccioni M. D. Monitoring applied and residual stress in materials and structures by non-

- destructive acoustoelastic techniques. 2016 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). IEEE. 2016. pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EESMS.2016.7504830>
- [41] Castellano A., Fraddosio A., Marzano S., Piccioni M. D. Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect. *Procedia engineering*. 2017. 199, pp. 1519-1526. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.494>
- [42] Ivanova Y., Partalin T., Pashkuleva D. Acoustic investigations of the steel samples deformation during the tensile. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. 53(1), pp. 39-50. <https://doi.org/10.1134/S1061830917010077>
- [43] Ivanova Y. Non-destructive monitoring of tensile of mild steel samples by magnetic Barkhausen and ultrasonic methods. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 145, pp. 05007. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814505007>
- [44] Johnson G. C. Acoustoelastic theory for elastic–plastic materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1981. 70(2), pp. 591-595. <https://doi.org/10.1121/1.386748>
- [45] Hirao M., Pao Y. H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam. *The Journal of the Acoustical society of America*. 1985. 77(5), pp. 1659-1664. <https://doi.org/10.1121/1.391964>
- [46] Kobayashi M. Theoretical study of acoustoelastic effects caused by plastic anisotropy growth. *International Journal of Plasticity*. 1987. 3(1), pp. 1-20. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(87\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0749-6419(87)90014-3)
- [47] Alhimenko A. A., Belyaev A. K., Grishchenko A. I., Semenov A. S., Tretyakov D. A., Polyanskiy V. A., Yakovlev Y. A. Propagation of acoustic waves during the control of hydrogen-induced destruction of metals by the acoustoelastic effect. 2018 Days on Diffraction (DD), IEEE. 2018. pp. 11-16. <https://doi.org/10.1109/DD.2018.8553151>
- [48] Tretyakov D. A., Belyaev A. K. Surface effect of acoustic anisotropy during plastic deformation of metals. *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing. 2019. 2176(1), pp. 020011. <https://doi.org/10.1063/1.5135123>
- [49] Belyaev A.K., Galyautdinova A.R., Tretyakov D.A. Acoustoelastic Effect During Plastic Deformation of Anisotropic Metals. *International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics”*, Cham: Springer International Publishing. 2020. pp. 296-302. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92144-6_23
- [50] Третьяков Д. А. Акустическая анизотропия на различных стадиях деформационного процесса в металлах. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2020. 1, с. 43-56. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2020.1.043-056>
- [51] Semukhin B. S., Zuev L. B., Bushmeleva K. I. The velocity of ultrasound in low-carbon steel deformed at the low yield limit. *Journal of applied*

- mechanics and technical physics. 2000. 41(3), pp. 556-559.
<https://doi.org/10.1007/BF02465311>
- [52] Гузь А.Н., Махорт Ф. Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка. 1977. С. 148.
- [53] 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. 46, pp. 752–756.
<https://doi.org/10.3103/S0967091216100077>
- [54] Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Nonuniformity of acoustic anisotropy of thick-sheet steel. Steel in Translation. 2021. 51, pp. 335-341.
<https://doi.org/10.3103/S0967091221050120>
- [55] Прибор для измерения механических напряжений ИИ-5101А. Руководство по эксплуатации. ИНКО.468160.008 РЭ. Нижний Новгород: ООО “ИНКОТЕС”. 2022. 59 с.

D.A. Tretyakov, D.B. Kuatkina

NON-DESTRUCTIVE ULTRASONIC TESTING OF ELASTO- PLASTIC DEFORMATIONS IN ALUMINUM BY MEASURING THE ACOUSTOELASTIC EFFECT

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The work is devoted to experimental study of the acoustoelastic effect during elasto-plastic deformation of aluminum specimens with initial anisotropy of elastic properties. The approach to determining directions of transverse waves polarization in case of unknown directions of principal stress axes and anisotropy of mechanical properties was proposed. It is based on analysis of angular diagrams of acoustic anisotropy parameter. It was found that shape of angular diagrams is determined by material damage. The approach can be used in incoming non-destructive testing of pipelines, steam generators, and different materials with oriented internal structure.

Key words: non-destructive testing, acoustoelasticity, acoustic anisotropy, ultrasound, plastic deformation, destruction.

REFERENCES

- [1] Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. 51, pp. 171–178.
<https://doi.org/10.1134/S1061830915030079>

- [2] Benson R.W., Raelson V.J. Acoustoelasticity. *Production Engineering*. 1959. 30(29) pp. 56-59.
- [3] Green G. An Essay on the Determination of the Exterior and Interior attractions of Ellipsoids of Variable Densities. *Mathematical Papers of George Green*, New York, Chelsea. 1828.
- [4] Brillouin L. Sur les tensions de radiation. *Annales de Physique*. 1925. 10(4), pp. 528-586. <https://doi.org/10.1051/anphys/192510040528>
- [5] Bridgman P. W. The effect of pressure on the rigidity of several metals. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, American Academy of Arts & Sciences*. 1929. 64(3), pp. 39-49. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674287822.c28>
- [6] Birch F. The effect of pressure on the modulus of rigidity of several metals and glasses. *Journal of Applied Physics*. 1937. 8(2), pp. 129-133. <https://doi.org/10.1063/1.1710264>
- [7] Murnaghan F. D. Finite deformations of an elastic solid. *American Journal of Mathematics*. 1937. 59(2), pp. 235-260. <https://doi.org/10.2307/2371405>
- [8] Birch F. The effect of pressure upon the elastic parameters of isotropic solids, according to Murnaghan's theory of finite strain. *Journal of Applied Physics*. 1938. 9(4), pp. 279-288. <https://doi.org/10.1063/1.1710417>
- [9] Hughes D.S., Kelly J.L. Second-order elastic deformation of solids. *Physical Review*. 1953. 92(5), pp. 1145-1149. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145>
- [10] Toupin R. A., Bernstein B. Sound waves in deformed perfectly elastic materials. Acoustoelastic effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1961. 33(2), pp. 216-225. <https://doi.org/10.1121/1.1908623>
- [11] Truesdell C. General and exact theory of waves in finite elastic strain. *Archive for rational mechanics and analysis*. 1961. 8(1), pp. 263-296. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88691-1_5
- [12] Smith R.T. Stress-induced anisotropy in solids – the acousto-elastic effect. *Ultrasonics*. 1963. 1(3), pp. 135-147. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(63\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(63)90003-9)
- [13] Crecraft D. I. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. *Journal of Sound and Vibration*. 1967. 5(1), pp. 173-192. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(67\)90186-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90186-1)
- [14] Tokuoka T., Saito M. Elastic wave propagations and acoustical birefringence in stressed crystals. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1969. 45(5), pp. 1241-1246. <https://doi.org/10.1121/1.1911595>
- [15] Iwashimizu Y., Kubomura K. Stress-induced rotation of polarization directions of elastic waves in slightly anisotropic materials. *International Journal of Solids and Structures*. 1973. 9(1), pp. 99-114. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(73\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0020-7683(73)90035-8)

- [16] Okada K. Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*. 1980. 1(3), pp. 193-200. <https://doi.org/10.1250/ast.1.193>
- [17] Fukuoka H., Toda H., Naka H. Nondestructive residual-stress measurement in a wide-flanged rolled beam by acoustoelasticity. *Experimental Mechanics*. 1983. 23(1), pp. 120-128. <https://doi.org/10.1007/BF02328690>
- [18] Nikitina N. E. Acoustoelasticity. Practical application experience. N. Novgorod: TALAM. 2005. p. 208. (rus)
- [19] GOST R 52731-2007. Non-destructive testing. Stress evaluation by ultrasound. General requirements. Moscow: Standartinform. 2007. (rus.)
- [20] GOST R 52890-2007. Non-destructive testing. Evaluation of stresses in material of pipelines by ultrasound method. General requirements. Moscow: Standartinform. 2007. (rus.)
- [21] Nikitina N.E., Kazachek S.V. Theoretical and experimental study of stress concentration during stretching of a plate with a cut. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2008. 37, pp. 38–41. <https://doi.org/10.1007/s12001-008-1009-9>
- [22] Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2009. 45, pp. 861–866. <https://doi.org/10.1134/S1061830909120043>
- [23] Vatul'yan A.O. The theory of inverse problems in the linear mechanics of a deformable solid. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2010. 74(6), pp. 648–653. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2011.01.004>
- [24] Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A. et al. Ultrasonic Sensing Method for Evaluating the Limit State of Metal Structures Associated with the Onset of Plastic Deformation. *Physical Mesomechanics*. 2020. 23, pp. 241–245. <https://doi.org/10.1134/S102995992003008X>
- [25] Kurashkin K.V. Study of the Acoustoelastic Effect in an Anisotropic Plastically Deformed Material. *Physical foundations of technical acoustics*. 2019. 65(3), pp. 316-321. <https://doi.org/10.1134/S1063771019030047>
- [26] Kurashkin K.V., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Use of Texture-Dependent Ultrasonic Parameter as Indicator of Degradation of Hot-Rolled Thin-Sheet Steel Under Uniaxial Tension. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2022. 41(2), p. 46. <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00879-w>
- [27] Gonchar A.V., Sergeeva O.A., Kurashkin K.V. Metallographic and ultrasonic studies of fatigue failure of ASTM 1020 steel in the base metal and heat affected zone. *Procedia Structural Integrity*. 2022. 40, pp. 166-170. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.04.022>
- [28] Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Acoustic Birefringence Changes in the Base Metal and Heat Affected Zone of ASTM 1020 Steel

- under Plastic Deformation and Fatigue. E3S Web of Conferences. 2023. 398, pp. 01044. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339801044>
- [29] 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. 51, pp. 210–216. <https://doi.org/10.1134/S1061830915040087>
- [30] Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Uglov A.L., Anosov M.S., Shatagin D.A. Usage of the acoustic method for monitoring of the gaz pipelines stress. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1499, pp. 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1499/1/012044>
- [31] Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A. On the specific features of using the phenomenon of acoustoelasticity when testing the stress state of anisotropic material of technical objects at subzero temperatures. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. 57, pp. 21-30. <https://doi.org/10.1134/S1061830921010083>
- [32] Khlybov A.A., Uglov A.L. On an Acoustic Testing Method for Monitoring the Spatial Inhomogeneity of Plastic Deformation in Weakly Anisotropic Orthotropic Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. 59(1), pp. 22-32. <https://doi.org/10.1134/S1061830923700183>
- [33] Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E. et al. Development of Acoustic Methods of Control of the Stress-Strain State of Threaded Connections. Measurement Techniques. 2018. 61, pp. 297–302. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1424-3>
- [34] Stepanova L.N., Bekher S.A., Kurbatov A.N., Tenitilov E.S. Studying the stressed state of a rail by acoustoelasticity and tensometry. Izvestiya Vyssikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo. 2013. (7), pp. 103–109. (rus.)
- [35] Murav'ev V.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V. Acousto-Elastic Study of the Internal Stresses in Metal Structures. Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2016. 82(12), pp. 52-57. (rus.)
- [36] Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Buldakova I.V. Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal. Devices and Methods of Measurements. 2019. 10 (1), pp. 42–52. (rus.) <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52>
- [37] Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Volkova L.V. et al. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. Additive Manufacturing. 2022. 51, pp. 102-635. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102635>
- [38] Volkova L.V., Murav'eva O.V., Kolpakov K.V. Comparative analysis of acoustic anisotropy of pipes and sheets using SH- and tH-waves. Defektoskopia. 2023. (8), pp. 68-70. (rus.) <https://doi.org/10.31857/S0130308223080092>

- [39] Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Nagovitsyn A.A. Investigation of acoustic parameters of dispersion-hardening corrosion-resistant steel XM-12. AIP Conference Proceedings. 2023. 2605(1), pp. 020021. <https://doi.org/10.1063/5.0122757>
- [40] Castellano A., Foti P., Fraddosio A., Marzano S., Paparella F., Piccioni M. D. Monitoring applied and residual stress in materials and structures by non-destructive acoustoelastic techniques. 2016 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). IEEE. 2016. pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EESMS.2016.7504830>
- [41] Castellano A., Fraddosio A., Marzano S., Piccioni M. D. Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect. Procedia engineering. 2017. 199, pp. 1519-1526. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.494>
- [42] Ivanova Y., Partalin T., Pashkuleva D. Acoustic investigations of the steel samples deformation during the tensile. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. 53(1), pp. 39-50. <https://doi.org/10.1134/S1061830917010077>
- [43] Ivanova Y. Non-destructive monitoring of tensile of mild steel samples by magnetic Barkhausen and ultrasonic methods. MATEC Web of Conferences. 2018. 145, pp. 05007. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814505007>
- [44] Johnson G. C. Acoustoelastic theory for elastic-plastic materials. The Journal of the Acoustical Society of America. 1981. 70(2), pp. 591-595. <https://doi.org/10.1121/1.386748>
- [45] Hirao M., Pao Y. H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam. The Journal of the Acoustical society of America. 1985. 77(5), pp. 1659-1664. <https://doi.org/10.1121/1.391964>
- [46] Kobayashi M. Theoretical study of acoustoelastic effects caused by plastic anisotropy growth. International Journal of Plasticity. 1987. 3(1), pp. 1-20. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(87\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0749-6419(87)90014-3)
- [47] Alhimenko A. A., Belyaev A. K., Grishchenko A. I., Semenov A. S., Tretyakov D. A., Polyanskiy V. A., Yakovlev Y. A. Propagation of acoustic waves during the control of hydrogen-induced destruction of metals by the acoustoelastic effect. 2018 Days on Diffraction (DD), IEEE. 2018. pp. 11-16. <https://doi.org/10.1109/DD.2018.8553151>
- [48] Tretyakov D. A., Belyaev A. K. Surface effect of acoustic anisotropy during plastic deformation of metals. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing. 2019. 2176(1), pp. 020011. <https://doi.org/10.1063/1.5135123>
- [49] Belyaev A.K., Galyautdinova A.R., Tretyakov D.A. Acoustoelastic Effect During Plastic Deformation of Anisotropic Metals. International Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics", Cham: Springer International Publishing. 2020. pp. 296-302. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92144-6_23

- [50] Tretyakov D. A. Acoustic anisotropy at different stages of the deformation process in metals. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2020. 1, pp. 43-56. (rus.) <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2020.1.043-056>
- [51] Semukhin B. S., Zuev L. B., Bushmeleva K. I. The velocity of ultrasound in low-carbon steel deformed at the low yield limit. *Journal of applied mechanics and technical physics*. 2000. 41(3), pp. 556-559. <https://doi.org/10.1007/BF02465311>
- [52] Guz A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I. Introduction to acoustoelasticity. *Kiev: Naukova Dumka*; 1977. p. 148. (rus.)
- [53] 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. 46, pp. 752–756. <https://doi.org/10.3103/S0967091216100077>
- [54] Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Nonuniformity of acoustic anisotropy of thick-sheet steel. *Steel in Translation*. 2021. 51, pp. 335-341. <https://doi.org/10.3103/S0967091221050120>
- [55] Instrument for measuring mechanical stress IN-5101A. Manual. INKO.468160.008. Nizhny Novgorod: INCOTES. 2022. p. 59. (rus.)