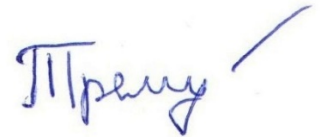


На правах рукописи



Третьяков Дмитрий Алексеевич

АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С НАКОПЛЕННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТЬЮ И ОСТАТОЧНЫМИ
ПЛАСТИЧЕСКИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

Специальность 1.1.8 –
Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2023

Работа выполнена: ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого

Научный руководитель: **Беляев Александр Константинович**,
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., директор
Высшей школы механики и процессов
управления Санкт-Петербургского
политехнического университета Петра
Великого

Официальные оппоненты: **Плехов Олег Анатольевич**,
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., директор
ФГБУН Пермский федеральный
исследовательский центр Уральского
отделения Российской академии наук

Беркутов Игорь Владимирович,
к.т.н., доцент Факультета систем управления
и робототехники ФГАОУ ВО Национальный
исследовательский университет ИТМО

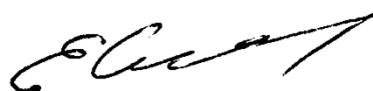
Ведущая организация: Институт проблем машиностроения
Российской академии наук – филиал
Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики им. А.В. Гапонова-
Грехова Российской академии наук»

Защита состоится «28» ноября 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС 24.1.097.01 на базе ФГБУН Институт проблем машиноведения Российской академии наук по адресу: 199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ФГБУН Институт проблем машиноведения Российской академии наук и на сайте института по адресу <https://ipme.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.097.01,
доктор технических наук



Е.Б. Седакова

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы. Возникновение пластических деформаций и развитие микродефектов оказывают влияние на прочностные характеристики металлов, вызывают деградацию их механических свойств на макроуровне и зачастую являются предвестниками близкого разрушения. Их своевременное обнаружение является условием для обеспечения безопасной эксплуатации промышленных узлов и агрегатов.

Существуют различные подходы к диагностике текущего состояния металлов. В настоящее время активно развиваются технологии акустического неразрушающего контроля, в частности, в последние десятилетия получили распространение методы акустической тензометрии. Они используются для определения напряженно-деформированного состояния деталей машин и элементов конструкций на производстве. В основе ряда таких методов лежит исследование анизотропного характера распространения упругих продольных и поперечных волн в среде. Наблюдаемая экспериментально акустическая анизотропия ультразвуковых волн, вызванная наличием внутренних напряжений, получила название акустоупругого эффекта. Он был предсказан теоретически в работах Г. Грина и Л. Бриллюэна и экспериментально обнаружен в металлах и горных породах П. Бриджменом и Ф. Берчем. Его физическое объяснение было построено на основе нелинейно-упругого материала с использованием упругого потенциала Ф. Мурнагана. Более поздние модификации данной модели связаны с работами таких ученых, как М. Био, Д. Хьюз и Дж. Келли, Р. Тупин и Б. Бернштейн, К. Трусделл, Т. Токуока и М. Сайто, Ю. Ивашимидзу, К. Окада, Х. Фукуока и других. Количественное определение акустической анизотропии связано с нахождением величины относительной разности скоростей плоско поляризованных поперечных волн взаимно ортогональной поляризации. Предложенный Р. Бенсоном и В. Рилсоном способ оценки главных напряжений посредством акустоупругих измерений для одноосного и двухосного напряженного состояния нашел развитие при решении задач технической диагностики. Результаты в области неразрушающего контроля были получены отечественными научными группами под руководством и при участии В.М. Бобренко и И.И. Авербуха, Г.А. Буденкова и Ж.Г. Никифорова, А.О. Ватульяна, Н.Е. Никитиной, В.И. Ерофеева, В.В. Мишакина и А.В. Гончара, А.Л. Углова и А.А. Хлыбова, А.В. Федорова и В.А. Быченка, А.А. Карабутова, В.В. Муравьева, Л.Н. Степановой, А.И. Трофимова и С.И. Минина и ряда других исследователей.

В классических моделях акустоупругости предполагается, что вызванная наличием упругих напряжений и деформаций анизотропия упругих волн на порядок величины превосходит воздействие других факторов, например, деформационной микроструктуры материала. Для учета влияния начальной текстуры и малых пластических деформаций Г. Джонсоном, М. Хирао и Ю. Пао, М. Кобаяши и другими авторами были разработаны модели слабо-анизотропного нелинейно-упругого материала и модели нелинейно-упруго-пластического материала с упрочнением, объединенные под общим названием акустопластичности. Эксперименты в металлах с начальной анизотропией упругих модулей, к числу которых относится промышленный прокат, выявили значительно большее влияние текстуры и пластических деформаций на акустическую анизотропию упругих волн, нежели предполагалось ранее, что было показано в работах Л.Б. Зуева и Н.Е. Никитиной. Разработанные под руководством В.И. Ерофеева, В.В. Мишакина скалярные модели

акустоповрежденности позволили описать нелинейные эффекты, возникающие при распространении волн в изотропно поврежденной среде. В них поврежденность вводится как математическая мера близости материала к разрушению и связана с микропластическими деформациями, дисперсией упругих волн и другими характеристиками среды. Тем не менее, остается актуальной задача исследования акустической анизотропии при больших упруго-пластических деформациях металлов с ненулевой начальной анизотропией, для которых характерен анизотропный характер накопления поврежденности в процессе монотонного или циклического нагружения.

Целью работы является исследование акустической анизотропии металлов при упруго-пластической деформации с учетом начальной анизотропии и приобретенной анизотропной поврежденности в рамках континуального подхода.

Основными задачами работы являются:

1. Описание влияния неоднородной начальной анизотропии упругих модулей, локализации больших пластических деформаций и накопленной в процессе нагружения поврежденности на величину акустической анизотропии металлического проката.
2. Определение связи между мерами тензора поврежденности второго ранга, скоростями упругих волн в поврежденном и неповрежденном материале и акустической анизотропией в рамках уравнений континуальной механики разрушения.
3. Разработка экспериментального способа определения пластических деформаций и поврежденности в деталях машин и элементах конструкций на основании результатов измерений акустической анизотропии.

Методы исследования. При исследовании акустической анизотропии металлического проката использовались методы ультразвукового неразрушающего контроля. Для установления связи между акустическими характеристиками материала и поврежденностью использовались подходы континуальной механики разрушения. Разработка способа определения пластических деформаций осуществлялась с учетом действующих методик измерений акустоупругости, используемых при акустической тензометрии деталей машин и элементов конструкций.

Научная новизна.

1. Обнаружено значительное влияние поверхностных повреждений на акустическую анизотропию при измерениях в промышленном прокате. Удаление поверхностных и подповерхностных слоев металла приводит к кратному снижению акустической анизотропии, приобретенной в процессе деформирования.
2. Установлена связь между главными значениями тензора поврежденности и акустической анизотропией. Использование модели анизотропной континуальной поврежденности позволяет количественно оценить объемную плотность дефектов по результатам контрольных измерений скоростей ультразвуковых волн в неповрежденном и поврежденном материале. В предположении однонаправленно и двунаправленно ориентированных поверхностных микротрещин были получены приближенные оценки акустической анизотропии на основании расчетных данных о поврежденности материала.

3. Разработан способ определения вклада пластических деформаций в величину акустической анизотропии при измерении в деталях машин и элементах конструкций. В его основе лежит алгоритм циклического сравнения значений акустической анизотропии при шлифовании металла. Механическое удаление поверхностных и подповерхностных слоев толщиной порядка 2-3 характерных размеров зерна позволяет снизить влияние поверхностной поврежденности на результаты ультразвуковых измерений, что может быть использовано для повышения точности прогнозов остаточного ресурса и результатов акустической тензометрии при проведении текущего неразрушающего контроля деталей машин и элементов конструкции посредством акустоупругих измерений. Построение угловых диаграмм акустической анизотропии дает возможность проанализировать характер накопленной анизотропной поврежденности металла.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты позволяют проводить количественную оценку накопленной поврежденности по результатам ультразвуковых измерений акустической анизотропии. Это имеет практическую ценность, поскольку в настоящее время уже разработано серийное оборудование, применяемое для промышленных измерений акустической анизотропии. Прямая оценка поврежденности металла позволяет спрогнозировать его остаточный ресурс, тем самым обеспечив безопасное функционирование ответственных конструкций на производстве. Подход к построению угловых диаграмм акустической анизотропии может быть использован для экспериментального определения осей анизотропии и направления действия максимальных напряжений в конструкции, что актуально при наличии сварных швов, технических отверстий, иных концентраторов напряжений. Разработанный способ определения величины пластических деформаций металла позволяет дополнить существующие методики акустоупругих измерений и расширить область их практического применения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования влияния поврежденного поверхностного слоя на величину акустической анизотропии взаимно ортогонально поляризованных поперечных волн, распространяющихся в металле перпендикулярно диагностируемой поверхности.
2. Математическая модель, связывающая главные значения тензора поврежденности с акустической анизотропией материала с однонаправленно и двунаправленно ориентированными поверхностными микротрещинами.
3. Результаты применения экспериментального подхода к определению ориентации осей анизотропии, направления действия максимальных напряжений и установлению характера анизотропной поврежденности путем построения угловых диаграмм акустической анизотропии в случае металлического проката.
4. Способ определения вклада пластической деформации в величину акустической анизотропии при измерении в деталях машин и элементах конструкции.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием специализированного оборудования при проведении измерений, строгостью математического аппарата, корректностью постановки задачи определения анизотропной поврежденности с

использованием элементов тензорного анализа, адекватностью физических представлений о наблюдаемых явлениях при изучении акустической анизотропии металлов и воспроизводимостью результатов экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на ежегодных международных школах-конференциях «Advanced Problems in Mechanics» (г. Санкт-Петербург, 2019-2021 гг.); ежегодных научно-практических конференциях с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (г. Санкт-Петербург, 2015-2018 гг.); ежегодных международных конференциях «Days on Diffraction» (г. Санкт-Петербург, 2017-2018 гг.); IV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов АО КБСМ «Старт в будущее» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); международной научно-технической конференции «International Conference on Industrial Engineering» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); II Всероссийской акустической конференции (г. Нижний Новгород, 2017 г.); XXVII международной конференции «Mathematical and computer simulation in mechanics of solids and structures» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 2017 г.); международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2019 гг.); XXXI международной конференции по проблемам машиноведения «МИКМУС» (г. Москва, 2019 г.); I международной научной конференции «Corrosion in the Oil and Gas Industry» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); XIII Всероссийском форуме «Наука и инновации в технических университетах» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Уфа, 2019 г.); XXII Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2021 г.).

В полном объеме работа докладывалась на городском семинаре по механике ИПМаш РАН, основанном д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Д.А. Индейцевым, и семинаре Высшей школы механики и процессов управления СПбПУ под руководством д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН А.К. Беляева. Результаты исследований были отмечены медалью Российской академии наук с премиями для молодых ученых в 2018 году.

Публикации по теме диссертации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 20 работах [1-20], в том числе в 3 работах в изданиях, рекомендованных ВАК РФ [1-3], в 8 работах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science [4-11] и в 1 патенте на изобретение [12].

Личный вклад соискателя. Все результаты, которые выносятся на защиту, получены соискателем лично. Автором работы были проведены ультразвуковые опыты в стали и алюминии, обнаружен эффект влияния поврежденного поверхностного слоя на акустическую анизотропию в промышленном прокате, получены аналитически и верифицированы экспериментально уравнения, связывающие главные значения тензора поврежденности со скоростями ультразвуковых волн и акустической анизотропией, предложен алгоритм определения вклада пластических деформаций в величину акустической анизотропии при измерениях в деталях машин и элементах конструкций, проведен обзор существующих подходов к изучению акустической анизотропии металлов, а также подготовлены материалы для публикаций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 174 страницы, содержит 75 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 230 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, проведен анализ степени разработанности темы и обоснована ее актуальность. Сформулированы цель и задачи исследования, его теоретическая и практическая значимость, научная новизна и результаты апробации. Отмечены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы, посвященной акустоупругому эффекту металлов и методам его оценки путем измерения акустической анизотропии.

В разделе 1.1 кратко освещены теоретические результаты Г. Грина и Л. Бриллюэна, предшествовавшие наблюдению П. Бриджменом, Ф. Берчем и другими акустоупругого эффекта при испытаниях металлов, горных пород и других материалов под действием высоких давлений. Показана связь между разработками Г. Генки, Ф. Мурнаганом, М. Био теорий конечных деформаций и решением задач о распространении упругих волн в предварительно напряженной среде. Подробно рассмотрены результаты Д. Хьюза и Дж. Келли, получивших уравнения связи между скоростями упругих волн в изотропном материале и величиной одноосных напряжений на основании нелинейно-упругой модели Мурнагана, и Р. Бенсона и В. Рилсона, предложивших способ определения главных двухосных напряжений в металлах посредством измерений акустической анизотропии как относительной разности скоростей поперечных волн взаимно ортогональной поляризации. Приведены результаты работ Р. Тупина и Б. Бернштейна, Р. Терстона и К. Браггера, К. Трусделла, Т. Токуока и Ю. Ивашимидзу, К. Окада и других авторов. Рассмотрен стресс-акустический закон Т. Токуока и М. Сайто для изотропного материала кубической симметрии, обобщенный Х. Фукуока для слабо анизотропной среды.

В разделе 1.2 рассмотрены модели акустопластичности, в частности, модель нелинейно-упруго-пластического материала с упрочнением Ю. Пао и М. Хирао и его модификации, предложенные М. Кобаяши. Приведено линеаризованное уравнение акустопластичности, прошедшее проверку на отоженных алюминиевых образцах при величине пластических деформаций менее 1%.

В разделе 1.3 рассмотрены модели акустоповрежденности, предложенные В.И. Ерофеевым, В.В. Мишакиным и А. Кастеллано. Первые два подхода предполагают скалярный вид функции поврежденности, заданной через относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов в стержне с учетом физической и геометрической нелинейности или же учитывающей влияние текстуры на скорость накопления микроповреждений через изменение ориентации кристаллов вследствие микропластических деформаций. Определение параметров поврежденности проводится с учетом кинетики накопления повреждений при экспериментах на статическое или динамическое нагружение. Подход к определению поврежденности через относительную вариацию компонент тензора упругости в форме Фойгта был использован А. Кастеллано при определении скоростей

продольных и поперечных волн в композитных образцах, свойства которых моделировались трансверсально-изотропным материалом.

В разделе 1.4 проведен краткий обзор существующих технологий акустической тензометрии металлов, в основе которых лежит явление акустоупругости. Рассмотрены работы, написанные под авторством В.М. Бобренко и И.И. Авербуха, В.И. Ерофеева и В.А. Зазнобина, А.О. Ватульяна, монографии А.Н. Гузя, Ф.Г. Махорта, О.И. Гуши и Н.Е. Никитиной, А.И. Трофимова и С.И. Минина, А.Л. Углова и А.А. Хлыбова, Х.Б. Толипова, А.А. Карабутова, В.А. Быченка, И.В. Беркутова и А.В. Федорова, Л.А. Пасманика и А.В. Камышева, Г.А. Буденкова, В.В. Муравьева, Л.Н. Степановой, Н.Е. Никитиной и других.

В разделе 1.5 подытоживаются основные результаты главы.

На основе проведенного обзора сформулированы цель и задачи диссертационного исследования. Результаты первой главы опубликованы в работе [1].

Во второй главе приведены результаты измерений акустической анизотропии при одноосном монотонном и циклическом нагружении призматических корсетных образцов, изготовленных из листов алюминиевого проката марки АМц и стального проката марки 14ХГНДЦ.

В разделе 2.1 описана технология проведения экспериментов. Для измерения акустической анизотропии был использован прибор ИН-5101А, разработанный под научным руководством Н.Е. Никитиной (1951-2016). Он реализует эхо-импульсный метод неразрушающего контроля механических напряжений методом акустоупругости. В экспериментах использовались два контактных датчика с частотами сигнала 5 МГц и 6 МГц. Возбуждение плоских поперечных волн V_1, V_2 взаимно ортогональной поляризации и продольной волны V_3 осуществлялось приемо-передающими пьезоэлектрическими блоками, входящими в состав датчика. С их помощью измерялись временные задержки t_1, t_2 между n отраженными волновыми пакетами. Расчет акустической анизотропии проводился по формуле (1):

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_{cp}} = \frac{V_1 - V_2}{(V_1 + V_2)/2} \cong \frac{t_2 - t_1}{(t_1 + t_2)/2} = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}} \quad (1)$$

Для удобства параметр a , % рассчитывался в процентах.

В работе исследовались три партии алюминиевых образцов: 500x70x20 мм с пределом текучести $\sigma_{T1} = 65 \div 70$ МПа (партия №1), 500x70x16 мм с $\sigma_{T2} = 70 \div 75$ МПа (партия №2) и 300x30x15 мм с $\sigma_{T3} = 55 \div 60$ МПа (партия №3). Испытания на одноосное монотонное растяжение образцов из партий №1 и №2 осуществлялись на машине INSTRON-8850, из партии №3 – на машине INSTRON-8801. Циклическое нагружение стальных образцов проводилось на машине ЦДМ-200, алюминиевых – на INSTRON-8850. Для измерения локальных деформаций использовался индукционный тензодатчик с базой измерений 10 мм и точностью 10^{-4} мм.

В разделе 2.2 приведены результаты ультразвуковых исследований. Измерения начальной акустической анизотропии a_0 , % в образце 1 партии №2 (на рис. 1) и образце 02П партии №3 (на рис. 2), вырезанных поперек направления проката, проводились в $n_{1-№2} = 10$ и $n_{02П-№3} = 15$ точках, расположенных на расстоянии 12 мм друг от друга. Максимальная разность между

значениями $a_0, \%$ в образце 1-№2 составила величину $\delta a_{01-\text{№}2} = -0.138\%$ или 25.36% от упругой деформационно-обусловленной акустической анизотропии $a_{S1-\text{№}2}(\varepsilon^e) = -0.544\%$. Максимальная разность значений $a_0, \%$ в образце 02П-№3 составила $\delta a_{002\text{П}-\text{№}3} = -0.083\%$ или 25.15% от деформационной акустической анизотропии $a_{S02\text{П}-\text{№}3}(\varepsilon^e) = -0.33\%$. Таким образом, влияние начальной анизотропии упругих модулей оказывает на акустическую анизотропию такое же влияние, что и упругие деформации металла. Таким образом, требуется учет неоднородности $a_0, \%$ при определении суммарной акустической анизотропии $a_\Sigma, \%$ алюминиевого проката.

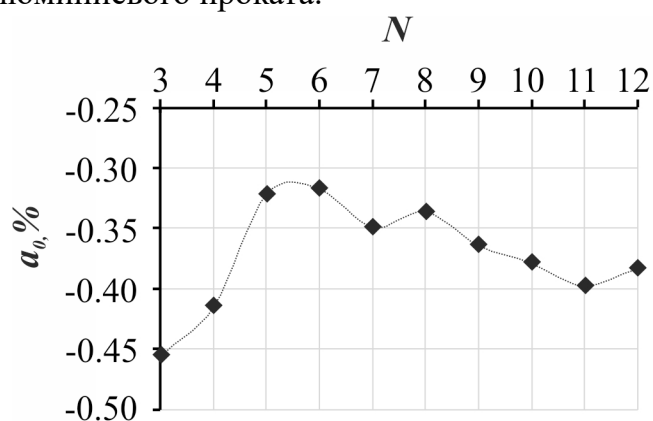


Рис. 1. Начальная акустическая анизотропия $a_0, \%$ образца 1-№2

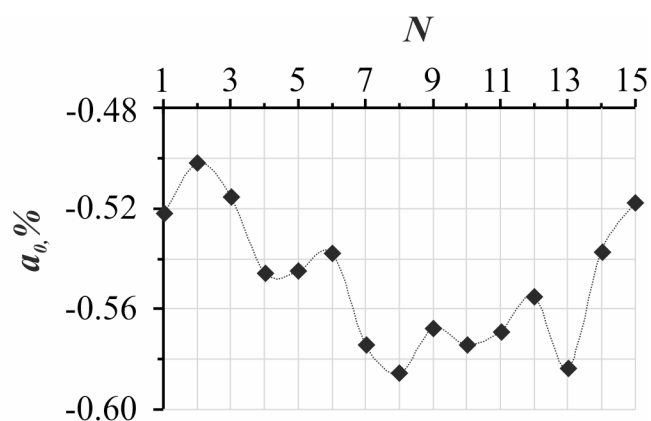


Рис. 2. Начальная акустическая анизотропия $a_0, \%$ образца 02П-№3

Были получены зависимости скоростей поперечных волн $V_1(\varepsilon^{e-p})$, $V_2(\varepsilon^{e-p})$ ортогональной поляризации и $V_3(\varepsilon^{e-p})$ продольной волны от упруго-пластических деформаций ε^{e-p} при одноосном монотонном растяжении. Экспериментальные графики для образца 1 партии №2 (на рис. 7) представлены на рис. 3 и рис. 4.

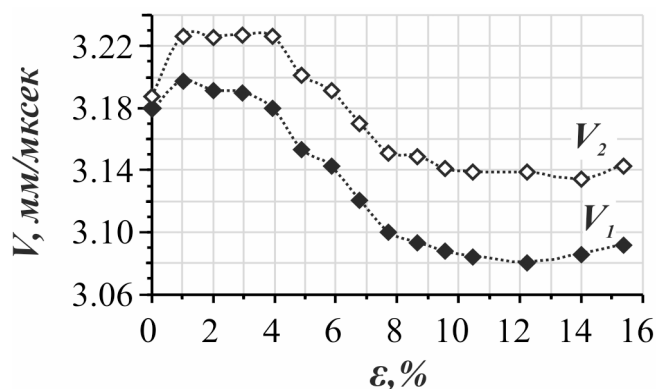


Рис. 3. Зависимости скоростей поперечных волн $V_1(\varepsilon^{e-p})$, $V_2(\varepsilon^{e-p})$ от деформаций образца 1 партии №2

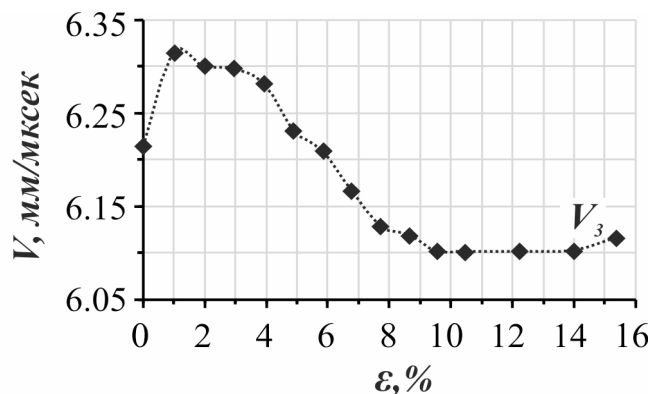


Рис. 4. Зависимость скорости продольной волны $V_3(\varepsilon^{e-p})$ от деформаций образца 1 партии №2

На участке упругих деформаций наблюдается рост значений скоростей ($dV_i/d\varepsilon^e > 0$, $i = \overline{1,3}$). Он сменяется их убыванием с началом нелинейного участка кривой деформирования " $\sigma - \varepsilon$ " ($dV_i/d\varepsilon^{e-p} < 0$) в диапазоне напряжений от предела пропорциональности до предела прочности $[\sigma_{0.2}, \sigma_{пр}]$. Очередной рост скоростей наблюдается напряжениях выше предела прочности с началом образования пластической шейки, который продолжается до разрушения.

Смена знака производной $dV_i/d\varepsilon^{e-p}$ является диагностическим признаком упруго-пластической деформации металла.

Было установлено, что у зависимостей акустической анизотропии $a(\varepsilon^{e-p})$, % наблюдается общий участок немонотонности в диапазоне упруго-пластических деформаций $\varepsilon^{e-p} = 1.42 \div 2.82\%$. На нем наблюдается “сброс” значений акустической анизотропии на 15-20% относительно максимального уровня, достигнутого в упругой области. Графики $a(\varepsilon^{e-p})$, % для точек 1, 4, 7 и 10 (на рис. 6) на расстоянии 45, 90, 135 и 180 мм от места разрушения образца представлены на рис. 5. Изменение знака производной $da/d\varepsilon^{e-p} < 0$ также говорит о начале пластической деформации металла. Различный экспериментальный характер кривых при $\varepsilon^{e-p} \geq 19.20\%$ (на рис. 5) связан с влиянием процесса локализации деформаций при пластическом разрушении (на рис. 7).

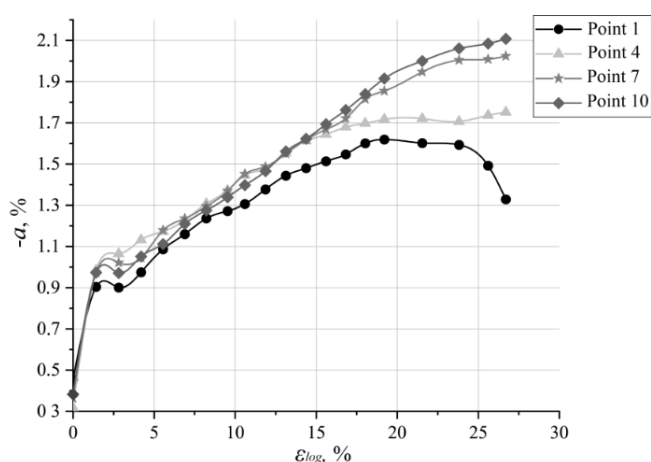


Рис. 5. Зависимость акустической анизотропии от деформаций $-a(\varepsilon^{e-p})$, %

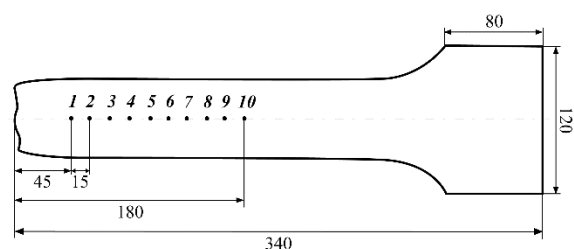


Рис. 6. Схема расположения точек в образце 1-№2

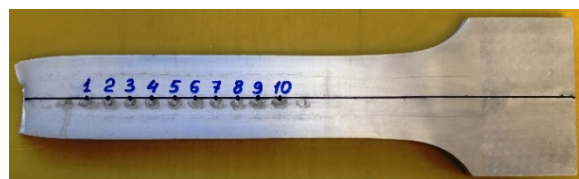


Рис. 7. Образец 1-№2 после разрушения

Образец 3 партии №1 был вырезан вдоль направления проката ($a_0 > 0$), схема образца до нагружения приведена на рис. 8. Измерения остаточной акустической анизотропии a_R , % в образце после разрушения в результате одноосного растяжения проводились вдоль трех рядов точек по $n = 20$ в каждом (на рис. 9).

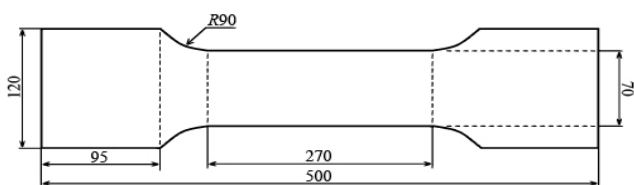


Рис. 8. Схема образца 3-№1

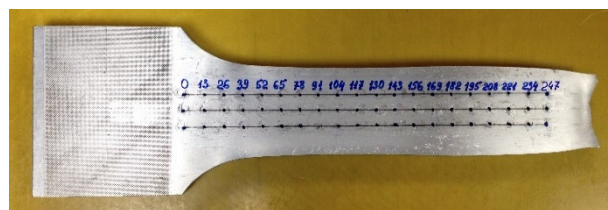


Рис. 9. Образец 3-№1 после разрушения

В образце 3-№1 наблюдалось образование двух зон локализации пластических деформаций. Сравнение распределений $h(n)$ толщины образца при микрометрических измерениях вдоль центрального ряда точек (на рис. 10) и распределений $a_{R1}(n) - a_{R3}(n)$ остаточной анизотропии (на рис. 11) указывает на их корреляцию. Влияние неоднородности толщины h на акустическую анизотропию a_R связано с вариацией длины акустического пути L при одной и той же резонансной частоте ω упругих волн.

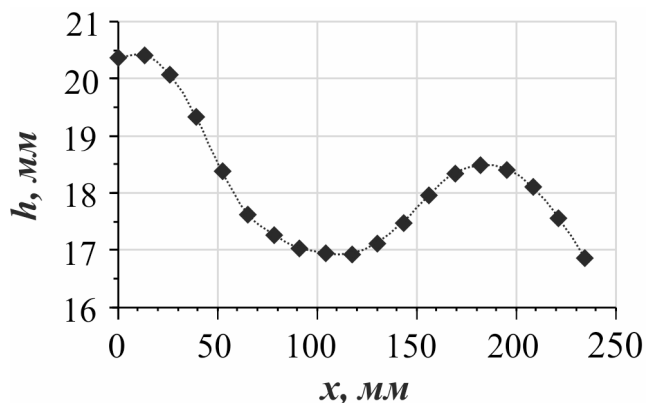


Рис. 10. Толщина образца 3-№1 после разрушения (центральный ряд точек)

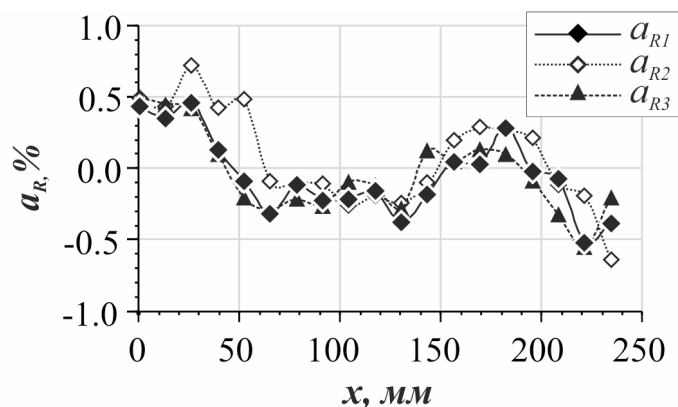


Рис. 11. Акустическая анизотропия образца 3-№1 после разрушения

При монотонном изменении толщины (случай образца 0В партии №3 на рис. 12) обнаруживается периодическое распределение акустической анизотропии $a_R(n)$, % после пластической деформации и разрушения (на рис. 13). Утонение образца приводит к снижению уровня левого локального максимума акустической анизотропии на рис. 13 ($a_R = 0.446\%$) относительно правого ($a_R = 0.592\%$) по мере приближения к месту разрыва образца вблизи точки 3. Расстояние между максимумами составляет 48 мм. Для их обнаружения использовалось половинное перекрытие участков измерений (расстояние между точками на рис. 13 составляет 6 мм). Нелинейное распределение акустической анизотропии на рис. 13 вызвано влиянием локализованной поврежденности (пор, трещин, структурных неоднородностей) на усредненные эффективные упругие свойств металла на макроуровне.

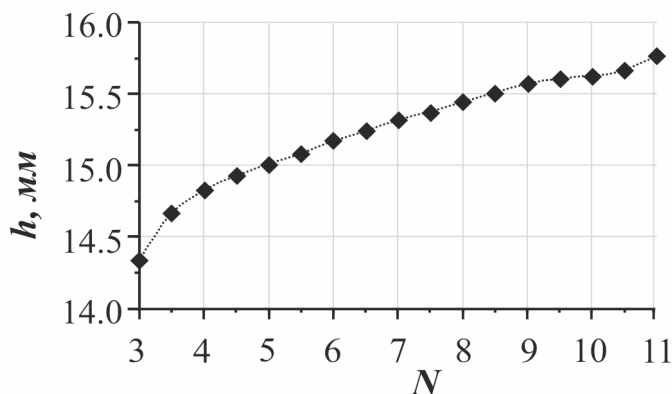


Рис. 12. Толщина образца 0В-№3 после пластической деформации и разрушения

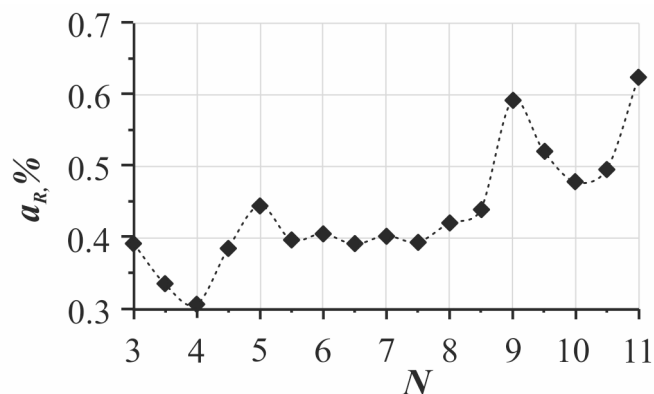


Рис. 13. Акустическая анизотропия образца 0В-№3 после разрушения

Было показано, что удаление поверхностных и подповерхностных слоев металла после деформации приводит к кратному снижению акустической анизотропии a_D , %, обусловленной влиянием накопленной поврежденности. Обработка на шлифовальном станке части образца из стали 14ХГНДЦ после усталостного разрушения (5 млн. циклов нагружения) на глубину шлифования от 0.05 мм в области захвата до 1.2 мм в сильно деформированной части привела к снижению уровня акустической анизотропии вблизи зоны разрушения в 10-15 раз от уровня $-0,1501 \div 0,6751\%$ до $-0,0642 \div -0,0299\%$ и изменению характера ее распределения до близкого к равномерному (на рис. 14).

Результаты измерения акустической анизотропии после двух этапов шлифования образца 3-№1 шкурками с различным размером абразивного зерна приведены на рис. 15. На рисунке

видно, что после удаления слоя толщиной $\overline{\Delta h_1} = 310$ микрон уровень акустической анизотропии в точках 1-5 стабилизируется и практически не меняется после снятия следующих $\overline{\Delta h_2} = 570$ микрон толщины (880 микрон после двух этапов). В то же время, значения анизотропии не возвращаются к начальному уровню $a_0, \%$ из-за вызванной пластическими деформациями неравномерности толщины образца. Влияние локализованной поврежденности на акустическую анизотропию, осредненную по всей толщине, затухает по мере удаления от его поверхности на расстояние 2-3 характерных размеров зерна металла.

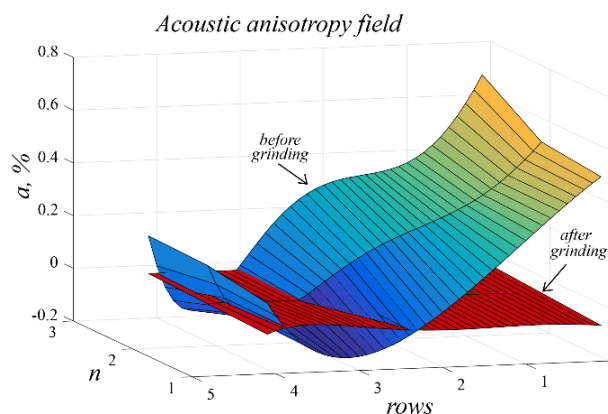


Рис. 14. Акустическая анизотропия до и после шлифования образца из стали 14ХГНДЦ

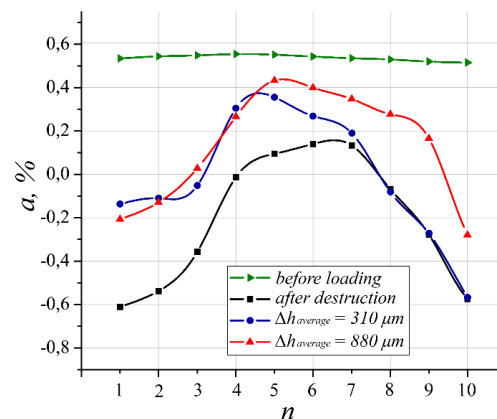


Рис. 15. Акустическая анизотропия при шлифовании алюминиевого образца 3-№1 марки АМц

Исследование влияния текстуры материала было проведено на образце 01П-№3, вырезанного поперек проката ($a_0 < 0$), после одноосного растяжения до 7% упруго-пластических деформаций и разгрузки без разрушения. Обработка на шлифовальном станке вернула равномерный характер толщины образца h (на рис. 16), при этом корреляция с начальной акустической анизотропией наблюдается только после второго цикла шлифования у распределения a_{G2} (на рис. 17). Это связано со снижением влияния поврежденного поверхностного слоя. Разница между уровнями a_{G2} и a_0 образца 01П-№3 на величину $\overline{\Delta a} = -0.16\%$ вызвана влиянием деформационной микроструктуры (текстуры) и изменением толщины после обработки поверхности и деформации металла.

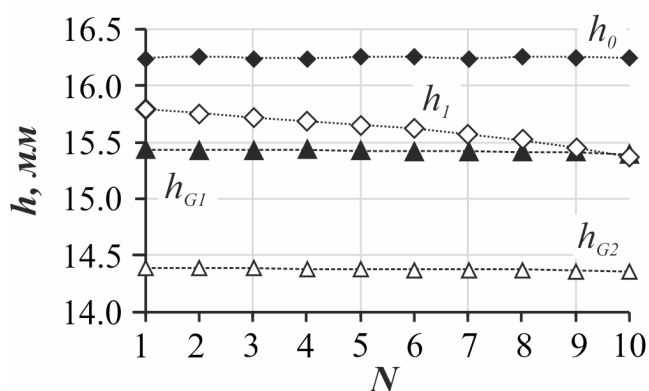


Рис. 16. Толщина образца 01П-№3 до нагружения h_0 , после разгрузки h_R и двух циклов шлифования h_{G1} и h_{G2}

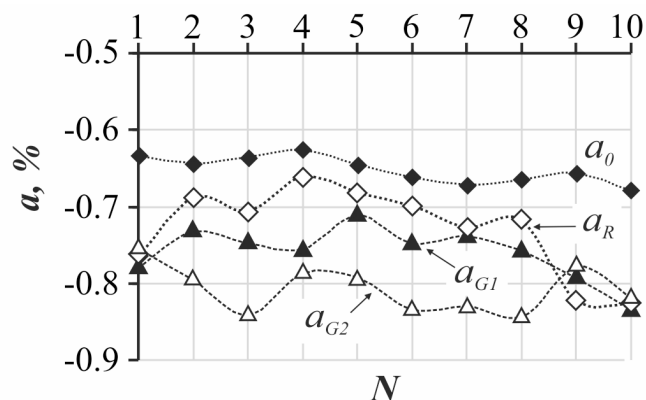


Рис. 17. Акустическая анизотропия до нагружения a_0 , после разгрузки a_R и двух циклов шлифования a_{G1} и a_{G2}

В разделе 2.3 подытоживаются основные результаты главы.

Результаты второй главы опубликованы в работах [2,5-8,11,13,20].

В третьей главе получены уравнения, связывающие акустическую анизотропию с главными компонентами тензора поврежденности второго ранга.

В разделе 3.1, исходя из результатов экспериментов, было получено уравнение для суммарной акустической анизотропии a_{Σ}^l (2), которое включает: 1) начальную a_0^l и упругую деформационную компоненты a_e^l из стресс-акустического закона Токуока-Сайто; 2) связанную с текстурой компоненту a_T^l из уравнения акустопластичности Хирао-Пао; 3) компоненту, возникающую при изменении длины акустического пути при пластической деформации $a_{\Delta h}^l$, рассчитываемую по формуле Бенсона-Рилсона; 4) две новых компоненты, связанных с объемной $a_{D_v}^l$ и поверхностной поврежденностью $a_{D_s}^l$:

$$a_{\Sigma}^l = a_0^l + \alpha_{D_s} a_{D_s}^l + \alpha_{D_v} a_{D_v}^l + \beta_e a_e^l + \gamma_{\Delta h} a_{\Delta h}^l + \gamma_T a_T^l, \quad (2)$$

где $\alpha_{D_s}, \alpha_{D_v}, \beta_e, \gamma_{\Delta h}, \gamma_T$ – весовые коэффициенты, связанные с характеристиками металла (упругими модулями, пределами прочности, средним размером зерна и другими). Для их определения требуется проведение испытаний с применением факторного анализа.

В разделе 3.2 в рамках континуального подхода механики разрушения получены уравнения связи между поврежденностью, скоростями продольных и поперечных упругих волн и акустической анизотропией.

Тензор поврежденности $\mathbf{D}$ был введен для описания анизотропного характера накопления повреждений при одноосном растяжении путем отношения суммарной площади дефектов $\delta\bar{S}$ к площади произвольно ориентированной площадки δS с учетом выбора нормалей в нагруженном материале без повреждений $\mathbf{n}$ и с ними $\bar{\mathbf{n}}$: $(\mathbf{E} - \mathbf{D}) \cdot \mathbf{n} \delta S = \bar{\mathbf{n}} \delta\bar{S}$, где $\mathbf{E}$ – единичный тензор. Тензор $\mathbf{D}$ связывает между собой тензор напряжений Коши $\boldsymbol{\sigma}$ и тензор эффективных напряжений в поврежденной среде $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ (3):

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{D})^{-1}, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} \delta S = \bar{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \bar{\mathbf{n}} \delta\bar{S}$, так как направления главных напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ и $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ совпадают.

В диссертационном исследовании была решена задача о распространении плоской монохроматической волны в упругой поврежденной среде в направлении $\mathbf{N} = \mathbf{n}_3$ (по толщине материала) после проведенной симметризации тензора $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$.

Были получены уравнения (4), связывающие скорости поперечных волн V_1, V_2 взаимно ортогональных волн и скорость продольной волны V_3 поврежденного материала с главными компонентами тензора поврежденности D_1, D_2, D_3 :

$$V_1 = \sqrt{\frac{2\mu(1-D_1)(1-D_3)}{\rho_0(2-D_1-D_3)}}, \quad V_2 = \sqrt{\frac{2\mu(1-D_2)(1-D_3)}{\rho_0(2-D_2-D_3)}}, \quad (4)$$

$$V_3 = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)(1-D_3)}{\rho_0}}$$

На основании (4) были найдены соотношения (5), позволяющие оценить значения компонент D_1, D_2, D_3 путем ультразвуковых измерений скоростей V_1, V_2, V_3 при известных значениях упругих модулей λ, μ и плотности ρ_0 неповрежденного материала:

$$D_1 = 1 - \left(\frac{2\mu}{V_1^2 \rho_0} - \frac{\lambda + 2\mu}{V_3^2 \rho_0} \right)^{-1}, \quad D_2 = 1 - \left(\frac{2\mu}{V_2^2 \rho_0} - \frac{\lambda + 2\mu}{V_3^2 \rho_0} \right)^{-1}, \quad D_3 = 1 - \frac{V_3^2 \rho_0}{\lambda + 2\mu} \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) описывают случай, когда оси упругой анизотропии совпадают с осями поврежденности, тензор поврежденности $\mathbf{D}$ имеет диагональный вид, а материал находится в условиях одноосного или двухосного напряженного состояния.

Был рассмотрен материал с системой однонаправленных ($D_1 \neq 0, D_2 = 0$) и двунаправленных ($D_1 \neq 0, D_2 \neq 0$) трещин, в котором поврежденность локализована на поверхности ($D_3 = 0, a_{D_v}^l = 0$). Для случая однонаправленных трещин ($D_1 \neq 0, D_2 = D_3 = 0$) была получена приближенная формула (6):

$$a_D^l(D_1) \cong D_1/4, \quad (6)$$

где a_D^l – акустическая анизотропия, вызванная поврежденностью материала.

Для случая одноосного нагружения $\sigma = \sigma_{11} \mathbf{i} \otimes \mathbf{i}$ материала с ортогональными трещинами ($D_1 \neq 0, D_2 \neq 0, D_3 = 0$) была получена аналогичная формула (7):

$$a_D^l(D_1, D_2) \cong \frac{D_2 - D_1}{4} \quad (7)$$

Максимальные расхождения между значениями экспериментально измеренной акустической анизотропии $a, \%$ и ее теоретическими оценками a_D^l , полученными по формуле (7) для алюминиевого образца 04П-№3, вырезанного поперек проката ($a_0 < 0, D_1 \neq 0, D_2 \neq 0, D_3 = 0$), не превысили 4.88%.

В разделе 3.3 подытоживаются основные результаты главы.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [3,10,14-16,18,19].

В четвертой главе рассмотрен способ нахождения вклада пластической деформации и поврежденности в величину акустической анизотропии при измерении в деталях машин и элементах конструкций.

В разделе 4.1 предложен подход к определению осей анизотропии материала посредством угловых диаграмм акустической анизотропии. Суть подхода заключается в расчете акустической анизотропии a^φ при повороте системы объемных поперечных волн ортогональной поляризации $\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\}$ относительно заранее неизвестных осей нагружения и осей анизотропии материала. В ходе опытов на каждом шаге измерений осуществлялся поворот акустического датчика на угол $\varphi = 2m\Delta\varphi$ относительно продольной оси образца с шагом $90^\circ/m = 2\Delta\varphi$, где m – целое число ($m = 1, 2, 3 \dots$), а шаг по углу $\Delta\varphi > 0$ при повороте против часовой стрелки. Для расчета акустической анизотропии a^φ была получена новая формула (8) с учетом согласованного поворота плоскостей поляризации волн $V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}$:

$$a^\varphi = (V^\varphi - V^{\varphi+90^\circ}) / ((V^\varphi + V^{\varphi+90^\circ})/2) \quad (8)$$

При измерении временных задержек $t^\varphi, t^{\varphi+90^\circ}$ уравнение (8) принимает вид (9):

$$a^\varphi = (t^{\varphi+90^\circ} - t^\varphi) / ((t^{\varphi+90^\circ} + t^\varphi) / 2) \quad (9)$$

Для построения диаграмм во всем диапазоне углов тригонометрического круга $[0^\circ, 360^\circ]$ использовались правила (10) и (11):

$$a\{V^{\varphi+90^\circ}, V^{\varphi+180^\circ}\} = -a\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\} \quad (10)$$

$$a\{V^{\varphi+180^\circ}, V^{\varphi+270^\circ}\} = a\{V^\varphi, V^{\varphi+90^\circ}\} \quad (11)$$

На рис. 18 представлены серии угловых диаграмм акустической анизотропии, полученные при одноосном ступенчатом нагружении образца 04-№3 до $\varepsilon^{e-p} = 16.6\%$ упруго-пластических деформаций. Точки строились с шагом $\Delta\varphi = 22.5^\circ$ ($m = 2$). Форма диаграмм определяется характером начальной акустической анизотропии a_0^φ , на который накладывается влияние деформационной анизотропии a_s^φ и поврежденности a_D^φ .

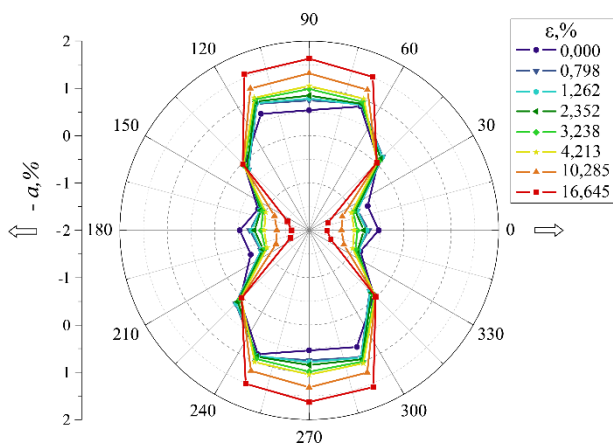


Рис. 18. Угловые диаграммы акустической анизотропии образца 04П-№3 с ростом упруго-пластических деформаций

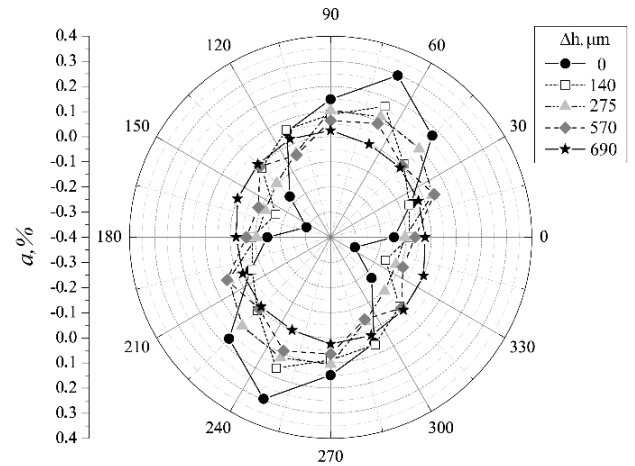


Рис. 19. Угловые диаграммы акустической анизотропии после 2,4,6 и 8-го этапов шлифования образца 5-№1

На примере образца 5-№1 после разрушения было показано, что влияние локализованной в поверхностном слое поврежденности затухает после удаления 250-300 микрон поверхностного слоя, что сопровождается изменением формы и ориентации угловых диаграмм (на рис. 19). Возвращение диаграмм к виду, соответствующему характеру анизотропии упругих модулей, является признаком исключения влияния поверхностных повреждений на результаты измерений акустической анизотропии.

В разделе 4.2 рассмотрен способ, который включает в себя оценку компоненты A_D влияния поврежденности путем сравнения значений акустической анизотропии A_0 до и A_n после n циклов шлифования при наличии одностороннего доступа к детали или конструкции (12) или при возможности шлифования обеих свободных поверхностей (13):

$$A_D = 2(A_0 - A_n) \quad (12)$$

$$A_D = A_0 - A_n \quad (13)$$

Последний цикл шлифования A_n определяется при выполнении условия (14):

$$|A_n - A_{n-1}|/|A_{n-1}| < 10\%, \quad (14)$$

где A_{n-1} – акустическая анизотропия на предпоследнем цикле шлифования.

Число циклов шлифования зависит от средней глубины шлифования на каждом цикле. Общая глубина шлифования (с двух сторон образца), не должна превышать 5-7 характерных размеров зерна, тем самым, не влияя на несущую способность конструкции.

Суммарную акустическую анизотропию предлагается рассматривать в виде (15):

$$A_0 = A_T + A_y + A_p + A_D, \quad (15)$$

Слагаемые уравнения (15) определяются через компоненты суммы (2).

Методы акустической тензометрии позволяют определить величину упругой деформационной компоненты A_y . Величина A_T , как правило, находится по измерениям на малонагруженном участке конструкции. Шлифовка поверхности металла позволяет исключить компоненту A_D от влияния поврежденного поверхностного слоя. Таким образом, удастся определить вклад пластических деформаций A_p по формуле (16):

$$A_p = A_0 - A_D - (A_T + A_y), \quad (16)$$

Измерения при четырех циклах шлифования (на каждом снималось в среднем 125 микрон) алюминиевого образца толщиной 20 мм показали, что влияние поврежденности на величину акустической анизотропии на порядок превосходит эффект от пластических деформаций ($\overline{A_D} = -0,6\%$ против $\overline{A_p} = -0,05\%$).

В разделе 4.3 подытоживаются основные результаты главы.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [4,9,12,17].

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении приведены копии диплома о присуждении медали Российской академии наук за цикл работ по материалам диссертации, а также свидетельство о получении патента на изобретение изложенного в разделе 4.2 способа определения вклада пластической деформации в величину акустической анизотропии.

Основные результаты

1. Было экспериментально установлено влияние поверхностных повреждений металла на величину акустической анизотропии. Удаление повреждённых поверхностных и подповерхностных слоев металла приводит к кратному снижению приобретенной при деформировании акустической анизотропии металла.
2. Для определения величины объемной плотности повреждений по результатам ультразвуковых измерений была разработана модель материала с анизотропной поврежденностью. В рамках уравнений континуальной механики разрушения были получены соотношения, связывающие главные значения тензора поврежденности второго ранга со скоростями двух поперечных волн ортогональной поляризации и продольной волны, распространяющихся перпендикулярно контактной поверхности. Для случаев однонаправленно и двунаправленно ориентированных поверхностных трещин были получены приближенные соотношения, связывающие акустическую анизотропию с поврежденностью линейным образом.

3. Для определения осей анизотропии упругих модулей и осей действия максимальных растягивающих напряжений был предложен подход к построению угловых диаграмм акустической анизотропии. Его применение позволяет установить паттерн анизотропной поврежденности металла.
4. Был разработан способ определения вклада пластической деформации в величину акустической анизотропии при измерении в деталях машин и элементах конструкций. В его основе лежит алгоритм циклического сравнения значений акустической анизотропии при шлифовании поверхностных и подповерхностных слоев металла на толщину до 5-7 характерных размеров зерна. Применение способа позволяет проводить раздельную оценку вклада пластических деформаций и поверхностной поврежденности металла в величину акустической анизотропии.

Публикации по материалам диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Беляев А. К., Полянский В. А., Третьяков Д. А. Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – №. 4. – С. 130-151.
2. 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.
3. Семенов А. С., Полянский, В. А., Штукин, Л. В., Третьяков, Д. А. Влияние поврежденности поверхностного слоя на акустическую анизотропию // Прикладная механика и техническая физика. – 2018. – Т. 59. – №. 6. – С. 201-210.

В изданиях, входящих в базы данных Scopus/Web of Science

4. 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. – P. 296-302.
5. Tretyakov D.A., Belyaev A.K., Shaposhnikov N.O. Acoustic anisotropy and localization of plastic deformation in aluminum alloys // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 30. – P. 413-416.
6. Belyaev A. K., Galyautdinova, A. R., Polyanskiy, V. A., Tretyakov, D. A. Skin Effect of Acoustic Anisotropy and Dissolved Hydrogen in Metals // Advances in Hydrogen Embrittlement Study. – 2021. – P. 33-43.
7. Tretyakov D.A., Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Stepanov A.V., Yakovlev Yu. A. Correlation of acoustoelasticity with hydrogen saturation during destruction // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2019. – Vol. 121. – P. 01016.
8. Tretyakov D. A., Belyaev A. K. Surface effect of acoustic anisotropy during plastic deformation of metals // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing. – 2019. – Vol. 2176. – No.1. – P. 020011.
9. 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. – P. 11-16.

10. Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A. Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // Procedia Structural Integrity. – 2017. – 6. – P. 201-207.
11. Belyaev A. K., Grishchenko A. I., Polyanskiy V. A., Semenov A. S., Tretyakov D. A., Shtukin L. V., Yakovlev Y. A. Acoustic anisotropy and dissolved hydrogen as an indicator of waves of plastic deformation // 2017 Days on Diffraction (DD). – IEEE. – 2017. – P. 39-44.

В изданиях, входящих в базу данных РИНЦ

12. Патент № 2648309 С1 Российская Федерация, МПК G01N 29/07. Способ определения вклада пластической деформации в величину акустической анизотропии при измерении в деталях машин и элементах конструкции: № 2016151104: заявл. 23.12.2016: опубл. 23.03.2018 / В. А. Полянский, А. И. Грищенко, А. К. Беляев [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН).
13. Третьяков Д.А., Беляев А.К., Галяутдинова А.Р. Нелинейное поведение скоростей ультразвуковых волн и акустической анизотропии при пластическом деформировании металлов // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2019). – 2020. – С. 195-198.
14. Третьяков Д.А., Беляев А.К., Галяутдинова А.Р., Полянский В.А., Семенов А.С. Акустическая анизотропия металлов при пластической деформации и накоплении поврежденности // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – 2019. – С. 806-808.
15. Галяутдинова А.Р., Третьяков Д.А. Акустическая анизотропия на поздних стадиях пластического разрушения металлов // Наука и инновации в технических университетах. – 2019. – С. 49-51.
16. Галяутдинова А.Р., Третьяков Д.А. Эволюция акустической анизотропии и мер поврежденности при усталостном разрушении металлов // Неделя науки СПбПУ. – 2018. – С. 210-213.
17. Галяутдинова А.Р., Третьяков Д.А. Эволюция угловых диаграмм акустической анизотропии при неупругом деформировании металлов // Неделя науки СПбПУ. – 2018. – С. 207-210.
18. Третьяков Д.А., Галяутдинова А.Р. Исследование акустической анизотропии при циклическом нагружении металлов методом угловых диаграмм // Неделя науки СПбПУ. – 2018. – С. 227-230.
19. Третьяков Д.А., Грищенко А.И., Семенов А.С., Полянский В.А., Штукин Л.В. Идентификация уравнений эволюции поврежденности и акустической анизотропии при упруго-пластическом деформировании // Неделя науки СПбПУ. – 2017. – С. 154-157.
20. Беляев А. К., Полянский В. А., Третьяков Д. А., Яковлев Ю.А. Идентификация волн пластической деформации методом акустоупругости // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. – 2017. – С. 998-1004.