

ОБ АКУСТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СЛАБО АНИЗОТРОПНЫХ ОРТОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2023 г. А.А. Хлыбов^{1,*}, А.Л. Углов

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Россия 603155 Нижний Новгород, ул. Минина, 24

*E-mail: hlybov_52@mail.ru

Поступила в редакцию 30.10.2022; после доработки 26.11.2022

Принята к публикации 02.12.2022

Исследовали возможности использования неразрушающего акустического контроля для определения особенностей пространственного распределения локальных пластических деформаций при деформировании плоских образцов из сплава АМг61. Проанализированы методические особенности использования параметра акустической анизотропии для исследования закономерностей изменения пространственных неоднородностей поля локальных пластических деформаций. Представлена расчетно-экспериментальная методика определения параметра акустической анизотропии, позволяющая корректно определять не только ее величину, но и направления локальных осей акустической анизотропии. Рассмотрены источники погрешностей предлагаемой методики, границы ее применимости, а также требования к аппаратно-программным средствам ее реализации. Результаты экспериментальных исследований, проведенные на образцах из слабо анизотропного алюминиевого сплава АМг61, сопоставлены с представлениями автоволновой механики пластичности металлов. Предложен инженерный алгоритм определения ранней локализации зон потери устойчивости при пластическом деформировании образцов. Показана возможность создания методики оценки ресурса пластичности материала при его пластическом формоизменении.

Ключевые слова: ультразвук, упругие волны, анизотропные материалы, акустическая анизотропия, упругопластическое деформирование.

DOI: 10.31857/S0130308223010037, EDN: BVEMFR

ВВЕДЕНИЕ

Специалисты, занимающиеся вопросами пластической обработки металлов (прокат, штамповка и т.д.), проявляют интерес к особенностям формоизменения материала с точки зрения пространственной однородности этого процесса. Особенно это касается изготовления высоконагруженных элементов конструкций. Дело в том, что материал детали со сложной геометрией в процессе ее изготовления, например, при штамповке, испытывает существенно неоднородную пластическую деформацию с присущими ей значительными локальными градиентами. В этой связи все более актуальными становятся как необходимость понимания закономерностей пластической деформации, так и возможность ее оперативной оценки.

Анализ результатов исследований природы пластической деформации твердых тел показывает, что наблюдаемая пространственно-временная неоднородность пластического течения наблюдается на любом ее этапе и является наиболее важным атрибутом деформационного процесса [1]. Справедливость этого заключения отчетливо прослеживается на всех масштабных уровнях деформационного процесса [2—8], начиная с дислокационного и заканчивая макроскопическим. В работах, результаты которых обобщены в монографиях [4, 9], макромасштабные аспекты пластического течения изучались в моно- и поликристаллах чистых металлов и сплавов разного химического и структурного состава. Было экспериментально показано, что пластическая деформация твердых тел имеет макроскопически локализованный характер на протяжении всего процесса пластического течения: от предела текучести до разрушения. Возникающие при этом в образцах пространственно-временные структуры локализации макроскопического масштаба спонтанно генерируются при деформации с постоянной скоростью. Деформируемая среда в ходе процесса пластического течения самопроизвольно расслаивается на чередующиеся, друг с другом деформирующиеся и недеформирующиеся в данный момент времени объемы.

При этом на наблюдаемой поверхности образца деформирующиеся и недеформирующиеся объемы образуют специфическую картину распределения очагов локализованной пластичности.

Полученные результаты, кроме научной значимости, представляет практическую значимость в плане возможности построения инженерных алгоритмов оценки ресурса пластичности конструкционных материалов и раннего прогнозирования координат зон будущей потери устойчи-

ности процесса деформирования и разрушения материала в составе деталей машин и конструктивных элементов. Это представляет интерес как в процессе изготовления деталей, так и при их эксплуатации в условиях, допускающих развитие пластических деформаций (например, при малоцикловом нагружении). Однако для реализации названных алгоритмов необходим мониторинг текущего пространственного распределения поля пластических деформаций с использованием соответствующих аппаратно-программных средств. Существующие методы контроля, такие как метод скоростной фотографии, тепловой метод и подобные им, дающие интересные с научной точки зрения результаты, мало подходят для их использования на реальных технических объектах. Нужна их разумная альтернатива в виде удобного для практического использования неразрушающего инженерного метода.

Среди используемых методов неразрушающего контроля, отвечающим требованиям обеспечения контроля неоднородности пластической деформации на мезоуровне, — это ультразвуковой метод, основанный на анализе параметров упругих импульсов в ультразвуковом диапазоне частот. Соответствующие длины волн (сотни мкм — десятки мм) вполне соответствуют мезоуровню, на масштабах которого работает автоволновая теория пластической деформации.

Одним из информативных параметров, широко применяемым при контроле структурных особенностей, физико-механических характеристик, напряженно-деформированного состояния, усталостной поврежденности конструкционных материалов и др., является акустическая анизотропия [10—21].

В настоящей работе рассматривается возможность анализа закономерностей пластической деформации образцов из горячекатаного листа сплава АМгб1 с использованием уточненного алгоритма определения параметра акустической анизотропии. Прокат из сплава АМгб1 используется для изготовления изделий авиа- и судостроения, также в строительных конструкциях.

Широкий температурный диапазон возможного использования деталей из сплава АМгб1 (от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$) делает его одним из наиболее распространенных конструкционных материалов, используемых в жестких климатических условиях, включая условия Крайнего Севера.

Имеющиеся результаты исследований закономерностей упругопластического деформирования сплава АМгб1 с использованием акустических методов позволяют прогнозировать поведение ответственных конструктивных элементов, но при существенных ограничениях:

- 1) известна история упругопластического деформирования;
- 2) процесс накопления необратимых деформаций для рассматриваемого элемента имеет пространственно однородный характер.

В условиях реальной эксплуатации высоконагруженных конструкций ни одно из этих условий, как правило в необходимом объеме информации для задач прогнозирования, не выполняется. При отсутствии подробного (с малой пространственной дискретностью) мониторинга закономерностей деформирования конструктивного элемента возможность прогнозирования его ресурса и локализации зоны предполагаемого разрушения на достаточно ранней стадии эксплуатации практически отсутствует. Подобный мониторинг с использованием метода сеток и т.п. является весьма дорогостоящим. В связи с этим создание расчетных методик оценки ресурса при неполном объеме информации об истории нагружения дает весьма приблизительный результат.

Названные факторы могут привести или к излишней консервативности оценки ресурса и необоснованно раннем выводе конструкции из эксплуатации или же, наоборот, к внезапному разрушению в зоне с повышенной интенсивностью накопления деформаций.

Целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка расчетно-экспериментальной методики определения акустической анизотропии слабо анизотропного ортотропного материала, позволяющей определить не только степень локальной акустической анизотропии, но и ее направление.

Для достижения поставленной цели решается ряд задач:

анализ источников погрешностей предлагаемой методики и границ ее применимости в инженерной практике;

исследование влияния пластической деформации на закономерности изменения пространственного распределения акустической анизотропии образцов из горячекатаного листа сплава АМгб1;

оценка возможности использования полученных результатов для разработки инженерной методики неразрушающей оценки ресурса пластичности и раннего обнаружения зон разрушения материала в составе высоконагруженных ответственных конструктивных элементов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ АЛГОРИТМОВ

Металлопрокату свойственна текстурная анизотропия, существенно влияющая на его прочностные и эксплуатационные свойства. Изделия сложной формы, изготовленные из проката с использованием технологий, предполагающих значительную пластическую деформацию материала, естественно, обладают существенной пространственной неоднородностью деформационной текстуры.

Текстура материала при пластической деформации оказывает решающее влияние на величину акустической анизотропии [17—21], что определяет важность задачи корректного определения последней.

Изменения анизотропии при наличии пластических деформаций достаточно малы (десятые доли — единицы процентов) и некорректность ее измерения может привести не только к большим погрешностям, но, более того, к неправильному пониманию закономерностей процессов пластической деформации, о которых судят по изменению анизотропии.

При исследовании свойств образцов и конструктивных элементов, изготовленных из проката, обычно используют ортогональную систему координат. Координатные оси выбирают следующим образом: ось OX_1 — нормально к поверхности материала, ось OX_2 — в плоскости поверхности проката вдоль направления проката (НП), ось OX_3 — перпендикулярно НП (рис. 1).

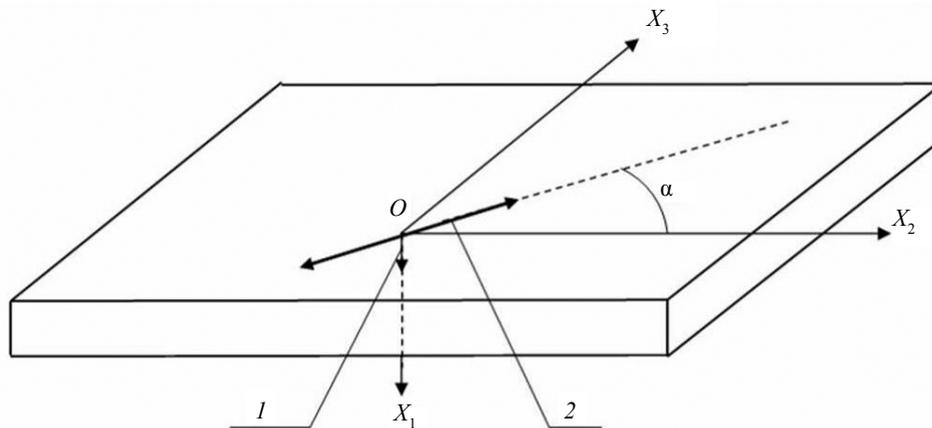


Рис. 1. Выбор осей координат.

С точки зрения характеристик анизотропии прокат относится к ортотропным материалам, имеющим три взаимно ортогональные плоскости симметрии, нормальные к осям OX_1 , OX_2 , OX_3 .

В работе рассматриваются плоские упругие поперечные горизонтально поляризованные волны с волновым вектором, параллельным оси OX_1 . Волна распространяется вдоль толщины образца проката и ее фронт параллелен плоскости X_2OX_3 .

Рассмотрим распространение импульса поперечной волны, излучаемого пьезопреобразователем, установленным на плоскости проката (плоскость X_2OX_3 в выбранной нами системе координат). Направление поляризации пьезопреобразователя с направлением проката составляет угол α (ось OX_2) (см. рис. 1).

Сигнал на излучающем преобразователе имеет вид:

$$\mathbf{u}(t) = U_0(t) \mathbf{p} e^{j\omega t} \text{ с амплитудой } U_0.$$

В анизотропном материале в силу эффекта двулучепреломления исходная волна с амплитудой U_0 расщепляется на две с амплитудами:

$$U_2^0 = U_0 \cos \alpha, \quad U_3^0 = U_0 \sin \alpha. \quad (1)$$

Суммарный импульс для произвольного угла в соответствии с [22]:

$$u(t) = u_2(t) + u_3(t - \Delta t), \quad (2)$$

где

$$u_2(t) = U_0(t) \cos^2 \alpha \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$u_3(t - \Delta t) = U_0(t - \Delta t) \sin^2 \alpha \cos[(\omega_0(t - \Delta t) + \varphi_0)].$$

Временной сдвиг между импульсами, на который расщепляется исходный:

$$\Delta t = L \left(\frac{1}{V_3} - \frac{1}{V_2} \right) = t_3 - t_2, \quad (3)$$

где L — акустический путь; t_2, t_3 — задержки импульсов поперечных волн с поляризацией, параллельной оси OX_2 ($\alpha = 0$) и OX_3 ($\alpha = \frac{\pi}{2}$) соответственно.

В качестве характеристики акустической анизотропии авторы обычно используют безразмерный параметр:

$$A = \frac{V_2 - V_3}{V_{cp}} = 2 \frac{V_2 - V_3}{V_2 + V_3} = \frac{\Delta t}{t_{cp}} = 2 \frac{t_3 - t_2}{t_3 + t_2}. \quad (4)$$

Выражение для временного сдвига (3) можно записать в виде:

$$\Delta t = A \frac{L}{V_{cp}}. \quad (5)$$

Для полного расщепления импульса необходимо, чтобы временной сдвиг Δt превышал длину импульса $t_{и}$, т.е. для величины анизотропии должно выполняться соотношение:

$$A > \frac{V_{cp} t_{и}}{L}. \quad (6)$$

Для исследуемого сплава скорость поперечной волны порядка $V_{cp} \approx 3000$ м/с. Длительность импульса для частоты порядка 5 МГц составляет 1—1,5 мкс. Отсюда следует, что при толщине материала порядка 10 мм для выполнения соотношения (6) в случае измерения задержек t_2 и t_3 по двум отраженным сигналам в совмещенном режиме величина анизотропии должна превышать 20 %, однако обычно диапазон ее изменения для данного материала не превышает ± 1 % [23]. Понятно, что никакое реально возможное увеличение акустического пути за счет использования большого количества отраженных донных импульсов не может обеспечить выполнение неравенства (6). В этой связи простые методы оценки анизотропии по расщепленным импульсам в нашем случае неприменимы.

Кроме того, для исследуемого слабо анизотропного материала следует учитывать следующее обстоятельство: в соответствии с современными представлениями автоволновых подходов к процессам пластического деформирования при одноосном деформировании локальные деформации мезообъемов характеризуются пространственной неоднородностью не только по величине, но и направлению [24]. В процессе пластического деформирования ортотропного поликристаллического материала происходит поворот локальных осей анизотропии OX'_2 и OX'_3 на некоторый угол между локальной осью OX'_2 и направлением проката.

Поэтому для исследования закономерностей развития пространственно неоднородных пластических деформаций необходим алгоритм прецизионного измерения локальных значений акустической анизотропии с учетом пространственного разброса направлений локальных осей анизотропии материала. При этом размеры зон для акустических измерений должны соответствовать масштабу пространственной неоднородности («пространственному периоду») пластической деформации, который, как следует из результатов исследований [1, 4, 9], составляет 3—5 мм.

Типичные радиоимпульсы, используемые в ультразвуковой дефектоскопии, хорошо аппроксимируются следующим выражением:

$$u(t) = U_0 e^{-a_2 t} (1 - e^{-a_1 t}) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (7)$$

где U_0 — амплитуда; a_1, a_2 — постоянные времени нарастания и спада сигнала соответственно.

Численный анализ для импульса вида (7) показывает, что при повороте преобразователя в плоскости X_2OX_3 вокруг оси OX_1 на угол α суммарный импульс (2) смещается на величину $\Delta t'$, связанную с углом поворота соотношением:

$$\Delta t' = \Delta t \sin^2 \alpha. \quad (8)$$

Из соотношения (8) следует, что в системе координат $X'_2OX'_3$, повернутой относительно начальной на угол α , для задержек t'_2 и t'_3 , соответствующих направлениям вектора поляризации вдоль осей OX'_2 и OX'_3 , можно записать выражения:

$$t'_2 - t_2 = \Delta t \sin^2 \alpha, \quad (9)$$

$$t'_3 - t_3 = -\Delta t \sin^2 \alpha, \quad (10)$$

откуда получаем выражение для «кажущейся» анизотропии:

$$A' = A \cos 2\alpha. \quad (11)$$

На рис. 2 приведен график зависимости «кажущейся» анизотропии от угла поворота преобразователя с шагом 5° .

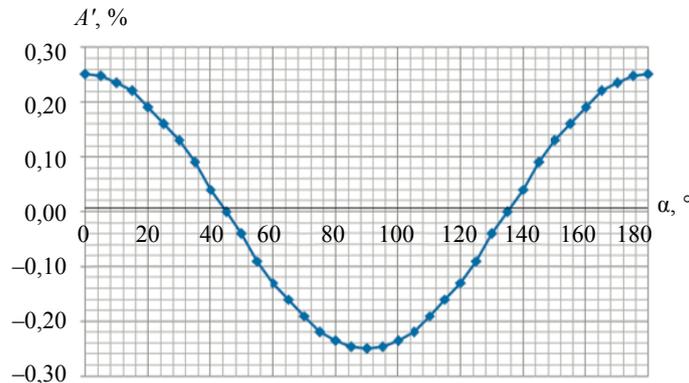


Рис. 2. Зависимость «кажущейся» анизотропии от угла поворота преобразователя.

Из рис. 2 видно, что «кажущаяся» анизотропия A' , как сказано выше, изменяется от величины A до $-A$. Следует также отметить, что максимально точно «кажущуюся» анизотропию можно измерить вблизи углов, кратных 90° , где производная $\frac{\partial A'}{\partial \alpha}$ близка к нулю. При этих углах «кажущаяся» и истинная анизотропии равны по модулю.

Ниже на рис. 3а—г условно показано пространственное распределение истинной анизотропии для ряда случаев:

рис. 3а — случай «идеального проката», когда в каждом выделенном макрообъеме материала истинная анизотропия одинакова по величине и направлению (угол поворота оси OX_2 в локальной зоне) и равна некоторому среднему значению $A_{\text{ср}}$;

рис. 3б — истинная анизотропия неодинакова по величине, но одинакова по направлению;

рис. 3в — истинная анизотропия одинакова по величине, но неодинакова по направлению;

рис. 3г — истинная анизотропия неодинакова как по величине, так и по направлению.

На соответствующих графиках приведены условные распределения величин «кажущейся анизотропии».

Рис. 3в, г позволяют сделать важный вывод: при игнорировании возможного поворота локальных осей анизотропии и ошибочной замене истинной анизотропии на «кажущуюся» вносится ошибка оценки анизотропии в сторону ее уменьшения, что может привести к нежелательным погрешностям расчетов характеристик конструкционных материалов, коррелирующих с величиной их акустической анизотропии.

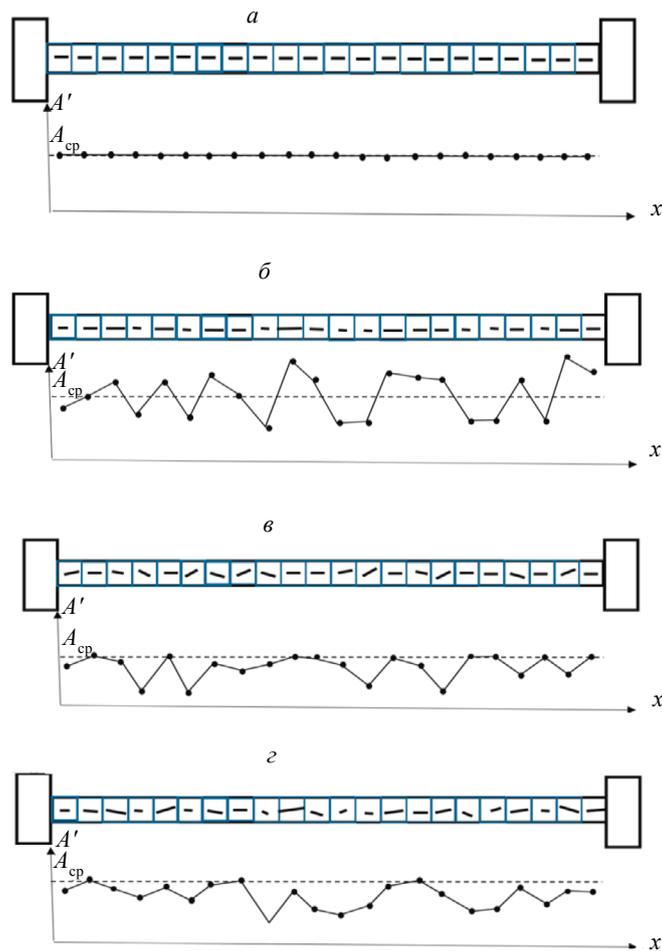


Рис. 3. Распределение истинной анизотропии в образцах: *a* — $A = \text{const} = A_{\text{cp}}$, $\gamma = \text{const} = 0$, $A'(x) = A(x)$; *б* — $A \neq \text{const}$, $\gamma = \text{const} = 0$, $A'(x) = A(x)$; *в* — $A = \text{const}$, $\gamma \neq \text{const}$, $A'(x) = A(x)\cos 2\gamma \leq A(x)$; *г* — $A \neq \text{const}$, $\gamma \neq \text{const}$, $A'(x) = A(x)\cos 2\gamma \leq A(x)$.

Некоторые авторы используют параметр A' для построения «угловых диаграмм анизотропии», однако, несмотря на измеримость, физического смысла «кажущаяся» анизотропия не имеет. Тем не менее ее можно использовать для определения локальных углов поворота осей анизотропии, являющихся важными характеристиками поля пластической деформации.

Действительно, при возможности определения параметра A' для достаточного массива значений углов α легко определить положение преобразователя, соответствующее некоторому углу α_0 , при котором $A' = 0$. При этом точность этого определения будет максимальной, поскольку, как следует из (11), в этой точке значение производной имеет локальный экстремум и искомая точка является точкой перегиба кривой (11), что существенно облегчает ее поиск средствами программного обеспечения используемых аппаратно-программных средств измерений.

Угол поворота локальных осей анизотропии записывается следующим образом:

$$\gamma = \alpha_0 - \frac{\pi}{4}, \quad (12)$$

где α_0 — угол поворота преобразователя α , при котором «кажущаяся» анизотропия становится равной 0.

Описанная процедура иллюстрируется рис. 4.

Следует сделать важное замечание относительно погрешности определения угла поворота локальных осей анизотропии.

Если в точке измерений локальные оси анизотропии повернуты на угол γ по отношению к НП, то формула (11) приобретает вид:

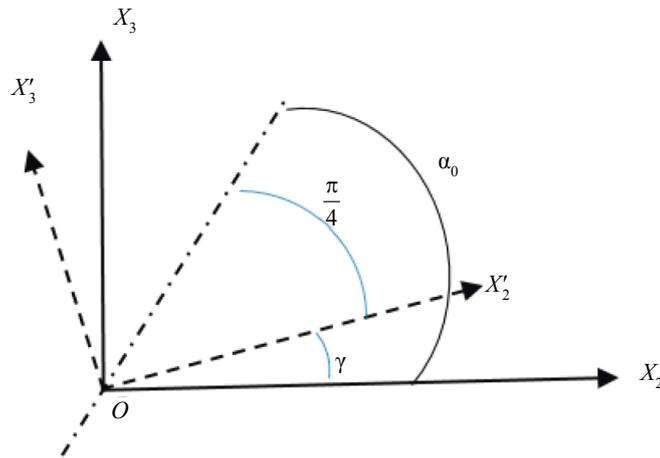


Рис. 4. Определение локальных осей анизотропии.

$$A' = A \cos 2(\alpha - \gamma). \quad (13)$$

Из (13) легко получить величину ожидаемой абсолютной погрешности определения угла поворота локальных осей $\Delta\gamma$:

$$\Delta\gamma = \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + \frac{(\Delta A)^2 \left[1 + \left(\frac{A'}{A} \right)^2 \right]}{4A^2 \left[1 - \left(\frac{A'}{A} \right)^2 \right]}}, \quad (14)$$

где $\Delta\alpha$ — абсолютная погрешность установки угла поворота преобразователя; ΔA — абсолютная погрешность определения акустической анизотропии, которая, как следует из формулы (5), связана с абсолютной погрешностью определения временного интервала для используемых средств измерений простой формулой:

$$\Delta A = \sqrt{2} \frac{\Delta t}{t_{cp}}. \quad (15)$$

При углах поворота преобразователя, в локальных осях, близких к $\frac{\pi}{4}$, где «кажушаяся» анизотропия стремится к нулю (а именно эти углы нас интересуют для поиска величины γ), формула (15) упрощается:

$$\Delta\gamma = \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + \frac{(\Delta A)^2}{4A^2}}. \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что чем меньше абсолютная величина истинной анизотропии, тем с большей погрешностью определяется угол γ . Этот вывод иллюстрируется нижеприведенным графиками на рис. 5, где представлены зависимости погрешности определения угла поворота локальных осей анизотропии $\Delta\gamma$ от величины истинной анизотропии для различных погрешностей установки угла поворота преобразователя $\Delta\alpha$ в диапазон от 1 до 10 град. Погрешности определения анизотропии (как истинной, так и «кажушейся»), обычно находятся в диапазоне 0,005—0,1 % в зависимости от используемых средств измерений и особенностей исследуемого материала, определяющих возможность прецизионного измерения задержек ультразвуковых импульсов. Для рис. 5 использовано значение погрешности $\Delta A = 0,05$ %, которая, как пояснено ниже, метрологически обеспечена используемыми средствами измерений.

Оценим минимальное значение истинной анизотропии, начиная с которого возможно определение угла поворота γ с допустимой погрешностью. Считаем, что допустимая погрешность связана с погрешностью установки преобразователя соотношением:

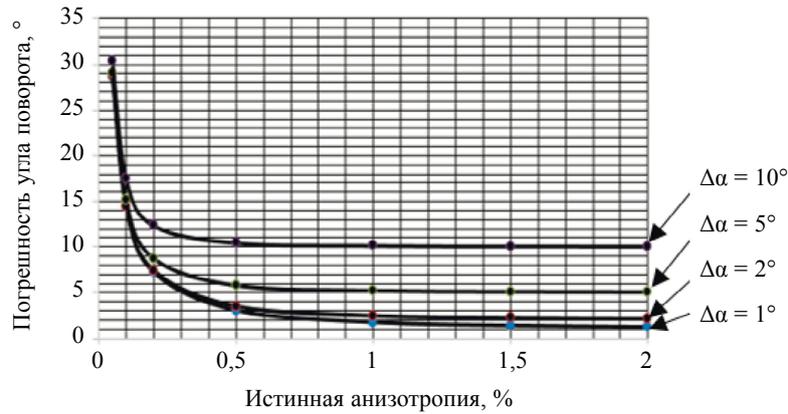


Рис. 5. Влияние величины истинной анизотропии на погрешность определения угла поворота локальных осей анизотропии.

$$k = \frac{\Delta\gamma}{\Delta\alpha}, \quad (17)$$

где $k > 1$ — некоторая постоянная, величина которой зависит от требуемой погрешности определения угла γ . Тогда для значения анизотропии, при которой гарантирована погрешность $\Delta\gamma$, получим соотношение:

$$A \geq \frac{k}{2\sqrt{k^2 - 1}} \frac{\Delta A}{\Delta\gamma}. \quad (18)$$

Реальная погрешность установки преобразователя имеет порядок $\pm 5^\circ$. Если необходимо обеспечить величину погрешности $\Delta\gamma$ не более $\pm 6^\circ$ (т.е. $k = 1,2$), то соотношение (18) конкретизируется следующим образом: $A \geq 0,7\%$. Таким образом, при данных значениях погрешностей $\Delta\alpha$ и $\Delta\gamma$ результаты определения углов поворота локальных осей анизотропии нельзя считать достоверными, если акустическая анизотропия материала менее $0,7\%$.

Для реализации описанной процедуры использовали устройство [25], содержащее две рядом расположенные пьезопластинки горизонтальных поперечных волн в форме равнобедренных прямоугольных треугольников с катетами 5 мм и общей гипотенузой. Пьезопластины поляризованы в ортогональных направлениях [26]. При повороте такого совмещенного преобразователя вокруг оси OX_1 и непрерывной фиксации величины «кажущейся» анизотропии можно достаточно точно определить величину угла γ , если выполнено условие (18).

После определения угла поворота локальных осей анизотропии γ само значение истинной анизотропии A может быть определено двумя способами:

обычным способом по формуле (4), в которой задержки t_2, t_3 аналогичны поляризациям пьезопластинок вдоль локальных осей анизотропии OX'_2 и OX'_3 соответственно;

уточненным способом в соответствии с процедурой, аналогичной предложенной в [25], с учетом того, что поляризация одной из пьезопластинок совершает поворот от направления, соответствующего углу γ до направления $\gamma + \frac{\pi}{2}$, поляризация второй пьезопластинки вращается в диапазоне углов от $\gamma + \frac{\pi}{2}$ до $\gamma + \pi$.

На рис. 6а—в приведены осциллограммы импульсов горизонтально поляризованных волн для различных ситуаций. Для приведенных осциллограмм амплитуда первого импульса для всех случаев измерений принята за 100%.

Сравнение осциллограмм на рис. 6а—в показывает заметное увеличение затухания при значительной пластической деформации: от 0,10 до 0,16 Нп/мкс.

Рис. 6в показывает, что расщепления импульсов, поляризованных под углом 45° к осям анизотропии, не происходит для донных сигналов с приемлемым соотношением «сигнал/шум». Это затрудняет достаточно точное определение акустической анизотропии на основании оценки вре-

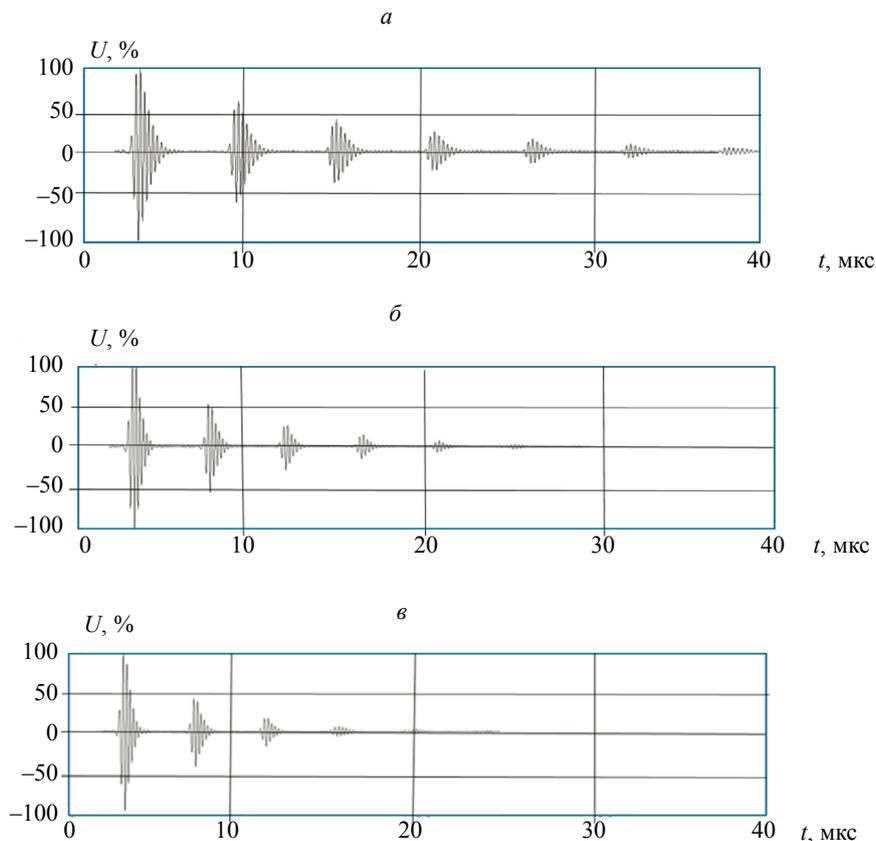


Рис. 6. Осциллограммы отраженных импульсов: исходный образец (акустическая анизотропия близка к 0, направление поляризации излучателя — вдоль НП) (а); образец, деформированный до образования шейки (20 % условной деформации, анизотропия в зоне измерений 0,8 %, направление поляризации излучателя — вдоль НП) (б); образец, деформированный до образования шейки (20 % условной деформации, анизотропия в зоне измерений 0,8 %, направление поляризации излучателя — под углом 45° к НП) (в).

менного сдвига между расщепленными импульсами, как это делается для материалов с высоким уровнем акустической анизотропии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментов использовали стандартные плоские образцы типа I по ГОСТ 1497 с толщиной рабочей части 7 мм и длиной 110 мм. Шероховатость рабочей поверхности Ra составляла 2,5 мкм по ГОСТ 2589. Измерения проводились для 5 одинаковых образцов.

Пластическое деформирование образцов осуществляли с помощью испытательной машины фирмы Tinius Olsen Ltd, модель H100KU.

Акустические измерения проводили в моменты остановки верхней traversы испытательной машины с помощью ИВК «АСТРОН», обеспечивающего возможность прецизионных измерений в реальном масштабе времени задержек и амплитуд ультразвуковых импульсов.

Определение задержек t_2 и t_3 проводили по 1 и 4 отраженным импульсам, что при толщине образца 7 мм составляло порядка 15 мкс.

Метрологически обеспеченная погрешность измерения временных интервалов Δt для ИВК «АСТРОН» составляет ± 2 нс.

Из формулы для анизотропии (4) следует выражение для абсолютной погрешности анизотропии:

$$\Delta A = \sqrt{2} \frac{\Delta t}{t_{cp}}. \quad (19)$$

Таким образом, абсолютная погрешность измерения анизотропии, как следует из формулы (19), теоретически не превышает величины 0,02 %, однако с учетом случайных факторов фактический доверительный интервал значений погрешности, полученный в результате многократных измерений, составил 0,05 % при доверительной вероятности 95 %, что мы и примем за фактическую погрешность определения акустической анизотропии.

Акустические измерения проводились вдоль рабочих частей образцов с шагом 5 мм.

На рис. 7 приведены распределения анизотропии вдоль центральной части образцов в исходном состоянии и деформированных на 5, 10, 15 и 20 %, что соответствовало моменту появления шейки.

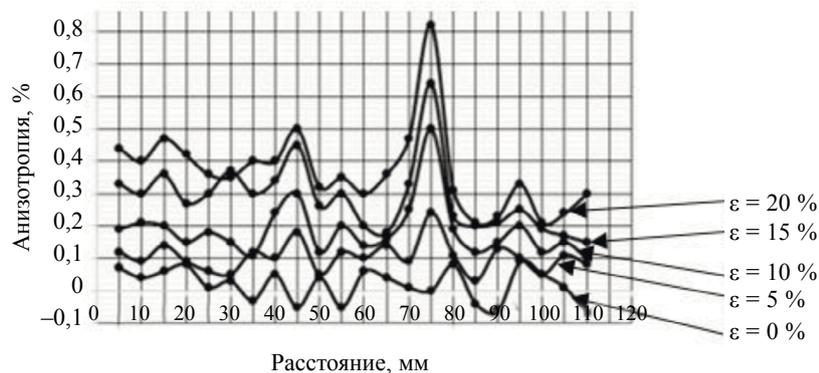


Рис. 7. Распределение акустической анизотропии по длине образца.

Из рис. 7 видно, что распределение анизотропии вдоль рабочей части образцов отличается заметной неоднородностью. При этом следует отметить важный факт: на достаточно ранних стадиях деформирования (не более 5 %) вдоль рабочей части начинают формироваться устойчивые локальные экстремумы анизотропии. Потеря устойчивости процесса деформирования произошло в зоне максимального экстремума, на расстоянии 75 мм от нижнего захвата. Данный результат соответствует ряду положений автоволновой механики пластической деформации [4, 9], согласно которым на стадии параболического упрочнения (а эта стадия является основной для исследуемого материала с ГЦК-структурой) очаги деформации наибольшей мощности (локальные максимумы) останавливаются и в наибольшем из них происходит потеря устойчивости деформации и дальнейшее разрушение. Аналогичное поведение параметра акустической деформации дает основание говорить о возможности разработки инженерной методики контроля закономерностей развития пластических деформаций, а после проведения представительных экспериментальных исследований — и о методике оценки ресурса пластичности и раннего обнаружения зон разрушения материала в составе высоконагруженных ответственных конструктивных элементов, подвергаемых повторно-статическим или циклическим нагрузкам большой амплитуды.

Авторы работ [1, 4] показывают, что в процессе пластической деформации поликристаллического материала возникают и эволюционируют на макроуровне не только поля смещений, но и поля поворотов. Естественно попытаться связать последние с введенным выше понятием поворота локальных осей акустической анизотропии. Экспериментально выявить наличие таких углов поворота в рамках проведенных экспериментов не удалось, что, по-видимому, объясняется большой погрешностью определения угла поворота локальных осей акустической анизотропии вследствие ее малой величины (см. формулу (16)).

ВЫВОДЫ

1. Предложена расчетно-экспериментальная методика определения акустической анизотропии слабо анизотропного ортотропного материала, позволяющая определить не только степень локальной акустической анизотропии, но и ее направление.

2. Проанализированы источники погрешностей предлагаемой методики и границы ее применимости в инженерной практике.

3. Проведены эксперименты на образцах из горячекатаного листа сплава АМг61 по исследованию влияния пластической деформации на закономерности изменения пространственного распределения акустической анизотропии.

4. В целом результаты подтверждают положения автоволновой механики пластичности металлов в части формирования стационарных максимумов пластической деформации на стадии параболического упрочнения: на достаточно ранних стадиях деформирования (не более 5 %) вдоль рабочей части образца начинают формироваться устойчивые локальные экстремумы анизотропии. Потеря устойчивости процесса деформирования произошло в зоне максимального экстремума.

5. Полученные результаты дают основание надеяться, что после проведения представительных экспериментальных исследований может быть разработана инженерная методика неразрушающей оценки ресурса пластичности и раннего обнаружения зон разрушения материала в составе высоконагруженных ответственных конструктивных элементов, подвергаемых повторно-статическим или циклическим нагрузкам большой амплитуды.

Исследование выполнено по гранту РНФ №19-19-00332-П «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев Л.Б., Баранникова С.А. Автоволновая механика пластичности металлов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 1. С. 49—63.
2. Pelleg J. Mechanical Properties of Materials. Dordrecht: Springer, 2013. 634 p.
3. Messerschmidt U. Dislocation Dynamics during Plastic Deformation. Berlin: Springer, 2010. 503 p.
4. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. М.: Физматлит, 2018. 207 с.
5. Haken H. Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. Berlin: Springer Verlag, 2005. 317 p.
6. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G. Elastic-plastic invariant of strain in metals // Progress in Physics Metals. 2018. V. 18. No. 4. P. 379—481.
7. Zuev L.B., Barannikova S.A., Semukhin B.S. Kinetics of Macrolocalization of Plastic Flow of Metals // Physics of the Solid State. 2018. V. 60 (7). P. 1358—1364.
8. Reyne B., Manach P.-Y., Moes N. Macroscopic consequences of Poibert-Luders and Portevin-Le Chatelier bands during tensile Deformation in Al—Mg alloys // Materials Science & Engineering A. 2019. V. 746. P. 187—196.
9. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
10. Муравьева О.В., Муравьев В.В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 3—11.
11. Матюк В.Ф. Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2012. № 3. С. 15—42.
12. Самокрутов А.А., Бобров В.Т., Шевальдыкин В.Г., Козлов В.Н., Алехин С.Г., Жуков А.В. Исследование анизотропии проката и ее влияния на результаты акустических измерений // Контроль. Диагностика. 2003. № 11. С. 6—19.
13. 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. P. 201—210.
14. 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. Т. 10. № 1. С. 42—52.
15. Углов А.Л., Хлыбов А.А. О контроле напряженного состояния газопроводов из анизотропной стали методом акустоупругости // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 9—19.
16. Курашкин К.В. Исследование акустоупругого эффекта в анизотропно пластически деформированном материале // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 3. С. 382—388.
17. 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. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.12
18. Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Yu.A. Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 6. P. 201—207.

19. *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. DOI: 10.15593/pern.mech/2020.4.12
20. *Kobayashi M.* Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation. Part I. Theory // International Journal of Plasticity. 1998. V. 14. No. 6. P. 511—522.
21. *Беляев А.К., Лобачев А.М., Модестов В.С. Пивков А.В., Полянский В.А., Семенов А.С., Третьяков Д.А., Штукин Л.В.* Оценка величины пластических деформаций с использованием акустической анизотропии // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2016. № 5. С. 124—131.
22. *Дьелесан Э., Руайе Д.М.* Упругие волны в твердых средах. Применение для обработки сигналов. М.: Наука, 1982. 424 с.
23. *Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н.* Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009. 280 с.
24. *Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Чернявский А.Г.* Пластическая дисторсия — фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушения твердых тел // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 1. С. 31—46.
25. *Хлыбов А.А., Углов А.Л., Андрианов В.М., Рябов Д.А., Кувшинов М.О.* Способ определения акустической анизотропии слабо анизотропного проката / Патент на изобретение № 2745211. Оpubл. 22.03.2021. Бюл. № 9.
26. *Хлыбов А.А., Углов А.Л., Прилуцкий М.А.* Ультразвуковой датчик сдвиговых волн / Патент на изобретение № 2365911. Оpubл. 27.08.2009. Бюл. № 24.
-