

Исследование эффекта быстрой динамики в клине со структурной нелинейностью с использованием клиновых волн

А.А. Агафонов,* А.И. Кокшайский,† Е.А. Тошов‡

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

С использованием клиновых волн исследован эффект быстрой динамики в клине из поликристаллического сплава Д16 с остаточными упругими напряжениями. На основе анализа полученных экспериментальных данных был сделан вывод: использованную методику можно применять для выявления дефектной структуры образца.

PACS: 43.25.+y УДК: 534

Ключевые слова: клиновые акустические волны, эффект быстрой динамики, структурная нелинейность.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования клиновых волн продолжаются более четырёх десятилетий, начиная с первых работ 1972 г. Лагасса [1] и Марадудина [2]. Клиновые волны являются изгибными и обладают высокой локализацией энергии у ребра клина [3]. Математическое описание таких волн и нахождение нормальных мод очень сложно. Точного решения этой задачи в настоящее время не получено. Поэтому на практике либо используют численные методы [2,4,5], либо развивают методы, основанные на качественном анализе возможностей формирования нормальных мод из полей, существующих в более простых структурах — неограниченных упругих средах и пластинках [6,7]. Лагасс предложил простую, эмпирическую формулу для скорости изгибных мод клиновой волны (через угол клина и скорость поверхностной волны) [1]. Она выглядит следующим образом:

$$c = c_R \sin(n\theta), \quad (1)$$

где c_R — скорость волны Рэлея, n — номер моды, θ — угол раствора клина. Использование клиновых волн является незаменимым методом диагностики твердотельного образца, имеющего рёбра. В развитии применения данных волн для диагностики остается много неисследованных особенностей, хотя по их изучению уже совершено немало работ. Это повышает интерес к их исследованию и использованию, нацеленному на расширение возможностей диагностики твердых тел. Однако использование клиновых волн в неразрушающем контроле в настоящее время значительно сдерживается из-за отсутствия ясного понимания закономерностей влияния на их распространение различных типов дефектов (зазубрин, выемок, микротрещин, остаточных напряжений) [8]. Как известно, наличие дефектов в твёрдом теле приводит к возникновению нели-

нейных явлений [9]. В настоящей работе рассматриваются следующие эффекты: зависимость поглощения волны от её амплитуды и эффект быстрой динамики, заключающийся в зависимости от амплитуды скорости волны. Как известно, при наличии дефектов в материале проявляется структурная нелинейность, причём её вклад значительно превосходит вклады других типов нелинейности [10–12].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБРАЗЕЦ

Для исследования упомянутых нелинейных эффектов была подготовлена следующая экспериментальная установка (рис. 1). Основные измерительные приборы: ультразвуковая установка Ritec (включает ультразвуковой генератор, АЦП, фильтры), осциллограф и компьютер.

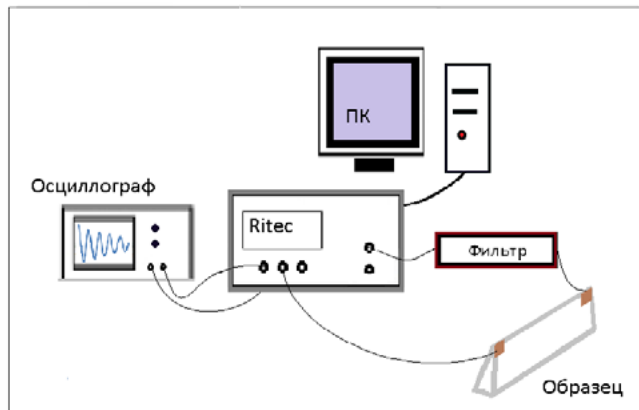


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

Для проведения экспериментальных исследований в образец из поликристаллического сплава алюминия Д16 путём деформаций были внесены остаточные упругие напряжения. Из полученного образца был изготовлен клин с углами раствора 30° и 60° (третий угол, равный 90° , не использовался) и длиной 180 мм.

*E-mail: agafonov.12345@mail.ru

†E-mail: super_trouper@mail.ru

‡E-mail: toschov.evgeniy@physics.msu.ru

Для возбуждения упругих волн в клине использовались пьезоэлектрические преобразователи.

Измерения проводились с использованием программы Rites, позволяющей с помощью компьютера настраивать генерируемый сигнал и производить математическую обработку принимаемого сигнала.

Генерируемый электрический импульс поступает на излучающий преобразователь. Преобразователь (с помощью обратного пьезоэлектрического эффекта) генерирует упругий импульс в клине. Импульс распространяется в образце в виде различных упругих волн, в том числе — клиновых. Упругие волны, (посредством прямого пьезоэлектрического эффекта) вызывают появление электрических импульсов на принимающем преобразователе.

Электрический сигнал проходит через фильтры, понижающие уровень шума, и поступает на установку Rites, где происходит его обработка. Вид сигнала наблюдается на осциллографе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 60° клине был получен импульс со скоростью распространения 2.57 ± 0.07 км/с. Он был использован для дальнейших исследований.

Для исследований в 30° клине был взят импульс второй моды клиновой волны, распространяющийся со скоростью 2.25 км/с.

Измерения были проведены при оптимальных частотах генерации — 410 кГц для 60° клина, 425 кГц для 30° клина.

В дальнейшем были измерены зависимости амплитуды и фазы сигналов на принимающем преобразователе от амплитуд сигнала на излучающем преобразователе.

Амплитуда сигнала на излучающем преобразователе и на 30°, и на 60° клине изменялась в диапазоне от 48 до 360 В. Ширина импульса — 1.7 мкс.

Расчёт изменения поглощения и скорости импульсов от амплитуды сигнала был произведён по следующим формулам:

Изменение фазовой скорости:

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta \varphi}{2\pi f \tau} \quad (2)$$

Изменение поглощения:

$$\Delta \alpha = \frac{1}{L} \ln \frac{U A_0}{A U_0} \quad (3)$$

Были получены следующие зависимости:

Полученные зависимости изменения фазовой скорости являются почти линейными функциями амплитуды волны

Зависимость изменения коэффициента поглощения клиновой волны от амплитуды для 60° клина имеет

линейный вид, а для 30° клина имеет некоторый минимум, за которым следует линейный участок. Это отличие графиков может быть объяснено тем, что в 60° клине исследовалась первая, единственная мода, а в 30° клине для исследования была выбрана вторая мода клиновой волны. При этом высшие моды имеют меньшую амплитуду, чем низшие при одинаковой амплитуде зондирующего импульса

Полученные зависимости (рис. 2, 3, 4, 5) свидетельствуют о нелинейности среды.

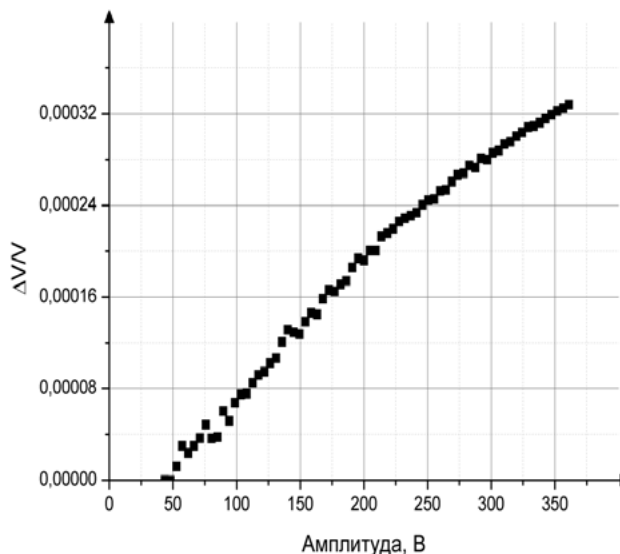


Рис. 2: Зависимость изменения фазовой скорости от амплитуды для 30° клина.

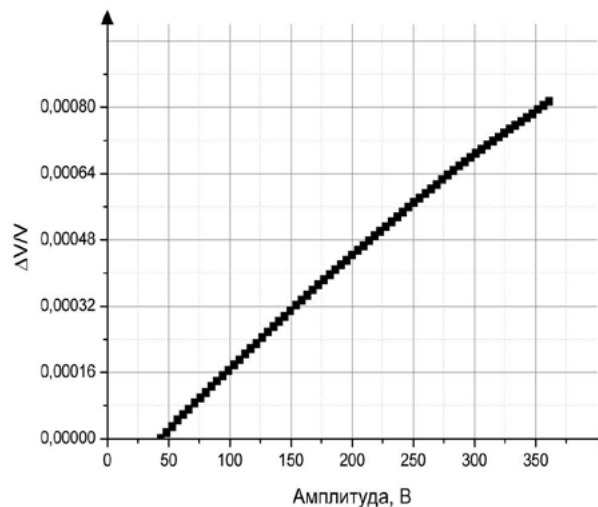


Рис. 3: Зависимость изменения фазовой скорости от амплитуды сигнала для 60° клина.

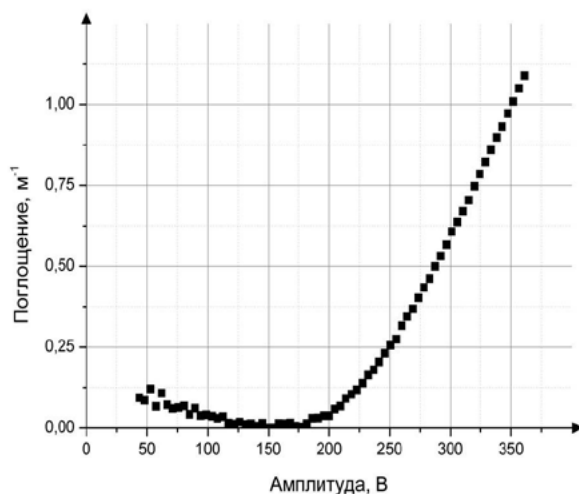


Рис. 4: Зависимость поглощения от амплитуды для 30° клина.

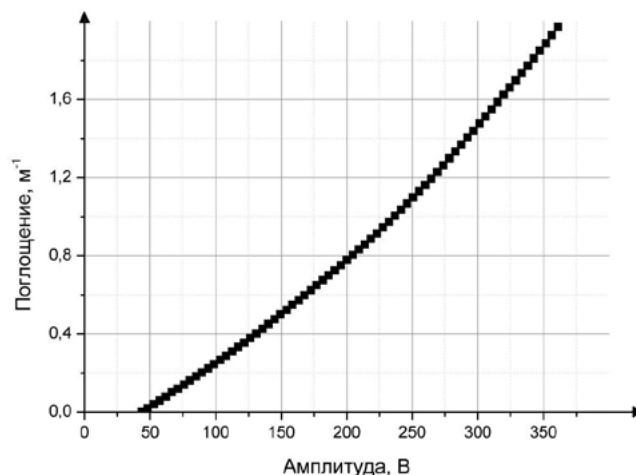


Рис. 5: Зависимость поглощения от амплитуды для 60° клина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана экспериментальная установка и методика исследования клиновых волн в твёрдых телах.
2. Изготовлены образцы с дефектами в виде остаточных упругих напряжений и микротрещин.
3. Проведены экспериментальные исследования зависимости скорости и поглощения клиновых волн от их амплитуды.
4. Обнаружена зависимость скорости и поглощения клиновых волн от их амплитуды, что указывает

на наличие структурной нелинейности.

5. Таким образом, зависимость скорости и поглощения клиновых волн от их амплитуды, может служить диагностическим признаком структурной нелинейности.

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору А. И. Коробову.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-00288).

- [1] Lagasse P. E., Mason I. M., Ash E. A. IEEE Trans. on son. and ultrason. **20**. P. 143. (1973).
- [2] Maradudin A. A., Wallis R. F., Mills D. L., Ballard R. L. Phys. Rev. B. **6**. P. 1106. (1972).
- [3] Боженко В. В., Иванов-Шиц К. М., Случ М. И., Солодов И. Ю. Акуст. журн. **31**, вып. 2. С. 262. (1983).
- [4] Moss S. L., Maradudin A. A., Cunningham S. L. Phys. Rev. B. **8**. P. 2999. (1973).
- [5] Sharon T. M., Maradudin A. A., Cunningham S. L. Phys. Rev. B. **8**. P. 6024. (1973).
- [6] Можжев В. Г. Вестник Московского Университета. № 5. С. 40. (1989).
- [7] McKenna J., Boyd G. D., Thurston R. N. IEEE Trans. on

son. and ultrason. **21**. P. 178. (1974).

- [8] Шанин А. В. Акуст. журн. **43**, № 3. С. 402. (1997).
- [9] Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. (М.: Наука, 1966).
- [10] Руденко О. В. Дефектоскопия. № 8. С. 24. (1993).
- [11] Руденко О. В. Успехи физических наук. **176**, № 1. С. 77. (2006).
- [12] Изосимова М. Ю. Дистанционная диагностика материалов с микро- и наномасштабными дефектами методом сканирующей лазерной виброметрии. Диссертация кандидата физ.-мат. наук. (Москва, МГУ, 2009).

The experimental studies of fast dynamics in a wedge with structural nonlinearity with V-waves

A.A. Agafonov^a, A.I. Kokshaiskii^b, E.A. Toschov^c

*Department of acoustics, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aagafonov.12345@mail.ru, ^bsuper_trouper@mail.ru, ^ctoschov.evgeniy@physics.msu.ru

The experimental studies of fast dynamics in a wedge of polycrystalline aluminum alloy with residual stresses with V-waves were carried out. As a result of the analysis of experimental data this method can be used to detect the presence of defects.

PACS: 43.25.+y

Keywords: wedge acoustic waves, fast dynamics, structural nonlinearity.

Received 27.07.2015

Сведения об авторах

1. Агафонов Александр Александрович — студент; тел.: 8(916) 482-01-80, e-mail: agafonov.12345@mail.ru.
2. Кокшайский Алексей Иванович — младший научный сотрудник; тел.: 8(985) 296-45-07, e-mail: super_trouper@mail.ru.
3. Тощов Евгений Алексеевич — студент; тел.: 8(929) 651-68-92, e-mail: toschov.evgeniy@physics.msu.ru.