Экспериментальное исследование быстрой и медленной динамики крутильных волн в поликристаллической меди

А.И. Коробов,* Н.И. Одина,† Е.М. Асеев[‡]

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

(Статья поступила 03.07.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Приведены результаты экспериментального исследования быстрой и медленной динамики крутильных волн в акустических резонаторах из поликристаллической меди двумя методами: резонансным (на частоте 3 кГц) и импульсным (на частоте 138 кГц). В обоих случаях с ростом амплитуды наблюдалось линейное уменьшение скорости крутильных волн. Проведено сравнение с аналогичными результатами, полученными с использованием продольных волн. Для крутильных волн относительное изменение частоты примерно в 2 раза меньше, чем для продольных волн. При увеличении амплитуды зондирующего сигнала обнаружено нелинейное затухание как крутильных, так и продольных волн. Обнаруженные зависимости поглощения и скорости крутильных волн от амплитуды зондирующего сигнала объясняются наличием в образце структурной упругой нелинейности.

РАСS: 43.25+у, 45.70.-п УДК: 534.222 Ключевые слова: быстрая и медленная динамика, крутильные волны, поликристаллическая медь, структурная упругая нелинейность.

введение

Как известно, в поликристаллических металлах вследствие наличия в них мезомасштабной дефектной структуры наблюдается нелинейное поведение упругих параметров даже при относительно слабых внешних воздействиях. Упругая нелинейность, обусловленная дефектной структурой, обычно называется структурной, или неклассической. Структурная нелинейность на несколько порядков превосходит физическую нелинейность, связанную с ангармонизмом кристаллической решетки [1-3]. Проявления структурной упругой нелинейности в резонаторах из поликристаллических металлов ранее экспериментально исследовались в основном для продольных волн [3, 4]. В то же время, на наш взгляд, представляет интерес экспериментальное исследование нелинейных эффектов с использованием и других типов волн. Это позволит расширить понимание механизмов упругой структурной нелинейности и возможностей их практического использования [5].

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Из цилиндрического прутка промышленного поликристаллического сплава меди был изготовлен акустический резонатор в форме цилиндра длиной 135 мм и диаметром 15.8 мм. Плотность образца меди составляла 8900 кг/м³. Резонатор одним концом был жестко закреплен на массивном металлическом основании. Граничное условие на этом конце стержня было близко к условию на абсолютно жесткой границе. Другой конец стержня оставался свободным. Таким образом, образец представлял собой четвертьволновой акустический резонатор. Возбуждение крутильных колебаний в резонаторе осуществлялось двумя парами продольных пьезопреобразователей, закрепленных на параллельных фасках, вырезанных вдоль боковых поверхностей цилиндра на свободном конце образца. Возбуждение и прием продольных колебаний проводились продольными пьезопреобразователями, закрепленными на противоположных основаниях цилиндра.

Измерения упругих свойств резонатора производились двумя методами: методом нелинейного акустического резонанса на частотах (3-10) кГц и эхоимпульсным методом частотах более 100 кГц. Первый метод заключается в измерении зависимости относительного изменения собственной частоты образца от амплитуды возбуждающего сигнала. Методика измерений в этом случае заключается в измерении серии резонансных характеристик исследуемого образца при различных амплитудах электрического сигнала, подаваемого на излучающий преобразователь. Экспериментальная установка, реализующая резонансный метод, состояла из синхронного усилителя SR850 со встроенным генератором сигналов фирмы Stanford Research System, усилителя мощности и осциллографа для контроля подаваемого на излучающий преобразователь сигнала. Поскольку рабочий диапазон синхронного усилителя SR850 ограничен частотой 100 кГц, для работы на частотах выше 100 кГц был использован ультразвуковой измерительный комплекс на основе импульсного приемо-передатчика RPR-4000 фирмы RITEC (USA), работающий в импульсном режиме. Для анализа акустических сигналов в ультразвуковой установке был реализован квадратурный метод, который

^{*}E-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

[†]E-mail: niodina@mail.ru

[‡]E-mail: aseevgenij@mail.ru



Рис. 1: Быстрая динамика крутильных волн: *a* — зависимость относительного изменения резонансной частоты от амплитуды возбуждающего сигнала при непрерывном возбуждении; *б* — зависимость относительного изменения скорости крутильных волн от амплитуды возбуждающего сигнала при импульсном возбуждении

позволяет одновременно измерять амплитуду и фазу принимаемого сигнала и рассчитать относительное изменение скорости упругой волны и ее коэффициент затухания. Преимуществом импульсного метода, помимо расширения частотного диапазона, является простота проведения эксперимента и обработки экспериментальных результатов. Поскольку для акустического четвертьволнового резонатора скорость упругой волны $V = 4Lf_n/(2n + 1)$ линейно зависит от его резонансной частоты f_n (*L*-длина образца, *n*-номер резонанса), то оба метода несут одинаковую информацию об изменении скорости волны. Измерения с использованием крутильных волн непрерывным методом проводились на резонансной частоте образца порядка 3000 Гц, а импульсным — 138 кГц.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты экспериментального исследования быстрой динамики крутильных волн в образце меди при непрерывном и импульсном возбуждении представлены на рис. 1. Из сравнения графиков видно, что в обоих случаях (т.е. и на высоких, и на низких частотах) наблюдается линейное уменьшение скорости крутильных волн при увеличении амплитуды волны, сравнимое по порядку величины. Отметим, что для крутильных волн это изменение примерно в 2 раза меньше, чем для продольных волн в том же образце, измеренное ранее [6].

По экспериментально измеренным резонансным кривым резонатора, совершающим крутильные колебания, была рассчитана его добротность. Ее зависимость от амплитуды возбуждающего сигнала показана на рис. 2. Из рис. 2 видно, что с ростом амплитуды добротность падает (затухание, соответственно, растет). В аналогичных экспериментах на продольных волнах также наблюдалось уменьшение добротности резонатора при увеличении амплитуды колебаний в нем [2, 6].



Рис. 2: Быстрая динамика крутильных волн: зависимость добротности резонатора от амплитуды возбуждающего сигнала при непрерывном возбуждении

Были проведены экспериментальные исследования медленной динамики крутильных волн в образце меди импульсным методом. Результаты измерений медленной динамики приведены на рис. 3.

Измерение медленной динамики проводилось следующим способом. Предварительно в течение 15 мин в образце возбуждалась крутильная мода с максималь-



Рис. 3: Медленная динамика крутильных волн: *а* — зависимость относительного изменения скорости крутильных волн от времени; *б* — зависимость изменения коэффициента затухания от времени

но возможной амплитудой. Это приводило к нарушению равновесного состояния дефектной системы в образце. После этого экспериментально исследовалась релаксация упругих свойств в образце меди: на малой амплитуде зондирующего сигнала измерялось изменение скорости и поглощения крутильных волн с течением времени. Из рис. З,а видно увеличение относительного изменения скорости распространения крутильных волн по закону, близкому к логарифмическому. Также был отмечен рост затухания в зависимости от времени (рис. 3, δ). При временах измерения > 1000 с величины скорости и поглощения крутильных волн выходят на стационарный уровень. Отметим, что для крутильных волн это время примерно в 2.5 раза меньше, чем для продольных волн в том же образце [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования быстрой и медленной динамики крутильных волн в акустических резонаторах из поликристаллической меди двумя методами: импульсным и непрерывным. В обоих случаях наблюдалось уменьшение скорости крутильных волн с увеличением их амплитуды, сравнимое по порядку величины. Проведено сравнение с результатами, полученными с использованием продольных волн [6]. Для крутильных волн относительное изменение частоты примерно в 2 раза меньше, чем для продольных волн. Линейная зависимость изменения скорости крутильных волн, обнаруженная при непрерывном и импульсном методах измерения, указывает на наличие в материале резонатора дефектной структуры, приводящей к структурной упругой нелинейности. При исследовании эффектов медленной динамики отмечена более медленная релаксация скорости упругих крутильных волн, чем скорости продольных волн. Исследованные нелинейные упругие эффекты могут быть использованы при создании новых методов неразрушающего контроля, основанные на методах нелинейной акустики.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00042).

- [1] Руденко О.В. УФН. 2006. 176, № 1. С. 77.
- [2] Назаров В.Е., Островский Л.А., Соустова И.А., Сутин А.М. Акуст. журн. 1988. 34, №3, С. 491.
- [3] Ostrovsky L.A., Johnson P.A. Riv. Del Nuovo Cim. 2001.
 24, № 7. P. 1.
- [4] Коробов А. И., Одина Н. И., Мехедов Д. М. Акуст. журн. 2013. 59, № 4. С. 438.
- [5] Машинский Э. И. Геология и геофизика. 2009. 50, № 8. С. 950.
- [6] Хегай С.С. Особенности нелинейного взаимодействия продольных и крутильных волн в резонаторах из поликристаллической меди. Магистерская диссертация. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2017.

The experimental investigation of the fast and slow dynamics of the torsional waves in the polycrystalline copper

A. I. Korobov^a, N. I.Odina^b, E. M. Aseev^c

Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia E-mail: ^aakor@acs465a.phys.msu.ru, ^bniodina@mail.ru, ^caseevgenij@yandex.ru

The results of an experimental study of the fast and slow dynamics of torsional waves in acoustic resonators made of polycrystalline copper using two methods: resonant (at a frequency of 3 kHz) and pulsed (at a frequency of 138 kHz) are presented. In both cases, as the amplitude was increased, a linear decrease of the velocity of the torsional waves was observed. A comparison with similar results obtained using longitudinal waves was made. For torsional waves, the relative frequency change is approximately 2 times less than for longitudinal waves. As the amplitude of the probing signal is increased, nonlinear absorption of both torsional and longitudinal waves is observed. The observed dependences of the absorption and velocity of torsional waves from the amplitude of the probing signal are explained by the presence in the sample of a structural elastic nonlinearity.

PACS: 43.25+y, 45.70.-n

Keywords: fast and slow dynamics, torsional waves, polycrystalline copper, structural elastic nonlinearity *Received 03 July 2017*.

Сведения об авторах

- 1. Коробов Александр Иванович доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru.
- 2. Одина Наталья Ивановна канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: niodina@mail.ru
- 3. Асеев Евгений Михайлович студент; (495) 939-18-21, e-mail: aseevgenij@yandex.ru.