

УДК 620.179.162

Кириченко И.А., д-р техн. наук,
Киреев А.Н., Кашура А.Л., кандидаты техн. наук

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Представлен метод определения структурного коэффициента затухания продольной ультразвуковой волны, изменение которого обуславливается изменением затухания упругой волны в объектах контроля из поликристаллических материалов.

Ключевые слова: ультразвук, затухание, поликристаллические материалы, рассеяние, ультразвуковая волна.

Kirichenko I.A., ScD.,
Kireev A.N. PhD., Kashura A.L. PhD.

THE METHOD OF DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF ULTRASOUND ATTENUATION IN POLYCRYSTALLINE MATERIALS

The paper provides the method of determination of the structural factor attenuation of longitudinal ultrasonic waves, the change of which is conditioned by the change of the attenuation of elastic waves in the objects of control of polycrystalline materials.

Keywords: ultrasound, attenuation, polycrystalline materials, scattering, the ultrasonic wave.

Кириченко И.О., д-р техн. наук,
Киреев А.М., Кашура О.Л., кандидаты техн. наук

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГАСАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ В ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛАХ

Представлено метод визначення структурного коефіцієнта загасання поздовжньої ультразвукової хвилі, зміна якого обумовлюється зміною загасання пружної хвилі в об'єктах контролю з полікристалічних матеріалів.

Ключові слова: ультразвук, загасання, полікристалічні матеріали, розсіювання, ультразвукова хвиля.

При распространении ультразвуковой волны в поликристаллическом материале уменьшается ее интенсивность. Ослабление интенсивности связано с расхождением и затуханием ультразвуковой волны [1]. Ослабление волны за счет расхождения зависит от известных факторов: размеров излучателя, длины и скорости ультразвуковой волны в среде.

В то же время установлено, что затухание ультразвука в поликристаллических материалах обусловлено его поглощением и рассеиванием на микронеоднородностях и границах кристаллитов.

На величину поглощения (преобразование энергии ультразвуковой волны в тепловую энергию) влияют потери на дефектах кристаллической решетки, термоупругие эффекты, дислокационное трение, фонон-фононное взаимодействие, взаимодействие фононов с электронами проводимости,

взаимодействие ультразвука с колебаниями кристаллической решетки, магнитоупругие эффекты [2].

Рассеяние ультразвука обусловлено тем, что поликристаллический материал не является строго однородным. В нем встречаются граничные поверхности, на которых звуковое сопротивление изменяется [3]. В материалах, зерна которых состоят из одной фазы, например, в аустенитной стали, изменение акустического сопротивления при переходе границы кристаллитов обусловлено упругой анизотропией свойств кристаллита. В материалах, зерна которых состоят из разных фаз, например, в перлитоферритной стали, чугун и др., изменение акустического сопротивления на границе кристаллитов больше, чем у материалов с однофазной структурой, следовательно, и рассеяние играет большую роль в затухании ультразвука.

Из вышесказанного следует, что существуют определенные закономерности между условиями распространения упругой волны,

© Кириченко И.А., Киреев А.М.,
Кашура А.Л., 2012

ее длиной, размерами и акустическими характеристиками как элементов проводящей среды (зерен и межкристаллитных прослоек), так и всей среды в целом. В зависимости от соотношения указанных параметров решающая роль в затухании принадлежит либо явлениям дифракции, когда длина волны λ значительно превосходит среднестатистический размер зерна d ($\lambda > 2\pi d$), вследствие чего акустические потери оказываются малы. В области частот, когда $d < \lambda < 2\pi d$ характерным является фазовое рассеяние ультразвука на границах кристаллитов. Если $\lambda \leq d$, то происходит диффузное рассеяние ультразвука, при котором коэффициент рассеяния уже не зависит от частоты, а с повышением частоты заметную роль начинает играть физическое поглощение ультразвука.

Затухание ультразвука является усложняющим фактором при ультразвуковом контроле объектов с поликристаллической структурой. Погрешность вносит разница в затухании ультразвуковой волны в объекте контроля и в стандартном образце с искусственными эталонными отражателями для оценки допустимости обнаруженных несплошностей. Вследствие этой разницы амплитудные характеристики эхо-сигнала от обнаруженной несплошности и эталонного отражателя с одинаковой эквивалентной площадью будут иметь разное значение.

С другой стороны, связь между параметрами ультразвуковой волны и размерами, формой и характеристиками элементов проводящей среды поликристаллического материала позволяет осуществлять контроль структуры без нарушения целостности изделия путем построения корреляционных зависимостей между структурными характеристиками материала и параметрами затухания упругой волны.

Определение затухания упругой волны может осуществляться резонансным методом, при котором измеряется ширина резонансных пиков на определенном уровне от максимального значения амплитуды. Также затухание определяют методом свободных колебаний посредством измерения числа периодов свободных колебаний, за которое амплитуда колебаний уменьшается до определенного уровня (например, в два раза) [4].

Погрешности при этих измерениях возникают в результате потерь, не связанных с затуханием волн в материале (передача энергии в опоры, в окружающую среду, возбуждающий элемент и т.п.).

При практических измерениях наибольшее распространение получил способ сравнительного измерения затухания по амплитудным характеристикам импульсов, проходящим один и тот же путь в образце и изделии одинаковой формы при аналогичных условиях контакта преобразователя с объектом контроля и образцом. Недостатком этого способа является относительность измерения, так как на амплитуду сигнала влияет помимо затухания расхождение ультразвуковой волны.

Цель статьи. Целью настоящей работы является разработка метода определения параметров затухания продольной ультразвуковой волны в объектах из поликристаллических материалов, исключающего недостатки известных методов.

На рис. 1 представлена схема анализа характеристик прохождения и отражения продольной ультразвуковой волны в объекте контроля (ОК). Для наглядности первое и второе отражение волны от донной поверхности разнесены по сечению ОК.

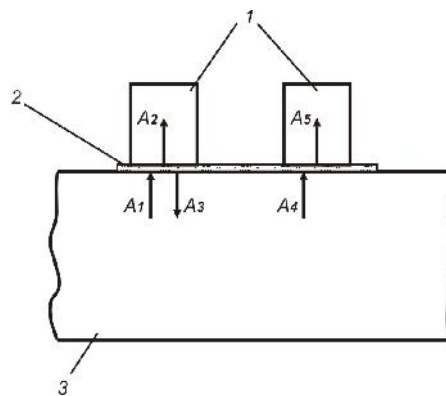


Рис. 1. Схема для анализа характеристик прохождения и отражения продольной ультразвуковой волны в ОК:

1 – пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП); 2 – контактная жидкость (КЖ); 3 – ОК; A_1 – амплитудная характеристика первого донного эхо-сигнала, пришедшего на границу раздела ОК–КЖ–ПЭП; A_2 – амплитудная характеристика первого донного эхо-сигнала, прошедшего границу раздела ОК–КЖ–ПЭП; A_3 – амплитудная характеристика

эхо-сигнала, отраженного от границы раздела ОК–КЖ–ПЭП; A_4 – амплитудная характеристика второго донного эхо-сигнала, прошедшего на границу раздела ОК–КЖ–ПЭП; A_5 – амплитудная характеристика второго донного эхо-сигнала, прошедшего границу раздела ОК–КЖ–ПЭП.

В анализируемой схеме (рис. 1) можно выделить следующие математические зависимости:

$$A_2 = A_1 \cdot D_2,$$

откуда

$$A_1 = \frac{A_2}{D_2}, \quad (1)$$

где D_2 – коэффициент прохождения ультразвуковой волны через границу раздела ОК–КЖ–ПЭП;

$$A_3 = A_1 \cdot R, \quad (2)$$

где R – коэффициент отражения ультразвуковой волны от границы раздела ОК–КЖ–ПЭП.

Из выражений (1, 2) получаем

$$A_3 = \frac{A_2 \cdot R}{D_2}. \quad (3)$$

$$A_5 = A_4 \cdot D_2,$$

откуда

$$A_4 = \frac{A_5}{D_2}. \quad (4)$$

Ультразвуковым импульсным дефектоскопом возможно измерить отношения амплитудной характеристики A_5 к амплитудной характеристике A_2 (дБ)

$$\Delta N = 20 \cdot \lg \frac{A_5}{A_2}.$$

Из этой зависимости следует

$$F = \frac{A_5}{A_2} = 10^{\left(\frac{\Delta N}{20}\right)}. \quad (5)$$

Отражение от донной поверхности в дальней зоне (зоне Фраунгофера) ПЭП описывается выражением [5]

$$\frac{A_4}{A_3} = \frac{S_a}{2 \cdot \lambda \cdot x} \cdot e^{-2 \cdot \delta \cdot x}, \quad (6)$$

где S_a – площадь излучателя ПЭП; λ – длина ультразвуковой волны; x – расстояние до донной поверхности; δ – коэффициент затухания ультразвуковой волны.

Из выражений (3, 4, 6) находим

$$\frac{\left(\frac{A_5}{D_2}\right)}{\left(\frac{A_2 R}{D}\right)} = \frac{S_a}{2 \lambda x} \cdot e^{-2 \delta x}. \quad (7)$$

Из выражений (5, 7) следует

$$\frac{F}{R} = \frac{S_a}{2 \lambda x} \cdot e^{-2 \delta x}. \quad (8)$$

Из выражения (8) получаем

$$\delta = K_c + K_R, \quad (9)$$

где

$$K_c = -\frac{\ln\left(\frac{2 \lambda x F}{S_a}\right)}{2 x}, \quad (10)$$

$$K_R = \frac{\ln R}{2 x}.$$

Компонент формулы (9) K_c назовем структурным коэффициентом. Он обуславливает ослабление продольной ультразвуковой волны в анализируемой схеме за счет затухания и отражения от границы раздела ОК–КЖ–ПЭП. Компонент формулы (9) K_R – характеризует ослабление продольной ультразвуковой волны в анализируемой схеме за счет отражения от границы раздела ОК–КЖ–ПЭП.

Если аналогичны условия контакта ПЭП с ОК при выполнении измерений в разных ОК коэффициент отражения $R = \text{const}$ и изменения структурного коэффициента K_c будут зависеть только от изменений параметров затухания в ОК.

Аналогичность акустического контакта при измерениях реализуется при следующих условиях:

- применении одного типа ПЭП;
- применении одинаковой КЖ;
- шероховатости контактной поверхности не более $R_z = 40$ мкм;
- измерении параметров затухания в объектах с одинаковым характеристическим импедансом;

неизменяющейся толщине слоя контактной жидкости.

Для реализации последнего условия была предложена схема стабилизации акустического контакта ПЭП с ОК, показанная на рис. 2 и 3. Ограничением для применения данной схемы является то, что ее можно применять только для ферромагнитных ОК.

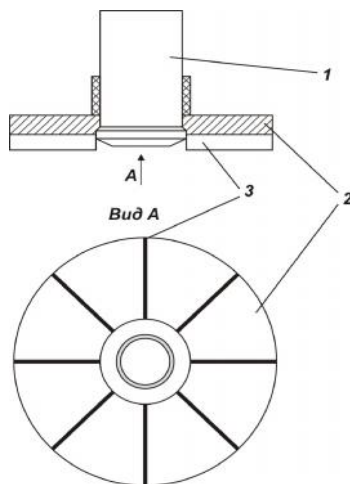


Рис. 2. Схема системы стабилизации акустического контакта:

1 – ПЭП; 2 – постоянный магнит; 3 – выточки для выхода излишек КЖ

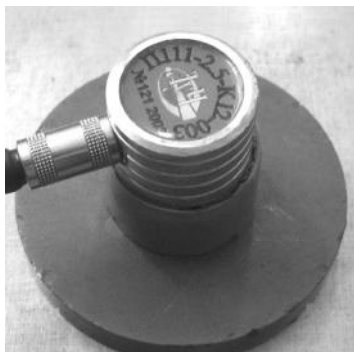


Рис. 3. Фото системы стабилизации акустического контакта

Из вышесказанного следует, что для определения параметров затухания в различных ОК достаточно определения структурного коэффициента K_c . Способ определения этого коэффициента K_c заключается в следующем:

1. В ОК из поликристаллического материала посредством ультразвукового импульсного дефектоскопа измеряется разница (дБ) ΔN между амплитудными характеристиками первого и второго донных эхо-сигналов.

2. При выполнении измерений должны соблюдаться следующие условия:

аналогичность условий контакта между ПЭП и ОК;

расстояние от точки ввода акустической оси ультразвуковой волны в ОК l до боковых граней ОК (рис. 4) должно быть больше или равно

$$l_{\min} = a + \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(0,61 \cdot \frac{\lambda}{a} \right) \right) \cdot \left(4x - \frac{a^2}{\lambda} \right), \quad (12)$$

где a – радиус излучателя; x – расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до донной поверхности; λ – длина ультразвуковой волны.

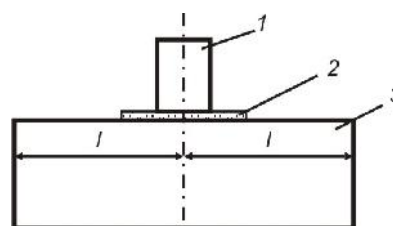


Рис. 4. Расстояние l от акустической оси ПЭП до боковых граней ОК:

1 – ПЭП; 2 – КЖ; 3 – ОК

На рис. 5 показана в виде графика зависимость минимального расстояния до боковых граней ОК l_{\min} от расстояния до донной поверхности x для разных типов ПЭП.

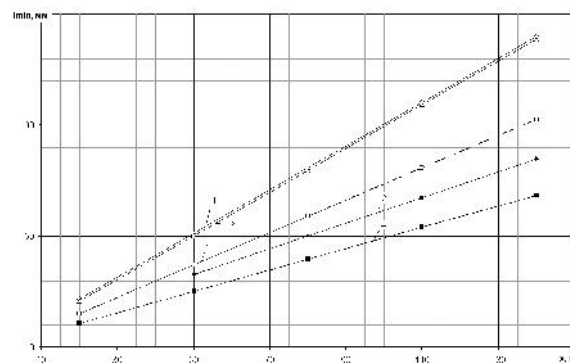


Рис. 5. График зависимости l_{\min} от x для разных типов ПЭП:

1 – П111-2,5-к12-003; 2 – П111-2,5-к20-003;
 3 – П111-5-к6-003; 4 – П111-10-к6-003;
 5 – П111-10-к4-003

По измеренному значению ΔN , воспользовавшись зависимостями (5, 10), рассчитывается структурный коэффициент K_c .

Выводы. Характеристикой упругой волны, наиболее чувствительной к структуре поликристаллического материала, является затухание.

При определении параметров затухания в поликристаллическом материале достаточно определять структурный коэффициент K_c , при условии сохранения аналогичности акустического контакта между ПЭП и ОК, что позволяет исключить влияние изменения коэффициента отражения от границы раздела ОК-КЖ-ПЭП на изменение структурного коэффициента K_c .

Для обеспечения условий аналогичности контакта между ПЭП и ОК предложена схема стабилизации акустического контакта, которая позволяет стабилизировать акустический контакт в ОК из ферромагнитных материалов.

Список использованной литературы

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др. Изд. 2-е испр. и доп. под. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

2. Труэлл Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. // Пер. с англ. – М.: Наука, 1972 – 340 с.

3. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер // Пер. с нем. Е. К. Бухмана, под ред. В. Н. Волченко. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.

4. Физическая акустика. Под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1966. – Т. 1. – Ч. А. – 592 с.

5. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

Получено 15.05.2012

References

1. Non-destructive control and diagnostics. Reference book / V.V. Klyuev, F.R. Sosnin, A.V. Kovalev and other of Publ. 2th ispr. and dop. under. red. V.V. Klyueva. – Moscow: Engineer, 2003. – 656 p. [in Russian].

2. Truell P. Ul'trazvukovye methods in physics of solid. / P. Truell, Ch. El'baum, B. Chik. Trudged with angl. – Moscow: Science, 1972 – 340 p. [in Russian].

3. Krautkremer Y. Ultrasonic control of materials. Reference book / Y. Krautkremer, H. Krautkremer. Trudged with it. E. K. Bukhmana, under red. V. N. Volchenko. – Moscow: Metallurgy, 1991. – 752 p. [in Russian].

4. Physical acoustics. Under red. At. Mezona. – Moscow: the World, 1966. Ist. 1. Ch. A – 592 h. [in Russian]/

5. Ermolov I. N. Theory and practice of ultrasonic control. / I.N. Ermolov. – Moscow: Engineer, 1981. – 240 p. [in Russian].



Кириченко
Ирина Алексеевна,
зав. каф. Метрологии и Восто-
чноукраинского нац.
ун-та им. В.Даля.
Тел.:+38 095-4619767



Киреев
Андрей Николаевич,
доц. каф. Метрологии и Восто-
чноукраинского нац.
ун-та им. В.Даля.
Тел.:+38 050 704-99-87



Кашура
Александр Леонидович,
доц. каф. Метрологии и Восто-
чноукраинского нац.
ун-та им. В.Даля.
Тел.:+38 097-366-17-73