

УДК 620.179.16

М.И. Сластен, В.И. Тимошенко

**О СЕРИИ МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ИМПУЛЬСА В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ С
ГАРМОНИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ МЕХАНИЧЕСКИМИ
НАПРЯЖЕНИЯМИ**

Серии многократных отражений ультразвукового импульса в плоскопараллельных образцах с гармонически изменяющимися механическими напряжениями представляют интерес при идентификации и акустической диагностике напряженного состояния монокристаллов с особыми физическими свойствами, в частности, галлий-гадолиниевого граната. Серии отражений при наличии гармонически изменяющихся механических напряжений и их отсутствии существенно различаются. При наличии гармонически изменяющихся механических напряжений серии отражений могут состоять из нескольких групп эхо-импульсов, отстоящих друг от друга.

Многократные отражения; эхо-импульсы; идентификация напряженного состояния; акустическая диагностика; остаточные механические напряжения.

M.I. Slasten, V.I. Timoshenko

**ABOUT A STRING OF MULTIPLE REVERBERATIONS OF ULTRASONIC
PULSE IN PLANE-PARALLEL SAMPLES WITH HARMONICALLY
VARYING MECHANICAL STRESSES**

Strings of multiple reverberations of ultrasonic pulse in plane-parallel samples with harmonically varying mechanical stresses are matter of interest when identifying and acoustically diagnosing stressed conditions of monocrystals with peculiar physical features, especially of gallium gadolinium garnet. There is a considerable distinction between strings of reverberation with and without harmonically varying mechanical stresses. String of reverberations with harmonically varying mechanical stresses may contain several groups of echo-pulses, separated from each other.

Multiple reverberations; echo-pulses; identification of stressed condition; acoustic diagnosis; residual mechanical stresses.

Исследуем влияние на форму огибающей серии ультразвуковых (УЗ) эхо-импульсов одноосных сжимающих гармонически изменяющихся механических напряжений (МН) в плоскопараллельном образце монокристалла (МК) галлий-гадолиниевого граната (ГГГ), упруго изотропном в ненапряженном состоянии.

На рис. 1 изображены образец МК ГГГ 1 с остаточными гармонически изменяющимися МН σ и УЗ-преобразователь поперечных волн 2.

Оси координат OX , OY и OZ направим вдоль длины AB , толщины AA' и высоты AD образца МК ГГГ 1. Остаточные МН σ действуют в плоскости $ABCD$ параллельно оси OX , являются сжимающими и равномерно распределены по толщине L образца МК ГГГ 1. Величина остаточных МН σ изменяется в направлении оси OY по гармоническому закону. Преобразователь УЗ-волн 2 шириной $2a$ расположен на поверхности $ABCD$ образца МК ГГГ 1. Поперечная УЗ-волна, излучаемая преобразователем 2, поляризована вдоль оси OX и распространяется вдоль оси OZ . Разделим плоскопараллельный образец 1 плоскостями, параллельными плоскостями $DCC'D'D$, на участки шириной $2a$ с порядковым номером m . Расстояние между соседними наибольшими значениями МН обозначим через Λ_{σ} .

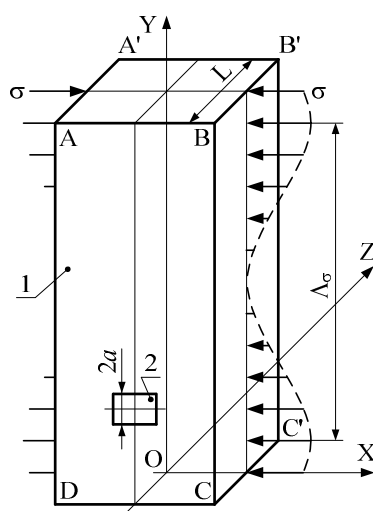


Рис. 1. Плоскопараллельный образец МК ГГГ 1 с гармонически изменяющимися остаточными МН σ и УЗ-преобразователь поперечных волн 2

На рис. 2 показаны серии многократных отражений импульса УЗ-колебаний при его распространении в плоскопараллельном МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН для различных координат входа УЗ-пучка y_m .

На участках с наибольшими и наименьшими остаточными МН и градиентом изменения скорости распространения поперечной УЗ-волны, равным нулю, амплитуда эхо-импульсов в сериях многократных отражений убывает по экспоненциальному закону (рис. 2,а).

На участках с линейно изменяющимися остаточными МН и градиентом изменения скорости распространения поперечной УЗ-волны, не равным нулю, серии многократных отражений могут состоять из двух и более дополнительных групп эхо-импульсов (рис. 2,б-д). Дополнительные группы эхо-импульсов в сериях многократных отражений появляются в результате искажения прямолинейной траектории распространения УЗ-пучка в образце с гармонически изменяющимися остаточными МН. В результате искажения траектории УЗ-пучка и его отклонения от прямолинейного распространения поперечное сечение УЗ-пучка смещается в сторону уменьшения скорости УЗ-волны и может не попадать на УЗ-преобразователь [1]. В этом случае эхо-импульсы в серии многократных отражений могут отсутствовать. Отличие серии многократных отражений от серии с экспоненциально убывающими эхо-импульсами зависит от амплитуды $\Delta\sigma_A$ и периода Λ_σ гармонически изменяющихся МН, ширины УЗ-преобразователя $2a$ и расстояния от центра УЗ-преобразователя до прямой, параллельной оси OZ и проходящей через минимум остаточных МН Δy_m [2]. Увеличение $\Delta\sigma_A$ и уменьшение Λ_σ приводят к уменьшению радиуса кривизны траектории R , появлению дополнительных групп эхо-импульсов, уменьшению расстояния Λ_{mm} , которое проходит УЗ-пучок от УЗ-преобразователя, установленного на участке с порядковым номером m , до полного совмещения его поперечного сечения с УЗ-преобразователем, уменьшению числа эхо-импульсов N в группах и увеличению отклонения огибающей каждой группы эхо-импульсов от экспоненты – огибающая может оказаться даже прямой линией [3].

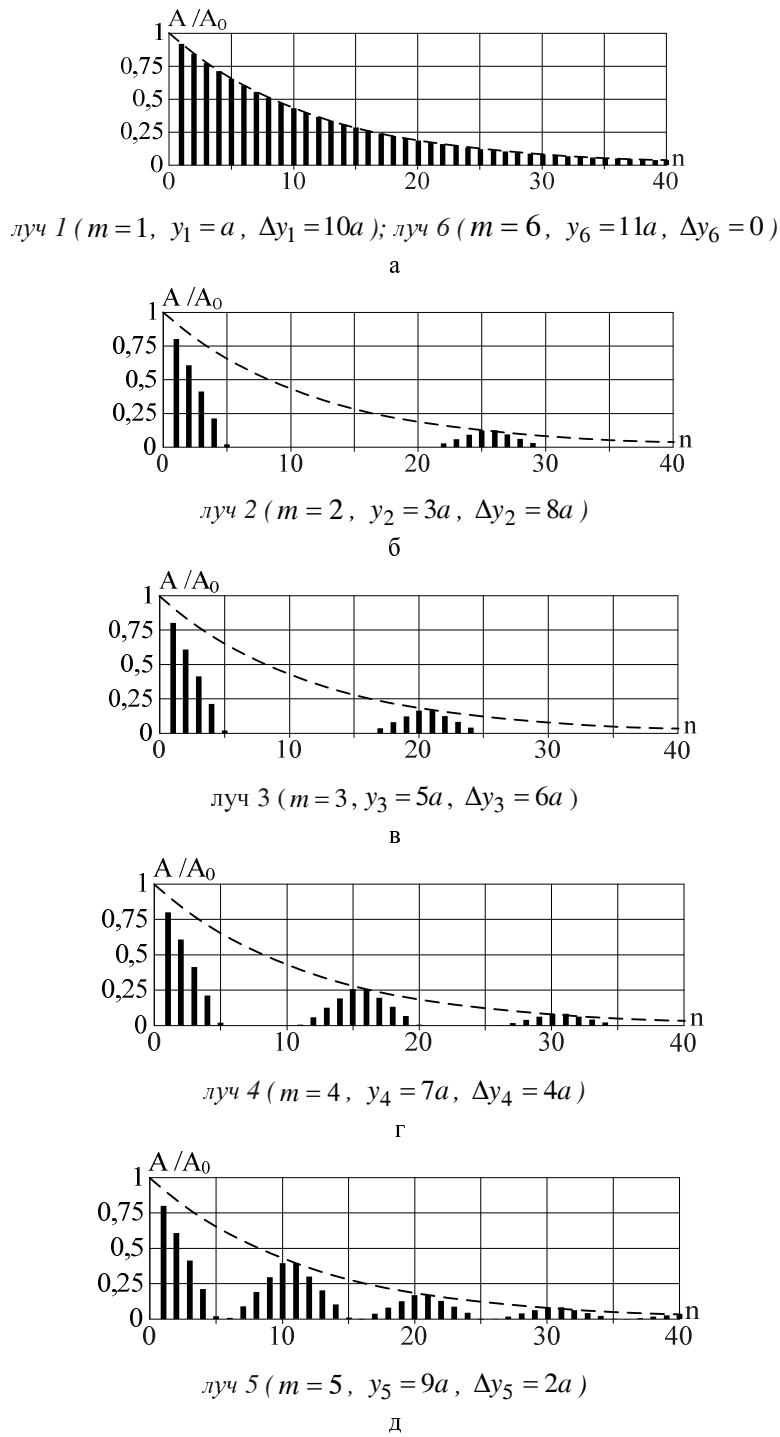


Рис. 2. Серии многократных отражений импульса УЗ-колебаний

Для различных координат входа УЗ-пучка y_m ($m = 1 \div 6$) и $y_{\sigma_{\min}} = 11a$.

Модуль разности координат входа УЗ-пучка y_m и минимума остаточных МН $y_{\sigma min}$ определяет амплитуду смещения поперечного сечения УЗ-пучка Δy_m относительно минимума остаточных МН при его распространении

$$\Delta y_m = |y_{\sigma min} - y_m|.$$

Расстояние от плоскости УЗ-преобразователя до точки пересечения УЗ-пучком прямой, параллельной оси OZ и проходящей через минимум остаточных МН l_m , определяется по формуле

$$l_m = \sqrt{\Delta y_m \left(\frac{2v_{s0}}{\text{grad } v_s} - \Delta y_m \right)}, \quad (1)$$

где v_{s0} – скорость распространения поперечной УЗ-волны в ненапряженном монокристалле; v_s – скорость распространения поперечной УЗ-волны в монокристалле с остаточными МН.

Из формулы (1) следует, что l_m тем больше, чем больше амплитуда смещения Δy_m .

Расстояние между эхо-импульсами с максимальными амплитудами в соседних группах серии многократных отражений определяется как $\Lambda_{lm} = 4l_m$.

Расстояние Λ_{lm} может быть определено экспериментально по времени, измеренному от начала зондирующего импульса до эхо-импульса с максимальной амплитудой во второй группе эхо-импульсов серии многократных отражений на экране осциллографа, и скорости распространения поперечной УЗ-волны v_s в монокристалле с остаточными МН.

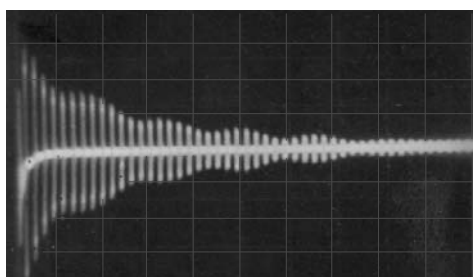
Сравнивая между собой серии многократных отражений, изображенные на рис. 2,б и 2,д, видно, что расстояние между группами эхо-импульсов в сериях тем больше, чем больше амплитуда смещения Δy_m , т.е. чем дальше от σ_{min} находится УЗ-преобразователь. Эта закономерность является характерной для гармонически изменяющихся МН.

На рис. 3 представлены фотограммы серий многократных отражений УЗ-импульса в плоскопараллельных образцах с гармонически изменяющимися МН для различных значений $\Delta \sigma_A$.

Фотограммы получены при использовании специально подобранных плоскопараллельных образцов МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН. Амплитуда гармонически изменяющихся остаточных МН в образце № 1 $\Delta \sigma_{A1} = 0,2 \cdot 10^6$ Па (рис. 3,а), в образце № 2 $\Delta \sigma_{A2} = 0,5 \cdot 10^6$ Па (рис. 3,б) и в образце № 3 $\Delta \sigma_{A3} = 0,9 \cdot 10^6$ Па (рис. 3,в). Период гармонически изменяющихся остаточных МН в образцах № 1–№ 3 приблизительно одинаков $\Lambda_{\sigma 1} \approx \Lambda_{\sigma 2} \approx \Lambda_{\sigma 3}$. УЗ-преобразователь располагался на соседнем участке с участком, в центре которого величина МН минимальна, при этом $\Delta y = 2a$.

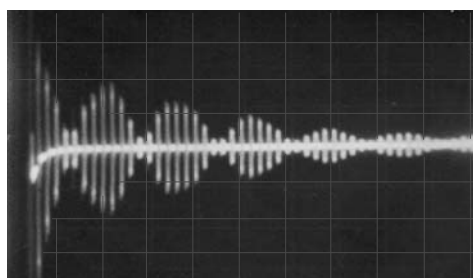
Из фотограмм следует, что с увеличением амплитуды гармонически изменяющихся остаточных МН отклонения амплитуд эхо-импульсов в сериях многократных отражений от экспоненциального закона возрастают.

Чтобы отличить участок с минимальными остаточными МН от участка с максимальными остаточными МН, необходимо сравнить между собой расстояния между эхо-импульсами с максимальными амплитудами $\Lambda_{\text{л}}$ в ближайших группах серий многократных отражений на соседних с ними участках – $\Lambda_{\text{л}}$ минимально вблизи участка с минимальными остаточными МН.



образец № 1 $\Delta\sigma_{A1} = 0,2 \cdot 10^6 \text{ Па}$

а



образец № 2 $\Delta\sigma_{A2} = 0,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$

б



образец № 3 $\Delta\sigma_{A3} = 0,9 \cdot 10^6 \text{ Па}$

в

Рис. 3. Фотограммы серий многократных отражений УЗ-импульса в плоскопараллельных образцах с гармонически изменяющимся МН для различных значений $\Delta\sigma_A$

Наличие групп эхо-импульсов в серии многократных отражений импульса УЗ-колебаний и характерное отклонение огибающей серии эхо-импульсов от экспоненциального закона являются закономерными и могут использоваться в аку-

стической тензометрии при идентификации и диагностике напряженного состояния, в частности, при определении местоположения границ участков с допустимыми остаточными МН в МК [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сластен М.И.* Об огибающей серии эхо-импульсов в монокристаллах с неоднородными механическими напряжениями при акустической диагностике напряженного состояния // Акустические измерения и стандартизация. Электроакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана // Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. – В 3-х т. – М.: ГЕОС, 2007. – Т. 2. – С. 95-100.
2. *Сластен М.И.* Измерение градиента скорости ультразвука в монокристаллах с линейно изменяющимися механическими напряжениями // Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана / Сборник трудов XXII сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета РАН по акустике. – В 3-х т. – Т. 2. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 98-102.
3. *Сластен М.И.* Ультразвуковой контроль остаточных механических напряжений в монокристаллах галлий-гадолиниевого граната. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – 127 с.
4. *Сластен М.И.* Измерение градиента скорости ультразвука в монокристаллах с гармонически изменяющимися остаточными механическими напряжениями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 1 (114). – С. 36-43.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.А. Воронин.

Сластен Михаил Иванович

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: slasten@mvs.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371663.

Кафедра физики; к.т.н.; доцент.

Тимошенко Владимир Иванович

E-mail: ega@tti.sfedu.ru.

Россия, 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Slasten Michail Ivanovitch

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: slasten@mvs.tsure.ru.

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371663.

The Department of Physics; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Timoshenko Vladimir Ivanovitch

E-mail: ega@tti.sfedu.ru.

Russia, 347928, Taganrog, Shevchenko Street, 2.

Phone: +78634371795.

The Department of Electrohydroacoustics and Medical Engineering; Dr. of Eng. Sc.; Professor.