

УДК 620.179.16

М.И. Сластен

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОДНООСНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИ
ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ОСТАТОЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ДИАГНОСТИКЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
МОНОКРИСТАЛЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫМ
МЕТОДОМ**

Теоретически исследовано влияние гармонически изменяющихся остаточных механических напряжений на серию многократных отражений ультразвукового импульса в монокристаллическом плоскопараллельном образце. Рассмотрены особенности распространения ультразвуковых волн в полубесконечной среде с гармонически изменяющимися механическими напряжениями. Предложен способ идентификации однородного напряженного состояния с минимальными остаточными механическими напряжениями ультразвуковым эхо-импульсным методом.

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

M.I. Slasten

**IDENTIFICATION OF SINGLE-AXIS HARMONICALLY VARYING
RESIDUAL MECHANICAL STRESSES DURING DIAGNOSTIC OF STRESSED
CONDITION OF MONOCRYSTALS BY MEANS OF ULTRASONIC ECHO-
PULSE METHOD**

The paper covers theoretical analysis of influence of harmonically varying residual mechanical stresses on series of ultrasonic pulse multiple reverberations in monocrystal plane-parallel sample. The paper also deals with features of ultrasonic wave propagation in half-infinite environment with harmonically varying mechanical stresses. Author suggests an ultrasonic echo-pulse method of identification of homogeneous stressed condition with minimum residual mechanical stresses.

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

Диагностика одноосных гармонически изменяющихся остаточных механических напряжений (МН) ультразвуковым (УЗ) эхо-импульсным методом представляет особый интерес при нахождении в монокристаллических (МК) слитках, в частности галлий-гадолиниевого граната (ГГГ), местоположения границ участков с допустимыми остаточными МН. Монокристаллический слиток с гармонически изменяющимися остаточными МН можно представить как совокупность участков с линейно изменяющимися МН и участков с различными по величине однородными МН. Основная трудность возникает при идентификации однородного напряженного состояния с минимальными остаточными МН.

Рассмотрим влияние одноосных сжимающих гармонически изменяющихся МН на форму огибающей серии УЗ эхо-импульсов в упругоизотропном в ненапряженном состоянии плоскопараллельном образце МК ГГГ.

На рис. 1 изображены плоскопараллельный образец МК ГГГ 1, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда с остаточными гармонически изменяющимися МН σ , и УЗ-преобразователь поперечных волн 2.

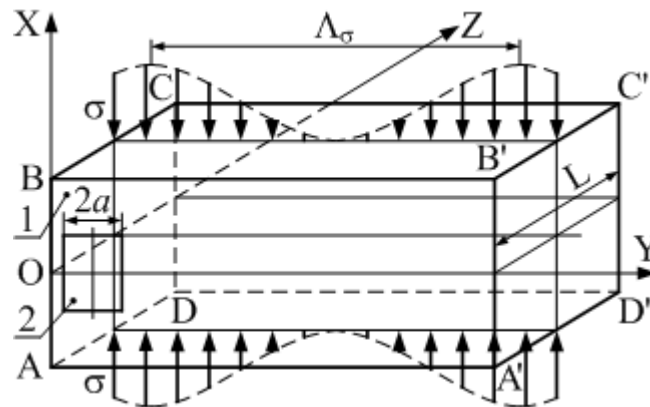


Рис. 1. Плоскопараллельный образец МК ГГГ 1 с гармонически изменяющимся МН σ и УЗ-преобразователь поперечных волн 2

Направим оси координат OX , OY и OZ соответственно вдоль высоты AB , длины AA' и толщины AD плоскопараллельного образца МК ГГГ 1. Пусть остаточные МН σ , действующие в плоскопараллельном образце МК ГГГ 1 параллельно плоскости $ABB'A'A$, являются сжимающими, параллельны оси OX , направлены противоположно оси OX и равномерно распределены по толщине L плоскопараллельного образца МК ГГГ 1. Величина остаточных МН σ изменяется с увеличением расстояния от плоскости XOZ в направлении оси OY по гармоническому закону. Преобразователь УЗ-волн 2, ширина которого $2a$, расположен на поверхности $ABB'A'A$ образца МК ГГГ 1. Поперечная УЗ-волна, излучаемая преобразователем 2, поляризована вдоль оси OX и распространяется вдоль оси OZ , многократно отражаясь от плоскостей $CC'D'DC$ и $BB'A'AB$. Разделим плоскопараллельный образец 1 плоскостями, параллельными плоскости $ABCD$, на участки с порядковым номером m , ширина которых равна ширине УЗ-преобразователя $2a$. Обозначим расстояние между соседними наибольшими значениями МН через Λ_σ .

На рис. 2 представлено распределение остаточных гармонически изменяющихся МН σ вдоль длины плоскопараллельного образца МК ГГГ, разделенного на участки шириной $2a$.

Из рисунка видно, что если $\Lambda_\sigma \geq 10 \cdot 2a$, то остаточные МН можно считать практически не изменяющимися с градиентами скорости поперечной УЗ-волны $G_v = 0$ на участках от 0 до $2a$ ($m = 1$) $\sigma = \sigma_{\max}$, от $10a$ до $12a$ ($m = 6$) $\sigma = \sigma_{\min}$ и от $20a$ до $22a$ ($m = 11$) $\sigma = \sigma_{\max}$ и линейно изменяющимися с градиентом скорости УЗ-волны, отличающимся от нуля ($G_v \neq 0$) на участках с порядковыми номерами $m = 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9$ и 10 .

Пусть действующие в плоскопараллельном образце остаточные МН периодически изменяются согласно формуле

$$\sigma(y) = -\sigma_{\min} - 2\sigma_A \cos^2 \left[\frac{\pi}{\Lambda_\sigma} (y - a) \right],$$

где σ_{\min} – наименьшее остаточное МН; σ_A – амплитуда гармонически изменяющихся остаточных МН; Λ_σ – период гармонически изменяющихся остаточных МН; y – текущая координата.

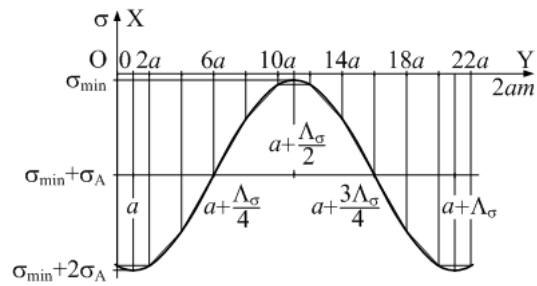


Рис. 2. Распределение гармонически изменяющихся остаточных МН σ вдоль длины образца МК ГГГ, разделенного на участки шириной $2a$

На рис. 3 изображены траектории распространения УЗ-пучков в полубесконечном МК ГГГ с гармонически изменяющимися МН σ в зависимости от координаты входа УЗ-пучка y .

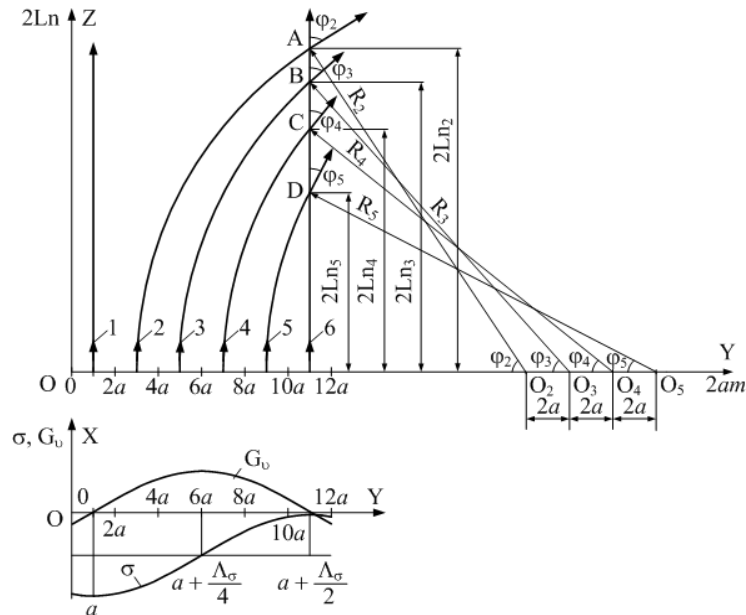


Рис. 3. Траектории распространения УЗ-пучков в полубесконечном МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН σ в зависимости от координаты входа УЗ-пучка y_m

Угол отклонения УЗ-луча от его направления при излучении φ_m равен

$$\varphi_m = \arcsin\left(\frac{\Delta y_m}{R}\right),$$

где Δy_m – путь, пройденный УЗ-лучом, излученным на участке с порядковым номером m , до пересечения с прямой, параллельной оси OZ , соответствующей наименьшим гармонически изменяющимся остаточным МН σ_{\min} ; R – радиус кривизны луча [1].

Значение радиуса R зависит от градиента изменения скорости распространения поперечной УЗ-волны в плоскопараллельном образце МК ГГГ с остаточными МН и определяется соотношением

$$R = \frac{v_s}{\text{grad } v_s},$$

где

$$\text{grad } v_s = \frac{dv_s}{dy} = \frac{2\pi}{\Lambda_\sigma} v_{sA} \sin \frac{2\pi}{\Lambda_\sigma} (y - a).$$

Из рисунка видно, что для лучей УЗ-пучков, имеющих разные координаты входа y_m , максимальный угол достигается при различной длине пути в полубесконечном МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН σ – чем больше расстояние от точки входа УЗ-пучка до прямой, параллельной оси OZ и проходящей через наименьшее значение гармонически изменяющихся остаточных МН, тем больше угол φ_m .

Рассмотрим траектории параллельных УЗ-пучков, излученных в полубесконечный МК ГГГ перпендикулярно гармонически изменяющимся вдоль оси OY остаточным МН с периодом Λ_σ , действующих в плоскости, параллельной XOY , и равномерно распределенных по толщине образца L .

На рис. 4 показан ход лучей УЗ-пучков в полубесконечном МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН.

Из рисунка видна качественная картина зависимости искривления траектории УЗ-пучков при распространении в полубесконечной среде с гармонически изменяющимися МН. Ход лучей показывает, что искривления траекторий распространения УЗ-пучков существенно зависят от соотношения ширины $2a$ УЗ-пучка, периода остаточных МН Λ_σ и расстояния $2L$. Лучи УЗ-пучков, входящие в область положительного градиента ($0 < y_m < 11a$), отклоняются в сторону положительного направления оси OY . Максимальный угол отклонения этих лучей достигается при пересечении их траектории с прямой, параллельной оси OZ , при $y = 11a$, после чего эти лучи попадают в область отрицательного градиента, их угол отклонения уменьшается до нуля, а затем лучи снова начинают отклоняться в другую сторону.

Поперечное сечение УЗ-пучка совместится с УЗ-преобразователем на расстоянии $\Lambda_{\text{лм}}$ вследствие искривления траектории при распространении, которое определяется по формуле

$$\Lambda_{\text{лм}} = \frac{4v_s}{\text{grad } v_s} \sin \varphi_m.$$

Учитывая, что

$$\frac{v_s}{\text{grad } v_s} (1 - \cos \varphi_m) = 2am,$$

получим

$$\Lambda_{\text{лм}} = 8am \sqrt{\frac{v_s}{am \cdot \text{grad } v_s} - 1}.$$

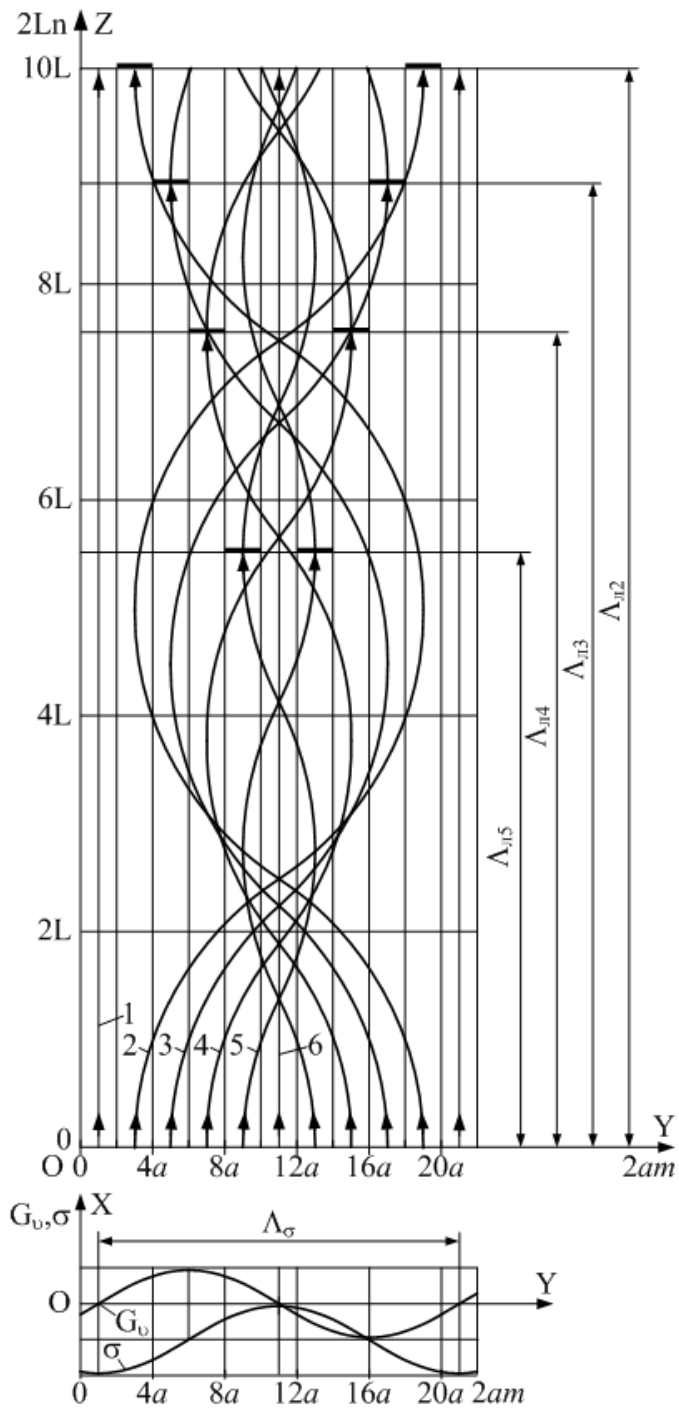
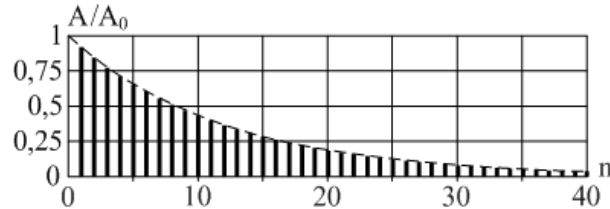
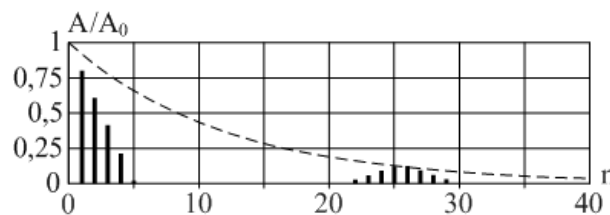


Рис. 4. Ход лучей УЗ-пучков в полубесконечном МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН

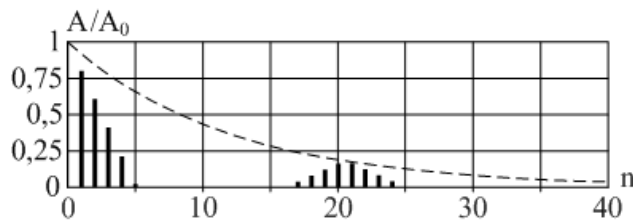
На рис. 5 показаны серии многократных отражений импульса УЗ-колебаний при его распространении в плоскопараллельном МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН для различных координат входа УЗ-пучка y_m .



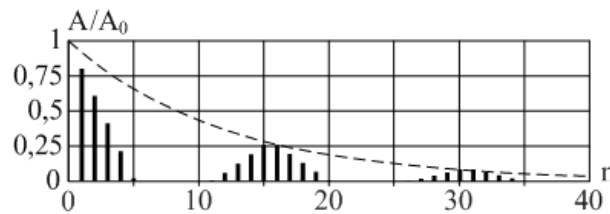
а – луч 1 ($m = 1, y_1 = a, \Delta y_1 = 10a$); луч 6 ($m = 6, y_6 = 11a, \Delta y_6 = 0$)



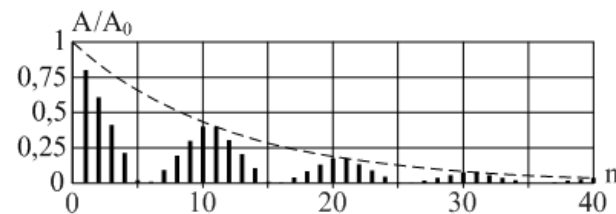
б – луч 2 ($m = 2, y_2 = 3a, \Delta y_2 = 8a$)



в – луч 3 ($m = 3, y_3 = 5a, \Delta y_3 = 6a$)



г – луч 4 ($m = 4, y_4 = 7a, \Delta y_4 = 4a$)



д – луч 5 ($m = 5, y_5 = 9a, \Delta y_5 = 2a$)

Рис. 5. Серии многократных отражений импульса УЗ-колебаний для различных координат входа УЗ-пучка y_m ($m = 1 \div 6$) и $y_{\sigma \min} = 11a$

Амплитуда эхо-импульсов в сериях многократных отражений на участках с наибольшими и наименьшими остаточными МН и градиентом изменения скорости распространения поперечной УЗ-волны, равным нулю, убывает по экспоненциальному закону (рис. 5,а).

Серии многократных отражений на участках с линейно изменяющимися остаточными МН и градиентом изменения скорости распространения поперечной УЗ-волны, не равным нулю, состоят из двух и более последовательностей эхо-импульсов (рис. 5,б-д).

Изменение амплитуды эхо-импульсов в последовательностях не является экспоненциальным и с увеличением амплитуды гармонически изменяющихся остаточных МН приближается к линейному [2].

Расстояния между первой и второй последовательностями эхо-импульсов в сериях определяются разностью порядковых номеров рассматриваемого участка m и участка с наименьшими остаточными МН – чем меньше разность, тем ближе последовательности.

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.

Расстояние между эхо-импульсами с максимальными амплитудами в соседних группах серии многократных отражений определяется как $\Lambda_{\Delta m} = 4l_m$ и, как следует из (1), тем больше, чем больше амплитуда смещения Δy_m .

Расстояние $\Lambda_{\Delta m}$ 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. 5,б и рис. 5,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.

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сластен М.И.* Ультразвуковой контроль остаточных механических напряжений в монокристаллах галлий-гадолиниевого граната. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – 127 с.
2. *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., профессор 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.

Slasten Michail Ivanovitch – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: slasten@mvs.tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of eng. sc.; associate professor.