

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Короченцев В.И.* Математическая модель генерации упругих и электромагнитных волн очагом землетрясения // Известия ЮФУ. – 2009. – № 7 (96). – С. 206-215.
2. *Короченцев В.И., Лисунов Е.В.* Исследование «гравитационных» волн, излучаемых землетрясениями // Фундаментальные вопросы естествознания. – Владивосток: ТОВВМИ, 2009. – С. 75-79.
3. *Короченцев В.И., Лисунов Е.В., Белаиш А.П., Абдрашитов А.Г.* // К возможности применения «гравитационных» волн, излучаемых землетрясениями, для навигации судов // Научная конференция "Вологдинские чтения". – ДВГТУ. – С. 21-24.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.П. Тарасов.

Короченцев Владимир Иванович

Дальневосточный федеральный университет.

E-mail: vkoroch@mail.ru.

690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.

Тел.: 89025579758.

Кафедра ГА и УЗТ; заведующий кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Лисунов Евгений Витальевич

E-mail: lisunov.evgeniy@gmail.com.

Тел.: 89644307313.

Аспирант.

Korochentsev Vladimir Ivanovich

Far East Federal University.

E-mail: vkoroch@mail.ru.

8, Sukhanova Street, Vladivostok, 690950, Russia.

Phone: +79025579758.

Dr. of Phis.-Math. Sc.; Professor.

Lisunov E.vgenij Vital'evich.

E-mail: lisunov.evgeniy@gmail.com.

Phone: +79644307313.

Post-graduate Student.

УДК 620.179.16

М.И. Сластен

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН
В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ
С ГАРМОНИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ОСТАТОЧНЫМИ
МЕХАНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ**

Распространение ультразвуковых волн в плоскопараллельных монокристаллических образцах с гармонически изменяющимися остаточными механическими напряжениями представляют интерес для акустической диагностики напряженного состояния монокристаллов при определении местоположения границ участков с допустимыми остаточными механическими напряжениями. Образец с гармонически изменяющимися остаточными механическими напряжениями рассматривается, как совокупность участков с наименьшими механическими напряжениями, участков с наибольшими механическими напряжениями и участков с линейно изменяющимися механическими напряжениями. Рассмотренное распространение ультразвуковых волн позволяет отличить минимально напряженные участки от максимально напряженных по огибающей серии многократных отражений.

Градиент скорости; монокристалл; остаточные механические напряжения.

M.I. Slasten

**ULTRASONIC WAVES PROPAGATION IN PLANE-PARALLEL
MONOCRYSTAL SAMPLES WITH HARMONICALLY VARYING RESIDUAL
MECHANICAL STRESSES**

Ultrasonic waves propagation in plane-parallel monocrystal samples with harmonically varying residual mechanical stresses is a matter of interest for acoustic diagnosis of stressed condition of monocrystals with peculiar physical features, especially of gallium-gadolinium garnet while defending locations of boundaries of parts with permissible residual mechanical stresses. Sample with harmonic varying of residual mechanical stresses is considered as a set of parts with minimum mechanical stresses, parts with maximum mechanical stresses and parts with ramp mechanical stresses. Ultrasonic waves propagation in plane-parallel monocrystal sample with harmonically varying of residual mechanical stresses, analysed in the paper, allow to distinguish minimum stressed parts from maximum stressed one with the help of envelope of string of multiple reverberations.

Speed gradient; monocrystal; residual mechanical stresses.

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

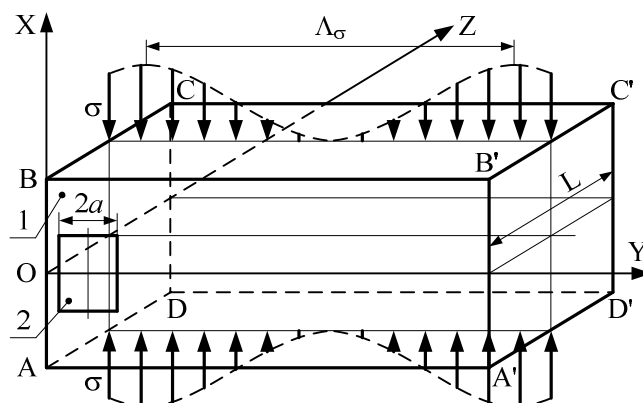


Рис. 1. Плоскопараллельный образец МК ГГГ 1 с гармонически изменяющимися остаточными МН σ и УЗ-преобразователь поперечных волн 2

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 $ABB'A'$, 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 и длина которого соответственно $2a$ и $2b$, расположен на поверхности $ABB'A'$ 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 $2a$.

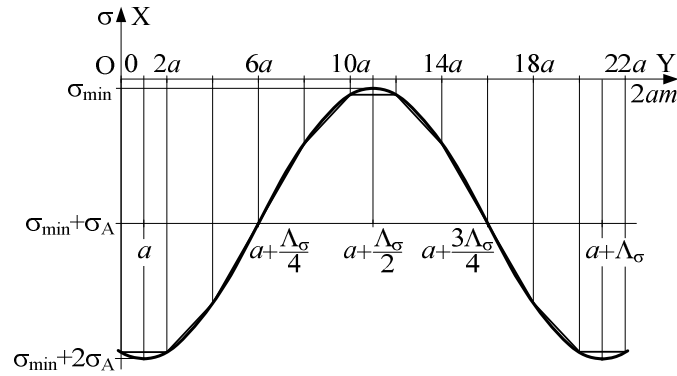


Рис. 2. Распределение гармонически изменяющихся остаточных МН σ вдоль длины плоскопараллельного образца МК ГГГ, разделенного на участки шириной $2a$

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

Пусть действующие в плоскопараллельном образце остаточные МН периодически изменяются согласно формуле

$$\sigma(y) = -\sigma_{min} - 2\sigma_A \cos^2 \left[\frac{\pi}{\Lambda_\sigma} (y - a) \right], \quad (1)$$

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

Зависимость скорости распространения поперечной УЗ-волны v_s вдоль оси OZ от координаты входа УЗ-пучка y при указанном распределении остаточных МН (1) в плоскопараллельном образце МК ГГГ можно представить в виде

$$v_s(y) = v_{smin} + 2v_{sA} \cos^2 \left[\frac{\pi}{\Lambda_\sigma} (y - a) \right],$$

где v_{smin} – наименьшая скорость распространения поперечной УЗ-волны; v_{sA} – амплитуда изменения скорости распространения поперечной УЗ-волны.

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

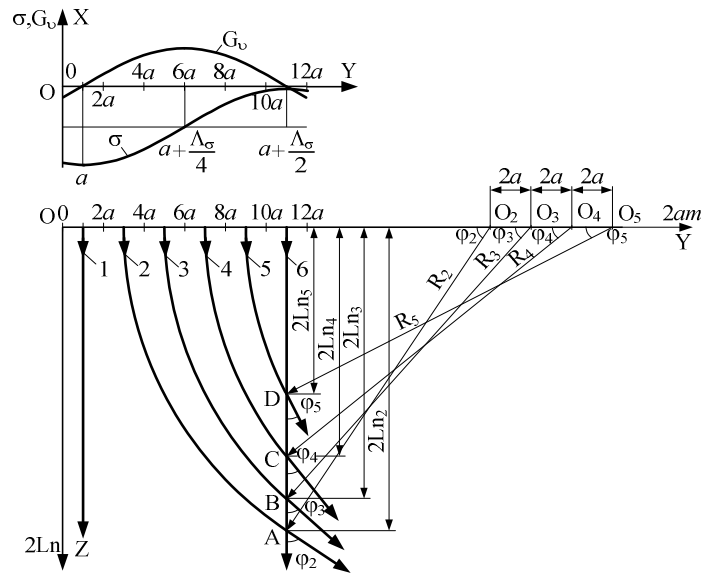


Рис. 3. Траектории распространения УЗ-пучков в полубесконечном МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН σ в зависимости от координаты входа УЗ-пучка y_m

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

$$\varphi_m = \arcsin\left(\frac{\Delta y_m}{R}\right), \tag{2}$$

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 [2].

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

$$R = \frac{v_s}{\text{grad} v_s}, \tag{3}$$

причем

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

Максимальное значение градиента скорости распространения поперечной УЗ-волны

$$\left(\frac{dv_s}{dy}\right)_{max} = \frac{2\pi}{\Lambda_\sigma} v_{sA}. \tag{4}$$

Подставляя (3) и (4) в (2), получим выражение для угла отклонения УЗ-луча в плоскопараллельном образце МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН:

$$\varphi_m = \arcsin \frac{2\pi\nu_{sA}\Delta y_m}{\Lambda_\sigma\nu_s}$$

Из рис. 3 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 , действующими в плоскости, параллельной XOY и равномерно распределенными по толщине образца L .

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

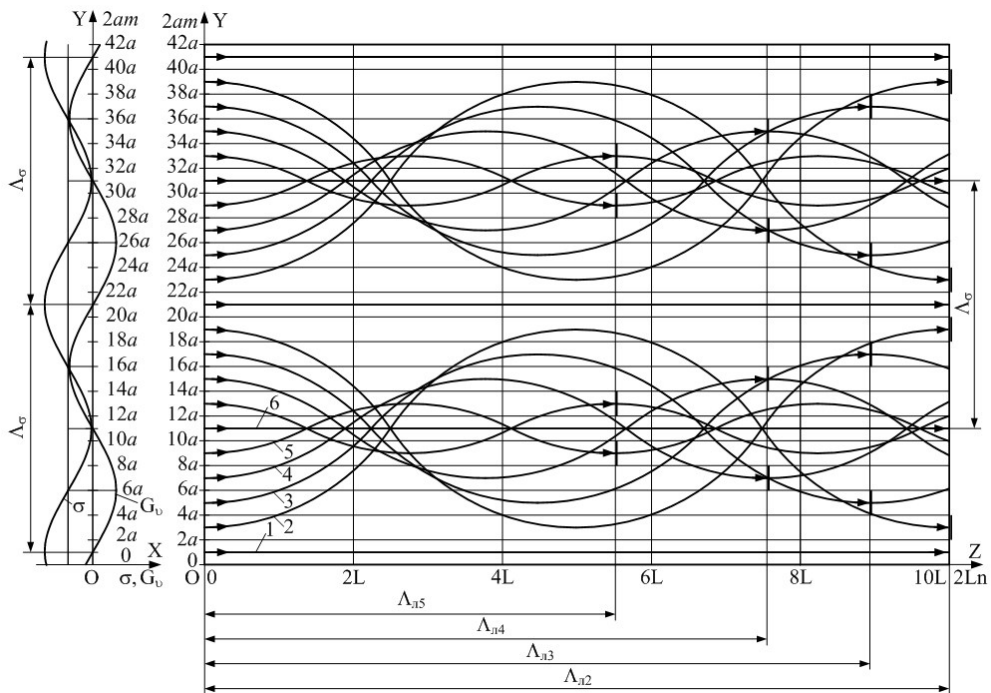


Рис. 4. Ход лучей УЗ-пучков в полубесконечном МК ГГГ с гармонически изменяющимися остаточными МН

Из рис. 4 видна качественная картина зависимости искривления траектории УЗ-пучков при распространении в полубесконечном образце с гармонически изменяющимися остаточными 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 ($0 < y_m < 1a$), отклоняются в сторону положительного направления оси OY [3].

Максимальный угол отклонения этих лучей достигается при пересечении их траектории с прямой, параллельной оси OZ , при $y = 1a$, 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 Λ_{lm} вследствие искривления траектории при распространении, которое определяется по формуле

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

Учитывая, что

$$R(1 - \cos \varphi_m) = 2am ,$$

получим

$$\Lambda_{lm} = 8\sqrt{am(R - am)} .$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.
2. *Сластен М.И.* Ультразвуковой контроль остаточных механических напряжений в монокристаллах галлий-гадолиниевого граната. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – 127 с.
3. *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.

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.

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.