

Нелинейные упругие явления при распространении акустических волн на плоской шероховатой границе твердых тел

Н. В. Ширгина,^{*} А. И. Кокшайский,[†] А. И. Коробов[‡]

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

(Статья поступила 10.07.2016; Подписана в печать 11.07.2016)

В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния статического давления, приложенного к плоской шероховатой границе двух твердых тел на ее нелинейные упругие свойства. Исследования проведены спектральным методом по эффективности генерации высших акустических гармоник, возникающих при прохождении через границу продольной упругой волны конечной амплитуды и при распространении поверхностной акустической волны вдоль границы двух твердых тел. Экспериментально определенная степенная зависимость высших акустических гармоник от амплитуды первой акустической гармоники значительно отличалась от классических значений показателей для этих гармоник. По измеренным амплитудам первой и второй гармоник поверхностной акустической волны, прошедшей вдоль границы, рассчитан нелинейный акустический параметр второго порядка в зависимости от внешнего давления, приложенного к образцу при фиксированном значении амплитуды зондирующей волны. Обнаружено, что нелинейный параметр ПАВ немонотонно зависит от статического давления, приложенного к границе. Анализ экспериментальных результатов был проведен на основе неклассической акустической нелинейности.

PACS: 43.25+y УДК: 534.222.

Ключевые слова: генерация упругих гармоник, диагностика шероховатой границы, неклассическая нелинейность, нелинейный акустический параметр.

ВВЕДЕНИЕ

Не идеальность структуры твердых тел приводит к появлению в них структурной неклассической упругой нелинейности. Неклассическая нелинейность может существенно превосходить классическую нелинейность, связанную с ангармонизмом межмолекулярных сил. Возможные физические механизмы структурной нелинейности рассмотрены в работе [1]. Одним из таких механизмов является граница двух плоских твердых тел [2]. Впервые нелинейные упругие свойства границы двух изотропных твердых сред были исследованы в работах [3, 4]. В этих работах исследована зависимость амплитуды второй продольной акустической гармоники от величины приложенного к границе давления. В [5] теоретически проанализировано влияние давления, приложенного к плоской границе двух изотропных твердых тел, на процесс генерации сдвиговых акустических гармоник при прохождении нормально к границе сдвиговой акустической волны. Было показано, что в спектре прошедшей через границу сдвиговой волны появляются нечетные сдвиговые гармоники. В [6] проведено исследование нелинейной границы двух плоских изотропных твердых тел с помощью поверхностных акустических волн. Проведенные исследования показали, что граница (контакт) двух плоских шероховатых сред является источником упругой нелинейности, которая значительно больше классиче-

ской нелинейности в изотропном материале контактирующих сред

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований нелинейных упругих свойств границы шероховатых сред с различными размерами шероховатостей с помощью продольных и поверхностных акустических волн.

1. ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСШИХ АКУСТИЧЕСКИХ ГАРМОНИК ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ПРОДОЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ ШЕРОХОВАТУЮ ГРАНИЦУ ИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Экспериментальные исследования проводились в образце, состоящем из двух цилиндров из сплава алюминия Д16, прижатых друг к другу плоскими полированными основаниями. Для излучения и приема продольных акустических волн на противоположные плоские поверхности цилиндров крепились пьезоэлектрические преобразователи в виде прямоугольных пластинок из ниобата лития Y-36° среза с резонансными частотами 5 МГц и 20 МГц (рис. 1). Преобразователь с резонансной частотой 20 МГц хорошо принимал (1–4) акустические гармоники. Измерения проводились с помощью ультразвукового автоматизированного измерительного комплекса в составе импульсного приемо-передатчика RITEC RAM-5000 и системы создания контролируемого давления на границе двух тел. Результаты эксперимента регистрировались, обрабатывались и архивировались в персональном компьютере. Блок-схема установки приведена на рис. 2. Экспериментальные исследования нелинейных свойств плоской шероховатой

^{*}E-mail: natalia.shirgina@physics.msu.ru

[†]E-mail: super_trouper@mail.ru

[‡]E-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

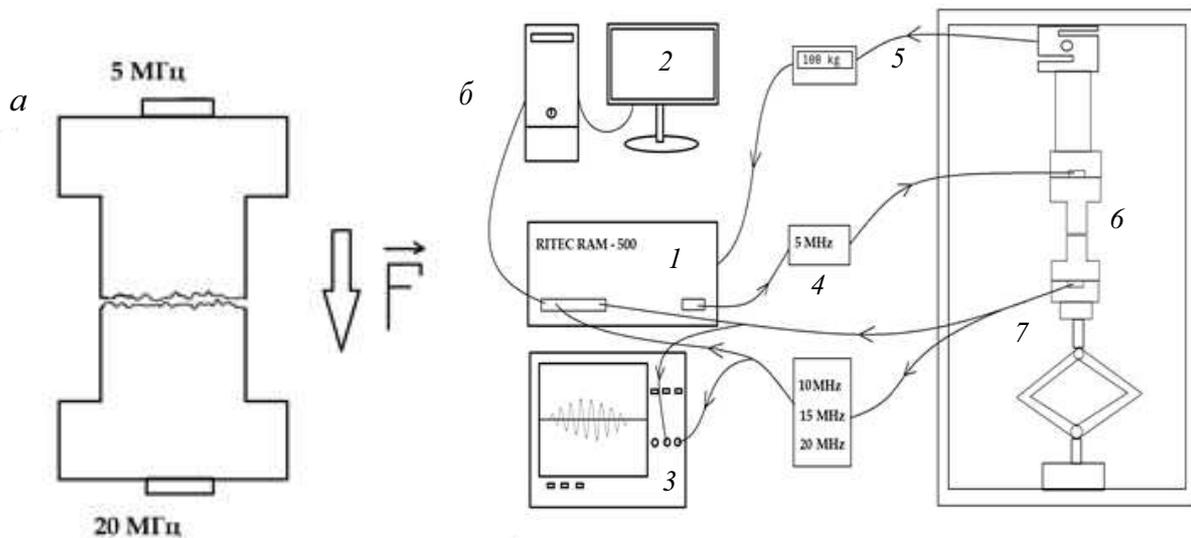


Рис. 1: а – Схема экспериментального образца, б – блок-схема установки (1 – импульсный приемопередатчик RITEC RAM-5000, 2 – персональный компьютер, 3 – осциллограф, 4 – фильтры частот, 5 – датчик давления, 6 – исследуемый образец с пьезопреобразователями, 7 – домкрат)

границы двух твердых тел выполнены спектральным методом.

При постоянном давлении зависимость амплитуд высших гармоник A_n от амплитуды первой гармоники A_1 описывается выражением

$$A_n = K(A_1)^M, \tag{1}$$

где K – коэффициент, описывающий нелинейные упругие свойства границы. Для анализа экспериментальных результатов прологарифмируем выражение (1):

$$\ln(A_n) = \ln(K) + \ln(A_1). \tag{2}$$

$$Y = B + C \tag{3}$$

в котором $Y = \ln(A_n)$, $B = M$, $X = \ln(A_1)$, $C = \ln(K)$. Тангенс угла наклона этой прямой равен $B = M$ и определяет степенную зависимость амплитуды гармоники от амплитуды первой гармоники.

Для всех высших гармоник были проведены измерения зависимости их амплитуд от амплитуды первой гармоники при нескольких фиксированных значениях внешнего статического давления, приложенного к границе. Эти эксперименты позволили определить показатель M в (1), описывающий степенную зависимость амплитуд высших гармоник от амплитуды первой гармоники. Зависимости амплитуд высших гармоник A_n от амплитуды первой гармоники A_1 при фиксированных давлениях P , приложенного к границе в интервале (0–14) МПа, были построены в двойном логарифмическом масштабе. Эти построения позволили определить степенную зависимость амплитуд высших гар-

моник A_n от амплитуды первой гармоники A_1 . Значения показателя степени M для высших упругих гармоник при различных значениях статического давления, приложенного к границе, приведены на рис. 2. В классическом случае показатель M равен номеру гармоники n . Однако, как видно на рис. 2, степенная зависимость гармоник отличается от классической и значительно превосходит классические значения показателя M : при минимальных значениях внешнего давления показатель M для второй гармоники превосходит классическое значение $M = 2$ в 4 раза, для третьей гармоники в 2.5 раза, для четвертой гармоники в 3.5 раза. В интервале давлений $0 < P < 1$ МПа величина коэффициента m уменьшается в (1.5–2) раза, а при давлениях $P > 1$ МПа величина показателя M для всех гармоник практически не зависит от давления. При максимальных значениях давления, используемого в эксперименте, показатель M для второй гармоники был равен $M \approx 2.5$, для третьей гармоники $M \approx 5$, для четвертой гармоники $M \approx 6.5$. Это указывает на присутствие сильной структурной нелинейности на плоской шероховатой границе двух плоских тел.

2. ДИАГНОСТИКА НЕЛИНЕЙНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЫ ДВУХ ШЕРОХОВАТЫХ СРЕД ПОВЕРХНОСТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ

Блок-схема экспериментальной установки для исследования упругих свойств плоской границы двух шероховатых сред поверхностными акустическими волнами (ПАВ) приведена на рис. 3,а. К стеклянной под-

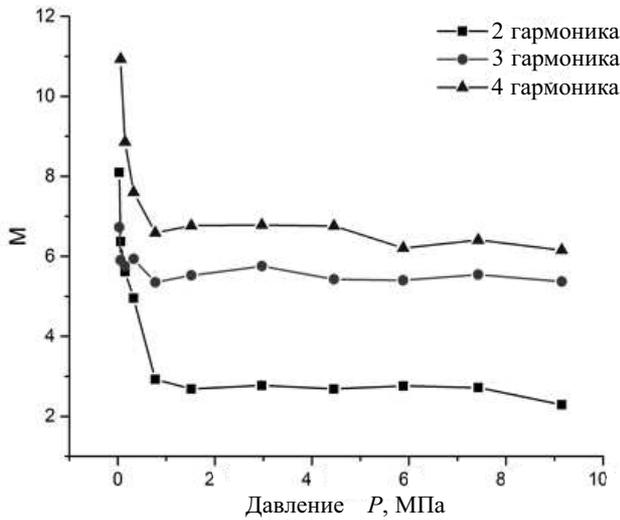


Рис. 2: Зависимость показателя степени от давления для второй, третьей и четвертой акустических гармоник

ложке, в которой распространялась ПАВ, с помощью домкрата прижимались образцы с различной степенью шероховатости их поверхности. Внешнее статическое давление реверсивно изменялось в интервале $0 < P < 4100$ кПа. Для возбуждения в подложке ПАВ использовался клиновый преобразователь с резонансной частотой 1.25 МГц, прошедшая вдоль границы подложка–образец (ПО) ПАВ регистрировалась клиновым преобразователем с резонансной частотой 2.5 МГц. Этот преобразователь эффективно регистрировал ПАВ с частотами 1.25 МГц и 2.5 МГц. При измерении сигнала второй гармоники ПАВ на частоте 2.5 МГц применялся режекторный фильтр на частоту зондирующего сигнала. Измерения нелинейных упругих свойств границы ПО проводились спектральным методом по эффективности генерации второй гармоники ПАВ. В качестве образцов использовалась наждачная бумага с известными размерами гранул абразивного материала и образцы из дюралюминия с нанесенными на них неровностями. В работе представлены результаты для 3 типов наждачных бумаг, которые имели различные размеры гранул абразивного материала: P60, размеры гранул (250–300) мкм, P400 (44–47) мкм, P800 (20.8–22.8) мкм (рис. 3, б). На поверхность образцов из дюралюминия в виде куба с шириной основания 28 мм были нанесены неровности при помощи наждачной бумаги типа P60, P320 и P800 с различными диаметрами гранул абразивного материала.

В спектре акустической волны, прошедшей вдоль поверхности образца, наблюдалась первая гармоника на частоте 1.25 МГц и вторая (2.5 МГц) гармоника:

$$A = A_f \sin(2\pi ft - kl) + A_{2f} \sin [2(2\pi ft - kl)]. \quad (4)$$

Источниками сигнала второй гармоники ПАВ могут быть следующие причины: генерация высших гармоник

пьезокерамическими элементами в клиновых преобразователях, контактная нелинейность на границе клиновый преобразователь–подложка, упругая нелинейность, связанная с ангармонизмом межатомного взаимодействия в подложке и неклассическая нелинейность на границе между подложкой и тестовым образцом. Первые три причины генерации сигнала второй гармоники не зависят от величины давления, приложенного к границе ПО. Поэтому можно считать, упругая нелинейность в исследуемой системе в основном определяется структурной нелинейностью на границе ПО. Причина проявления неклассической упругой нелинейности на границе двух шероховатых поверхностей следующая. ПАВ имеет эллиптическую поляризацию и содержит две упругие компоненты: поперечную компоненту, нормальную к границе, и продольную компоненту, параллельную границе двух сред [7]. Вследствие этого на границе поджатых шероховатых сред появляется два механизма неклассической упругой нелинейности: контактная нелинейность Герца, вызванная поперечной компонентой ПАВ, которая приводит к генерации второй гармоники ПАВ на поджатой границе ПО, и гистерезисная нелинейность, вызывающая генерацию нечетных гармоник, обеспеченная продольной компонентой ПАВ [5, 8]. Генерация нечетных гармоник нами в этой работе не исследовалась. Зависимость амплитуды второй гармоники A_{2f} от амплитуды основной волны A_f в твердых телах определяется выражением:

$$A_{2f} = \frac{Nk_f^2 L}{8} A_f^M, \quad (5)$$

где N — нелинейный акустический параметр второго порядка (НАП), k_f — волновой вектор основной волны, L — длина образца. При фиксированном значении амплитуды зондирующей волны для всех образцов, была экспериментально измерена зависимость амплитуд первой и второй гармоник ПАВ от давления на границе. Эти измерения с учетом уравнения (2) позволили рассчитать зависимость нелинейных акустических параметров (НАП) второго порядка от величины приложенного к границе ПО давления, нормированные значения которых приведены на рис. 4, а, б. (НАП для каждого образца были пронормированы на их значения при минимальном давлении, использовавшемся в эксперименте).

С увеличением давления на образец растёт число микроконтактов, являющихся источниками упругой нелинейности между поверхностями, и как следствие, увеличивается упругая нелинейность на границе ПО. При дальнейшем увеличении давления, когда все имеющиеся контакты вступили во взаимодействие, согласно теории контактного взаимодействия Герца, упругая нелинейность на границе ПО уменьшается. При большем размере гранул на одинаковых площадях образца количество источников нелинейности уменьшается, в то же время размеры гранул в таких образцах находятся в более широком диапазоне, что приводит к

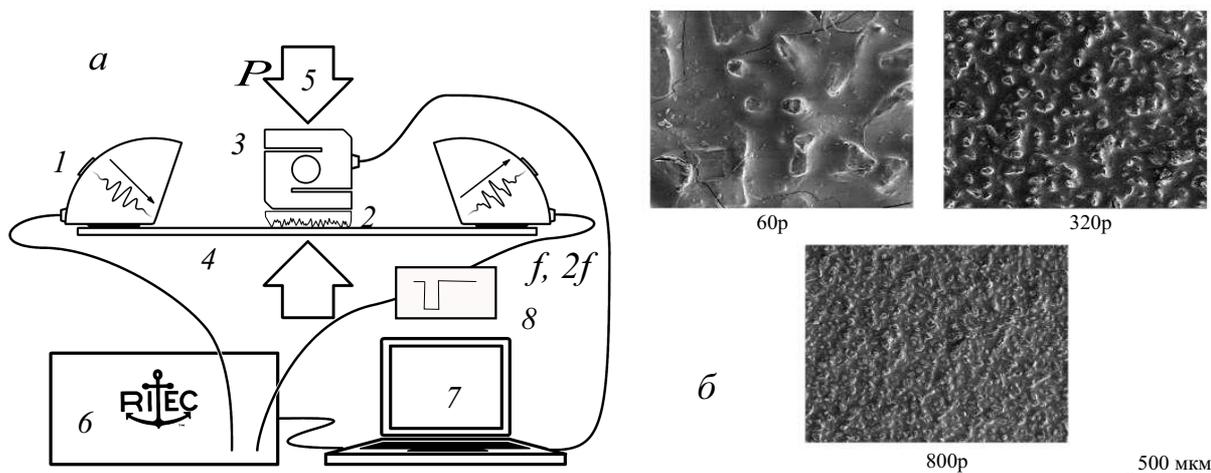


Рис. 3: *a* — Экспериментальная установка для исследования распространения поверхностных волн. 1 — клиновые преобразователи для возбуждения и приема поверхностных волн, 2 — образец, 3 — датчик давления, 4 — подложка из полированного оптического стекла, 5 — домкрат, 6 — генератор и усилитель, 7 — компьютер со встроенным АЦП, 8 — режекторный фильтр; *б* — фотографии поверхностей образцов наждачной бумаги, выполненная с помощью электронного микроскопа

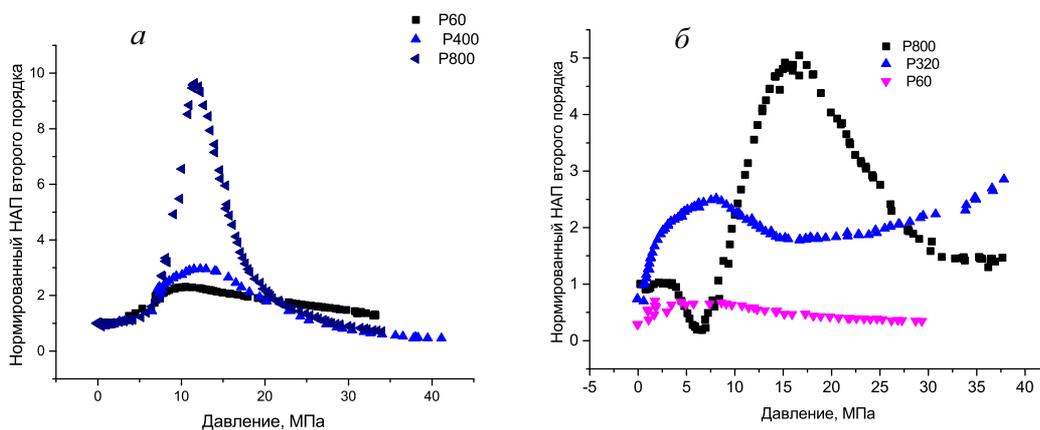


Рис. 4: Нормированный нелинейный акустический параметр в образцах с различной степенью шероховатости: *a* — образцы из наждачной бумаги, *б* — дюралюминиевые образцы

увеличению интервала давлений, в котором происходит изменение НАП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования нелинейных упругих свойств плоской границы образцов твердых тел с различной степенью шероховатости. В первой серии экспериментов нелинейные упругие свойства границы диагностировались спектральным методом с помощью продольной акустической волны, прошедшей через границу и поверхностной акустической волны, распространяющейся вдоль границы во второй серии экспериментов. Впервые обнаружена генерация второй, третьей и четвертой упругих продольных гармоник в спектре акустической продольной вол-

ны конечной амплитуды, прошедшей через плоскую шероховатую границу двух плоских изотропных твердых тел. Определена степенная зависимость M амплитуд высших гармоник A_m от амплитуды первой гармоники A_1 . Обнаружено, что значения показателя степени M для всех исследованных гармоник отличается от классических значений этого показателя.

Экспериментально исследовано влияние статического давления, приложенного к границе ПО на величину амплитуд, прошедших вдоль границы ПО первой и второй гармоник ПАВ. Исследуемые образцы имели различную степень шероховатости поверхности. Проведенные измерения позволили определить влияние статического давления, приложенного к границе на величину нелинейного акустического параметра второго порядка (НАП) для ПАВ. Было обнаружено, что НАП немонотонно зависит от величины внешнего давления,

приложенного к границе ПО: при увеличении давления величина НАП проходит через максимум. При этом величина максимума и его ширина коррелирует с величиной шероховатости исследованных образцов. Результаты экспериментальных исследований анализируются с использованием механизмов структурной нелинейности.

Предложенные в работе экспериментальные методи-

ки исследования нелинейных упругих свойств плоской границы твердых тел с помощью нелинейных акустических волн могут быть использованы в неразрушающем контроле для диагностики шероховатости и волнистости поверхности плоских твердых тел.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-22-00042).

-
- [1] Руденко О. В. УФН. 2006. **176**, № 1. С. 77.
 [2] Solodov I. Y., Krohn N., Busse G. Ultrasonics. 2002. **40**. P. 627.
 [3] Richardson J. M. Int. J. Eng. Sci. 1979. **17**. P. 73.
 [4] Buck O., Morris W. L., Richardson J. N. Appl. Phys. Lett. 1978. **33**, № 5. P. 371.
 [5] Meziane A., Norris A. N., Shuvalov A. L. J. Acoust. Soc. Am. 2011. **130**, № 4. P. 1820.
 [6] Rischbieter F. Acustica. 1965. **16**. P. 75.
 [7] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989.
 [8] Коршак Б. А., Коршак Ю. Б. Письма в ЖТФ. 2008. **34**, № 11. С. 68.

Nonlinear elastic phenomena in the propagation of acoustic waves on a flat rough boundary of solids

N. V. Shirgina^a, A. I. Kokshayskiy^b, A. I. Korobov^c

*Department of Acoustics, Faculty of Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
 Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^anatalia.shirgina@physics.msu.ru, ^bsuper_trouper@mail.ru, ^cakor@acs465a.phys.msu.ru

The paper presents the results of experimental studies of the effect of static pressure applied to the flat rough boundary of two solid materials on its nonlinear elastic properties. The investigations were carried out by the spectral method on the efficiency of generation of higher acoustic harmonics that were caused by a longitudinal elastic wave passes through the boundary and when a surface acoustic wave propagates along the boundary of two solid bodies. The experimentally determined power law dependence of the higher acoustic harmonics on the amplitude of the first acoustic harmonic was significantly different from the classical values for these harmonics. According to the measured amplitudes of the first and second harmonics of the surface acoustic wave passing along the boundary, a second-order nonlinear acoustic parameter was calculated as a function of the external pressure applied to the sample. It is found that the nonlinear parameter of the SAW does not depend monotonically on the pressure at the boundary. An analysis of the experimental results was carried out on the basis of a nonclassical acoustic nonlinearity.

PACS: 43.25+y

Keywords: Generation of elastic harmonics, rough boundary diagnostics, nonclassical nonlinearity, nonlinear acoustic parameter.

Received 10 July 2017.

Сведения об авторах

1. Ширгина Наталья Витальевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: natalia.shirgina@physics.msu.ru.
 2. Кокшайский Алексей Иванович — мл. науч. сотрудник; (495) 939-18-21, e-mail: super_trouper@mail.ru.
 3. Коробов Александр Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru.
-