

Особенности нелинейной трансформации акустических волн при наклонном падении на плоскую границу двух твердых тел

А.И. Кокшайский,^{*} Н.В. Ширгина,[†] 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 06.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Проанализированы особенности нелинейной трансформации продольной и сдвиговой акустических волн с вертикальной поляризацией (SV-волны) при их падении под углом 45° на плоскую границу двух шероховатых сред. Исследования производились спектральным методом по эффективности генерации амплитуды первой и второй продольных и третьей сдвиговой акустических гармоник, отраженных и прошедших через плоскую границу двух твердых тел в зависимости от внешнего давления, приложенного к границе. Амплитуды гармоник немонотонно зависели от величины внешнего статического давления, приложенного к границе. Полученные результаты находятся в согласии с проведенным анализом, свидетельствуют о присутствии сильной структурной нелинейности на границе двух сред, обусловленной механизмами контакта Герца и гистерезисной нелинейностью и могут быть использованы при диагностике качества сварных швов.

PACS: 43.25+у

УДК: 534.222

Ключевые слова: генерация акустических гармоник, гистерезисная нелинейность, трансформация акустических волн.

ВВЕДЕНИЕ

При наклонном падении продольных и сдвиговых акустических волн на шероховатую плоскую границу двух твердых тел наблюдается трансформация акустических волн. Исследование нелинейных упругих явлений на плоской границе двух тел давно привлекает исследователей [1–4]. Тем не менее, особенности трансформации акустической продольной волны в сдвиговую исследованы пока что недостаточно широко. При распространении акустических волн в образце на границе поджатых шероховатых сред появляется два механизма неклассической упругой нелинейности, первый из которых — контактная нелинейность Герца [5, 6], когда площадь контактов нелинейно зависит от приложенного напряжения, и система деформируется как ансамбль нелинейных пружинок, которая приводит к генерации второй акустической гармоники продольной волны на границе. Второй механизм неклассической упругой нелинейности — гистерезисная нелинейность, вызывающая генерацию нечетных гармоник, обеспеченная поперечной компонентой акустической волны [4].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Блок-схема установки приведена на рис. 1. Экспериментальный образец представлял собой прямоуголь-

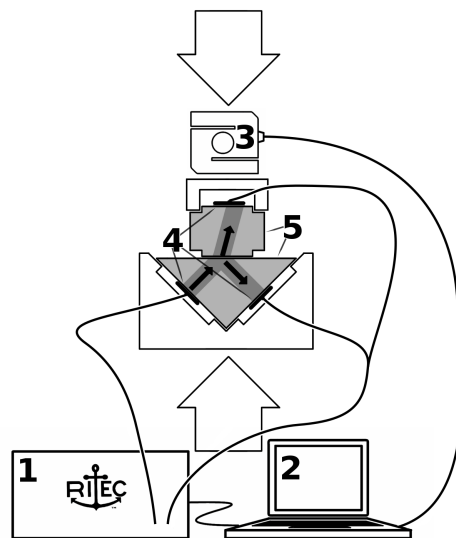


Рис. 1: Блок-схема установки (1 — импульсный передатчик RITEC RAM-5000 со встроенными фильтрами частот, 2 — персональный компьютер, 3 — датчик давления, 4 — пьезопреобразователи, 5 — исследуемый образец)

ную равнобедренную пирамиду из дюралюминия, к основанию которой прижимался цилиндр из алюминиевого сплава Д16 с плоскими основаниями. На одну грань пирамиды был закреплен пьезоэлектрический преобразователь из ниобата лития с резонансной частотой 5 МГц для генерации продольной акустической волны. Продольные волны, излучаемые этим преобразователем, падали под углом 45° на границу и отражались под таким же углом. На противоположной грани пирамиды и на плоской стороне цилиндра закреплялся продольный пьезопреобразователь из ниобата ли-

^{*}Е-mail: super_trouper@mail.ru

[†]Е-mail: natalia.shirgina@physics.msu.ru

[‡]Е-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

тия $Y-36^\circ$ среза на удвоенную частоту (10 МГц) либо сдвиговый пьезопреобразователь из ниобата лития на утроенную частоту (15 МГц). Для проведения экспериментальных измерений использовался ультразвуковой автоматизированный измерительный комплекс, в составе импульсного приемо-передатчика RITEC RAM-5000 и системы создания контролируемого давления на границе двух тел. Для выделения сигналов высших акустических гармоник применялись фильтры соответствующих частот. Исследования проводились спектральным методом.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В процессе эксперимента были измерены амплитуды первой, второй и третьей акустических гармоник, отраженных и прошедших через границу, в зависимости от реверсивного внешнего давления, приложенного к границе двух твердых тел. Вследствие того, что у вектора смещения продольной волны имеются две компоненты — нормальная и параллельная границе раздела, в спектре прошедшей и отраженной от границы акустической волны основной частоты 5 МГц наблюдались первая и вторая продольные акустические гармоники с частотами 5, 10 МГц и сдвиговая третья акустическая гармоника с частотой 15 МГц. Зависимости амплитуд прошедших и отраженных первой и второй акустических продольных гармоник от внешнего реверсивного давления на границу, представлены на рис. 2, а–г. Зависимость амплитуды отраженной третьей акустической сдвиговой гармоники от внешнего реверсивного давления на границу, представлена на рис. 2, д. При увеличении давления, приложенного к границе, происходило монотонное уменьшение амплитуды первой акустической гармоники, отраженной от границы (рис. 2, а), обусловленное увеличением доли энергии волны, проходящей через границу. В то же время, у амплитуды второй отраженной акустической гармоники наблюдался рост (рис. 2, в). Полученный эффект объясняется увеличением количества источников нелинейности (контактирующих шероховатостей на границе) с увеличением внешнего давления [3]. При увеличении давления на границе происходит рост амплитуды первой и второй прошедших акустических гармоник (рис. 2, б, г). При этом зависимость амплитуд первой и второй прошедших акустических гармоник от давления не является монотонной. Измеренная величина третьей сдвиговой отраженной гармоники при увеличении давления в диапазоне 0–5 МПа росла, после чего начала уменьшаться, выйдя в диапазоне давлений 15–20 МПа на плато. Немонотонность измеренных зависимостей высших гармоник объясняется присутствием шероховатостей различных размеров на границе. При увеличении внешнего давления

контакты границы последовательно вступают во взаимодействие, вызывая увеличение нелинейности, и как следствие, увеличение амплитуды высших гармоник, после того, как все контакты сжаты, нелинейность на границе начинает уменьшаться.

Для второй упругой гармоники были проведены измерения зависимости ее амплитуды от амплитуды первой гармоники при нескольких фиксированных значениях внешнего статического давления, приложенного к границе. При постоянном давлении зависимость амплитуды второй гармоники A_2 от амплитуды первой гармоники A_1 описывается выражением

$$A_2 = k(A_1)^m, \quad (1)$$

где k — коэффициент, описывающий нелинейные свойства границы. Для анализа экспериментальных результатов прологарифмируем выражение (1):

$$\ln(A_2) = \ln(k) + m \ln(A_1). \quad (2)$$

Тангенс угла наклона этой прямой (2) равен m и определяет степенную зависимость амплитуды гармоники от амплитуды первой гармоники.

Зависимость показателя степени m для упругих гармоник от величины значений статического давления, приложенного к границе, приведена на рис. 3, е. В классическом случае показатель m равен 2 — номеру гармоники. Из рис. 2, е следует, что степенная зависимость отличается от классической для прошедшей акустической волны при низких значениях внешнего статического давления (от 0 до 5 МПа), а затем выходит на классические показатели. Полученная зависимость показателя степени свидетельствует о том, что неклассическая нелинейность, обусловленная слабым контактом на границе (контактная герцевская нелинейность), максимальна при минимальных значениях внешнего статического давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально были исследованы особенности трансформации акустических волн при наклонном падении на плоскую шероховатую границу двух сред. Полученные результаты свидетельствуют о присутствии сильной структурной нелинейности на границе двух сред, обусловленной механизмами контакта Герца и гистерезисной нелинейностью. Результаты работы могут быть применены в акустической диагностике композитных материалов для обнаружения в них различных дефектов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00042).

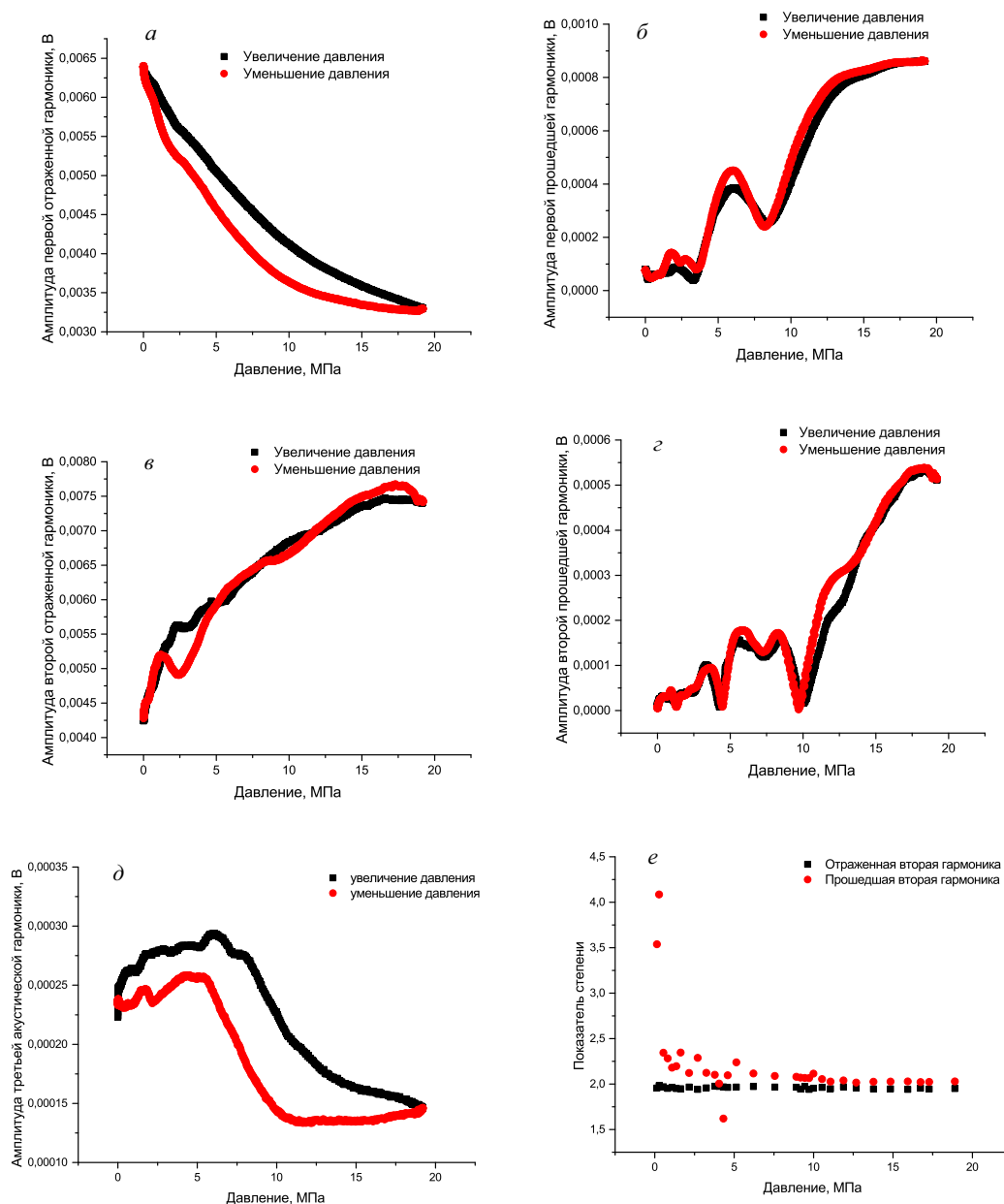


Рис. 2: Зависимости амплитуд: *а* — первой отраженной, *б* — первой прошедшей, *в* — второй отраженной, *г* — второй прошедшей акустических продольных гармоник от внешнего реверсивного давления на границе; *д* — зависимость амплитуды отраженной третьей акустической сдвиговой гармоники от внешнего реверсивного давления на границе. *е* — Зависимость показателя степени t для прошедшей и отраженной второй упругой гармоники от величины значений статического давления, приложенного к границе

[1] Buck O., Morris W.L., Richardson J.N. Appl. Phys. Lett. 1978. **33**, № 5. P. 371.
 [2] Лен К.С., Северин Ф.М., Солодов И.Ю. Акуст. журн. 1991. **37**, № 6. С. 1165.
 [3] Руденко О.В., Чинь Ань Ву. Акуст. журн. 1994. **40**, № 4. P. 668.
 [4] Meziane A., Norris A.N., Shuvalov A.L. J. Acoust. Soc. Am. 2011. **130**, № 4. P. 1820.

[5] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989.
 [6] Ширгина Н.В., Кокишайский А.И., Коробов А.И. Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2015. № 1. С. 151302.
 [7] Баллад Е.М., Коршак Б.А., Можжев В.Г., Солодов И.Ю. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2001. № 6. С. 44.

Features of non-linear transformation of the acoustic waves at oblique incidence on a plane boundary between two solids

A. I. Kokshayskiy^a, N. V. Shirgina^b, A. I. Korobov^{1,c}

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

E-mail: ^asuper_trouper@mail.ru, ^bnatalia.shirgina@physics.msu.ru, ^cakor@acs465a.phys.msu.ru

features of non-linear transformation of longitudinal and shear acoustic waves with vertical polarization (SV-waves) when they fall at the angle of 45° to the plane boundary between two rough environments were studied. Studies were made by the spectral method measuring the generation efficiency of the amplitude of the first, second and third longitudinal and shear acoustic harmonics, reflected and transmitted through a flat interface between two solids, depending on the external pressure applied to the boundary. The amplitudes of the harmonics nonmonotonically depend on the external static pressure applied to the border. The results were in agreement with the analysis indicate the presence of a strong non-linearity of the structure at the boundary between two media due to the mechanisms of contact Hertz and hysteresis non-linearity and can be used in the diagnosis of the quality of the welds.

PACS: 43.25+y

Keywords: the generation of acoustic harmonics, hysteresis nonlinearity, the transformation of acoustic waves.

Received 06 July 2017.

Сведения об авторах

1. Кокшайский Алексей Иванович — мл. науч. сотрудник; 9(495) 939-18-21, e-mail: super_trouper@mail.ru.
2. Ширгина Наталья Витальевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: 9(495) 939-18-21, e-mail: natalia.shirgina@physics.msu.ru.
3. Коробов Александр Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: 9(495) 939-18-21, e-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru.