

УДК 534.2

ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСШИХ АКУСТИЧЕСКИХ ГАРМОНИК НА ПЛОСКОЙ ШЕРОХОВАТОЙ ГРАНИЦЕ ДВУХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

© 2017 г. А. И. Коробов, А. И. Кокшайский, Н. В. Ширгина*, В. А. Ахматгалиев

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет,
119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы***e-mail: Natalia.shirgina@physics.msu.ru*

Поступила в редакцию 28.11.2016 г.

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 отражении от границы и прохождении через нее продольной упругой волны конечной амплитуды. Была обнаружена немонотонная зависимость амплитуд акустических гармоник от величины приложенного к границе внешнего реверсивного статического давления: для амплитуд второй и третьей гармоник наблюдались выраженные максимумы амплитуды с уменьшением внешнего статического давления. Было также обнаружено, что амплитуды второй, третьей и четвертой акустических гармоник увеличиваются при уменьшении внешнего статического давления (по сравнению с их значениями при тех же величинах давления при его увеличении). Экспериментально определенная степенная зависимость высших акустических гармоник от амплитуды первой акустической гармоники значительно отличалась от классических показателей для этих гармоник. Было проанализировано влияние внешнего давления на величину нелинейных упругих параметров второго и третьего порядков. Анализ экспериментальных результатов был проведен на основе неклассической акустической нелинейности.

Ключевые слова: диагностика границы двух сред, генерация упругих гармоник, контактная нелинейность, неклассическая нелинейность.

DOI: 10.7868/S0320791917040074

1. ВВЕДЕНИЕ

Дефекты, дислокации, межзеренные границы, микротрещины, нарушение сплошности и остаточные механические напряжения приводят к появлению в твердых телах структурной неклассической упругой нелинейности [1]. Величина этой нелинейности может значительно превышать величину классической нелинейности, связанной с ангармонизмом межмолекулярных сил. Структурная нелинейность является локальной, ее свойства определяются состоянием дефектов в каждой точке материала. Это позволяет не только судить о наличии дефектов в исследуемом материале, но и получить информацию об их пространственном распределении [2]. Для исследования упругих свойств материалов с неидеальной структурой применяются различные методы нелинейной акустики, такие как акустоупругий эффект, спектральные методы и методы нелинейной резонансной ультразвуковой спектроскопии [3–6]. Один из возможных механизмов структурной нелинейности поликристаллических металлов проявляется на плоской границе микрокри-

сталлов, а также плоской шероховатой границе двух твердых тел [7, 8]. В [9, 10] нелинейные упругие свойства границы двух плоских твердых тел экспериментально изучались по эффективности генерации второй упругой гармоники. Амплитуда второй гармоники немонотонно зависела от величины давления, приложенного к контакту. Отражение плоской сдвиговой упругой волны с вертикальной поляризацией, падающей под углом 45° на границу двух шероховатых поверхностей, экспериментально изучено в [11]. В спектре отраженной от границы упругой волны регистрировались сигналы основной частоты и второй гармоники. Было обнаружено, что с увеличением давления, приложенного к границе, амплитуда отраженной волны основной частоты монотонно уменьшалась, в то время как зависимость амплитуды второй гармоники сдвиговой волны от давления имела немонотонный характер. Результаты этого эксперимента были проанализированы в [12]. Нелинейное отражение упругой плоской продольной волны, падающей на границу плоское твердое тело—гранулированный слой, исследовано в работе [13]. Результаты экспериментальных

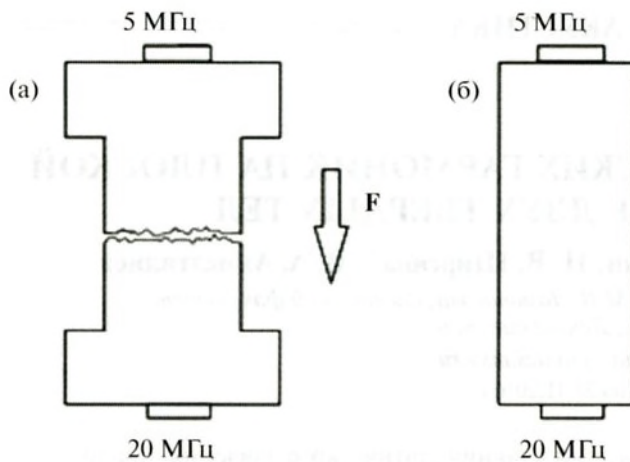


Рис. 1. (а) Исследуемый образец, (б) контрольный образец.

исследований генерации высших акустических гармоник при распространении поверхностных акустических волн вдоль границы и отражении SV сдвиговых акустических волн под углом 45° от границы приведены в [14].

В рассмотренных работах нелинейные упругие свойства границы двух сред были исследованы по эффективности генерации второй продольной акустической гармоники. Однако экспериментальных исследований генерации третьей и четвертой продольных акустических гармоник на границе двух сред проведено не было.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования особенностей генерации высших акустических гармоник (второй, третьей, четвертой) на границе двух плоских шероховатых тел в поле плоской продольной волны конечной амплитуды.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

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 и 20 МГц (рис. 1). Преобразователь с резонансной частотой 20 МГц хорошо принимал первые четыре акустические гармоники. Для приема третьей отраженной от границы гармоники использовался излучающий преобразователь на 5 МГц в режиме на отражение. Экспериментальные измерения проводились с помощью ультра-

звукового автоматизированного измерительного комплекса в составе импульсного приемо-передатчика RITEC RAM-5000 и системы создания контролируемого давления на границе двух тел. Приемно-передатчик был соединен с персональным компьютером, что позволяло управлять параметрами эксперимента: амплитудой, частотой и длительностью зондирующего импульса, а также коэффициентом усиления и полосой пропускания приемного тракта ультразвукового сигнала. Результаты эксперимента регистрировались, обрабатывались и архивировались в персональном компьютере. Блок-схема установки приведена на рис. 2. Экспериментальные исследования нелинейных свойств плоской шероховатой границы двух твердых тел выполнены спектральным методом. В первой серии экспериментов при фиксированной амплитуде зондирующего сигнала измерялись зависимости амплитуд первых четырех акустических гармоник, прошедших через плоскую границу твердых тел, а также амплитуда третьей отраженной от границы акустической гармоники, от величины давления P , приложенного к границе. Давление P , создаваемое домкратом, управляемым шаговым двигателем, реверсивно изменялось в интервале $(0-190-0) \times 10^5$ Па. Величина давления P измерялась электронным датчиком давления и записывалась в файл в компьютере параллельно с результатами измерений амплитуд акустических гармоник. Для выделения акустических сигналов высших гармоник на фоне мощного зондирующего сигнала использовались фильтры низких и высоких частот. Во второй серии экспериментов при заранее выбранных фиксированных значениях давления P были исследованы зависимости амплитуд второй, третьей и четвертой прошедших акустических гармоник от амплитуды первой акустической гармоники.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных измерений зависимостей амплитуд первых четырех продольных акустических гармоник, прошедших через границу при фиксированной амплитуде зондирующей волны от величины статического давления, приложенного к границе, приведены на рис. 3а–3г. Результаты аналогичных экспериментальных измерений для третьей отраженной от границы продольной акустической гармоники представлены на рис. 3д. Зависимости амплитуд гармоник от давления, приведенные на рис. 3, нормированы на их максимальные значения, измеренные в процессе эксперимента. Максимальное значение амплитуды первой гармоники было равно 4.20 мВ, второй – 39.8 мкВ, третьей прошедшей акустической гармоники – 5.57 мкВ, четвертой – 0.827 мкВ, а третьей отраженной акустической

гармоники – 15.2 мкВ. Как видно на рис. 3, при увеличении статического давления, приложенного к границе, в спектре прошедшего через границу акустического сигнала наблюдалось монотонное увеличение амплитуд первой, второй, третьей и четвертой акустических гармоник. Однако при уменьшении внешнего давления зависимости амплитуд второй и третьей акустических гармоник имели немонотонный характер с явно выраженным максимумом – для второй гармоники в области давления 12 МПа (рис. 3б), для третьей гармоники – в области давления 10 МПа (рис. 3в). Аналогичная особенность была характерна и для третьей отраженной от шероховатой границы акустической гармоники: ярко выраженный максимум при уменьшении внешнего реверсивного давления для нее наблюдался в области давления 10 МПа (рис. 3д). Для четвертой гармоники максимум зависимости амплитуды от давления не был зафиксирован. Для всех измеренных высших акустических гармоник наблюдалась характерная особенность: при реверсивном уменьшении внешнего статического давления величины амплитуд гармоник при тех же величинах внешнего статического давления были больше, чем их значения при увеличении внешнего статического давления. Подобная зависимость амплитуды второй акустической гармоники от величины реверсивного внешнего давления, приложенного к границе, наблюдалась в работе [15]. (Измерений зависимостей амплитуд третьей и четвертой акустических гармоник от давления на границе в [15] не проводилось.)

Экспериментально обнаруженные особенности зависимостей амплитуд высших акустических гармоник от величины давления на плоской границе двух шероховатых твердых тел (увеличение амплитуды при уменьшении внешнего давления) могут быть объяснены на основе модели, предложенной в [12]. Согласно этой модели, микровыступы шероховатой поверхности можно смоделировать ансамблем пружинок, имеющих одинаковые упругости, но разные длины l_i (рис. 4). Каждая из пружинок деформируется под действием силы F_i , приложенной к шероховатой границе, если ее длина больше ширины контакта h . Число деформируемых пружинок зависит от величины силы, прикладываемой к границе. Это приводит к нелинейной связи между давлением и величиной деформации ансамбля пружинок. С увеличением давления растет число (площадь) контактов между поверхностями, что приводит к увеличению коэффициента прохождения первой гармоники через границу и, соответственно, к росту амплитуды прошедшей волны основной частоты. Увеличение амплитуд гармоник вызвано тем, что с увеличением давления увеличивается количество контактов соприкосновения шероховатых поверхностей на границе, каждый из которых, со-

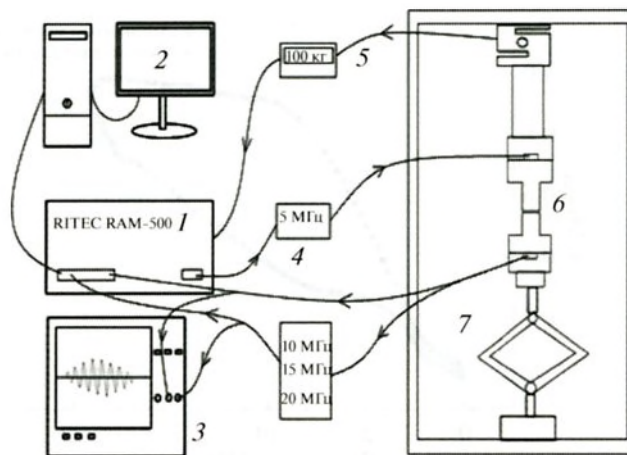


Рис. 2. Блок-схема установки: 1 – импульсный приемопередатчик RITEC RAM-5000, 2 – персональный компьютер, 3 – осциллограф, 4 – фильтры частот, 5 – датчик давления, 6 – исследуемый образец с пьезопреобразователями, 7 – домкрат.

гласно [12], является источником упругой контактной акустической нелинейности. Характер зависимости амплитуд высших акустических гармоник при реверсивном изменении внешнего давления на шероховатой границе указывает на сглаживание и уменьшение высоты микровыступов в результате разрушения наиболее высоких шероховатостей на границе контактирующих поверхностей. При этом дисперсия величин высот неровностей в образце становится меньше. Кроме того, в результате разрушения источников нелинейности большого размера могут появляться дополнительные неровности меньшей высоты. Таким образом, при разгрузке образца количество источников нелинейности на единицу площади увеличивается по сравнению с их количеством в образце до его нагружения. Это приводит к увеличению амплитуд акустических гармоник. Необходимо отметить, что в связи с особенностями методики проведения эксперимента измерения амплитуд высших акустических гармоник проводились на одном образце не одновременно, а последовательно: сначала измерялась зависимость амплитуды второй гармоники от давления при его реверсивном изменении, затем проводились аналогичные измерения для третьей и четвертой гармоник. При каждом цикле измерения следующей акустической гармоники происходило последовательное разрушение наиболее высоких неровностей. Это приводило к увеличению количества неровностей на границе с одновременным уменьшением их высоты. Описываемый процесс изменения количества и высоты соприкасающихся контактов шероховатых поверхностей схематично показан на рис. 5. В результате максимумы амплитуд второй и третьей

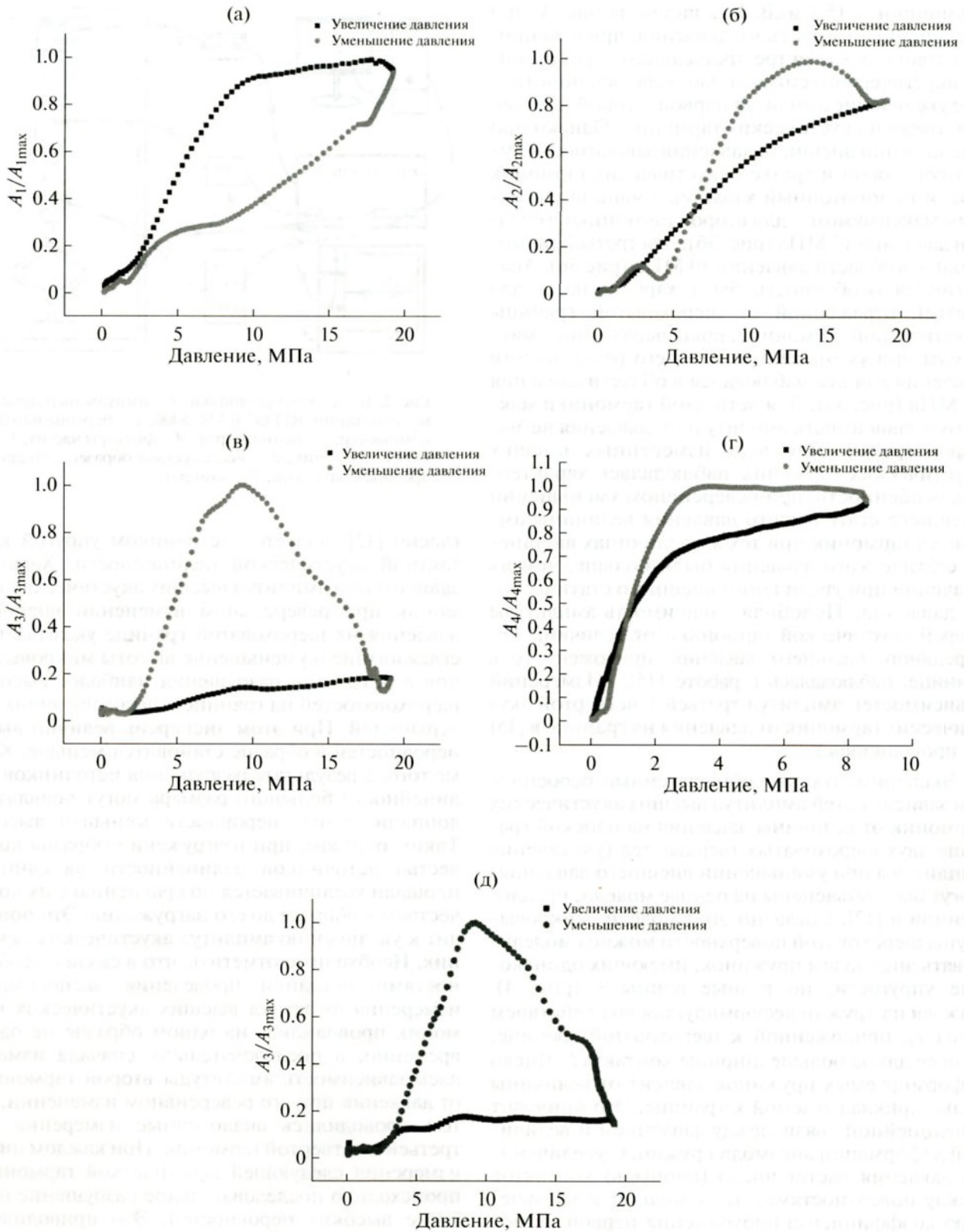


Рис. 3. Зависимость от давления нормированных амплитуд (а) первой, (б) второй, (в) третьей, (г) четвертой прошедших акустических гармоник; (д) зависимость от давления третьей отраженной акустической гармоники.

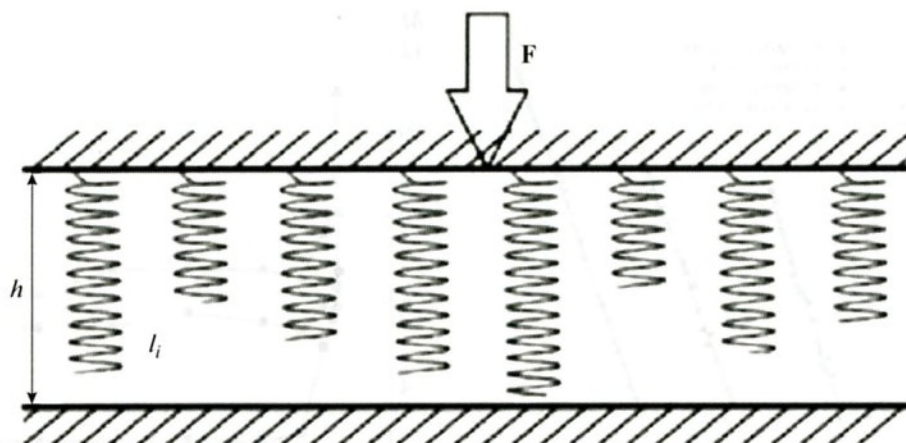


Рис. 4. Модель пружинок разной длины.

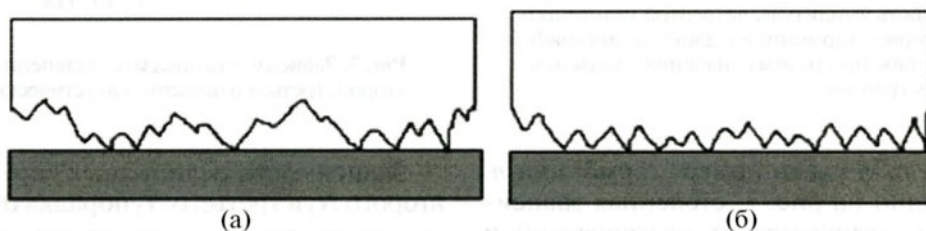


Рис. 5. Механизм нелинейности (а) до приложения внешнего статического давления, (б) после приложения внешнего статического давления.

гармоник при уменьшении внешнего давления проявляются при разных значениях величины давления. Отсутствие явного максимума на зависимости амплитуды четвертой гармоники от давления может быть связано с тем, что приложенного в процессе эксперимента давления оказалось недостаточно для достижения максимума амплитуды четвертой гармоники. (Немонотонное поведение нелинейных упругих свойств границы двух шероховатых поверхностей, вызванное увеличением количества источников нелинейности, наблюдалось ранее в [16, 17] при диагностике шероховатой границы поверхностными акустическими волнами.)

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

$$A_n = K(A_1)^m, \quad (1)$$

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

$$\ln(A_n) = \ln(K) + m \ln(A_1). \quad (2)$$

Выражение (2) является уравнением прямой линии

$$Y = BX + C, \quad (3)$$

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.

Зависимости амплитуд высших гармоник A_n от амплитуды первой гармоники A_1 при фиксированных значениях давления P , приложенного к границе в интервале 0–14 МПа, были построены в двойном логарифмическом масштабе. Пример такой зависимости для амплитуды четвертой гармоники A_4 приведен на рис. 6. Эти построения позволили определить степенную зависимость амплитуд высших гармоник A_m 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. 7. В классическом

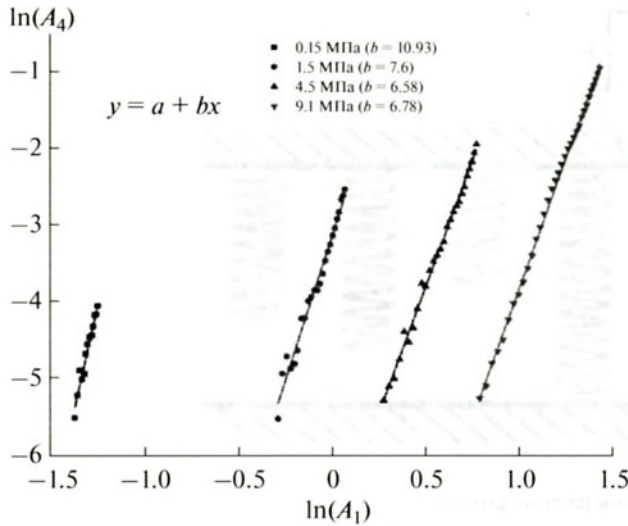


Рис. 6. Зависимость амплитуды четвертой гармоники от амплитуды первой гармоники в двойном логарифмическом масштабе при разных значениях давления, приложенного к границе.

случае показатель m равен номеру гармоники n . Однако, как видно на рис. 7, 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.

Учитывая полученные значения m и выражения (4) и (5), связывающие нелинейные упругие параметры второго N_2 и третьего N_3 порядка и амплитуды первой A_1 , второй A_2 и третьей A_3 гармоник, можно рассчитать зависимость нелинейных упругих параметров второго и третьего порядка от давления:

$$A_3 = N_2 \frac{k^2 A_1^m}{8} L, \quad (4)$$

$$A_3 = N_3 \frac{k^3 A_1^3}{24} L. \quad (5)$$

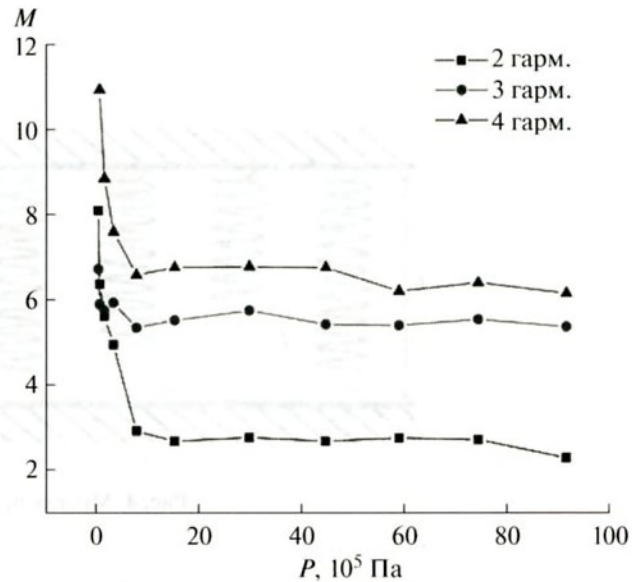


Рис. 7. Зависимость показателя степени от давления для второй, третьей и четвертой акустических гармоник.

Зависимости нелинейных упругих параметров второго N_2 и третьего N_3 порядка от внешнего статического давления приведены на рис. 8а, 8б. Представленные зависимости нормированы на максимальные расчетные значения N_2 и N_3 и имеют немонотонный характер. Полученные зависимости нелинейных упругих параметров при наличии тестового образца с известной шероховатостью поверхности позволяют оценить размеры шероховатостей границы [17], а также построить функцию распределения высот шероховатостей на границе [12, 13].

Генерация высших упругих гармоник в образце может происходить не только на границе двух твердых тел, но и в объеме образца за счет упругой нелинейности, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки. Вследствие акустоупругого эффекта коэффициенты упругости второго и третьего порядков в твердом теле могут зависеть от приложенного к нему внешнего давления [18]. Чтобы оценить вклад в общую упругую нелинейность упругой нелинейности в объеме материала, был изготовлен контрольный образец в виде сплошного цилиндра из изотропного сплава Д16 (рис. 16). Амплитуда первой гармоники в контрольном образце возросла примерно в 2.3 раза по сравнению с максимальной амплитудой в образце с шероховатой границей. Это объясняется меньшим поглощением упругих волн в контрольном образце. Амплитуда второй гармоники уменьшилась в 4.8 раза. При реверсивном изменении давления в интервале $(0-200-0) \times 10^5$ Па изменение амплитуд первой и второй гармоник в контрольном образце не превысило 2%. Из этого следует, что все

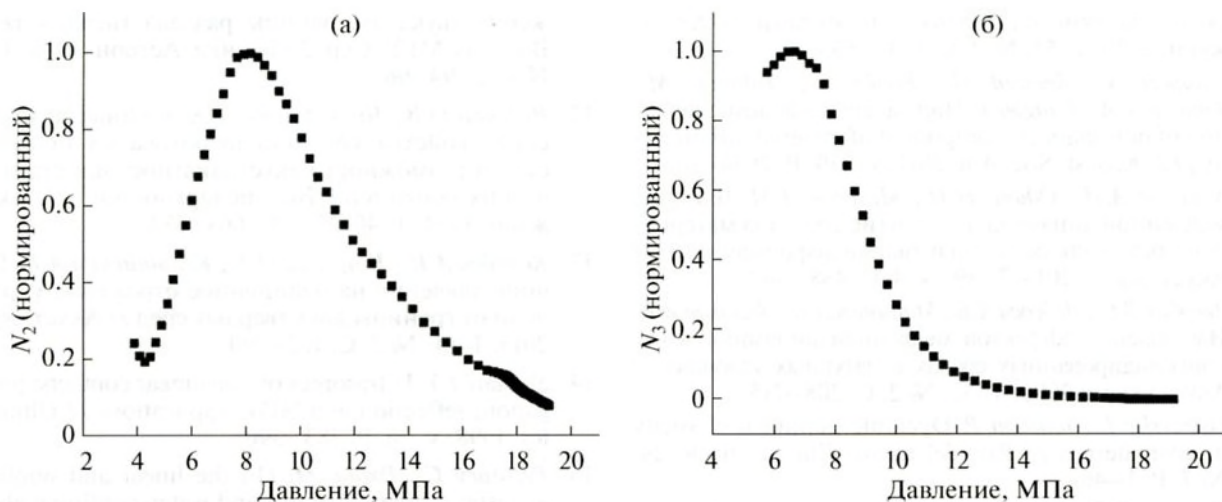


Рис. 8. Зависимость от давления нормированных нелинейных упругих параметров: (а) второго порядка, (б) третьего порядка.

нелинейные упругие явления, наблюдаемые в экспериментальном образце (рис. 1а), содержащем плоскую шероховатую границу двух твердых тел, обусловлены в основном нелинейными упругими механизмами на этой границе.

4. ВЫВОДЫ

Спектральным методом по эффективности генерации первых четырех акустических гармоник, возникающих при прохождении продольной упругой волны конечной амплитуды через шероховатую границу двух твердых тел и отражении от нее, проведены экспериментальные исследования влияния статического давления, приложенного к границе, на ее нелинейные упругие свойства. Построены зависимости нелинейных упругих параметров второго и третьего порядков от внешнего давления. Обнаружено, что амплитуды высших акустических гармоник немонотонно зависят от приложенного к границе внешнего реверсивного статического давления: для амплитуд второй и третьей гармоник наблюдались выраженные максимумы амплитуды при уменьшении внешнего статического давления. Обнаружено также, что амплитуды второй, третьей и четвертой акустических гармоник повышаются при реверсивном уменьшении внешнего статического давления (по сравнению с их значениями при тех же величинах давления при его увеличении), что объясняется увеличением количества источников нелинейности на единицу площади при разгрузке по сравнению с их количеством в образце до его нагружения. При фиксированных значениях давления в интервале давлений $(0-190) \times 10^5$ Па были измерены зависимости амплитуд прошедших высших акустических гармоник от амплитуды

первой гармоники. Полученные экспериментально зависимости были построены в двойном логарифмическом масштабе. Это позволило определить зависимости показателей степени m , определяющих степенную зависимость амплитуд высших акустических гармоник от амплитуды первой гармоники. Было обнаружено, что экспериментально определенная степенная зависимость высших гармоник значительно отличается от классических показателей для этих гармоник. Это указывает на присутствие сильной структурной нелинейности на плоской шероховатой границе двух плоских тел. Экспериментальные исследования генерации третьей и четвертой продольных акустических гармоник при нормальном падении плоской продольной акустической волны на шероховатую границу двух твердых тел были выполнены впервые. Анализ экспериментальных результатов был проведен на основе механизма контактной акустической нелинейности.

Полученные в работе экспериментальные результаты могут быть применены в акустической диагностике композитных материалов для обнаружения в них различных подповерхностных дефектов, например, непроклея, расслоений.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-22-00042).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Успехи физ. наук. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
2. Изосимова М.Ю., Коробов А.И., Руденко О.В. Пространственное распределение нелинейного акустического параметра в тонкой поликристалличе-

- ской пластине из сплава с дефектами // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 2. С. 153–159.
3. *Haupert S., Renaud G., Rivière J., Talmant M., Johnson P.A., Laugier P.* High-accuracy acoustic detection of non-classical component of material nonlinearity // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 130. P. 2654–2661.
 4. *Коробов А.И., Одина Н.И., Мехедов Д.М.* Влияние медленной динамики на упругие свойства материалов с остаточными и сдвиговыми деформациями // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 4. С. 438–444.
 5. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.* Наблюдение эффектов медленной динамики в неконсолидированных средах в натуральных условиях // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 2. С. 208–215.
 6. *Ostrovsky L., Johnson P.* Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // *Riv. del nuovo Cim.* 2001. V. 24. № 7. P. 1–46.
 7. *Руденко О.В.* Нелинейные методы акустической диагностики // Дефектоскопия. 1993. № 8. С. 24–32.
 8. *Руденко О.В., Коробов А.И., Изосимова М.Ю.* Нелинейность твердых тел с микро- и наномасштабными дефектами и особенности ее макроскопических проявлений // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. P. 187–193.
 9. *Richardson J.M.* Harmonic generation at an unbonded interface – I. Planar interface between semi-infinite elastic media // *Int. J. Eng. Sci.* 1979. V. 17. P. 73–85.
 10. *Buck O., Morris W.L., Richardson J.N.* Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks // *Appl. Phys. Lett.* 1978. V. 33. № 5. P. 371–373.
 11. *Северин Ф.М., Солодов И.Ю., Шкуланов Ю.Н.* Экспериментальное наблюдение нелинейности отражения звука от границы раздела твердых тел // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрон. 1988. Т. 29. № 4. С. 94–96.
 12. *Руденко О.В., Чинь Ань Ву.* Нелинейные акустические свойства контакта шероховатых поверхностей и возможности акустодиагностики статистических характеристик поверхностей // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 668–672.
 13. *Коробов А.И., Ширгина Н.В., Кокшайский А.И.* Влияние давления на нелинейное отражение упругих волн от границы двух твердых сред // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 182–190.
 14. *Solodov I.Y.* Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications // *Ultrasonics.* 1998. V. 36. P. 383–390.
 15. *Pecorary C., Poznic M.* On the linear and nonlinear acoustic properties of dry and water-confining elastoplastic interfaces // *Proc. R. Soc. A.* 2006. V. 462. P. 769–788.
 16. *Shirgina N.V., Kokshaitskiy A.I., Korobov A.I.* Diagnosis of nonlinear elastic properties of the boundary of two flat rough solids by surface acoustic waves // *Phys. Procedia.* 2015. V. 70. P. 463–466.
 17. *Кокшайский А.И., Коробов А.И., Ширгина Н.В.* Диагностика упругих свойств плоской границы двух шероховатых сред поверхностными акустическими волнами // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 2. С. 152–157.
 18. *Thurston R.N., Brugger K.* Third-order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media // *Phys. Rev.* 1964. V. 133. P. A1604.