АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2006, том 52, № 5, с. 683–692

УДК 537.548

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ ЛЭМБА В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНКЕ С ДЕФЕКТАМИ

© 2006 г. А. И. Коробов, М. Ю. Изосимова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
119992 Москва, Ленинские горы
Тел.: (095)9-39-1821
E-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 15.11.05 г.

Приводятся результаты экспериментов по исследованию волн Лэмба конечной амплитуды в твердотельной пластинке из поликристаллического сплава алюминия с дефектами. Для регистрации и визуализации волн Лэмба использовался лазерный сканирующий виброметр. Исследованы зависимости амплитуд высших гармоник от амплитуды основной частоты, усредненных по поверхности пластинки, в точке, удаленной от дефекта, и в месте дефекта. Обнаружены пороговый характер генерации высших гармоник и степенная зависимость их амплитуд, не характерная для нелинейности, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки материала. Экспериментально показана возможность локации распределения отдельных дефектов по измеренному пространственному распределению структурной нелинейности в исследуемом материале. Для объяснения экспериментальных результатов привлекается модель билинейной среды.

PACS: 43.25.Dc

ВВЕДЕНИЕ

Наличие надмолекулярных неоднородностей и дефектной структуры в твердых телах существенно влияет на их физические свойства, в том числе и на упругие свойства. Дефекты (дислокации, трещины, полости, поры, межзеренные границы и т.д.) заметно изменяют функциональную зависимость между напряжением и деформацией вследствие особенностей локального деформирования и сингулярного поведения внутренних напряжений в их ближайшей окрестности (концентраторы напряжений). В результате такого влияния дефектной структуры реальный материал в целом обнаруживает сильные нелинейные свойства даже при относительно слабых действующих напряжениях. Нелинейность, связанную с дефектами и нарушением сплошности материала, называют структурной или неклассической нелинейностью, и она может существенно (на 2–3 порядка) превышать нелинейность, связанную с ангармонизмом кристаллической решетки, называемую по устоявшейся терминологии "физической" нелинейностью. Гигантская структурная нелинейность открывает новые возможности для разработки точных методов акустической диагностики, позволяющих получать более полную информацию о состоянии материала [1]. Одна из первых ключевых работ, в которой исследовалось влияние дефектной структуры материала на его упругие нелинейные свойства, была выполнена в 1963 г. В.А. Красильниковым с соавторами [2]. Традиционные импульсные методы [2–5] или резонансные методы [6–11] позволяют исследовать интегральное влияние дефектов на акустическую нелинейность. В последнее время развиваются экспериментальные методы, позволяющие наблюдать отдельные дефекты [12]. Для исследования локальных свойств структурной нелинейности более удобными оказались акустические волны (АВ) в тонких твердотельных пластинках [13]. Из большого спектра АВ в пластинах в последнее время наиболее активно исследуется нулевая мода изгибной волны Лэмба, которая позволяет не только обнаружить наличие дефектов структуры в тонких пластинах и оболочках, но и дает возможность локализировать и визуализировать отдельные дефекты [12, 14, 15].

Следует отметить, что, несмотря на большое количество публикаций, посвященных волнам Лэмба в твердотельных пластинах, работ, связанных с экспериментальными исследованиями нелинейного взаимодействия изгибных волн с дефектной структурой, мало. Целью данной работы является экспериментальное исследование особенностей нелинейных явлений при распространении волн Лэмба большой амплитуды в тонкой пластине из поликристаллического сплава алюминия, содержащей дефекты.

ИЗГИБНЫЕ ВОЛНЫ ЛЭМБА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

В тонких пластинках со свободными границами распространяются АВ, называемые волнами Лэмба. Они существенно отличаются от АВ в неограниченной среде [13, 16]. Решение волнового уравнения с учетом граничных условий на поверхности пластины является достаточно сложной задачей. В случае, когда выполняется условие $k_t h \ll 2$ ($k_t = 2\pi f/V_t$ – волновой вектор, f – частота, V_t – скорость сдвиговой волны, h – толщина пластины), волновое уравнение для изгибной волны Лэмба, в которой вектор смещения перпендикулярен к плоскости пластинки, сводится к дифференциальному уравнению четвертого порядка в частных производных [16]:

$$\rho\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2} + \frac{D}{h}\Delta^2\zeta = 0, \qquad (1)$$

здесь $\zeta(x, y)$ – смещение, перпендикулярное к плоскости пластинки, $D = \dfrac{h^3E}{12(1-\sigma^2)}$ – цилиндрическая жесткость, E – модуль Юнга, σ – коэффициент Пуассона, Δ – двумерный оператор Лапласа. Из (1) можно получить выражение для фазовой скорости нулевой моды изгибной волны:

$$c_{a0} = \sqrt[4]{\frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)}}\sqrt{\omega h} = A\sqrt{\omega h}. \qquad (2)$$

Как видно из (2), фазовая скорость этой моды обладает дисперсией. Это приводит к тому, что спектр собственных колебаний пластины конечных размеров является неэквидистантным.

В случае точечного возбуждения в тонкой пластинке распространяется цилиндрическая изгибная волна. В круглой пластинке, свободной по внешнему контуру и возбуждаемой в центре, формы ее колебаний в полярных координатах определяются следующим выражением [17]:

$$Y_m(r, \varphi) = (\cos m\varphi)[A_m J_m(kr) + B_m I_m(kr)], \qquad (3)$$

где Y_m, A_m, B_m – амплитуды, $m = 0, 1, 2, 3, \ldots$, $J_m(kr)$, $I_m(kr)$ – функции Бесселя, r – радиус, φ – полярный угол. Уравнение (3) с граничными условиями при $r = a$ (a – радиус пластины) позволяет найти резонансные частоты колебаний пластинки. Система уравнений, определяющих частотный спектр собственных колебаний пластинки, имеет достаточно сложный вид. Проведенный в [18] анализ этой системы показывает, что спектр собственных колебаний круглой тонкой пластинки является неэквидистантным.

Для экспериментального исследования волн Лэмба в тонких пластинках нами была разработана автоматизированная экспериментальная установка (рис. 1). Она состоит из вибратора, к которому жестко прикрепляется исследуемый образец в виде тонкой круглой пластинки, усилителя мощности LM-102 и сканирующего лазерного виброметра PSV-300 фирмы Polytec. Гармонический сигнал с внутреннего функционального генератора виброметра через усилитель мощности подавался на вибратор, который возбуждал в пластинке изгибную волну. С помощью лазерного виброметра имелась возможность дистанционно измерить колебательную скорость пластинки в 512×512 наперед заданных дискретных точках, провести спектральный анализ поступившего сигнала и восстановить форму колебаний поверхности на основной частоте и гармониках этого сигнала. Виброметр позволяет проводить измерения колебательной скорости в интервале 3×10^{-6}–10 м/с и в диапазоне частот до 1 МГц. При этом амплитуда колебательной скорости легко пересчитывается в амплитуду смещения или ускорения поверхности. Измерение колебательной скорости в виброметре основано на эффекте Доплера. Выбор области сканирования значительно упрощен за счет встроенной видеокамеры. Работа всей системы управляется персональным компьютером. С помощью программного обеспечения, поставляемого вместе с виброметром фирмой Polytec, выбирается исследуемая область сканирования образца, задается форма и частота сигнала для его возбуждения. Далее измерения проводятся в автоматическом режиме. Пакет программ позволяет провести различные виды математической обработки сигнала с виброметра: усреднение, цифровую фильтрацию, спектральный анализ, визуализацию колебаний образца, обработку полученного изображения и т.д. При этом имеется возможность найти как усредненный спектр колебаний по всей поверхности, так в любой точке образца.

Для учета возможной паразитной нелинейности, вызванной вибратором, перед началом измерений проводился спектральный анализ колебаний вибратора при его возбуждении гармоническим сигналом. Амплитуда колебаний всех гармоник была более чем на 60 дБ ниже амплитуды основной частоты во всем диапазоне амплитуд колебаний, используемых в экспериментах. Это позволило в дальнейшем при анализе экспериментальных результатов не учитывать нелинейность, связанную с негармоничностью колебаний вибратора.

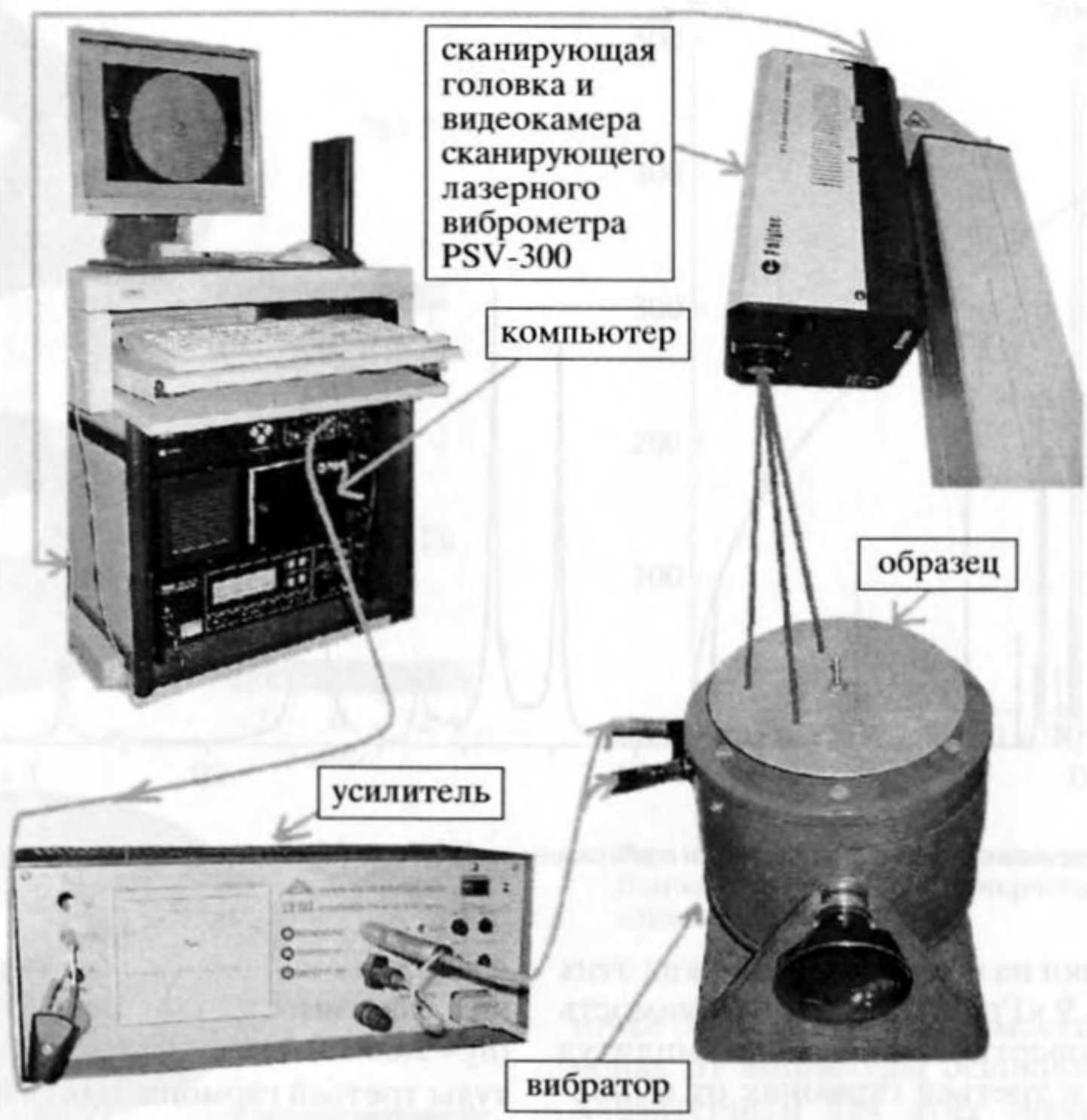

Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

Экспериментальные исследования проводились в пластинке из поликристаллического сплава алюминия диаметром 121 мм и толщиной 1.17 мм, которая крепилась к вибратору в геометрическом центре. Так как элементы крепления пластинки к вибратору имели конечные размеры, то это приводило к некоторому изменению собственных частот и добротности мод пластинки по сравнению с точечным возбуждением. Предварительный визуальный анализ пластинки не выявил в ней поверхностных дефектов. Для определения собственных колебаний пластинки на вибратор с функционального генератора через усилитель мощности подавался ЛЧМ сигнал с девиацией частоты в пределах от 100 Гц до 25 кГц. Это позволило в этом диапазоне частот определить спектр собственных мод пластинки (рис. 2) и визуализировать форму их колебаний. Пример визуализации некоторых мод приведен на рис. 3. Центр пластины с элементами ее крепления к вибратору не сканировался. Поэтому в центре всех рисунков, демонстрирующих форму колебаний различных мод в пластинке, наблюдается белое круглое пятно. Рядом с каждым изображением формы колебаний моды на рисунках помещена диаграмма, уровень серого на которой позволяет определить амплитуду колебаний.

Визуализация собственных мод пластинки (рис. 3) позволила определить длину волны, величину скорости изгибной волны, а также параметр $A = 39.56 \pm 0.73$ (м/с $)^{0.5}$ в выражении для скорости изгибной волны (2). Рассчитанная по табличным значениям модулей упругости и плотности ($E = 72$ ГПа, $\sigma = 0.31$, $\rho = 2.7 \times 10^3$ кг/м^3) [19] величина этого параметра была равна 39.6 (м/с)$^{0.5}$, и находилась в хорошем согласии с результатами эксперимента. Измеренное значение параметра A позволило с помощью (2) построить дисперсионную кривую для нулевой изгибной моды в исследуемом материале (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗГИБНЫХ ВОЛН

Исследование нелинейных акустических явлений в образце проводилось на двух модах пластинки с резонансными частотами: 2.528 кГц и 11.9 кГц. На этих модах не наблюдалась угловая зависимость амплитуды, что упрощало в дальнейшем анализ

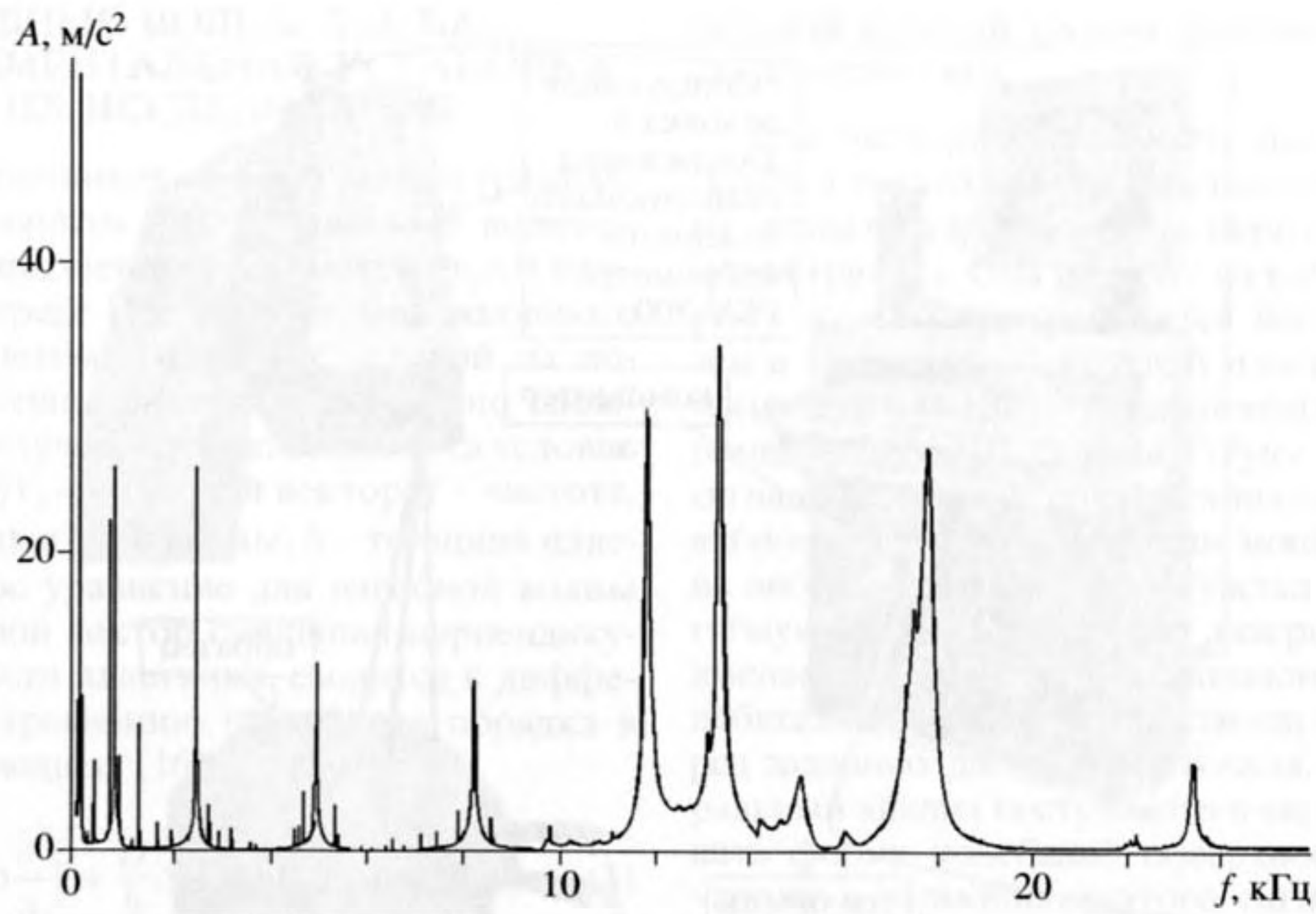

Рис. 2. Спектр собственных колебаний пластинки в диапазоне от 100 Гц до 25 кГц (единицы измерения амплитуды – м/с^2).

колебаний пластинки на высших гармониках этих мод. На частоте 11.9 кГц была снята зависимость усредненных по поверхности образца амплитуд колебаний второй и третьей гармоник от амплитуды основной частоты. Если предположить степенную зависимость амплитуд высших гармоник $A_{m\omega}$ ($m = 2, 3$) от амплитуды основной частоты A_ω,

$$A_{2\omega} = C_2 A_\omega^{n_2}, \quad A_{3\omega} = C_3 A_\omega^{n_3}, \tag{4}$$

то построение в двойном логарифмическом масштабе зависимости $y = nx + b$ (где $y = \ln(A_{2\omega,\,3\omega})$, $x = \ln(A_\omega)$, $b = \ln(C_{2,\,3})$, $C_{2,\,3}$ – параметр, характеризующий нелинейные акустические свойства образца) позволяет по углу наклона прямой $y(x)$ найти $n = n_{2,\,3}$. Для среднего по всей поверхности пластинки амплитудного спектра из зависимости логарифма амплитуд второй и третьей гармоник от логарифма амплитуды основной частоты (рис. 5а,б) были определены величины $n_2 = 2.12 \pm 0.09$, и $n_3 = 1.55 \pm 0.11$. Такая степенная зависимость амплитуд гармоник указывает на то, что помимо классической нелинейности, для которой $n_2 = 2$, $n_3 = 3$ [20], в образце имеются механизмы нелинейности, отличные от классического механизма. Представлял интерес выяснить, характерна ли такая амплитудная зависимость гармоник для усредненного спектра, или она имеет такой же характер и в локальной точке. Анализ спектра колебаний в различных локальных точках пластинки позволил найти такие, в которых наблюдалась практически квадратичная зависимость амплитуды второй гармоники ($n_2 = 2.06 \pm 0.13$) и кубическая зависимость амплитуды третьей гармоники ($n_3 = 2.9 \pm 0.02$) от амплитуды первой гармоники (рис. 6в,г). На наш взгляд это связано со следующими обстоятельствами. Как уже отмечалось выше, образец был приготовлен из поликристаллического сплава алюминия. Внутренняя структура поликристаллических металлов представляет собой произвольно ориентированные кристаллические зерна с развитыми межзеренными границами, микротрещинами и т.д. [10, 21, 22]. В точках, удаленных от межзеренных границ, наблюдается степенная зависимость амплитуд высших гармоник, практически характерная для классической нелинейности. Упругие свойства межзеренных границ отличны от упругих свойств зерен. Контраст упругих свойств на границе зерен вызывает изменение локальных и, как следствие, интегральных нелинейных свойств таких материалов [23], и может привести к изменению степенной зависимости между амплитудами первой и высших гармоник.

Гармоники выше третьей для основной частоты 11.9 кГц не наблюдались из-за малой амплитуды колебаний вибратора на этой частоте. Поэтому была исследована генерация гармоник модой с резонансной частотой 2528 Гц. Амплитуда колебаний вибратора на этой частоте в 4.7 раза выше амплитуды его колебаний на частоте 11.9 кГц при одной и той же амплитуде электрического напряжения, подаваемого на вибратор. Увеличение амплитуды

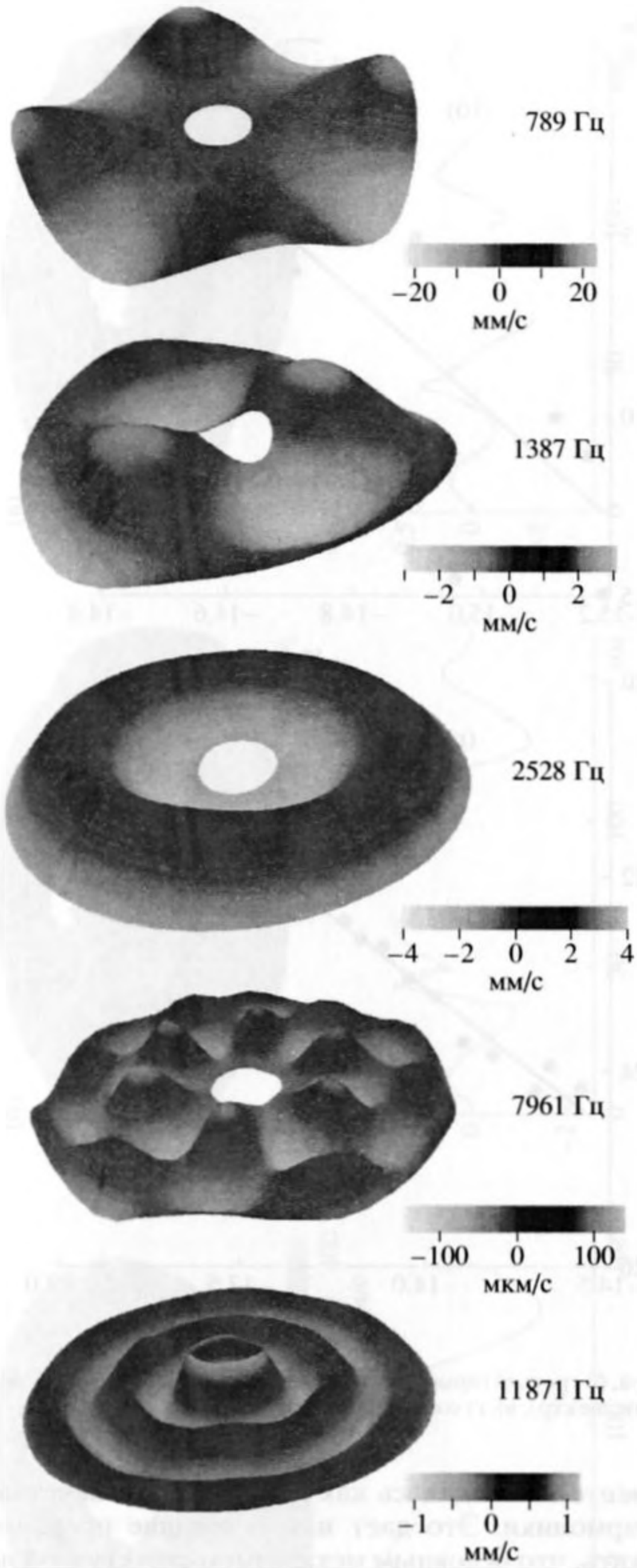

Рис. 3. Форма колебаний некоторых мод тонкой круглой пластинки.

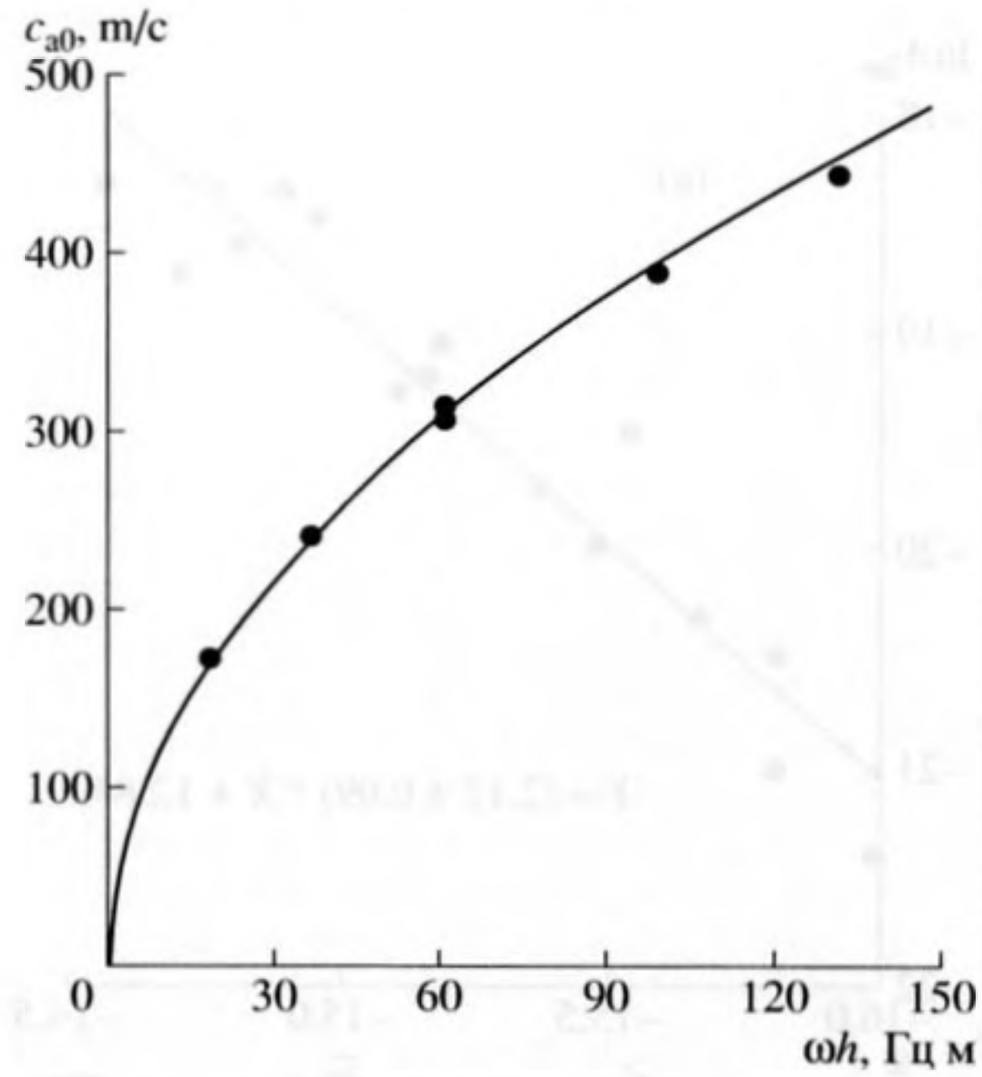

Рис. 4. Дисперсионная кривая для изгибной волны Лэмба в образце из поликристаллического сплава алюминия.

колебаний пластинки на частоте 2528 Гц привело к значительному (до 200 раз) увеличению в локальной точке по сравнению со средними по пластинке амплитудами высших гармоник (рис. 6). В этой точке были сняты зависимости амплитуд 2–5 гармоник от амплитуды основной частоты (рис. 7). Характерным для этих зависимостей является монотонное увеличение амплитуд гармоник при увеличении амплитуды основной частоты в диапазоне 0–9.5 мкм и их резкий рост (более чем на два порядка) при дальнейшем увеличении амплитуды возбуждения. При амплитуде основной частоты, равной 10.2 мкм, гармоники достигали максимума, а при дальнейшем увеличении амплитуды возбуждения начинали резко уменьшаться примерно до уровня, предшествовавшего их резкому росту. Из амплитудных зависимостей гармоник видно, что их резкое увеличение наступает при превышении некоторого порога по амплитуде возбуждения, что характерно для неклассической нелинейности [12, 24]. Мы предполагаем, что генерация высших гармоник происходила на локальном дефекте в виде поджатой микротрещины с величиной поджатия 9.5 мкм или точечного герцевского контакта на межзеренной границе, которые являются источниками неклассической нелинейности [1]. (Нелинейность открытой микротрещины конечных размеров не имеет порога по амплитуде возбуждения.) В [12, 24] проведено феноменологическое описание неклассической нелинейности, где было сделано предположение, что для описания движения контактных границ в твердом теле под воздействием нормальных и тангенциальных к границе смещений могут быть использованы модели билинейной и гистерезис-

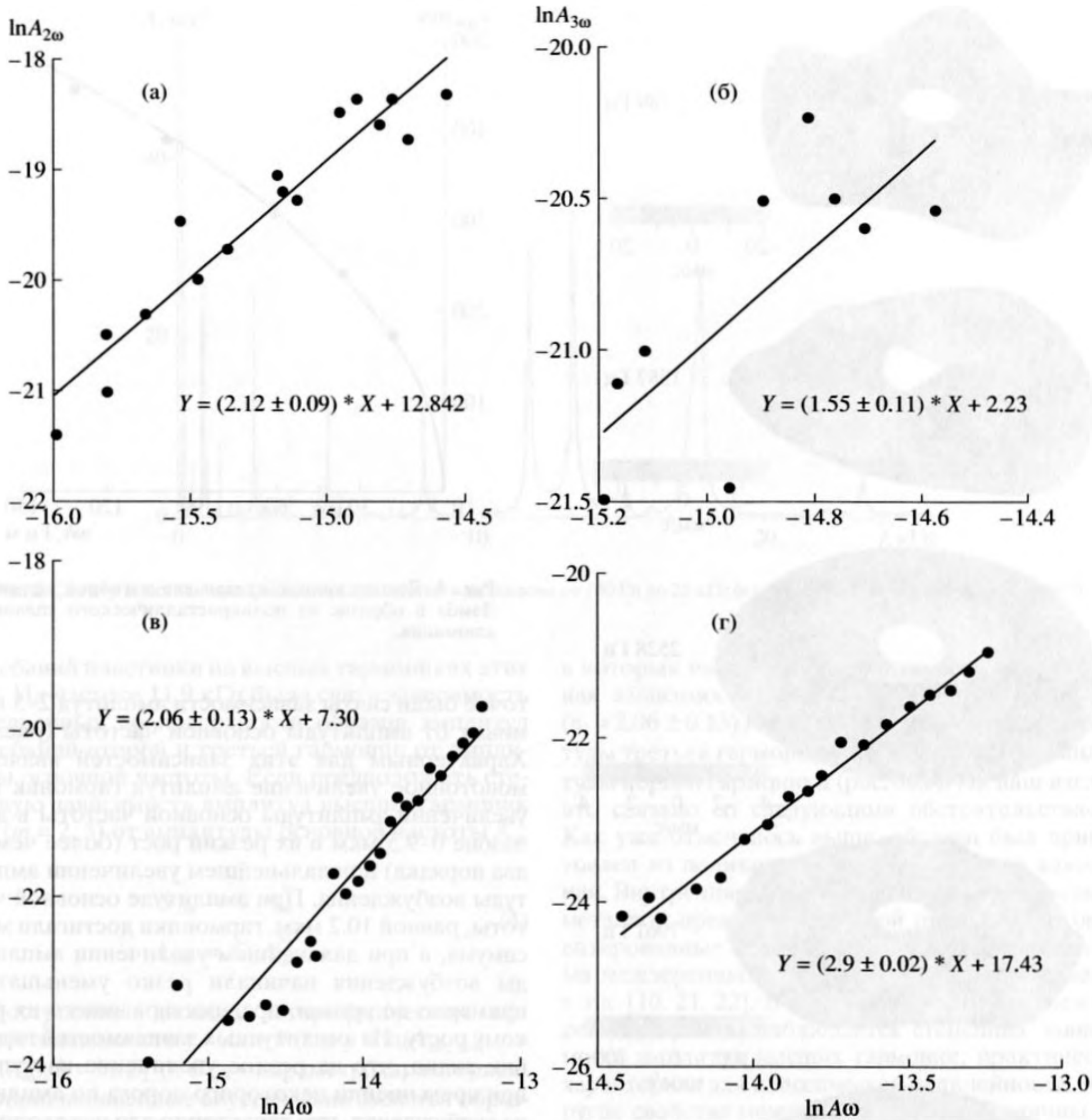

Рис. 5. Зависимость средней по поверхности амплитуды а) второй, б) третьей гармоники от амплитуды основной частоты в двойном логарифмическом масштабе (средний по поверхности спектр), в), г) соответственно (в локальной точке).

ной сред соответственно. Общим для этих моделей является пороговый характер: неклассическая нелинейность проявляется при превышении амплитуды колебаний в волне величины, зависящей от размеров и состояния локальных дефектов. Однако спектр гармоник, генерируемых АВ в случае билинейной и гистерезисной нелинейностей, различен. В случае билинейной среды в волне присутствуют все гармоники, в то время как в случае гистерезисной нелинейности отсутствуют четные гармоники. В описанном выше эксперименте наблюдались как четные, так и нечетные гармоники. Это дает нам основание предположить, что основным механизмом структурной нелинейности в данном случае является механизм билинейной, или хлопающей, нелинейности. Уравнение состояния $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ для билинейной среды представляет собой кусочно-линейную функцию с разрывом при $\varepsilon = 0$ (рис. 8). Если амплитуда деформации ε_m в волне меньше начального поджатия ε_0 микротрещины или межзеренной границы, то среда является линейной, а при $\varepsilon_m > \varepsilon_0$

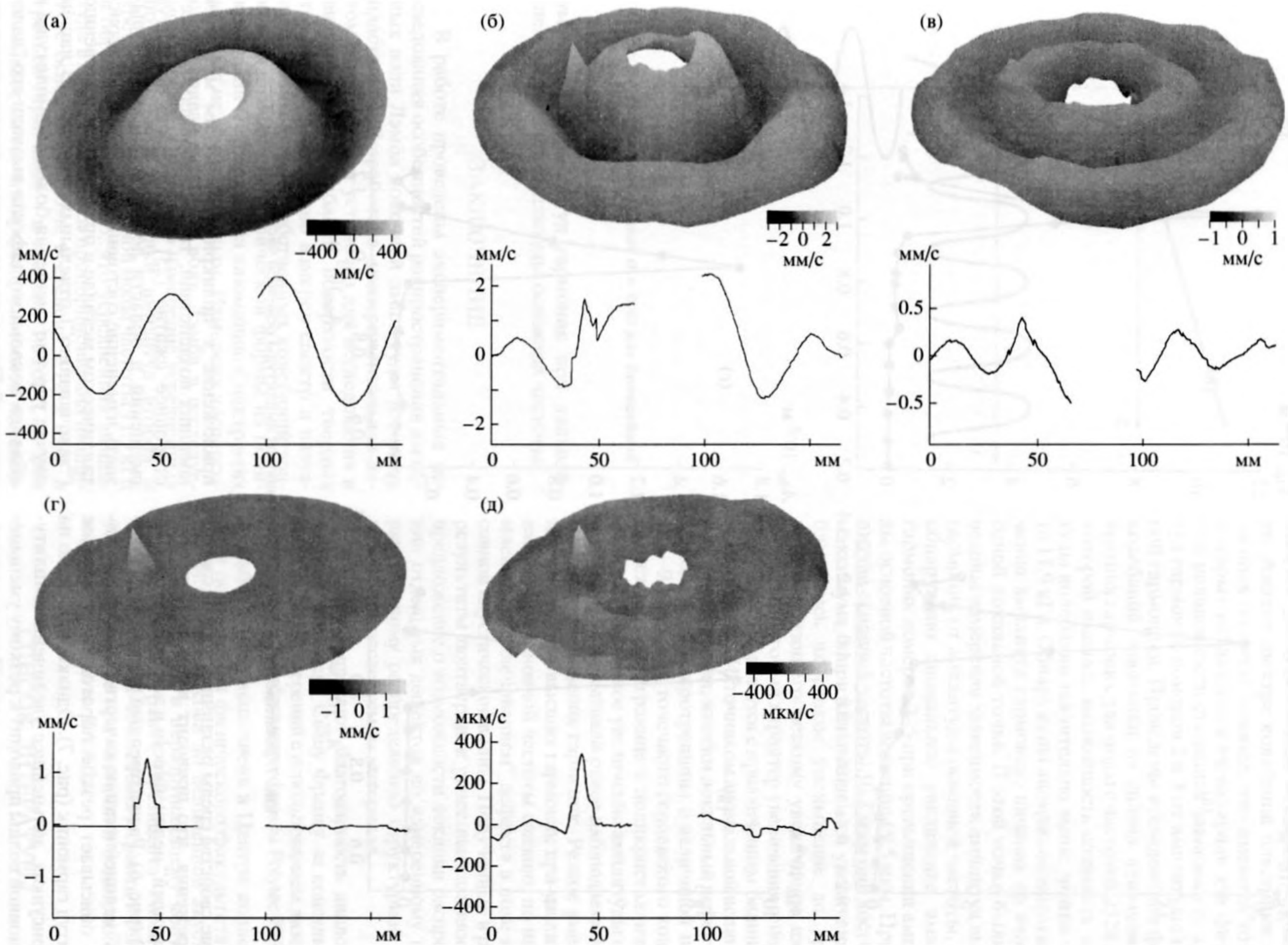

Рис. 6. Формы колебаний пластинки на первых пяти гармониках моды с резонансной частотой 2528 Гц. (Внизу для каждой гармоники изображена амплитуда смещений пластины вдоль диаметра, проходящего через центр дефекта).

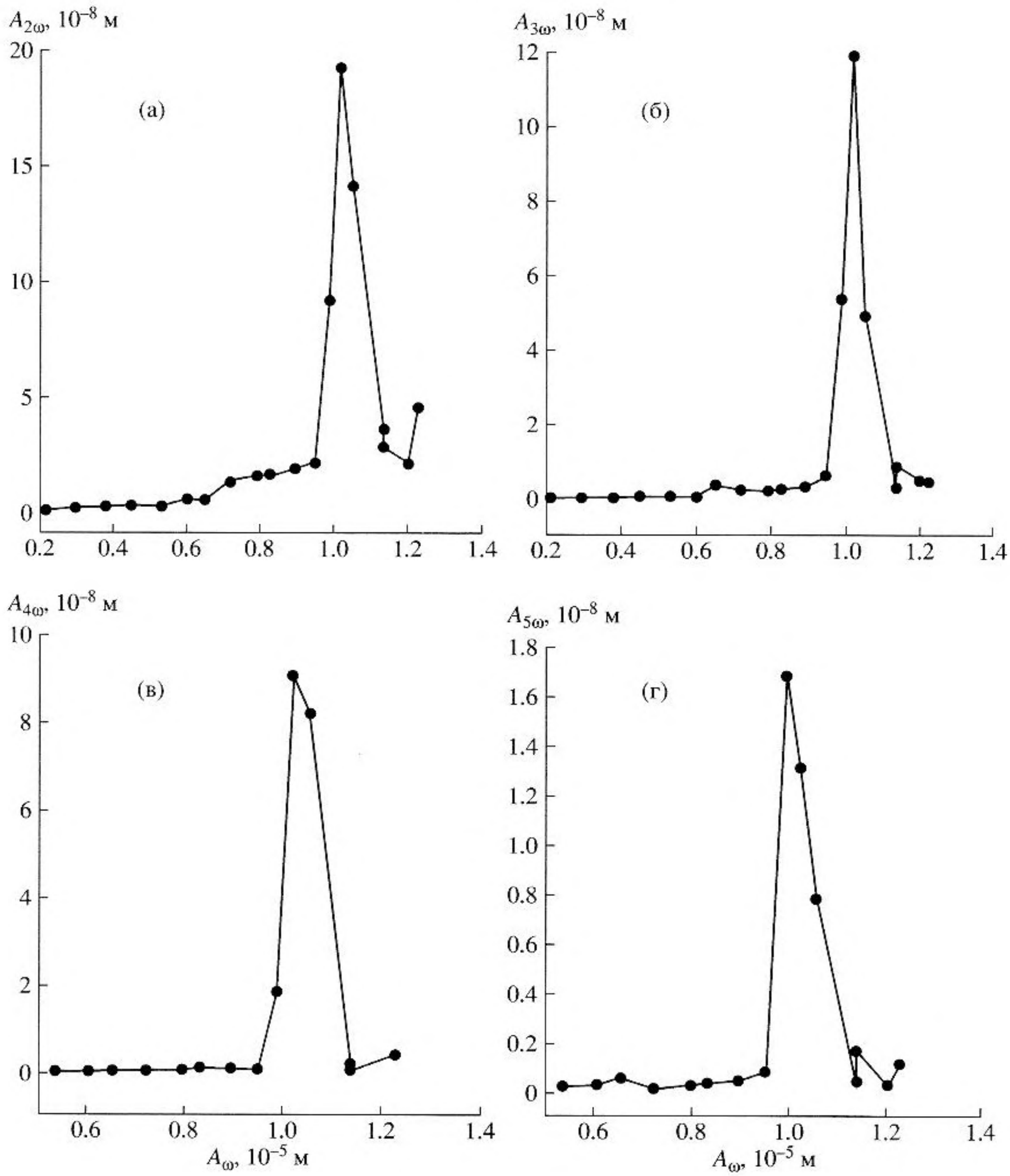

Рис. 7. Зависимости амплитуд 2–5 гармоник от амплитуды основной частоты.

упругие свойства среды различны для фаз сжатия и разрежения, что приводит к так называемой "хлопающей" нелинейности и искажению профиля AB (рис. 6). Рассмотренный механизм "хлопающей" нелинейности на качественном уровне хорошо описывает резкое пороговое увеличение амплитуд гармоник (рис. 7). Однако, как видно на этих рисунках, дальнейшее увеличение амплитуды основной волны приводит к резкому уменьшению амплитуд высших гармоник. По нашему мнению, это связано со следующим. Как известно, приложение к поликристаллическим металлам внешних воздействий, таких, например, как всестороннее сжатие [25] или больших амплитуд смещений в области дефекта [26], может вызвать изменение состояния дефектов в поликристаллическом металле и привести к исчезновению ("залечиванию") отдельных дефектов. В нашем случае упругие смещения большой амплитуды в области локального дефекта вызвали его "залечивание". Это привело к исчезновению источника хлопающей нелинейности и значительному

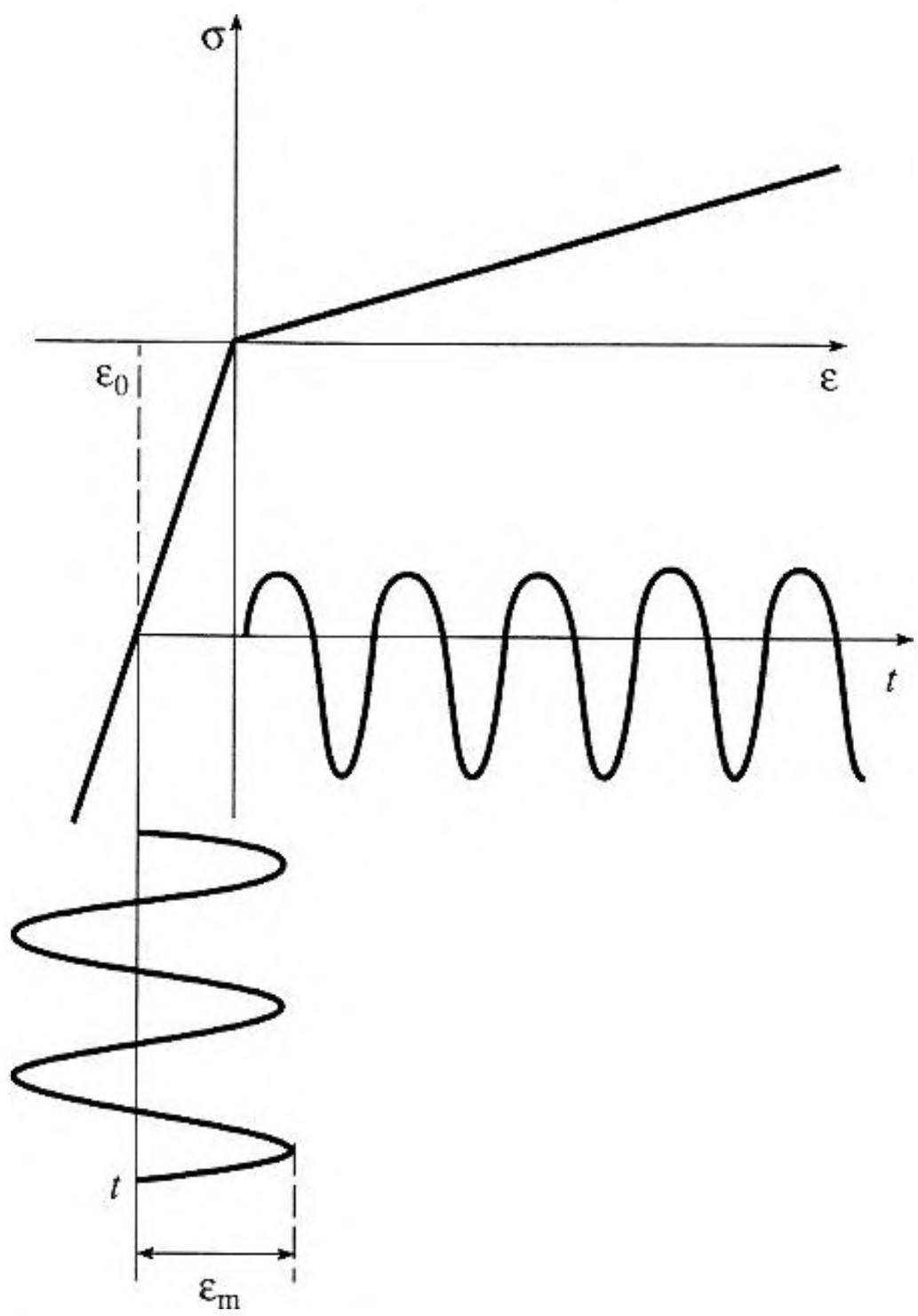

Рис. 8. Нагрузочная кривая $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ для билинейной среды [12].

уменьшению амплитуд гармоник при дальнейшем увеличении амплитуды основной частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены экспериментальные исследования особенностей распространения изгибных волн Лэмба конечной амплитуды в тонких пластинках. Разработана экспериментальная автоматизированная установка для исследования и визуализации колебаний поверхности твердых тел. Экспериментально измерен спектр и визуализированы формы собственных колебаний тонкой пластинки цилиндрической формы из поликристаллического сплава алюминия. Спектр этих мод был неэквидистантным. Измерена дисперсионная кривая изгибных волн Лэмба в исследуемом образце. Проведено измерение усредненных по поверхности пластинки амплитуд второй и третьей гармоник изгибной моды частоты 11.9 кГц в образце. Обнаружено, что усредненная амплитуда второй гармоники пропорциональна амплитуде основной частоты в степени 2.12 ± 0.09, а третьей гармоники – в степени 1.55 ± 0.11. Это указывает на то, что кроме физической нелинейности связанной с ангармонизмом кристаллической решетки, в поликристаллическом сплаве имеется дополнительный механизм нелинейности. Анализ спектра колебаний пластинки в различных областях показал, что имеются точки, в которых наблюдается характерная для физической нелинейности степенная зависимость амплитуд гармоник номеров 2 и 3 от амплитуды основной гармоники. Проведены исследования формы колебаний пластинки из сплава алюминия для высших гармоник для моды с частотой 2528 Гц, на которой имелась возможность создавать амплитуды колебаний значительно выше, чем на частоте 11.9 кГц. Обнаружены аномально высокие значения амплитуд гармоник, начиная со второй в одной локальной точке. В этой точке были проведены измерения зависимости амплитуд высших гармоник от амплитуды основной частоты. Было обнаружено аномальное увеличение амплитуд гармоник номеров 2–5 при превышении амплитуды основной частоты величины 9.5 мкм. При амплитуде основной частоты 10.2 мкм они достигают максимума, и при дальнейшем ее увеличении наблюдалось их резкое уменьшение до уровня, предшествующего резкому увеличению их амплитуд. Пороговый характер увеличения генерации гармоник объясняется с привлечением билинейной модели среды. Источником аномальной нелинейности, на наш взгляд, являлся локальный дефект в виде поджатой микротрещины с величиной поджатия ~9.5 мкм или точечного герцевского контакта на межзеренной границе в поликристаллическом образце. Повторное увеличение амплитуды основной частоты не вызвало ранее наблюдаемого аномального увеличения гармоник. Резкое уменьшение амплитуды высших гармоник при увеличении амплитуды основной частоты связано, по нашему мнению, с "залечиванием" дефекта в поле интенсивной акустической волны. Полученные в работе результаты подтвердили ранее высказанное в [1] предложение о возможности локации распределения отдельных дефектов по измеренному пространственному распределению структурной нелинейности в исследуемом материале.

Авторы выражают благодарность дипломированному инженеру Свену Франку за консультации по методике измерений с использованием лазерного сканирующего виброметра фирмы Polytec PSV-300.

Работа была выполнена в Центре коллективного пользования физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова по нелинейной акустической диагностике и неразрушающему контролю при поддержке гранта Президента Российской Федерации № НШ-1575.2003.2 и гранта РФФИ 05-02-16327, а также при частичной поддержке Германского общества ДААД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Руденко О.В.* Нелинейные методы в акустической диагностике // Дефектоскопия. 1993. № 8. С. 24–32.

2. *Гедройц А.А., Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Сдвиговые волны конечной амплитуды в поли- и монокристаллах металлов // Докл. АН СССР, 1963. Т. 150. С. 515–518.
3. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела, М.: Мир, 1972. С. 307.
4. *Ермилин К.К., Зарембо Л.К., Красильников В.А., Мезинцев Е.Д., Прохоров В.М., Хилков К.В.* Изменение второй гармоники сдвиговой ультразвуковой волны при усталостном динамическом нагружении металлов // ФММ. 1973. Т. 36. № 3. С. 640–641.
5. *Коробов А.И., Мехедов Д.М.* Влияние статической деформации на нелинейные упругие свойства дюралюминия. Сб. трудов XIII сессии РАО Москва, 2003. Т. 1. С. 72–76.
6. *Коротков А.С., Славинский М.М., Сутин А.М.* Изменения нелинейного акустического параметра стали при накоплении дефектов // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 84–87.
7. *Назаров В.Е.* Нелинейные акустические эффекты в отожженной меди // Акустический журнал. 1991. Т. 37. Вып. 1. С. 150–156.
8. *Guyer R., Johnston P.A.* Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials, Physics Today, 1999. P. 30–36.
9. *Есипов И.Б.* Исследование протекания нефти в гранулированной среде методом нелинейной акустической резонансной спектроскопии. Сборник трудов семинара научной школы профессора С.А. Рыбака. Москва, 2001. С. 45–50.
10. *Коробов А.И., Экономов А.Н.* Влияние изменения дефектной структуры в поликристаллической меди на ее упругие свойства // Физика металлов и металловедение. 2005. Т. 99. № 5. С. 104–112.
11. *Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Ван Нин.* Экспериментальные исследования упругой нелинейности в структурно-неоднородных материалах // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 5. С. 689–697.
12. *Krohn N., Pfleiderer K., Stoessel R., Solodov I., Busse G.,* Nonlinear acoustic imaging: fundamentals, methodology, and NDE-applications. Nonlinear Acoustic Imaging: Fundamentals, Methodology and NDE-Applications. In: Arnold W. and Hirsekorn S. (Eds.): Acoustical Imaging, Vol. 27, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Dordrecht & New York, 2004. P. 91–98.
13. *Викторов И.А.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. С. 78–96, 145–153.
14. *Mallet L., Lee B.C., Staszewski W.J., Scarpa F.* Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing. Smart Mater. Stuct. 13 (2004). P. 2512–60.
15. *Mallet L., Lee B.C., Staszewski W.J., Scarpa F.* Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: II. Lamb waves for damage detection. Smart Mater. Stuct. 13 (2004). P. 261–269.
16. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1987. С. 124–128, 138–141.
17. *Гонткевич В.С.* Собственные колебания пластинок и оболочек. Киев: Наукова думка, 1964. С. 5–9, 45.
18. Физическая акустика. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Под ред. У. Мэзона, М: Мир, 1966. Т. 1. Ч. А. С. 140–161.
19. Физические величины. Справочник. Энергоатомиздат, 1991. С. 1232.
20. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. С. 549.
21. *Кайбашев О.А., Валиев Р.З.* Границы зерен и свойства металлов. М.: Металлургия, 1987. С. 213.
22. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. С. 272.
23. *Беляева И.Ю., Зайцев В.Ю.* О предельном значении параметра упругой нелинейности структурно неоднородных сред // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 731–737.
24. *Ballad E.M., Korshak B.A., Solodov I.Yu., Krohn N., Busse G.* Local Nonlinear and Parametric Effects for Non-Bonded Contacts in Solids. Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century edited by O.V. Rudenko and O.A. Sapozhnikov. Faculty of Physics, MSU, Moscow, 2002. V. 2. P. 727–734.
25. *Петров А.И., Разуваева М.В.* Начальная стадия процесса залечивания пор и трещин в поликристаллических металлах в условиях всестороннего сжатия // ФТТ. 2005. Т. 47. № 5. С. 880–885.
26. *Кулемин А.В.* Ультразвук и диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. С. 98–106.

Nonlinear Lamb Waves in a Metal Plate with Defects

A. I. Korobov and M. Yu. Izosimova

Faculty of Physics, Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, 119992 Russia
e-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

Abstract—Experimental results on the propagation of finite-amplitude Lamb waves in a solid plate made of polycrystalline aluminum alloy with defects are presented. The Lamb waves are recorded and visualized using a scanning laser vibrometer. The dependences of the higher harmonic amplitudes, both averaged over the plate surface and measured at a point far from the defect and at the site of the defect, on the fundamental frequency amplitude are studied. A threshold character of the higher harmonic generation and a power-law behavior of their amplitudes are revealed, the latter feature being unconventional for the nonlinearity associated with the anharmonicity of the crystal lattice of the material. The possibility of locating the distribution of individual defects from the measured spatial distribution of structural nonlinearity in the material under study is experimentally demonstrated. The results of the experiments are explained in terms of the bilinear medium model.