

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.222

© 1991 г.

И.Ю. Беляева, Е.М. Тиманин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ПОРОСОДЕРЖАЩИХ УПРУГИХ СРЕД

Одно из новых и, на наш взгляд, весьма интересных как с физической, так и с практической точек зрения направлений нелинейной акустики связано с изучением сред с аномально высокой нелинейностью, обусловленной обычно той или иной их структурной неоднородностью.

Наиболее изученная среда такого рода – жидкость с пузырьками газа. Однако, как показано в [1, 2], высокой нелинейностью могут обладать также твердые или резиноподобные материалы с соответствующей структурой.

В работах [2, 3] проведено теоретическое исследование нелинейных свойств резиноподобных (т.е. удовлетворяющих условию $\mu \ll \lambda$, где λ, μ – параметры Ламе) сред со сферическими и цилиндрическими порами. Показано, что эффективный параметр нелинейности таких сред определяется выражением $g = g_2 / (1 + g_1)^2$, где $g_1 = 3\lambda / 4\mu V_0$, $g_2 = 27/64 (\lambda/\mu)^2 V_0$ (где V_0 – относительная концентрация полостей) для среды со сферическими порами и $g_1 = \lambda/\mu V_0$, $g_2 = 3/2 (\lambda/\mu)^2 V_0$ для среды, содержащей цилиндрические поры. Максимальное значение нелинейного параметра g_{\max} в среде со сферическими порами достигается при оптимальной относительной концентрации $V_{0\text{opt}} = 4\mu/3\lambda$ и равно $g_{\max} = 11\lambda/64\mu$, а для среды с цилиндрическими порами $g_{\max} = 3\lambda/8\mu$ достигается при $V_{0\text{opt}} = \mu/\lambda$. Таким образом, даже при малой объемной концентрации полостей такие среды могут обладать аномально высокой нелинейностью.

Для экспериментальных исследований нами был использован пластизол – материал, в котором $\lambda = 2,55 \cdot 10^9$ Н/м², $\mu = 1,21 \cdot 10^4$ Н/м², т.е. $\lambda/\mu = 2 \cdot 10^5$. Измерения параметра нелинейности образцов из этого материала осуществлялись методом анализа нелинейных искажений, возникающих в образце под действием гармонической силы, приложенной к его нижнему концу (рис. 1).

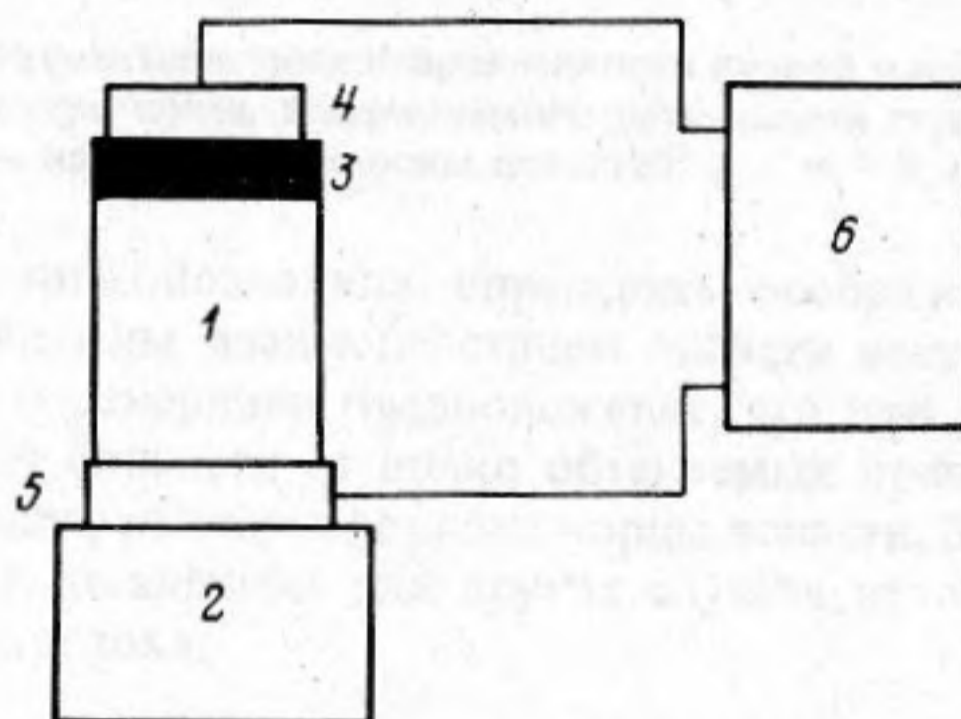


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Для этого стакан с исследуемым образцом пластизоля 1 закреплялся на подвижной платформе вибростенда 2. Сверху на образец ставился груз 3, ускорение которого регистрировалось акселерометром 4. Колебания платформы контролировались нижним акселерометром 5.

Сигнал с верхнего и нижнего акселерометров выводился на двухканальный анализатор 6, с которого снималась требуемая информация.

Выражение для параметра нелинейности образца, записанное через данные эксперимента, имеет вид

$$g = \frac{\Omega^4}{\omega_0^2} l \frac{a_{2\Omega}}{a_{\Omega}^2}, \quad (1)$$

где Ω — частота возбуждения, ω_0 — резонансная частота системы "груз — упругая нелинейность", l — длина образца, a_{Ω} — амплитуда ускорения верхнего конца образца на основной частоте, $a_{2\Omega}$ — амплитуда второй гармоники ускорения. В ходе эксперимента был исследован ряд образцов с различной концентрацией как сферических, так и цилиндрических пор. Радиусы создаваемых пор лежали в интервале 20–50 мкм (их резонансные частоты 18–70 кГц): поскольку рабочая частота $\Omega = 3$ кГц, то для пор выполнено условие квазистатичности. Кроме того, распределение напряжений вдоль образца можно было считать однородным (длина продольной волны в материале $\lambda \approx 80$ см, тогда как длина образца $l = 2$ см).

На рис. 2, а, б представлены зависимости амплитуды второй гармоники ускорения от амплитуды ускорения на частоте возбуждения. Результаты расчета параметра нелинейности образцов, проведенного в соответствии с (1), вместе с экспериментальными данными сведены в табл. 1, 2. Видно, что теория и эксперимент находятся в хорошем количественном соответствии.

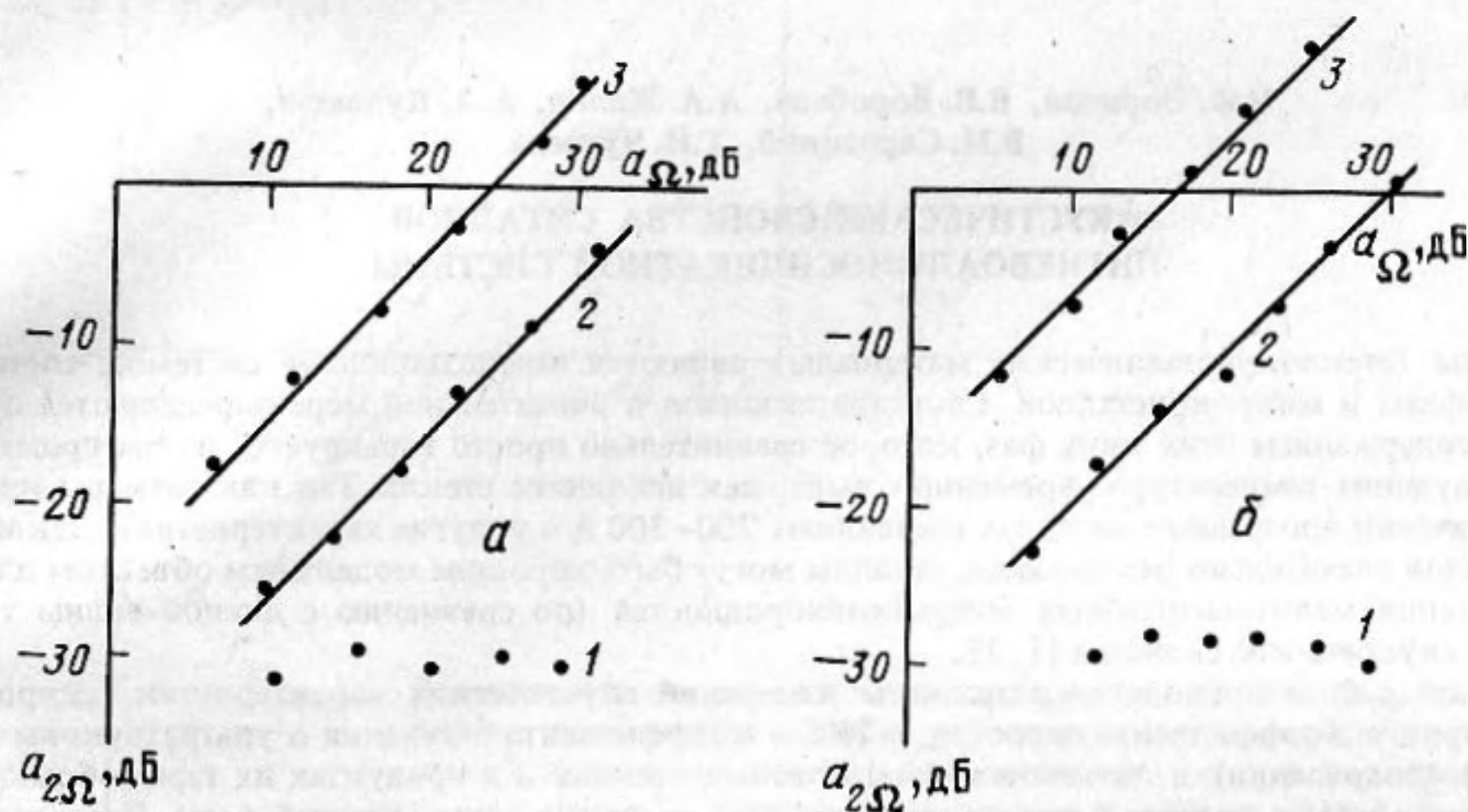


Рис. 2. Зависимость амплитуды ускорения верхнего конца образца на частоте второй гармоники $a_{2\Omega}$ от амплитуды ускорения на основной частоте a_{Ω} . Прямые линии соответствуют квадратичной зависимости; а — образцы со сферическими порами: 1 — образец без пор, 2 — $V_0 = 400 V_{opt}$; 3 — $V_0 = 150 V_{opt}$; $V_{opt} = 6,6 \cdot 10^{-6}$; б — образцы с цилиндрическими порами: 1 — образец без пор, 2 — $V_0 = 100 V_{opt}$; 3 — $V_0 = 10 V_{opt}$; $V_{opt} = 5 \cdot 10^{-6}$

Таблица 1

Параметры нелинейности образцов со сферическими порами

V_0	$150 V_{opt}$	$400 V_{opt}$
$g_{теор}$	$9 \cdot 10^2$	$3,6 \cdot 10^2$
$g_{эксп}$	$1,1 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^2$

Таблица 2

Параметры нелинейности образцов с цилиндрическими порами

V_0	10	$100 V_{opt}$
$g_{теор}$	$2,7 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^3$
$g_{эксп}$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^3$

На наш взгляд, приведенные здесь данные позволяют говорить о создании материала с достаточно стабильными свойствами, параметр нелинейности которого превышает $10^3 - 10^4$.

Авторы выражают благодарность Л.А. Островскому за интерес к работе и обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В.Е., Островский Л.А., Соустова И.А., Сутин А.М. Исследование аномальной акустической нелинейности в металлах // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 3. С. 491–499.
2. Островский Л.А. К нелинейной акустике слабосжимаемых пористых сред // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 5. С. 908–913.
3. Островский Л.А. Нелинейные свойства упругой среды с цилиндрическими полостями // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 3. С. 490–494.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
22.01.91

УДК 534.8

© 1991 г.

Б.Ф. Борисов, В.В. Воробьев, А.А. Жилин, А.А. Кулешов,
В.М. Сарнацкий, Т.И. Чуваева

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИТАЛЛОВ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СИСТЕМЫ

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) являются композиционной системой, состоящей из стеклофазы и микрокристаллов. Свойства ситаллов в значительной мере определяются относительным содержанием этих двух фаз, которое сравнительно просто варьируется путем применения соответствующих температурно-временных выдержек исходного стекла. Так как размеры кристаллов в оптически прозрачных ситаллах составляют 200–300 Å и упругие характеристики стеклофазы и кристаллов значительно различаются, ситаллы могут быть хорошим модельным объектом для изучения влияния мелкомасштабных микронеоднородностей (по сравнению с длиной волны ультразвука) на акустические свойства [1, 2].

В данной работе приводятся результаты измерений акустических характеристик (скорости v , температурного коэффициента скорости – ТКС и коэффициента затухания α ультразвуковых волн различной поляризации) в литиевоалюмосиликатных стеклах и в продуктах их термообработки – ситаллах трех марок по мере возрастания в них содержания кристаллической фазы. Исследовались два литиевоалюмосиликатных стекла составов № 1, 2 несколько различающихся относительным содержанием основных компонент, а также стекло состава № 3, в которое дополнительно введен оксид фосфора. При термообработке данных стекол в интервале температур 700–800 °С выделяются гексагональные кристаллы твердых растворов, изоструктурные β -кварцу и β -эвкрипиту [3]. Относительная степень закристаллизованности N термообработанных образцов оценивалась по значениям плотности, измеренной относительно образцов ситалла, в котором при длительном прогреве при температуре 800 °С сохранялось постоянное содержание кристаллической фазы.

Скорость продольных v_{\parallel} и сдвиговых v_{\perp} волн и ТКС измерялись на частоте 10 МГц импульсно-фазовым методом [4] с чувствительностью к относительным изменениям скорости ультразвука 10^{-4} . Область изменения температуры при измерениях ТКС составляла $-30 \div +50$ °С. Затухание α измерялось в диапазоне частот 100–500 МГц методом брэгговской дифракции света на ультразвуке. На рисунке для иллюстрации показано поведение скорости и ТКС продольных ультразвуковых волн в ситаллах в зависимости от величины N . Увеличение степени закристаллизованности ситаллов сопровождается: монотонным ростом скорости продольных и сдвиговых волн; изменением знака ТКС продольных волн с отрицательного на положительный с прохождением через нулевое значение ТКС; сохранением отрицательного знака ТКС для сдвиговых волн во всем диапазоне изменения величины N .

Необычные термоупругие свойства ситаллов, и в частности положительный знак ТКС для продольной волны, можно объяснить на основе простой модели, рассматривающей ситаллы, состоящими из стеклофазы и микронеоднородностей, размеры которых много меньше длины волны ультразвука. Наличие микрокристаллов с иным коэффициентом термического расширения, чем у остаточной стеклофазы, должно приводить к возникновению локальных микронапряжений на границе раздела фаз, и эффективный модуль упругости такой среды состоит из трех частей – соответствующих модулей для однородных фаз двухфазной системы и слагаемого, связанного с локальными напряжениями. При увеличении температуры материала поведение скорости звука зависит от относительного вклада двух процессов – обычного спада, присущего изотропной среде, и роста скорости из-за уменьшения локальных напряжений на границе раздела двух фаз в связи с аномальной зависимостью