

10;15

## **Дистанционная диагностика резиноподобных материалов методами нелинейной акустики**

© А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова, К.А. Ненарокомов, Н.И. Одина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: aikor42@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 ноября 2016 г.

Предложен прототип нового дефектоскопа для дистанционной бесконтактной диагностики резиноподобных материалов. Принцип действия дефектоскопа основан на особенностях нелинейного взаимодействия двух ультразвуковых волн в исследуемом материале с дефектами. Ультразвуковые волны в тестируемом материале возбуждаются дистанционно с помощью сфокусированных в воздухе ультразвуковых пучков. Экспериментально показана возможность с помощью предлагаемого дефектоскопа дистанционного обнаружения и локализации подповерхностных дефектов с размерами, значительно меньшими длины волны зондирующего ультразвука.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44951.16582

Ряд полимеров, например таких, как силиконовые эластомеры, полиуретаны, резины, а также биологические ткани, в настоящее время относят к классу так называемых резиноподобных материалов (soft solids). Эти материалы способны выдерживать значительные деформации без нарушения сплошности внутренней структуры. Благодаря этому свойству они нашли широкое применение во многих технических приложениях. При изготовлении и использовании материалов в них возможно появление различных дефектов. Вследствие низкого акустического импеданса резиноподобных материалов применение стандартных методов акустической диагностики затруднительно. Поэтому проблема диагностики таких материалов является актуальной. Один из возможных методов диагностики резиноподобных материалов — применение сфокусированных ультразвуковых пучков в воздухе с использованием особенностей нелинейного отклика дефектной среды на ультразвуковую волну конечной амплитуды.

В работе приведено описание экспериментальной установки и методики для бесконтактной диагностики структурных дефектов в резиноподобных материалах методами нелинейной акустики. Принцип работы установки основан на особенностях нелинейного взаимодействия ультразвуковых волн в диагностируемом материале с дефектами [1–3]. При взаимодействии в нелинейной упругой среде двух ультразвуковых волн конечной амплитуды с частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и амплитудами  $U(\omega_1)$ ,  $U(\omega_2)$  соответственно на комбинационных частотах  $(\omega_1 \pm \omega_2)$  возникает упругая волна, амплитуда которой определяется выражением [1]

$$U(\omega_1 \pm \omega_2) = \frac{\Gamma L}{4c^2} (\omega_1 \pm \omega_2)^2 [U(\omega_1)U(\omega_2)], \quad (1)$$

где  $c$  — скорость звука в среде,  $\Gamma$  — нелинейный акустический параметр, характеризующий нелинейные упругие свойства среды,  $L$  — характерная длина области взаимодействия. Из (1) следует, что при постоянных значениях амплитуд акустических волн  $U(\omega_1)$  и  $U(\omega_2)$  величина сигнала на комбинационных частотах  $U(\omega_1 \pm \omega_2)$  зависит от величины параметра  $\Gamma$ , длины  $L$  и пропорциональна квадрату комбинационных частот  $(\omega_1 \pm \omega_2)^2$  ультразвуковых волн. Параметр  $\Gamma$  в среде с дефектами зависит не только от классической упругой нелинейности материала, связанной с ангармонизмом межмолекулярного взаимодействия, но и от структурной упругой нелинейности. Упругая структурная нелинейность возникает в материале с дефектами вследствие градиента упругих свойств на границе дефектов. Структурная нелинейность является локальной и в области дефекта может на несколько порядков превышать по величине классическую нелинейность в исследуемом образце [2,3]. Это свойство неклассической нелинейности позволяет определить пространственное распределение локальных дефектов в диагностируемом объекте при измерении величины амплитуды нелинейного упругого отклика от дефекта на комбинационной частоте при сканировании образца ультразвуковыми пучками [3]. В этом заключается принципиальное отличие предлагаемого метода от работы акустического микроскопа [4] и стандартных ультразвуковых дефектоскопов. В этих приборах регистрируется акустический сигнал, отраженный от дефекта. Поэтому современные акустические дефектоскопы, работающие в линейном режиме, принципиально не могут регистрировать дефекты с размерами меньше длины волны зондирующего акустического сигнала.

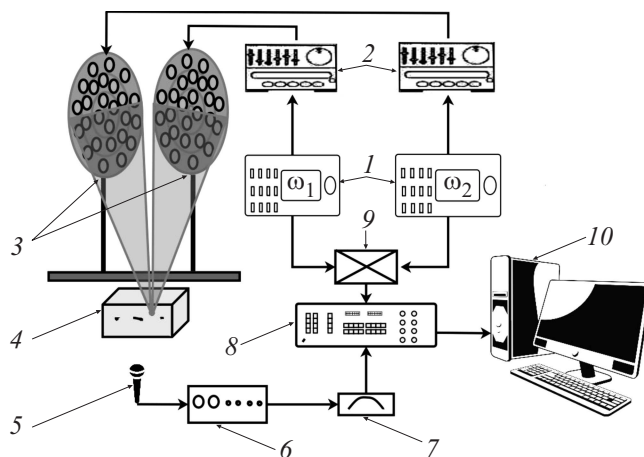
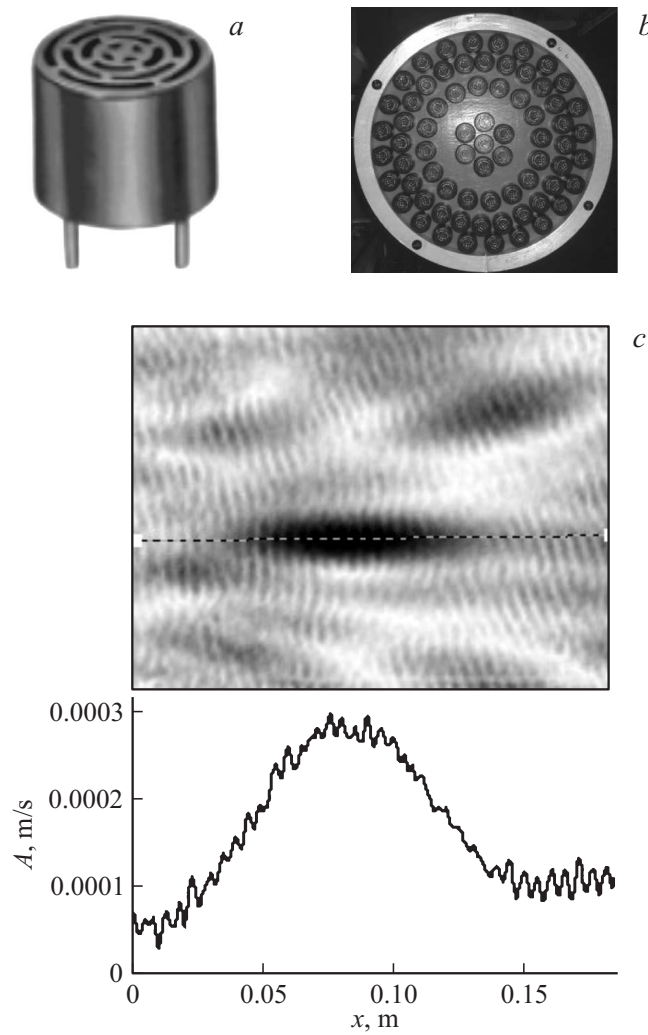


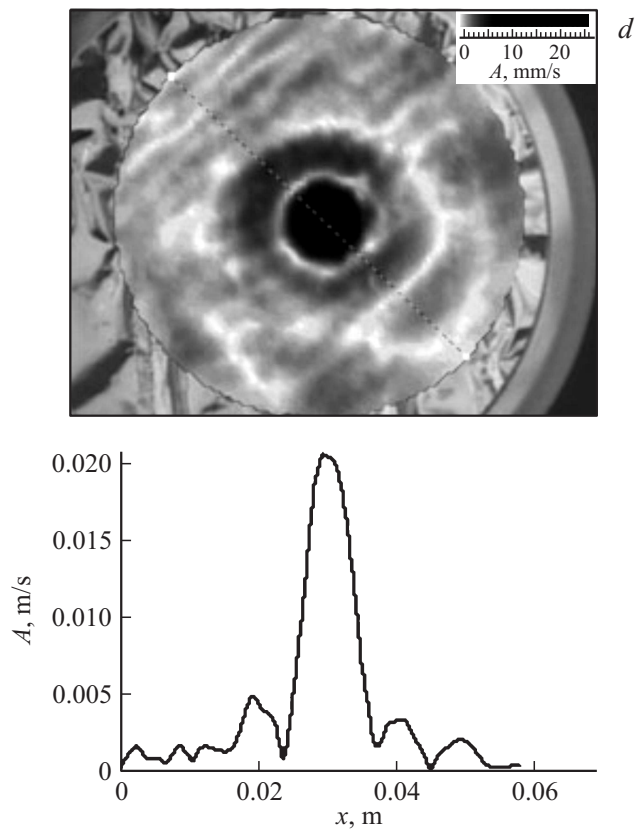
Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

Рабочие частоты современных дефектоскопов не превышают 5–10 МГц. Разрешение такого дефектоскопа не превышает 0.5–1 мм.

Блок-схема экспериментальной установки для бесконтактной дистанционной диагностики материалов приведена на рис. 1. Для создания в воздухе ультразвуковых пучков большой амплитуды были разработаны и изготовлены две ультразвуковые фазированные фокусирующие антенны с резонансными частотами  $39.0 \pm 0.5$  kHz. Для изготовления фазированных антенн были использованы дискретные источники излучения ультразвуковых волн MA40B8S японской фирмы Murata с резонансными частотами  $39.0 \pm 0.5$  kHz (рис. 2, *a, b*). Каждая антенна состоит из 60 дискретных источников, расположенных в четырех зонах Френеля по концентрическим окружностям с радиусами, соответствующими зонам Френеля. По методике, приведенной в [5], с помощью сканирующего доплеровского лазерного виброметра PSV-300 фирмы Polytec были измерены диаграмма направленности (рис. 2, *c*) и распределение колебательной скорости ультразвуковой волны в фокальной области антенн (рис. 2, *d*). Проведенные измерения и расчеты показали, что поперечный размер перетяжки в фокальной области антенны на уровне 0.5 составляет 16.3 мм, ее продольный размер 135 мм, а мак-



**Рис. 2.** *a* — излучатель Murata MA40B8S, *b* — фазированная антенна, *c* — диаграмма направленности фазированной антенны в фокальной области, *d* — распределение колебательной скорости в фокальной плоскости антенны.



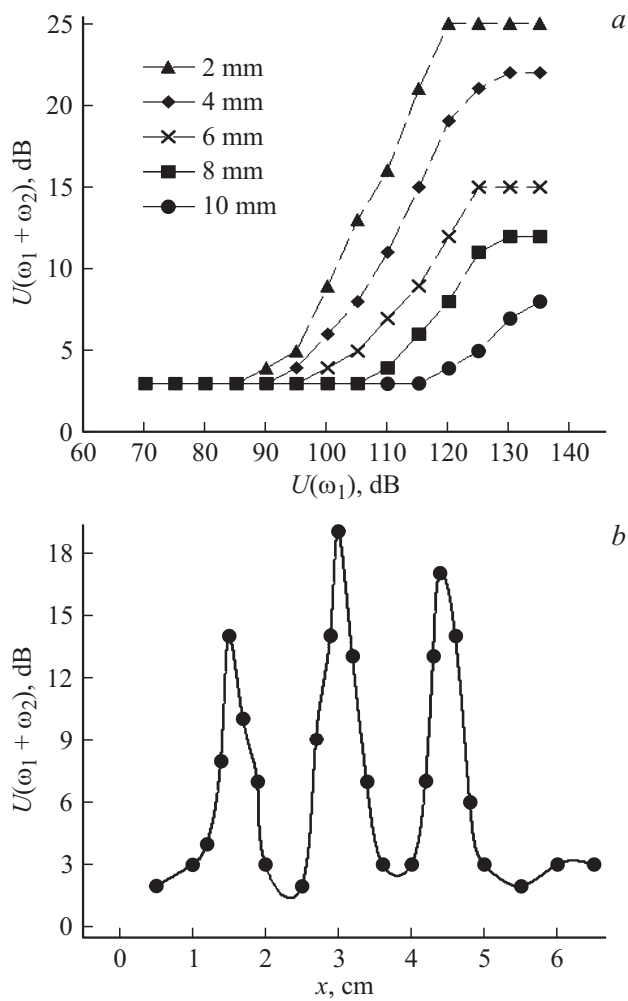
**Рис. 2** (продолжение).

симальное давление в фокусе  $F$  ( $F = 308$  mm), создаваемое антенной, составляло  $\sim 150$  dB. Изменяя величину напряжения, подаваемого на излучатели антенны, можно менять величину давления, создаваемого антеннами.

Экспериментальная установка (рис. 1) работает следующим образом. На излучатели в четных зонах Френеля подавалось переменное напряжение в противофазе относительно напряжения, подаваемого на преобразователи в нечетных зонах Френеля. На одну из антенн

подавался сигнал с частотой  $\omega_1 = 39.5 \text{ kHz}$ , на другую с частотой  $\omega_2 = 38.5 \text{ kHz}$  с отдельных генераторов (1), сигнал предварительно усиливался усилителями мощности (2). Антенны-излучатели (3) были установлены на оптической скамье. Ультразвуковые пучки, излучаемые антеннами, возбуждали в образце (4) продольные ультразвуковые волны на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . В результате нелинейного взаимодействия этих волн в образце происходила генерация упругих волн на нескольких частотах: на частотах зондирующих сигналов  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , на их гармониках  $2\omega_1$ ,  $2\omega_2$ , на суммарной ( $\omega_1 + \omega_2 \approx 80 \text{ kHz}$ ) и разностной ( $\omega_1 - \omega_2 = 1 \text{ kHz}$ ) частотах, а также на высших комбинационных частотах. При диагностике в установке использовался сигнал на суммарной частоте ( $\omega_1 + \omega_2 \approx 80 \text{ kHz}$ ). Применение двух зондирующих пучков вместо одного позволяет отстроиться от сигналов комбинационных частот зондирующих сигналов, генерируемых в воздухе. Нелинейный отклик с образца регистрировался конденсаторным микрофоном (5) с полосой регистрации ультразвуковых волн в диапазоне  $0.01\text{--}100 \text{ kHz}$ , усиливался в предусилителе (6) и через полосовой фильтр (7) подавался на вход синхронного усилителя-преобразователя УПИ-2 (8). В усилителе осуществлялись частотная селекция, синхронное детектирование и усиление сигнала. Частота регистрируемого сигнала в усилителе УПИ-2 определялась опорным сигналом, подаваемым на соответствующий вход усилителя. Опорный сигнал на частоте ( $\omega_1 + \omega_2$ ) генерировался в перемножителе сигналов (9). Сигналы  $A$  и  $B$  с двух квадратурных каналов усилителя УПИ-2 подавались на 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) L-305 (фирмы L-Card), помещенный в слот персонального компьютера (10). Анализ сигналов после их дискретизации в АЦП проводился на компьютере с помощью специально разработанной программы. Амплитуда нелинейного отклика образца  $U(\omega_1 + \omega_2)$  рассчитывалась по формуле  $U = \sqrt{A^2 + B^2}$ . Пространственное распределение нелинейного параметра определялось путем измерения амплитуды нелинейного отклика в зависимости от координаты области сканирования образца ультразвуковыми пучками. Локальное увеличение нелинейного отклика указывало на наличие дефекта в области сканирования.

Экспериментальный образец в форме параллелепипеда размером  $70 \times 50 \times 25 \text{ mm}$  был изготовлен из полимерного материала — пластисола (на основе силикона N 2132 LP фирмы M-F Manufacturing Company, USA). Упругие свойства этого материала близки к упругим



**Рис. 3.** Зависимость нелинейного отклика на суммарной частоте ( $\omega_1 + \omega_2$ ) от дефекта в виде воздушной полости при различных глубинах ее залегания от величины зондирующего сигнала (а) и зависимость нелинейного отклика на суммарной частоте ( $\omega_1 + \omega_2$ ) от координаты в образце при его сканировании ультразвуковыми пучками (б).

свойствам биологических тканей. Поэтому пластисол часто используется в экспериментах для моделирования биологических тканей. В образце на глубине 5 mm с шагом 15 mm были расположены следующие подповерхностные локальные неоднородности (дефекты): зерно пшеницы диаметром 1.5 mm, внутренний разрез, имитирующий трещину шириной 5 mm, и зерно гречки размером 3 mm. Размеры дефектов были значительно меньше длины волны зондирующего ультразвука в воздухе ( $\lambda = 38$  mm). Неоднородности для удобства проведения эксперимента были расположены в образце на прямой линии. Предварительно была измерена зависимость амплитуды нелинейного отклика от искусственно созданной в образце локальной неоднородности (пузырька воздуха диаметром 2–3 mm) с известными координатами, которая помещалась на различной глубине от поверхности образца. Нелинейный отклик уверенно регистрировался от неоднородности, расположенной на глубине 10 mm, и имел пороговый характер (рис. 3, *a*). При проведении экспериментов давление, создаваемое антенной, не превышало 140 dB. Такое давление создает на расстоянии 50 m взлетающий реактивный самолет. Интенсивность акустической волны в воздухе при давлении 140 dB равна  $I \approx 1.1 \cdot 10^{-2}$  W/cm<sup>2</sup>.

Для обнаружения дефектов в тестируемом образце было проведено его сканирование сфокусированными ультразвуковыми пучками вдоль линии, проходящей через искусственно созданные дефекты. Сканирование осуществлялось при линейном перемещении образца относительно области фокусировки антенн с помощью столика с микрометрической подачей. Диагностируемый образец находился от антенн на фокусном расстоянии  $F = 308$  mm. Нелинейный отклик от областей, где были расположены дефекты, превышал фоновый сигнал на 12–16 dB (рис. 3, *b*). Как следует из рис. 3, *b*, в диагностируемом образце бесконтактным методом были обнаружены подповерхностные дефекты, размеры которых были значительно меньше длины волны  $\lambda = 38$  mm зондирующего ультразвука, а также определены их координаты.

Таким образом, разработан прототип нового ультразвукового дефектоскопа, принцип действия которого основан на методах нелинейной акустики. Проведенные экспериментальные испытания показали, что предлагаемый дефектоскоп позволяет дистанционно диагностировать подповерхностные дефекты в резиноподобном материале с характерными размерами, значительно меньшими длины волны зондирующего ультразвука.



Для повышения разрешающей способности предлагаемого дефектоскопа можно использовать фокусирующие ультразвуковые преобразователи в воздухе, работающие в мегагерцевом диапазоне частот. Такие преобразователи с рабочими частотами в интервале (0.3–2) МГц и фокусным расстоянием 30–70 мм изготавливает, например, фирма Ultrangroup ([www.ultrangroup.com](http://www.ultrangroup.com)). Применение высокочастотных преобразователей значительно повысит разрешающую способность предлагаемого дефектоскопа и позволит регистрировать дефекты субмиллиметровых размеров. Кроме того, согласно формуле (1), нелинейный отклик от дефекта пропорционален квадрату комбинационных частот зондирующего сигнала. Применение высокочастотных преобразователей позволит значительно уменьшить давление, создаваемое зондирующим сигналом в резиноподобном материале при его диагностике.

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

## Список литературы

- [1] Руденко О.В. // Дефектоскопия. 1993. № 8. С. 24–32.
- [2] Руденко О.В. // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
- [3] Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Руденко О.В. // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 2. С. 153–159.
- [4] Тутов С.А., Маев Р.Г. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 9. С. 8–15.
- [5] Solodov I., Doring D., Busse G. // Proc. of 18th ISNA. Am. Inst. of Physics, 2008. P. 573–576.