термоупругого акустического сигнала. Повышение плотности энергии облучения приводит к дальнейшему изменению агрегатного состояния поверхностных слоев образца и их испарению, что вызывает еще большее уменьшение параметра генерации термоупругого импульса за счет выноса части поглощенной энергии и, возможно, экранировки энергии облучения парами испаряющегося вещества. Микроскопия облученной МРИ поверхности образца подтверждает факт испарения.

Таким образом, нами экспериментально показано, что эффективность генерации термоупругих акустических импульсов выше при облучении твердых тел сильноточными пучками электронов с энергией частиц в сотни килоэлектронвольт, чем при воздействии МРИ. При определенных для данного вещества критических значениях поверхностной плотности энергии облучения МРИ эффективность генерации реактивного акустического сигнала выше, чем термоупругого. Для конкретного материала ЭД-20 параметры генерации термоупругого сигнала при названных выше типах облучения различаются в 2,5 и более раз, причем это различие обусловлено изменением агредатного состояния вещества образца. Генерация реактивного акустического импульса в ЭД-20 начинается с критической плотности энергии облучения МРИ ≥ 1,0 Дж/см².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Беспалько А. А., Блинов В. И., Геринг Г. И. Роль импульсов упругих напряжений в явлении хрупкого разрушения ионных кристаллов при электронном облучении // ФТТ. 1984. Т. 26. В. 4. С. 1113—1116.
- 2. Аркаев Е. А., Бакшт Р. Б., Беспалько А. А. и др. Акустическая реакция твердых тел при облучении мощными потоками мягкого рентгеновского излучения // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 5. С. 949—951.
- 3. Oswald R. B., McLean F. B., Schallhorn D. R., Buxton L. D. One-Dimensional Thermoelastic Response of Solids to Pulsed Energy Deposition // J. Appl. Phys. 1974. V. 42. № 9. P. 3463—3473.
- 4. Беспалько А. А., Блинов В. И., Геринг Г. И., Савенко О. М. Динамическая тарировка широкополосных датчиков давления // Инж.-физ. журн. 1984. Т. 47. № 1 С. 166—167.

Институт сильноточной электроники СО Российской академии наук Поступило в редакцию 03.02.93

УДК 534.6:620.179.16

© 1993 г. И. И. Крюков

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПЕНОПЛАСТОВ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

Рассмотрены особенности акустического контроля жестких пенопластов по времени распространения ультразвуковых колебаний, связанных со структурной неоднородностью материала, от излучателя к приемнику. Показано, что протяженные дефекты в пенопластах следует считать частично звукопрозрачными. Учет этого фактора позволяет судить как о размере, так и о толщине дефекта.

Структура закрытоячеистых пенопластов типа жестких пенополиуретанов ППУ-3Ф плотностью 60—200 кг/м³ представляет собой комплекс газовых ячеек в твердом полимере и характеризуется значительной неоднородностью параметров [1], оказывающей большое влияние на условия акустического прозвучивания. Так, на пеноблоках ППУ-3Ф плотностью 100 кг/м³ при акустическом контроле на частотах 40—60 кГц скорость ультразвука изменяется в 1,5 раза, а амплитуда ультразвукового сигнала — в 10 раз и более [2]. На рис. 1 представлена микрофотография среднего участка вертикального разреза такого пенополиуретанового блока, полученная с помощью растрового электронного микроскопа. Наблюдаются колебания размеров ячеек в пределах 0,25—0,35 мм. С целью повышения производительности технологического контроля пеноблоков ППУ-3Ф толщиной 5,6 см, шириной 25 см и длиной 600 см применяют механизированную установку с использованием катящихся цилиндрических пьезопреобразователей с эластичными полиуретановыми протекторами [3].

Из-за нарушения технологии вспенивания в пенопластовых блоках нередко встречаются несплошности типа «газовая полость», протяженность которых значительно превышает размер ультразвукового пучка пьезопреобразователей [2]. Эти наиболее опасные дефекты не должны превышать 3—5 см с раскрывом по толщине 0,3—3 см из-за резкого снижения прочностных и теплоизоляционных свойств. В соответствии с [4] подобные несплониюсти целесообразно моделировать дефектами в виде звуконепрозрачной полуплоскости нулевой толщины.

При акустическом контроле пенопластов с помощью амплитудного теневого метода такая модель дает приемлемые результаты [3], несмотря на то, что дефект, заполненный воздухом, хотя и не является при частотах 40—60 кГц полностью звуконепрозрачным, существенно ослабляет ультразвуковой сигнал, проходящий через материал от излучателя к приемнику.

В [5] при дефектоскопии материалов с выраженной структурной неоднородностью рекомендуется проводить акустический контроль с помощью временного теневого метода. Это объясняется тем, что

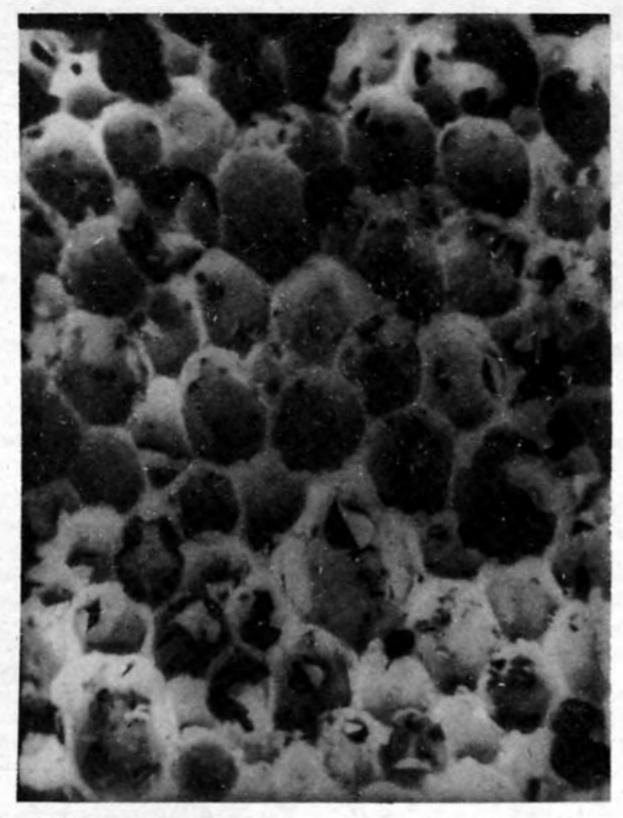


Рис. 1. Растровоэлсктронная микрофотография вертикального среза пенопласта ППУ-3Ф плотностью 100 кг/м³ (увеличение 60)

разброс скорости при контроле пенопластов значительно меньше, чем разброс амплитуды ультразвуковых колебаний. И кроме того, скорость ультразвука в отличие от амплитуды в значительно меньшей степени зависит от качества акустического контакта, на которое оказывают влияние неровность и шероховатость поверхностей пеноблоков, непостоянство толщины изделия, скорость перемещения пеноблоков и др. Из [5] также следует, что чувствительность временного теневого метода повышается с уменьшением толі цины изделия и размеров пьезопреобразователей.

Экспериментальные результаты показали, что при акустическом контроле пенопластов на частотах 40—60 кГц с помощью временного теневого метода необходимо учитывать частичную проходимость ультразвуковых колебаний сквозь дефекты разной толщины.

На рис. 2, a приведена схема акустического тракта при контроле временным теневым методом с учетом конечности размеров преобразователей 2a и толщины h дефекта в виде бесконечной полосы шириной d. На рисунке полоса нулевой толщины обозначается пунктиром.

Видно, что в случае частичной звукопрозрачности дефекта время прохождения t₁ ультразвуковых колебаний от излучателя к приемнику будет определяться тремя возможными путями: двумя дифракционными — за счет огибания дефекта в виде полосы на двух ее краях (левом и правом) — и прямым (наикратчайшим) — сквозь дефект:

$$t_1 = t_{\text{дм} \Phi p \ 1} = t_{l_1} + t_{l_2}, \tag{1}$$

$$t_2 = t_{\text{дифр 2}} = t_{r_1} + t_{r_2}, \tag{2}$$

$$t_3 = t_{\text{npsm}} = t_{H-h} + t_h, \tag{3}$$

где t_{l_1} , t_{r_1} — время дифракционного прохождения ультразвука в материале между ближайшим краем излучателя и соответственно левым или правым краями дефекта; t_{l_2} , t_{r_2} — время дифракционного прохождения ультразвука в материале между левым и соответственно правым краями дефекта и ближайшим краем приемника; t_{H-h} , t_h — время прямого прохождения ультразвука соответственно по пенопласту толщиной (H-h) и дефекту толщиной h; H — толщина изделия; Δ — величина смещения близлежащего края дефекта относительно оси пьезопреобразователей.

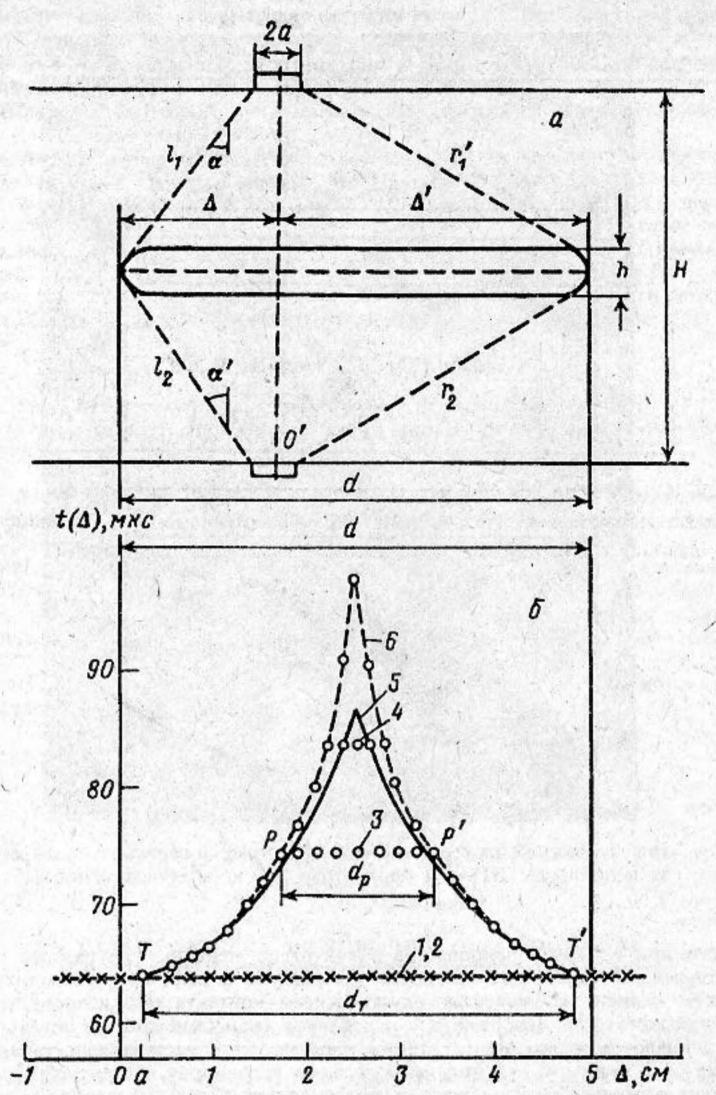


Рис. 2. Схема акустического тракта при контроле временным теневым методом (a) и экспериментальные зависимости времени распространения ультразвука (б), полученные на пеноблоке ППУ-3Ф плотностью 100 кг/м^3 до и после внесения искусственного дефекта в виде протяженной полосы шириной 5 см; толщина дефекта: I - 0 без дефекта; 2 - 0 дефект; 3 - 0.5; 4 - 1.0; 5 - 3вуконепрозрачный дефект нулевой толщины [5]; 6 - 2.0 см

Для каждого значения смещения Δ края дефекта относительно оси преобразователей время прохождения $I(\Delta)$ ультразвука определяется минимальным из значений I_i :

$$t(\Delta) = \min\{t_i\}, i = 1, 2, 3.$$
 (4)

На рис. 2,6 приведены экспериментальные зависимости регистрируемого на приемнике времени прохождения ультразвука $t(\Delta)$, отсчитываемого по приходу переднего фронта ультразвукового импульса. Они получены на пеноблоке ППУ- 3Φ плотностью $100~{\rm kr/m}^3$ толщиной $5,6~{\rm cm}$ с помощью катящихся пьезообразователей с размером пятна контакта в направлении прокатывания 2a до и после внесения дефектов в виде протяженной полосы шириной $d=5~{\rm cm}$ и толщиной $h=0;~0,5;~1,0;~2,0~{\rm cm}$. Дефект для случая наихудшей выявляемости [5] вырезался посередине пеноблока между излучателем и приемником. Ультразвуковые импульсы, регистрируемые с помощью катящихся цилиндрических преобразователей и наблюдаемые на осциллограммах, имеют обычную форму быстро возрастающей, а затем медленно спадающей синусоиды большой протяженности. При дифракционном проходе импульса его амплитуда резко падает. Амплитуда прямого сигнала также невелика. Поэтому для повышения точности определения $t(\Delta)$ применяют предварительные усилители, которые располагаются в корпусах преобразователей. Совпадающие кривые I и 2 на рис. 2,6 соответствуют участку пеноблока без дефекта и после прорезания там дефекта «нулевой» толщины. Кривые 3-5 получены

после увеличения толщины искусственного дефекта до 0,5; 1,0 и 2,0 см. Кроме этого, нанесена кривая 6, построенная в соответствии с [5] для полностью звуконепрозрачного дефекта нулевой толщины при допущении условия постоянства скорости распространения колебаний вдоль разных направлений.

Из рис, 2,6 видно, что на кривых времени прохождения ультразвука появляются явно выраженные горизонтальные полочки (кривые 3 и 4). Как показали несложные расчеты, положение горизонтальных полочек соответствует времени прямого прохождения ультразвука t3 сквозь изделие и воздушный слой дефекта. Чем больше толщина дефекта, тем больше время прохождения ультразвука t3 и тем

выше расположена горизонтальная полочка на кривой $t(\Delta)$.

Для частично звукопрозрачного дефекта в виде полосы относительно большой толщины (кривая 6), а также для звуконепрозрачного дефекта нулевой толщины (кривая 5) кривые $t(\Delta)$ имеют острый максимум, равноудаленный от краев дефекта (если скорость ультразвука по обе стороны дефекта одинакова). Эти кривые симметричны и при перемещении оси преобразователей относительно краев дефекта регистрируемое время определяется временем прохода ультразвука по наименьшему из двух дифракционных путей t_1 и t_2 . Ширина полосы d определяется в соответствии c [5]:

$$d = 2a + H\sqrt{t_{\text{дифp}}^2/t_0^2 - 1}, \tag{5}$$

где t_0 — время прямого прохождения ультразвука на бездефектном участке изделия (в непосредственной близости от полосы слева или справа); $t_{\text{дифр}}$ — максимальное время дифракционного прохождения ультразвука на участке с дефектом, когда $t_1 = t_2 = t_{\text{дифр}}$.

При контроле структурно-неоднородных материалов типа пенополиуретанов в формуле (5) уже нельзя удовлетворяться допущением постоянства скорости c распространения ультразвуковых колебаний вдоль разных направлений относительно оси преобразователей. Необходимо считать, что дифракционное время прохождения $t = f(\alpha, \alpha')$, где α, α' — соответственно углы между осью преобразователей и линией, соединяющей край дефекта с краем излучателя и приемника (см. рис. 2,a). Этим и объясняется, что на рис. 2,b экспериментальная кривая b возрастает резче и имеет соответственно более высокий пик, чем кривая b, построенная для b0 возрастает резче и имеет соответственно более высокий пик, чем кривая b1, построенная для b2, солят. Кроме того, у пенополиуретанов зависимость b3 может быть разной слева и справа от дефекта. Это связано с тем, что при сложном характере вспенивания слегка вытянутые газовые ячейки в пеноблоках (рис. 1) могут быть ориентированы не строго по вертикали, а под некоторым углом a0 к оси.

Для протяженных дефектов больших размеров из-за сильного затухания сигнала обнаружение пика может стать невозможным. Дифракционный сигнал ослабляется настолько, что перестает

регистрироваться на фоне шумов [5].

Возрастание времени прохождения ультразвука от уровня его бездефектного значения to происходит тогда, когда дефект полностью перекрывает зону прозвучивания между излучателем и приемником, ограниченную их контурами. По этой точке перегиба T можно судить о пространственном положении дефекта в виде полосы относительно оси преобразователей. Ширина полосы d определяется в этом случае как:

$$d = 2a + d_T, (6)$$

где d_T — размер между двумя точками T и T', определяемый на рис. 2,6 по кривой $t(\Delta)$. В неоднородных материалах определение точек перегиба бывает затруднено возможными колебаниями времени прохождения ультразвука из-за изменения структуры материала [2, 5] от участка к участку.

Для звукопрозрачного дефекта толщиной 0,5 или 1,0 см кривая $t(\Delta)$ вместо острого пика (кривая 6) имеет горизонтальную полочку (кривые 3 и 4). Регистрируемое время определяется временем прохода ультразвука по наименьшему из трех путей t_1 , t_2 и t_3 . Горизонтальная полочка (срезанная вершина) появляется для всех Δ , для которых $t_3 < t_1$; t_2 . По точке перегиба P (от $t_{\text{дифр}}$ к $t_{\text{прям}}$) можно также судить о ширине дефекта, которая определяется как

$$d = 2a + d_P + H\sqrt{t_{\text{new}}^2/t_0^2 - 1},\tag{7}$$

где d_T — размер горизонтальной полочки между двумя точками P и P', определяемый на рис. 2,6 по кривой $t(\Delta)$. Хотя под знаком радикала в (7) — $t_{\rm прям}$, в (5) — $t_{\rm днфр}$, в (7) надо также учитывать зависимость $t_{\rm прям} = t_{\rm днфр} = f(\alpha, \alpha')$, так как подъем $t(\Delta)$ до $t_{\rm прям}$ определяется $t_{\rm днфр} = f(\alpha, \alpha')$.

В рассмотренных выражениях (5)—(7) ширина дефекта зависит также от размера преобразователей 2a. В [3] размер пятна контакта катящегося цилиндрического пьезопреобразователя (с эластичным полиуретановым протектором) в направлении прокатывания 2a для усиления прижима $F \ge 23$ H определен равным 6 мм. Однако в соответствии с [6] давление, оказываемое таким преобразователем на плоскую поверхность изделия, неравномерно и изменяется от нуля на его краях до максимума в центре. Из-за этого в (5)—(7) под 2a надо понимать не геометрический, а эффективный размер преобразователей, который в зависимости от усилия прижима может быть несколько меньше.

Дефекты с небольшим раскрывом ($h \approx 0$) при акустическом контроле пенопластов по времени распространения ультразвука фиксироваться не будут. С другой стороны, увеличение толщины

раскрыва дефекта при неизменной его ширине может привести к исчезновению на кривой $t(\Delta)$ горизонтальной полочки (кривая 6). Зависимость $t(\Delta)$ будет близка к зависимости для звуконепрозрачного дефекта, но с учетом $t = f(\alpha, \alpha')$.

Особой трудностью акустического контроля пенопластов с помощью временного теневого метода является неопределенность контроля [2], так как изменение (увеличение) времени распространения ультразвуковых колебаний может происходить как из-за изменения структуры материала, так и из-за дифракционного огибания дефекта. Помимо этого, как было показано, дефект может «маскироваться» сквозным проходом ультразвука напрямую через частично звуко-

прозрачный дефект.

Таким образом, несмотря на то, что временной теневой метод широко применяется для акустического контроля структурно-неоднородных материалов и при этом обладает достаточной чувствительностью для определения протяженных дефектов, при ультразвуковой дефектоскопии следует учитывать специфические особенности структуры пенопластов, которые могут снизить точность и достоверность контроля. С другой стороны, по виду зависимости времени распространения $t(\Delta)$ (наличие пика или горизонтальной полочки) с учетом совокупности формул (5)—(7) можно судить о геометрических размерах дефекта и о его толщине. Что расширяет информацию о форме несплошности в контролируемом материале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Горлов Ю. П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. М.: Высш. шк. 1989. 384 с.
- 2. Крюков И. И., Агузумцян В. Г., Дронов Ю. В., Карапетян О. О. Ультразвуковая дефектоскопия пенопластов // Дефектоскопия. 1989. № 6. С. 79—83.
- 3. Агузумцян В. Г., Крюков И. И., Мамистов С. В., Паврос С. К. Акустический тракт теневого дефектоскопа при механизированном контроле пенопластов с помощью катящихся пьезопреобразователей // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. 1991. № 2. С. 42—48.
- Голубев А. С., Паврос С. К., Мамистов С. В. О соотношении действительных и условных границ протяженных несплошностей при ультразвуковом контроле толстых листов // Дефектоскопия. 1983. № 2. С. 3—7.
- Рапопорт Ю. М. Ультразвуковая дефектоскопия строительных деталей и конструкций. М.: Стройиздат. 1975. 129 с.
- 6. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.

Санкт-Петербургский Технологический институт Поступило в редакцию 20.06.92

УДК 621.396.677

© 1993 г. И. Л. Рубанов

О РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Проведено теоретическое исследование влияния взаимодействия по полю между элементами излучающей линейной эквидистантной антенной решетки на ее параметры с учетом характеристик возбуждающего электрического генератора.

В настоящее время исследованию влияния акустического взаимодействия на параметры излучающих антенных решеток как характеризующие дальнее поле — характеристику направленности, развиваемое в направлении максимума характеристики направленности звуковое давление, — так и характеризующие режим работы элементов антенной решетки — электроакустических преобразователей — и степень их согласования с выходными цепями возбуждающего электрического генератора — амплитуду колебательной скорости, импеданс излучения, входной электрический импеданс — посвящено значительное число работ. Однако в большинстве из них предполагалось, что величина подводимого к преобразователю от генератора электрического напряжения не зависит от его параметров, в частности от его входного электрического импеданса, т. е. генератор является генератором напряжения [1—3]. Исключением является работа [4], в которой исследован случай постоянного внутреннего чисто активного импеданса генератора. Представляет существенный теоретический и практический интерес исследование влияния взаимодействия по полю элементов антенной решетки с учетом характеристик возбуждающего электрического генератора.

Рассмотрим акустическое поле линейной эквидистантной антенной решетки, состоящей из N колец высоты h, установленных с периодом d на бесконечном абсолютно жестком цилиндре радиуса a. Каждому электроакустическому преобразователю в антенной решетке, являющемуся нагрузкой канала многоканального электрического генератора (МЭГ) — источника ЭДС E_n , обладающего внут-