

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carter A. H., Williams A. O., Jr. A New Expansion for the Velocity Potential of a Piston Source//J. Acoust. Soc. Amer. 1951. № 23. P. 179—184.
2. Seki H., Granato A., Truell R. Diffraction Effects in the Ultrasonic Field of a Piston Source and Their Importance in the Accurate Measurement of attenuation//J. Acoust. Soc. Amer. 1956. № 28. P. 230.
3. Zemanek J. Beam Behavior Within the Nearfield of a Vibrating Piston//J. Acoust. Soc. Amer. 1971. № 49. P. 181—191.
4. Wesley L. Nyborg and Bruce R. Steele. Nearfield of a Piston Source of Ultrasound in an Absorbing medium//J. Acoust. Soc. Amer. 1985. № 78. P. 1882—1891.
5. Schoch A. Betrachtungen uber das Schallfeld einer Kolben membran//Akust. Z. 1941. P. 318—326.
6. Pierce A. D. Acoustics, An Introduction to its Physical Principles and Applications. N. Y.: Mcgraw-Hill, 1981. Ch. 5.
7. Lord Rayleigh, Theory of sound. N. Y.: Dover, 1945. V. 2. P. 107.
8. Nyborg W. L. Heat generation by ultrasound in a relaxing medium//J. Acoust. Soc. Amer. 1981. № 70. P. 310—312.
9. Cavicchi T. J., O'Brien W. D., Jr. Heat generated by ultrasound in an absorbing medium//J. Acoust. Soc. Amer. 1984. № 7. P. 1244—1245.
10. Nyborg W. L. Physical principles of ultrasound, «in Ultrasound: Its applications in Medicine and Biology/Ed. by Fry F. J. N. Y.: Elsevier, 1978. P. 1—75.
11. Nyborg W. L., Steele R. B. Temperature elevation in a beam of ultrasound//Ultrasound Med. Biol. 1983. № 9. P. 611—620.

Университет
г. Мина, Египет

Поступило в редакцию
18.02.93

УДК 539.2:539.16.04

© 1993 г. А. А. Беспалько, В. И. Быков, А. В. Федюнин

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МОЩНЫМИ ПОТОКАМИ ЭЛЕКТРОНОВ И МЯГКОГО РЕНТГЕНА

Одним из эффектов, сопровождающих воздействие мощных радиационных полей на твердые тела, является генерация интенсивных акустических импульсов, играющих существенную роль в процессе разрушения облучаемых материалов [1, 2]. Амплитуды продольных волн сжатия и растяжения достигают значений до 10^9 Па при удельной мощности облучения электронами до 10^8 Вт/см². При наносекундной длительности импульса облучения электронами с энергией в сотни килоэлектронвольт выполняется условие мгновенного ввода энергии в образец. Тогда длительность и форма акустического импульса сжатия определяется соответственно свободным пробегом электронов и пространственным профилем выделившейся в материале энергии $\epsilon(x, t) = kE_e$ [3]. При воздействии мягким рентгеновским излучением (МРИ) с длиной волны $0,1 + 10$ нм выполняется условие поверхностного нагрева. Здесь длительность акустического сигнала определяется длительностью импульса воздействия, а его профиль — изменением во времени энергии, падающей на облучаемую поверхность образца $\epsilon(x, t) = kE_e$, где k — коэффициент генерации акустического сигнала, при нормальных условиях равный параметру Грюнайзена [2]. Для прогнозирования поведения твердых тел в радиационных полях необходимо сравнить эффективность генерации акустических импульсов при облучении электронами и МРИ. С этой целью нами проведены исследования акустических сигналов, возбуждаемых электронным пучком и МРИ в отвержденных образцах эпоксидной смолы ЭД-20. Образцы отверждали под давлением 5 бар в сосуде, находящемся в водно-паровой бане. Максимальная энергия электронов облучения составляла 260 кэВ, длительность импульса тока — 10 нс, а поверхностная плотность энергии E пучка изменялась в пределах 0,06—0,8 Дж/см². Энергия квантов МРИ находилась в интервале 0,1—1,0 кэВ, длительность импульса облучения колебалась в пределах 170—220 нс, а $E \approx 0,06$ —5,0 Дж/см². В качестве образцов ЭД-20 выбрана потому, что при названных выше параметрах излучательных установок длительности термоупругих акустических импульсов сжатия в ней различаются при обоих типах воздействия не более чем на 20%. Кроме того, эпоксидная смола обеспечивает надежный акустический контакт и удовлетворительную воспроизводимость измерений амплитудно-временных параметров акустических импульсов. Все это позволило упростить определение параметра генерации акустического отклика в ЭД-20 при облучении МРИ, сохраняя геометрию эксперимента такую же, как при электронном облучении и, следовательно, делая неизменным

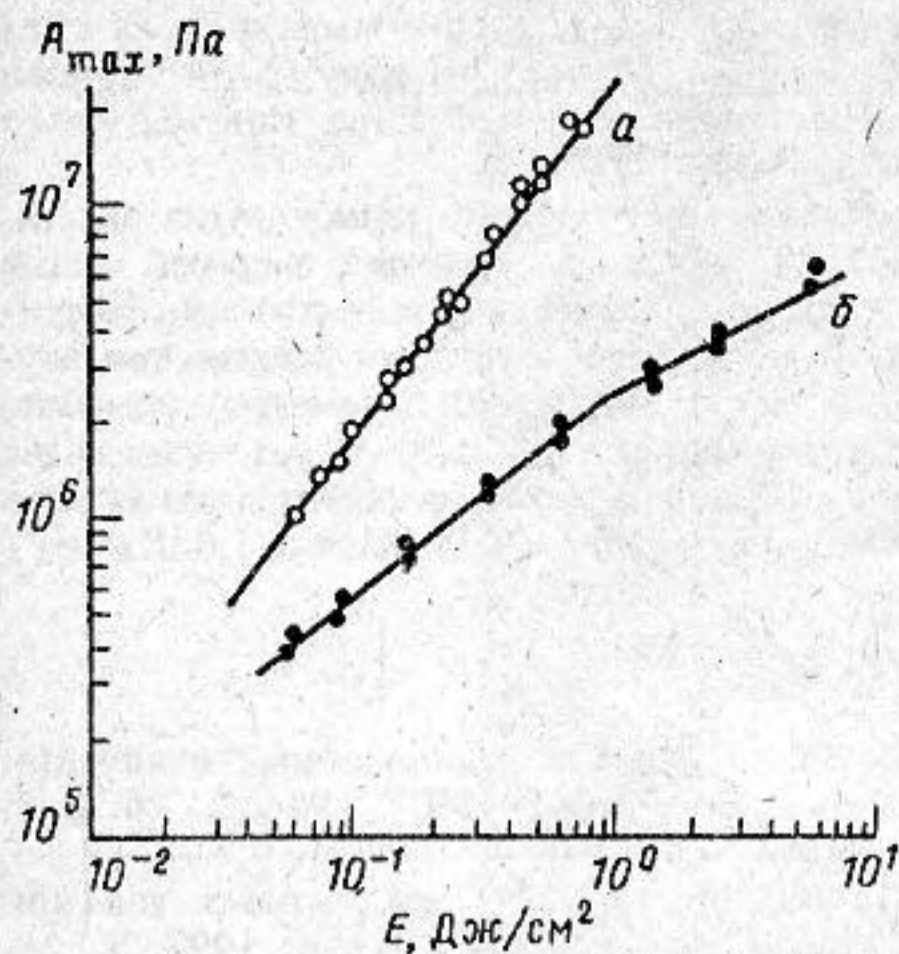


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость максимальной амплитуды акустического импульса сжатия в отвержденных образцах эпоксидного клея ЭД-20 от поверхностной плотности энергии облучения: а — электронами, б — МРИ

Рис. 2. Осциллограммы акустических импульсов в образцах ЭД-20 при разной поверхностной плотности энергии облучения МРИ ($\text{Дж}/\text{см}^2$): 1 — 0,1; 2 — 1,4; 3 — 5,6; Т — термоупругий; Р — реактивный импульс отдачи

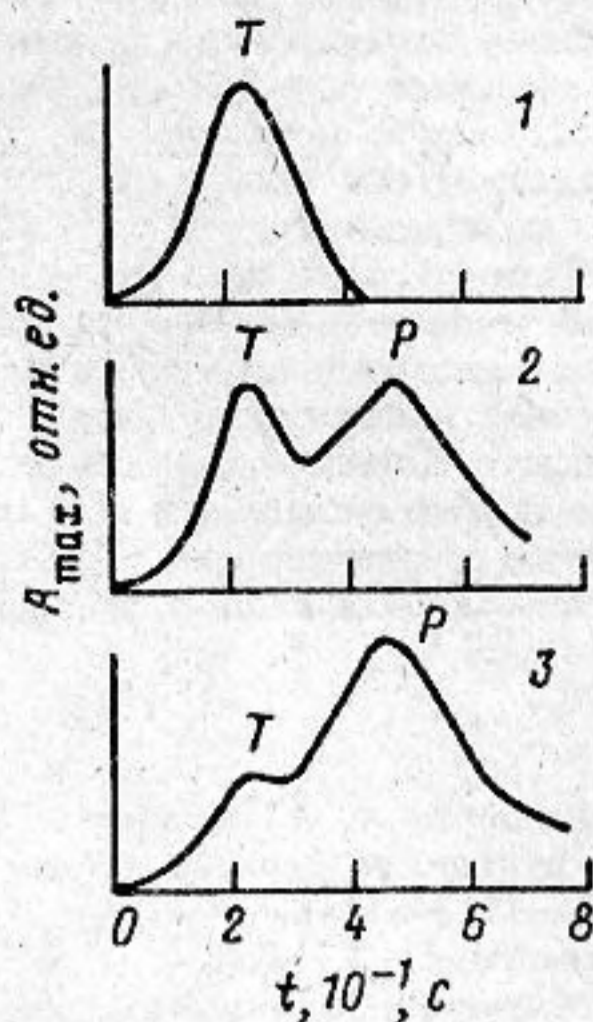


Рис. 2

коэффициент затухания акустических сигналов. При электронном возбуждении параметр генерации Γ определяли по экспериментальным данным, полученным с помощью лазерного интерферометра Майкельсона и калориметра. Для вычисления параметра генерации использовали выражение [3]

$$\Gamma = \rho c^2 U_{\max} (L) / E_{\text{tot}}$$

где U_{\max} — максимальное смещение необлученной поверхности образца, L — толщина образца, ρ —

плотность материала, c — скорость продольного звука, $E_{\text{tot}} = \int_0^L E(x) dx$, $E(x)$ — пространственный

профиль объемной плотности поглощенной энергии пучка электронов. Длительность импульса облучения учитывалась на этапе получения E_{tot} . Расчет по этой формуле показал, что параметр генерации равен 0,85. По методике работы [4] была произведена калибровка широкополосного апериодического пьезопреобразователя и определена максимальная амплитуда акустического импульса сжатия A_{\max} от поверхностной плотности энергии пучка электронов облучения (рис. 1, а). С учетом калибровочного коэффициента пьезопреобразователя и неизменности геометрии облучения электронами и МРИ была получена также зависимость A_{\max} от изменения поверхностной плотности энергии МРИ (рис. 1, б). Сопоставление экспериментальных данных (рис. 1) показало, что эффективность генерации акустических импульсов потоками мягкого рентгена в 2,5 и более раз ниже, чем при электронном воздействии. Такое различие может быть обусловлено сильным поверхностным нагревом образцов потоком квантов МРИ, что приводит при определенных критических значениях E , характерной для конкретного материала [2], к нестационарному фазовому переходу, а именно плавлению и испарению. Подтверждением этому служит появление дополнительного акустического сигнала при $E \geq 1,0 \text{ Дж}/\text{см}^2$, который стационарен во времени и может при $E = 4-5 \text{ Дж}/\text{см}^2$ превышать по амплитуде термоупругий импульс. На рис. 2 представлены осциллограммы термоупругого (Т) и реактивного (Р) акустических импульсов при различных поверхностных плотностях энергии облучения МРИ. Нарастание амплитуды реактивного акустического сигнала превышает рост A_{\max} , что указывает на перераспределение поглощенной энергии, затрачиваемой на образование термоупругого и реактивного акустических импульсов. Облучение образцов ЭД-20 пучками электронов с перечисленными выше параметрами приводит к такому распределению объемной плотности поглощенной энергии, которое не вызывает агрегатных изменений вещества и соответственно изменений параметра генерации термоупругого импульса. При облучении МРИ происходит сначала плавление поверхности образца и, как следствие, уменьшение параметра генерации

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 агрегатного состояния вещества образца. Генерация реактивного акустического импульса в ЭД-20 начинается с критической плотности энергии облучения МРИ $\geq 1,0$ 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., Бакиш 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 раскрытием по толщине 0,3—3 см из-за резкого снижения прочностных и теплоизоляционных свойств. В соответствии с [4] подобные несплошности 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