

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ВЕЩЕСТВ

Д.А.Костюк, Ю.А.Кузавко
Политехнический институт, г.Брест

В различных технологических процессах приготовления веществ и продуктов имеет место отверждение последних. При этом степень отверждения вещества однозначно говорит о качестве его приготовления. Здесь нами предлагается высокочувствительный метод ультразвуковой диагностики процессов отверждения веществ, заключающийся в измерении спектральных характеристик акустического импульсного сигнала, отраженного от границы твердого тела с исследуемым веществом при его отверждении. Примерами реальных технологических процессов при такой ультразвуковой диагностике могут быть сцепление асфальтового покрытия с дорожным грунтом, бетона с железной арматурой, брожение пищевых продуктов в различных емкостях и т.д., при этом рассматриваемые материалы являются сильно диссипативными средами (СДС), т.е. поглощение ультразвука в них весьма велико.

Прежде чем перейти к экспериментальным исследованиям, рассмотрим следующую теоретическую модель. Пусть из твердого тела (1) в исследуемый объект (2) нормально к плоской границе раздела этих сред $x=0$ распространяется импульсный акустический сигнал, имеющий на границе следующий вид:

$$u_1(x=0, t) = u_0 e^{-\frac{t-t_0}{T}} \sin 2\pi \frac{t}{T} \sin 2\pi \frac{t}{T} \left\{ \theta(t - \frac{\tau}{2}) - \theta(t + \frac{\tau}{2}) \right\}, \quad (1)$$

где u_0 — амплитуда сигнала, α характеризует огибающую импульса и однозначно $\alpha = \pi/Q$ связана с добротностью Q пьезоизлучателя, ω_0 — частота основной гармоники импульса, $\tau = nT$ — длительность импульса, $T = 2\pi/\omega_0$, n — количество периодов импульсов. Данный сигнал максимально близок к реальным акустическим импульсам, получаемым с помощью ультразвуковых пьезокерамических преобразователей (УЗП).

Если учитывать только затухание звука в СДС, то из решения волновых уравнений для упругих колебаний с учетом граничных условий для коэффициента отражения R_{ω} продольной акустической волны справедливо соотношение:

$$R_{\omega} = \frac{R_0[1 + (1 + x^2)^{1/2}] + \frac{T_0}{2}x^2 + i\frac{T_0}{2}x(1 + x^2)}{1 + (1 + x^2)^{1/2} + \frac{T_0}{2}x^2 + i\frac{T_0}{2}x(1 + x^2)}, \quad (2)$$

где $R_0 = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1)$ и $T_0 = 2Z_2/(Z_2 + Z_1)$ - соответственно коэффициенты отражения и прохождения звуковой волны (при $x \rightarrow 0$), $Z_1 = \rho_1 S_{10}$ и $Z_2 = \rho_2 S_{20}$ - акустические импедансы твердого тела и СДС, $x = \omega/\omega_c$, $\omega_c = \rho_2 S_{20}^2/b$, ρ_2 - плотность, b - параметр диссипативных потерь, S_{20} - скорость звука (при $\omega \rightarrow 0$). Таким образом, согласно (2), при отражении непрерывной акустической волны от СДС меняется ее амплитуда и фаза. В окрестности $\omega = \omega_c$ наблюдается минимум коэффициента отражения волны при дальнейшем возрастании фазы отраженного сигнала относительно падающего на границу сигнала.

Форма отраженного акустического импульса находится согласно выражению:

$$u^r(x, t) = F^{-1}\{F[R_{\omega}u^i(x, t)]\}, \quad (3)$$

где F и F^{-1} - соответственно прямое и обратное преобразование Фурье. Исходя из приведенной зависимости R_{ω} (2), для реального сигнала (1) с помощью компьютера рассчитывалась форма отраженного сигнала от границы раздела некоторых сред. Была найдена существенная зависимость амплитуды и фазы отраженного сигнала от частоты основной гармоники импульсного сигнала.

Для подтверждения теоретически предсказанного выше явления - зависимости коэффициента отражения от диссипации ультразвуковой энергии в отражающей среде - проводился следующий эксперимент. Ультразвуковой пьезокерамический преобразователь (УЗП) с резонансной частотой 3,5 МГц возбуждался импульсным генератором. УЗП излучал близкий к теоретически рассмотренной форме акустический импульс в структуру оргстекло-эпоксидная смола (ЭС). Излученные и отраженные с выхода УЗП сигналы регистрировались осциллографом с цифровой индикацией амплитудных и временных интервалов сигнала.

В процессе отверждения ЭС, приготовленной соответственно ГОСТ на 1 г ЭС 1,2 г отвердителя, наблюдалось уменьшение коэффициента отражения в 2,5 раза при изменении длительности сигнала с $\tau = 3$ мкс до $\tau = 2$ мкс. Поразительный результат получился при отверждении ЭС, приготовленной согласно объемному соотношению 1:2, когда коэффициент отражения уменьшился в 14 раз при изменении длительности в 2 раза.

Отметим, что показания коэффициента отражения ультразвука от ЭС менялись в течение трех и более суток, в то время как ЭС застывала за несколько часов. На наш взгляд, это говорит о продолжающихся в ЭС физико-химических превращениях на микроуровне. В эксперименте измерялся коэффициент отражения как временная функция при отвердении ЭС, в то время как частота ω_0 основной гармоники излученного сигнала оставалась неизменной. Очевидно, что вязкость СДС, как и затухание ультразвука в ней, достигали своего максимума в точке фазового перехода для ЭС.

Следует сделать вывод, что состояние отражающей СДС существенно влияет на коэффициент отражения и фазу как непрерывных, так и импульсных акустических сигналов. Так как фазовые измерения являются более точными по сравнению с амплитудными, то по ним мы можем судить о поглощении звука в СДС и проводить непосредственные измерения вязкости жидкостей. По таким измерениям при соответствующей доработке можно судить о готовности к употреблению того или иного технологического продукта. Так можно контролировать качество сцепления асфальта с грунтом, бетона с железной арматурой, соответствие нормам при изготовлении композиционных и иных материалов, а также степень готовности пищевых продуктов при их приготовлении.