

Исследование акустической упругости бетона

Адаменко В. С., Русин А. А.

Научный руководитель – Снежков Д. Ю., к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Эффект акустической упругости заключается в зависимости параметров распространения акустической волны или показателей акустической анизотропии испытуемого материала от напряжения (деформации). В основе эффекта акустической упругости лежит проявление нелинейных свойств областей бетона всех масштабных уровней локализации [1]. Это может быть изменение жесткости механических контактов структурных элементов бетона – кристаллогидратов между собой и зёрнами заполнителя. Это могут быть нелинейные эффекты трещиноватости, связанные с локальным изменением модуля упругости бетона. Это могут быть эффекты «схлопывания» трещин [2]. Эффектом просачивания фронта упругой волны через трещины можно объяснить увеличение скорости ультразвуковых колебаний, распространяющихся вдоль оси образца, при его осевом сжатии. На рис. 1 приведена зависимость скорости ультразвукового импульса с максимумом спектральной плотности на частоте 55 кГц от напряжения сжатия.

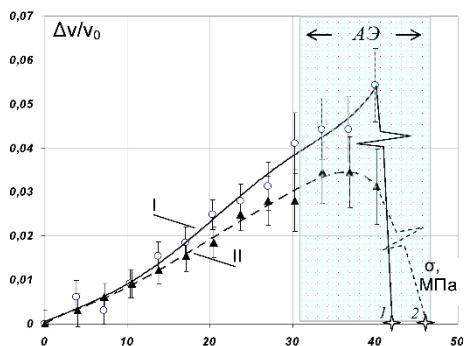


Рис. 1 Зависимость приращения скорости продольной ультразвуковой волны в образцах-призмах от статической осевой нагрузки: I – класс бетона С30/37; II – С35/45; (условия твердения нормальные, возраст бетона 370 сут.); 1, 2 – значения разрушающей нагрузки; АЭ – область интенсивной акустической эмиссии в образцах.

Акустические испытания производились в режиме прямого измерения времени распространения продольной подповерхностной волны ультразвукового импульса в образцах-призмах 100x100x400 мм поверхностным методом прозвучивания на базе 150 мм.

Эффект акустической упругости устойчиво наблюдается при нагрузках более 20% от разрушающей. В таблице 1 приведены максимальные значения коэффициентов акустической упругости для различных составов бетона, полученные экспериментально. В качестве параметра акустической упругости k_A использовано отношение

$$k_A = \frac{\Delta V_l}{V_l} \frac{1}{\sigma}, \quad (1)$$

где V_l – скорость распространения импульса подповерхностной продольной волны; ΔV_l – приращение скорости акустического импульса при осевой нагрузке σ .

Таблица 1 – Параметры акустоупругости бетона

№ состава	Класс по прочности	$f_{c,cube}$	Расход песка	Расход щебня	Расход цемента*, ПЦ-500	Параметр акуст. упругости** $\Delta v \cdot v^{-1} \cdot \sigma^{-1}$
		МПа	кг	кг	кг	10^{-9} Па^{-1}
1	C25/30	34,3	750	1100	445	$1,30 \pm 0,25$
2	C35/45	50,2	710	1000	600	$1,45 \pm 0,31$
3	C30/37	42,8	730	1050	540	$1,25 \pm 0,27$
4	C35/45	48,4	700	1030	600	$0,91 \pm 0,20$

*Вода на осадку конуса 13...15 см

** Контрольное напряжение $\sigma_c = 20 \text{ МПа}$

Из табл. 1 видно, что приращение скорости распространения акустического импульса при нагрузке 20 МПа лежит в пределах 1...1,5 %, при этом относительная погрешность в оценке k_A составляет ~20%. Следует заметить, что среднее квадратическое отклонение относительной вариации скорости, рассчитанное по формуле

$$s_{\Delta v^*} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta V_l / V_i - (\Delta V_l / V)_{m(n)}]^2}{n-1}} \quad (2)$$

остаётся практически постоянным в диапазоне напряжений 0...0,7 f_c , следствием чего является возрастание относительной погрешности в оценке

коэффициента k_A по мере уменьшения напряжения в бетоне. Указанная погрешность при $\sigma = 0,1f_c$ составляет 50...70%.

Для сопоставления результатов испытаний бетона ниже приведены данные акустической упругости образцов каменной соли и ангидрита (минерала безводного гипса) – материалов структурно однородных (в сравнении с бетоном), но которым также присуща трещиноватость разного масштабного уровня [4]. На рис. 2 приведены зависимости скорости распространения ультразвукового импульса частотой около 500 кГц в коротких образцах-кернах минерала ангидрита.

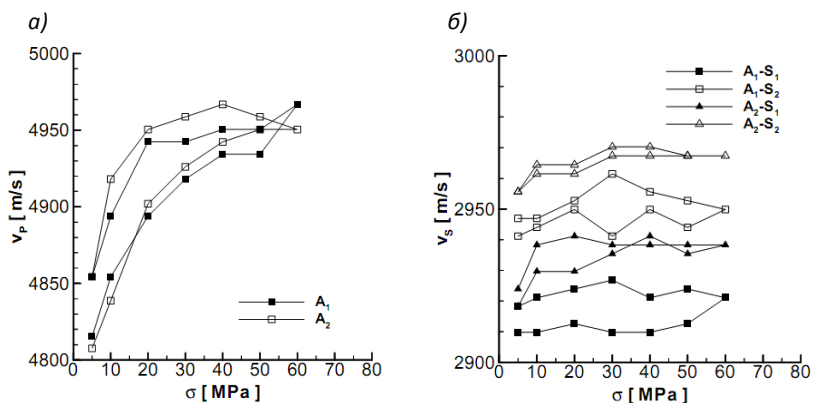


Рис. 2 - Зависимости скорости распространения акустических волн в образцах минерала ангидрита от напряжения при одноосном сжатии: а – продольной волны, б – поперечной [4]

Измерение скорости распространения импульса производилось в направлении сжатия образца. Максимальное значение показателя акустической упругости для продольных волн k_A , соответствующее начальному участку диаграммы, составило в среднем $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$. Вариация скорости распространения продольной волны составила 3%, при выраженной нелинейности её зависимости от напряжения сжатия. Характерным явилось слабое проявление эффекта акустической упругости для поперечных волн (см. рис. 2,б).

На рис. 3 приведены данные испытаний двух групп образцов-кернов каменной соли: группа *Berlin 1* – «свежие» образцы-керна, группа *Berlin 2* – образцы-керна выдержанные в нормальных условиях в течение года [4]. Показатель акустической упругости каменной соли лежит в пределах от $5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ (группа *Berlin 1*, начало диаграммы нагружения), до

$0,1..0,2 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ – (группа *Berlin 2*, конечный участок диаграммы нагружения).

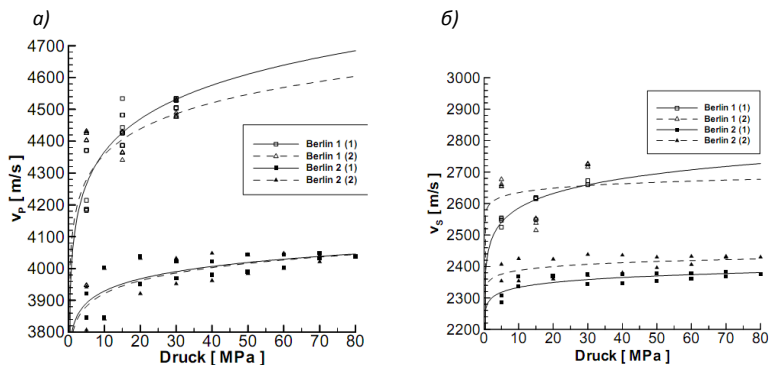


Рис. 3- Зависимости скорости распространения акустических волн в направлении сжатия в коротких образцах-кернах каменной соли от напряжения при одноосном сжатии: *a* – продольной волны, *б* – поперечной [4]

Деструктивные процессы в бетоне вследствие термических воздействия также могут выявляться показателем акустической анизотропии с использованием ультразвука. Важным его качеством является высокая чувствительность к анизотропии физико-механических параметров бетона при нагружении.

На рис. 4 приведены зависимости отношений скорости распространения импульса продольной волны в осевом и радиальном направлениях цилиндрического бетонного образца, подвергавшегося термическому воздействию [3].

Приведенные зависимости также косвенно свидетельствуют о снижении предела прочности бетона образцов после термического воздействия, превышающего 200°C

Полученные данные экспериментальных оценок показателя акустической упругости, наряду с его анизотропией, позволяют рассматривать его в качестве перспективного информационного параметра для контроля напряженно-деформированного состояния бетона непосредственно в конструкциях.

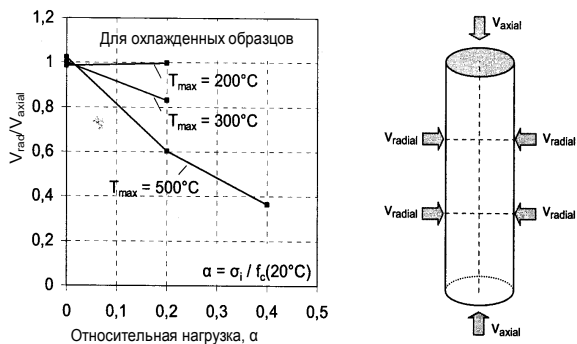


Рис. 4 Зависимость отношения скорости распространения ультразвукового импульса продольной волны в продольном и радиальном направлениях от относительной осевой нагрузки цилиндрического бетонного образца [3]

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина Н.Е., Акустоупругость. Опыт практического применения / Н.Е Никитина // Н.Новгород, ТАЛИАМ, 2008, С 208
2. Solodov, I. Nonlinear ultrasonic NDT for early defect recognition and imaging / I. Solodov, N. Krohn, G. Busse // Institute of polymer technology, department of nondestructive testing (ikt-zfp), University of Stuttgart, Pfaffenwald Germany // [Electronic resource], 2010. - Mode of access: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/>. - Date of access: 24.03.2010.
3. Schneider, U. Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit / U. Schneider, S. Huismann // Schriftenreihe des Institut für Hochbau und Technologie, Technische Universität Wien, Heft 17, Auflage 2011, P. 240.
4. Zimmer, U. Quantitative Untersuchung zur Mikrorissigkeit aus akustischen Gesteinseigenschaften am Beispiel von Steinsalz und Anhydrit / U.Zimmer // Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften Dr. rer. nat./ Technischen Universität Berlin.2001 – 189. p