

dr hab. inż. Radosław Jasiński, prof. PŚ¹⁾
 ORCID: 0000-0003-4015-4971

Wykorzystanie zjawiska elastoakustycznego do badania ścian z elementów murowych z ABK

The use of the elastoacoustic effect for testing walls made of AAC masonry units

DOI: 10.15199/33.2021.06.02

Streszczenie. Technika ultradźwiękowa wykorzystywana jest do określania wytrzymałości na ściskanie lub wykrywania wewnętrznych nieciągłości struktury. Używana jest także do określania stanu odkształceń oraz naprężeń w konstrukcjach i bazuje na efekcie elastoakustycznym (AE). Dotychczas efekt AE dość dobrze rozpoznano w materiałach jednorodnych, natomiast w przypadku materiałów porowatych czy niejednorodnych, takich jak beton czy skała, badania nie były prowadzone. Przedmiotem badań prezentowanych w artykule było wykorzystanie zjawiska AE do wyznaczania naprężeń w niewielkich modelach muru wykonanego z elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego. Przedstawiono zależności wiążące wartość naprężeń ściskających z prędkością podłużnej fali ultradźwiękowej z uwzględnieniem wilgotności.

Słowa kluczowe: konstrukcje murowe; autoklawizowany beton komórkowy (ABK); wytrzymałość na ściskanie; metoda nieniszcząca (NDT); badania ultradźwiękowe; efekt elastoakustyczny (AE).

Abstract. The ultrasonic technique is used not only to determine the compressive strength or to detect internal structure discontinuities. It is also used to determine the state of deformation and stress in structures and based on the elastoacoustic effect (AE). So far, the AE effect has been recognized quite well in homogeneous materials in the case of porous or heterogeneous materials such as concrete or rock, due to the large dispersion of the results, the study has not been conducted. The subject of the presented research was the use of the AE effect to determine the stresses in small models of masonry made of autoclaved aerated concrete masonry units. The relationship between the value of compressive stresses and the velocity of the longitudinal ultrasonic wave with regard to humidity was presented.

Keywords: masonry structures; autoclaved aerated concrete masonry units (AAC); compressive strength; non-destructive (NDT) technique; ultrasonic testing; elastoacoustic effect (AE).

Powszechnym zastosowaniem ultradźwięków w technice [1, 14] jest spektroskopia i defektoskopia ultradźwiękowa. Znacznie mniej powszechne jest zastosowanie technik ultradźwiękowych do pomiaru naprężeń, których podstawą jest zjawisko elastoakustyczne (AE), bazujące na korelacji między prędkością rozchodzenia się fali akustycznej a występującym naprężeniem. W przypadku betonu ultradźwiękowe techniki (NDT) stosuje się najczęściej do wyznaczania czasu wiązania, zmiany modułu sprężystości oraz wytrzymałości na ściskanie [5, 7]. W materiałach o strukturze porowatej, takich jak np. beton zwykły lub ceramika, predykcja stanu naprężeń przy użyciu ultradźwięków nie była dotychczas podejmowana.

Celem prezentowanych badań była próba podania empirycznych związków ujmujących wartości naprężeń pionowych, występujących w modelach muru wykonanych z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), z uwzględnieniem znanego efektu elastoakustycznego (AE) [2]. Stanowią one praktyczną aplikację wybranych zagadnień badań ultradźwiękowych przedstawionych w [10, 11] i obejmują eksperymenty wykonane na 24 niewielkich próbkach sześciennych (100 × 100 × 100 mm) z autoklawizowanego betonu komórkowego o nominalnej gęstości 400, 500, 600 i 700 kg/m³. Umożliwiły one wyznaczenie stałej elastoaku-

stycznej β_{113} wiążącej wartość naprężeń σ_3 z prędkością fali podłużnej c_p oraz względny współczynnik elastoakustyczny γ_{113} .

Teoretyczne podstawy pomiaru naprężeń z wykorzystaniem techniki ultradźwiękowej

Związek między występującym w ośrodku stanie naprężenia a prędkością fali mechanicznej został po raz pierwszy opisany w [3, 4, 8]. Zjawisko określono mianem efektu elastoakustycznego (AE) [9, 16]. Opisuje się je teoretycznie na podstawie nieliniowej teorii deformacji ciał stałych [12], w której zostają uwzględnione stałe sprężystości wyższych rzędów (niż występujących w liniowej teorii sprężystości). Prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej w ciele naprężonym można wyrazić jako sumę prędkości w stanie nienaprzężonym ($\sigma = 0$) i jej zmianę (przyrost) spowodowaną obecnością naprężenia. Więcej szczegółów dotyczących podstaw teoretycznych metody znaleźć można w [6, 12]. W przypadku jednoosiowego ściskania (rysunek 1) kwadrat prędkości fali podłużnej można wyrazić wzorem:

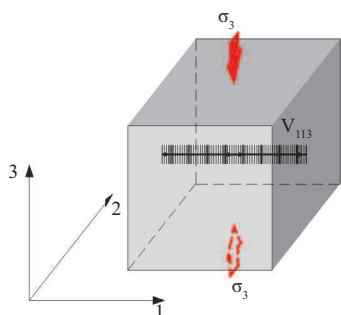
$$V_{113}^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0} + \frac{\sigma_3}{3K_0\rho_0} \left[\frac{2\lambda}{\mu} (\lambda + 2\mu + m) - 2l \right] \quad (1)$$

gdzie:

$$K_0 = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \frac{3\lambda + 2\mu}{3}$$

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa; radoslaw.jasinski@polsl.pl

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – składowe stanu naprężeń normalnych;
 λ, μ – stałe Lamégo;
 l, m, n – stałe sprężystości drugiego i trzeciego rzędu Murnaghana;
 ρ_0 – gęstość ciała w stanie nienaprzężonym.



Rys. 1. Identyfikacja spolaryzowanej w płaszczyźnie 1-3 podłużnej fali ultradźwiękowej w materiale izotropowym pod działaniem naprężenia normalnego σ_3
Fig. 1. Identification of a longitudinal ultrasonic wave polarized in the plane 1-3 in an isotropic material under the action of normal stress σ_3

Z równania (1) wynika, że znajomość prędkości fali ultradźwiękowej w obciążonym materiale, stałych sprężystości pierwszego rzędu (λ, μ) oraz drugiego i trzeciego (m, n, l) pozwalają na wyznaczenie naprężeń normalnych σ_3 . W przypadku jednoosiowego stanu naprężenia, który dominuje w murze ściśkanym osiowo, wg wzoru (1) można jednak wyznaczyć zależność między prędkością fali ultradźwiękowej a wartością naprężeń normalnych z pominięciem kłopotliwego stosowania wielu stałych materiałowych, stosując zależność:

$$\frac{(c_p - c_{p0})}{c_{p0}} = \frac{(t_{p0} - t_p)}{t_p} = \frac{\lambda}{\mu} \frac{(\lambda + 2\mu + m) - 1}{(\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)} \sigma_3 = \beta_{113} \sigma_3 \quad (2)$$

gdzie:

β_{113} – współczynnik elastoakustyczny [6] dotyczący fali podłużnej biegnącej prostopadle do kierunku działania obciążenia.

W odniesieniu do maksymalnych naprężeń zależność (2) można przedstawić w postaci:

$$\frac{(c_p - c_{p0})}{c_{p0}} = \frac{(t_{p0} - t_p)}{t_p} = \gamma_{113} \frac{\sigma_3}{\sigma_{3max}} \quad (3)$$

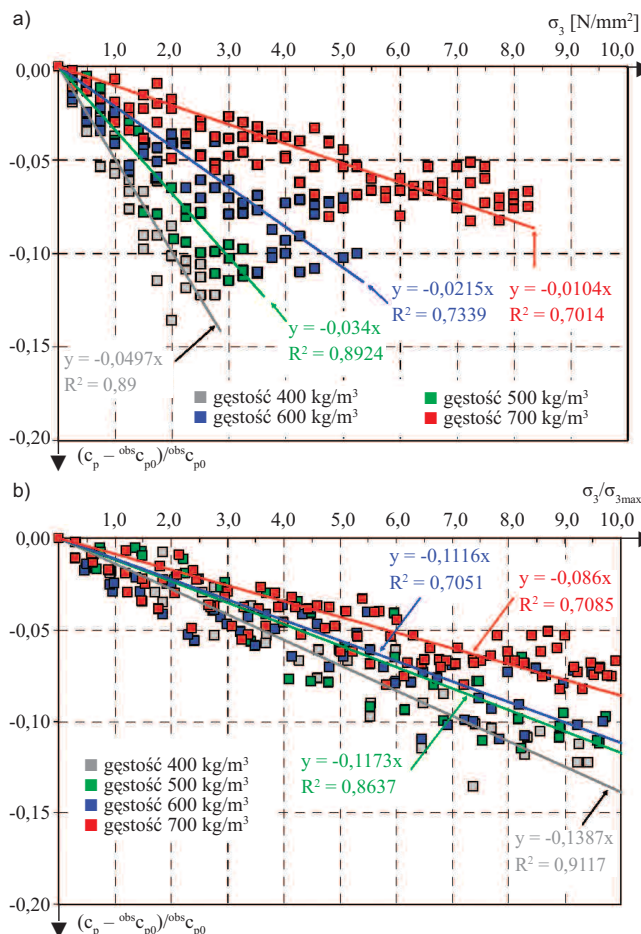
gdzie:

$\gamma_{113} = \beta_{113} \sigma_{3max}$ – względny współczynnik elastoakustyczny.

Wyznaczenie współczynnika elastoakustycznego

Wartość współczynnika elastoakustycznego β_{113} wyznaczono na próbkach sześciennych 100 x 100 x 100 mm zgodnych z EN 771-4:2011 [15], wyciętych z bloczków z ABK o klasie gęstości 400, 500, 600 i 700. W ramach każdej gęstości wykorzystano do badań co najmniej 6 próbek, a więc zbadano 24 próbki. Pomiar prędkości fali przeprowadzono za pomocą urządzenia PUNDIT LAB+ z głowicami eksponencyjnymi o częstotliwości 54 kHz [13]. Na rysunku 2a zestawiono wyniki pomiaru prędkości ultradźwięków w postaci ilorazu $(c_p - c_{p0})/c_{p0}$ wyrażającego względny przyrost prędkości ultradźwięków w funkcji naprężeń σ_3 . Natomiast na rysunku 2b pokazano względny przyrost prędkości fal ultradźwiękowych w funkcji względnych naprężeń ściskających σ_3/σ_{3max} .

Otrzymane wartości współczynników β_{113} i γ_{113} prostych wyznaczonych wg równań (2) i (3) w funkcji gęstości pokazano na rysunku 3. Na podstawie uzyskanych badań zapro-



Rys. 2. Wyniki pomiaru prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej: a) względna zmiana prędkości podłużnej fali w funkcji naprężenia ściskającego; b) względna zmiana prędkości podłużnej fali w funkcji względnych naprężeń ściskających

Fig. 2. Results of measurements of the velocity of longitudinal ultrasonic wave: a) relative change of longitudinal wave velocity as a function of compressive stress; b) relative change of longitudinal wave velocity as a function of relative compressive stresses

ponowano empiryczne zależności ujmujące wartości współczynników β_{113} i γ_{113} w funkcji gęstości ABK przy wilgotności $w = 0$.

$$\begin{aligned} \beta_{113} &= 1,39 \cdot 10^{-4} \rho - 0,104, R^2 = 0,995 \\ \gamma_{113} &= 1,72 \cdot 10^{-4} \rho - 0,206, R^2 = 0,923 \end{aligned} \quad (4)$$

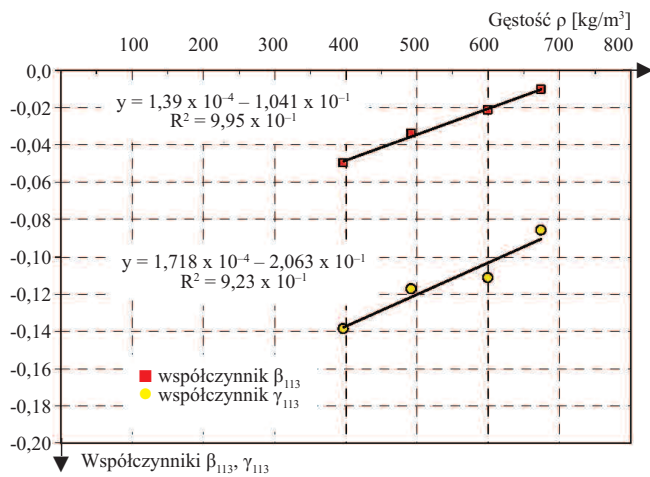
przy $397 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 674 \text{ kg/m}^3$

Do praktycznego zastosowania konieczne jest uwzględnienie wilgotności, która [6] zależy od gęstości ABK. Stwierdzono, że przy zwiększeniu gęstości od $\rho = 397$ do 674 kg/m^3 maksymalną wilgotność można wyrazić w postaci:

$$w_{max} = -1,23 \rho/1000 + 1,34, \text{ gdy } 397 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 674 \text{ kg/m}^3 \quad (5)$$

Na podstawie wykonanych badań otrzymano następujące zależności paraboliczne uwzględniające prędkość c_{pw} w wilgotnym ABK w odniesieniu do prędkości w stanie powietrznosuchym c_p :

$$\begin{aligned} c_{pw}/c_p &= 0,569 (w/w_{max})^2 - 0,818 (w/w_{max}) + 1, \\ &\text{gd } 397 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 446 \text{ kg/m}^3 \\ c_{pw}/c_p &= 0,483 (w/w_{max})^2 - 0,671 (w/w_{max}) + 1, \\ &\text{gd } 462 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 532 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (6)$$



Rys. 3. Wartości współczynników β_{113} i γ_{113} w funkcji gęstości ABK
 Fig. 3. Values of β_{113} and γ_{113} coefficients as a function of AAC density

$$c_{pw}/c_p = 0,366 (w/w_{max})^2 - 0,504 (w/w_{max}) + 1, \text{ gdy } 562 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 619 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{pw}/c_p = 0,323 (w/w_{max})^2 - 0,434 (w/w_{max}) + 1, \text{ gdy } 655 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 725 \text{ kg/m}^3$$

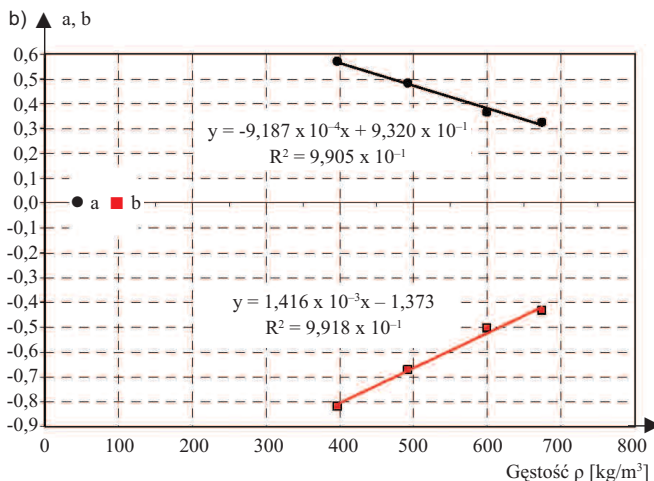
które można zapisać w ogólnej postaci:

$$c_{pw}/c_p = a (w/w_{max})^2 + b (w/w_{max}) + 1 \quad (7)$$

Po uwzględnieniu otrzymanych wartości współczynników empirycznych określono następujące zależności liniowe (rysunek 4):

$$a = 9,187 \cdot 10^{-4} \rho + 0,932, \text{ gdy } 397 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 674 \text{ kg/m}^3 \quad (8)$$

$$b = 1,416 \cdot 10^{-3} \rho - 1,373, \text{ gdy } 397 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 674 \text{ kg/m}^3$$



Rys. 4. Wartości współczynników a, b w funkcji gęstości ABK
 Fig. 4. The values of the coefficients a, b as a function of AAC density

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zastosowanie metody AE do badania autoklawizowanego betonu komórkowego. Zapropnowano procedurę i wyznaczono wartość współczynnika

elastoakustycznego β_{113} wiążącego prędkość propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej c_p z naprężeniem normalnym σ_3 . Do kalibracji użyto standardowych próbek sześciennych $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$. Na podstawie ABK o różnej gęstości, z wykorzystaniem korelacji pokazanych w [6], uwzględniono wpływ gęstości ρ oraz wilgotności względnej w . Rozważania umożliwiły podanie empirycznych zależności β_{113} oraz γ_{113} .

Literatura

- [1] Auld B. A. 1973). *Acoustic Fields and Waves in Solid*. John Wiley and Sons. New York. London. Sydney. Toronto.
- [2] Benson R. W., V. J. Raelson. 1959. „Acoustoelasticity”. *Product Engineering* 30: 56 – 59.
- [3] Bergman R. H., R. A. Shabender. 1958). „Effect of statically applied stresses on the velocity of propagation of ultrasonic waves”. *J. Appl. Phys.*, 29: 1736 – 1738. <https://doi.org/10.1063/1.1723035>.
- [4] Biot M. A. 1940. „The influence of initial stress on elastic waves”. *J. Appl. Phys.*, 11: 522 – 530. <https://doi.org/10.1063/1.1712807>.
- [5] Breyse D. 2012. „Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods”. *Constr. Build. Mater.* 33: 139–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>.
- [6] Deputat J. 1987. *Właściwości i wykorzystanie zjawiska elastoakustycznego do pomiarów naprężeń własnych*. Warszawa. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN.
- [7] Hola J., K. Schabowicz. 2010. „State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – Anticipated development trends”. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 10: 5–18. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60133-2](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60133-2).
- [8] Huges D. S., J. L. Kelly. 1953. „Second Order Elastic Deformation of Solids”. *Physical Review*, 1145 – 1149. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145>.
- [9] Husson D., G. S. Kino. 1982. „A perturbation theory for acoustoelastic effects”. *J. Appl. Phys.*, 53: 7250 – 7258. <https://doi.org/10.1063/1.331623>.
- [10] Jasiński Radosław, Ł. Drobiec, W. Mazur. 2019. „Validation of Selected Non-Destructive Methods for Determining the Compressive Strength of Masonry Units Made of Autoclaved Aerated Concrete”. *Materials*, 12: 389. <https://doi.org/10.3390/ma12030389>.
- [11] Jasiński Radosław. 2018. „Determination of AAC masonry compressive strength by semi destructive method”. *Nondestructive testing and diagnostics*, 3: 81 – 85. <https://doi.org/10.26628/wtr.v9i12.1023>.
- [12] Jasinski Radosław. 2020. „Identification of Stress States in Compressed Masonry Walls Using a Non-Destructive Technique (NDT)”. *Materials*, 13: 2852; <https://doi.org/10.3390/ma13122852>.
- [13] Jasiński Radosław. 2021. „Badania efektu akustoelastycznego w autoklawizowanym betonie komórkowym”. *Inżynieria i Budownictwo* 3: 96 – 101.
- [14] Malhotra V. M., N. J. Carino. 2003. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. CRC Press: Boca Raton. FL. USA.
- [15] PN-EN 771-4:2011. Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego.
- [16] Tokuoka T., M. Saito. 1968. „Elastic wave propagations and acoustical birefringence in stressed crystals”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 45: 1241–1246. <https://doi.org/10.1121/1.1911595>.

Podziękowanie

Autorka składa podziękowania firmie Solbet Sp. z o.o. za udostępnienie materiałów oraz pomoc w organizacji i realizacji badań.

Przyjęto do druku: 04.05.2021 r.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

www.s-p-b.pl



ROK ZAŁOŻENIA 1994