

dr hab. inż. Radosław Jasiński, prof. PŚ^{1*)}

ORCID: 0000-0003-4015-4971

dr hab. inż. Łukasz Drobiec, prof. PŚ¹⁾

ORCID: 0000-0001-9825-6343

dr inż. Wojciech Mazur¹⁾

ORCID: 0000-0002-3524-4094

Wyznaczanie charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie muru z ABK metodą NDT

Determination of AAC masonry compressive strength by NDT method

DOI: 10.15199/33.2019.07.04

Streszczenie. Zdecydowanie mniejszy stopień uszkodzeń konstrukcji występuje, gdy do określenia charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie zastosuje się ultradźwiękową metodę nieniszczącą (NDT). W artykule przedstawiono wyniki badań prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych c_p metodą przepuszczania, stosując głowice punktowe z eksponencjalnymi falowodami. Sformułowano postać krzywej ($f_{Bw} - c_p$) umożliwiającej określenie wytrzymałości na ściskanie ABK o dowolnej wilgotności (f_{Bw}). Rozważania zobrazowano przykładem wyznaczania charakterystycznej wytrzymałości muru na ściskanie.

Słowa kluczowe: autoklawizowany beton komórkowy (ABK); wytrzymałość na ściskanie; wielkość i kształt próbki; wilgotność; metoda ultradźwiękowa; metoda NDT.

Abstract. A much smaller degree of structural damage occurs when the ultrasonic non-destructive method (NDT) is used to determine the characteristic compressive strength. The paper presents the results of the longitudinal velocity of c_p ultrasound waves using the penetration probes with the overhead waveguides. The form of the curve ($f_{Bw} - c_p$) was formulated to determine the compressive strength AAC with any moisture content (f_{Bw}). The considerations are illustrated by an example of determining the characteristic strength of the wall for compression.

Keywords: autoclaved aerated concrete (AAC); compressive strength; shape and size of specimens; moisture; Ultrasonic Testing, NDT methods.

W celu określenia wytrzymałości muru w wielu miejscach konstrukcji budynku, zastosować można **nieniszczącą metodę ultradźwiękową (NDT)** pod warunkiem, że znana jest zależność prędkość ultradźwięku c_p – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie f_{Bw} . W przypadku ABK takich korelacji brakuje. Aby wypełnić tę lukę, wykonaliśmy badania [5] prędkości fal ultradźwiękowych ABK o różnej gęstości oraz wilgotności i opracowaliśmy zależności pozwalające na wyznaczenie wytrzymałości muru z ABK w warunkach in-situ. Stosując procedurę podaną w PN-EN 13791:2009 [6], zaproponowaliśmy wyznaczanie charakterystycznej wytrzymałości muru na ściskanie.

Badania ultradźwiękowe ABK

Badanie prędkości ultradźwięków wykonano na próbkach kostkowych $100 \times 100 \times 100$ mm wyciętych z elementów murowych, nawilżonych wodą do

wilgotności względnej $w/w_{\max} = 100\%$, 67% , 33% , 23% i 10% oraz próbkach wysuszonych do stałej masy $w/w_{\max} = 0\%$. W ramach każdej gęstości ABK zbadano co najmniej 20 próbek, a ogółem 91. Wykorzystano głowice eksponencjalne o długości falowodu $L = 50$ mm i częstotliwości 54 kHz. W próbkach z ABK wysuszonych do stałej masy prędkość fal ultradźwiękowych zmieniła się od 1847 m/s w betonie gęstości 400 kg/m³ do 2379 m/s w betonie klasy 700 . W próbkach wilgotnych także wykazano proporcjonalny wzrost prędkości fal ultradźwiękowych c_p do wzrostu gęstości. Częstkowe wyniki badań każdej serii ABK zawarto w [3]. Stwierdzono, że czynnikami decydującymi o prędkości fal ultradźwiękowych w ABK były gęstość oraz wilgotność względna. Postępując analogicznie jak w [4], w pierwszej kolejności wyznaczono krzywą korelacyjną wiążącą prędkość fali ultradźwiękowej w próbkach ABK w stanie powietrzno-suchym w funkcji uzyskanej wytrzymałości na ściskanie f_B . Wykazano, że betony o większej gęstości i większej wytrzymałości na ściskanie charakteryzowały się większą prędkością ultradźwięków. Wystarczająco pre-

czyjnymi aproksymacjami są zależności liniowe, których równania pokazano na rysunku 1a. Natomiast na rysunku 1b wyselekcjonowano z każdej klasy gęstości ABK wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i odpowiadającą im prędkość ultradźwięków suchego ABK ($w/w_{\max} = 0\%$), a następnie metodą najmniejszych kwadratów określono zależność $c_p - f_B$. Ponadto, na rysunku 1b pokazano przykładową zależność betonu maksymalnie zawilgoconego ($w/w_{\max} = 100\%$).

W przypadku betonu o wilgotności $w/w_{\max} = 0\%$ otrzymano następującą zależność empiryczną:

$$f_B = a(c_p)^2 + bc_p + c \rightarrow f_B = 5,73 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 + 1,43 \cdot 10^{-2}c_p + 10,3, \text{ gdy } 1847 \text{ m/s} < c_p \leq 2379 \text{ m/s} \quad (1)$$

Krzywa (1) uwzględnia wyniki otrzymane w badaniach ABK różnej gęstości, a uzyskany współczynnik korelacji wynosił $R^2 = 0,98$. W celu praktycznej aplikacji uzyskanych rezultatów badań konieczne jest opracowanie wspólnej krzywej uwzględniającej zarówno zmienność gęstości ABK, jak i wpływ wilgotności. W tym celu wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: radoslaw.jasinski@polsl.pl

wspólną krzywą uwzględniającą każdą wilgotność w/w_{\max} oraz gęstość (rysunek 2a), której równanie miało postać:

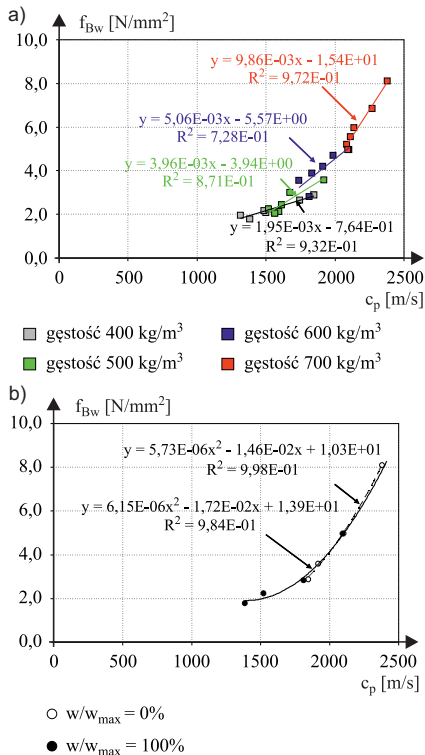
$$f_{Bw} = a_w(c_p)^2 + b_w c_p + c_w \rightarrow f_{Bw} = 5,33 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,39 \cdot 10^{-2}c_p + 10,9$$

gdy $1315 \text{ m/s} < c_p \leq 2379 \text{ m/s}$ (2)

Następnie wyznaczono równania poszczególnych krzywych w zależności od gęstości ABK. Wyniki zamieszczono w tabeli 1. Otrzymane wartości współczynników odniesiono do współczynników a_w , b_w i c_w wspólnej krzywej, a następnie naniesiono na rysunku 2b. Stosując metodę najmniejszych kwadratów, uzyskano następującą postać krzywych empirycznych pozwalających na określenie współczynników zależności $f_{Bw} - c_p$ ABK o dowolnej wilgotności i gęstości:

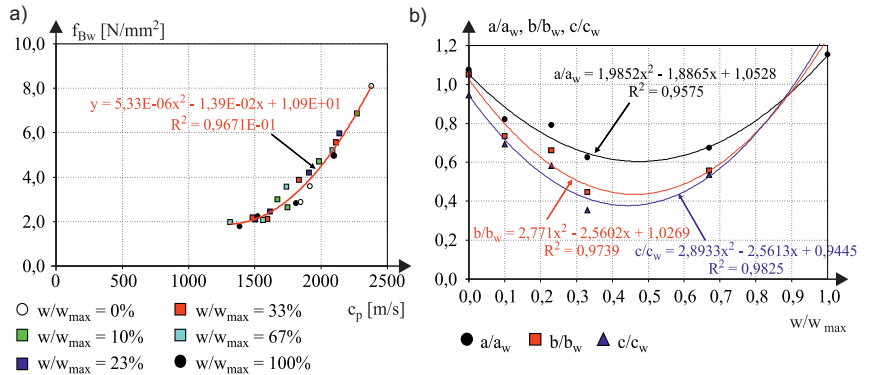
$$a/a_w = 1,99 (w/w_{\max})^2 - 1,89 w/w_{\max} + 1,05, \quad R^2 = 0,96 \quad (3)$$

$$b/b_w = 2,77 (w/w_{\max})^2 - 2,56 w/w_{\max} + 1,03, \quad R^2 = 0,97 \quad (4)$$



Rys. 1. Wyniki badań prędkości ultradźwięków: a) wytrzymałość ABK na ściskanie z uwzględnieniem klas gęstości; b) wytrzymałość ABK betonu wilgotnego - f_{Bw} i całkowicie suchego - f_B

Fig. 1. Results from P-waves velocity testing: a) compressive strength of AAC including density classes; b) AAC strength in wet concrete - f_{Bw} and totally dry concrete - f_B



Rys. 2. Wyniki badań prędkości ultradźwięków: a) wspólna krzywa $f_{Bw} - c_p$ wszystkich gęstości ABK i wszystkich wilgotności; b) równania współczynników krzywych różnej wilgotności ABK f_{Bw}

Fig. 2. Results from ultrasound velocity testing: a) common curve $f_{Bw} - c_p$ for all AAC densities and moisture levels; b) equations for curve coefficients at varying moisture content in AAC f_{Bw}

Tabela 1. Wartości współczynników oraz równań krzywych empirycznych
Table 1. Comparison of coefficients and equations of empirical curves

w/w_{\max}	Współczynniki krzywej			R^2	Równanie krzywej
	a	b	c		
0	$5,73 \times 10^{-6}$	$-1,46 \times 10^{-2}$	10,30	0,99	$f_{Bw} = 5,73 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,46 \cdot 10^{-2}c_p + 10,3$
0,1	$4,37 \times 10^{-6}$	$-1,02 \times 10^{-2}$	7,56	0,97	$f_{Bw} = 4,37 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,02 \cdot 10^{-2}c_p + 7,56$
0,23	$4,22 \times 10^{-6}$	$-9,19 \times 10^{-3}$	6,35	0,99	$f_{Bw} = 4,22 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 9,19 \cdot 10^{-3}c_p + 6,35$
0,33	$3,33 \times 10^{-6}$	$-6,21 \times 10^{-3}$	3,88	0,98	$f_{Bw} = 3,33 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 6,21 \cdot 10^{-3}c_p + 3,88$
0,67	$3,59 \times 10^{-6}$	$-7,75 \times 10^{-3}$	5,84	0,95	$f_{Bw} = 3,59 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 7,75 \cdot 10^{-3}c_p + 5,84$
1	$6,15 \times 10^{-6}$	$-1,72 \times 10^{-2}$	13,90	0,98	$f_{Bw} = 6,15 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,72 \cdot 10^{-2}c_p + 13,90$
Wspólna krzywa	$a_w = 5,33 \cdot 10^{-6}$	$b_w = -1,39 \cdot 10^{-2}$	$c_w = 10,90$	0,97	$f_{Bw} = 5,33 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,39 \cdot 10^{-2}c_p + 10,9$

$$c/c_w = 2,89 (w/w_{\max})^2 - 2,56 w/w_{\max} + 0,94, \quad R^2 = 0,98 \quad (5)$$

Obliczone współczynniki a, b i c należy wprowadzić do równania:

$$f_R = a(c_p)^2 + bc_p + c$$

gdy $1315 \text{ m/s} < c_p \leq 2379 \text{ m/s}$ (6)

określającego ogólną postać krzywej bazowej stosowanej do ABK.

Przykład skalowania krzywej ultradźwiękowej

Przedmiotem badań była ściana budynku wykonanego z elementów murowych z ABK poddanego oddziaływaniu środowiska przez kilkumiesięczny okres wiosenno-letni. Na potrzeby badań pobrano ze ściany 6 rdzeni o średnicy 50 mm i długości 120 mm. W każdym miejscu wykonano pomiary średniej wilgotności rdzeni metodą wagową. Dodatkowo określono gęstość pozorną ABK w stanie powietrzno-suchym ρ , a następnie wilgotność maksymalną w_{\max} . Wykonano badania niszczące, określając wytrzymałość na ściskanie f_c .

Na podstawie procedury opisanej w [4] obliczono wytrzymałość ABK w stanie wilgotnym f_{Bw} . W każdej pobranej próbce wyznaczono prędkość ultradźwięku c_p , stosując głowice eksponencjalne o częstotliwości 54 kHz. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 2.

W przedstawionej metodzie wyznaczono w każdym punkcie równanie krzywej korelacyjnej, a na tej podstawie obliczono wytrzymałość ABK w stanie wilgotnym $f_R = f_{Bw}$. Postępując zgodnie z wymaganiami normy [4], opracowane krzywe mogą być stosowane pod warunkiem, że zostaną wyskalowane. Stosuje się dwa warianty postępowania:

a) **wariant 1** – korelacja z wynikami badania odwiertów rdzeniowych; w celu określania korelacji $f-R$ należy wykonać co najmniej 18 pomiarów na próbkach rdzeniowych;

b) **wariant 2** – wzorcowanie na podstawie badania minimum dziewięciu odwiertów rdzeniowych do ograniczo-

Tabela 2. Właściwości próbek ABK i parametry krzywej korelacyjnej

Table 2. Properties of AAC specimens and parameters of correlation curve

ρ [kg/m ³]	w [%]	w_{max} [%] wg [1]	w/w _{max}	Wytrzymałość na ściskanie f_c [N/mm ²]	Prędkość ultradźwięku c_p [m/s]	Wytrzymałość w stanie wilgotnym		$\delta f =$ $f_{Bw} - f_R$	$f_{is,R}$
						f_{Bw} [N/mm ²] wg [1]	f_R [N/mm ²] wg [6]		
528	25	69,5	0,36	4,12	1544	2,75	2,23	0,52	1,35
589	47	62,0	0,76	3,11	1716	2,01	2,89	-0,88	2,74
536	24	68,5	0,35	3,89	1566	2,74	2,30	0,44	2,20
555	27	66,2	0,41	3,55	1412	2,48	1,82	0,66	1,90
524	26	70,0	0,37	3,22	1358	2,26	1,64	0,62	1,85
564	32	65,1	0,49	3,05	1325	2,09	1,65	0,44	1,84
Średnia						2,39	-	0,30	1,98
Odchylenie standardowe s						-	-	0,58	-

nego zakresu wytrzymałości, z wykorzystaniem znanej wyznaczonej korelacji.

W prezentowanym przykładzie dysponowano sześcioma próbkami rdzeniowymi. W związku z tym zastosowano pewną modyfikację wariantu 2, dostosowaną do specyfikacji ABK oraz mniejszej liczby próbek. Na wstępie w każdym punkcie obliczono różnicę wytrzymałości ABK na ściskanie uzyskaną w badaniach niszczących f_{Bw} i wyznaczoną z krzywej (7) ze współczynnikami obliczonymi wg [1, 5, 6]. Następnie określono średnią wartość różnicy $\delta f_{m(n)}$ z pomiarów zależności:

$$\delta f = f_{Bw} - f_R \quad (7)$$

gdzie:

f_{Bw} – wytrzymałość betonu na ściskanie określona na odwiertach w stanie wilgotnym;
 f_R – wytrzymałość na ściskanie obliczona z krzywych bazowych $f_R - c_p$.

Parametr przesunięcia Δf podstawowej krzywej bazowej obliczono w zależności od średniej wartości różnicy $\delta f_{m(n)}$ oraz współczynnika k_1 związanego z liczbą pomiarów, ze wzoru:

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 s = 0,30 - 1,87 \cdot 0,58 = -0,79 \quad (8)$$

gdzie:

$\delta f_{m(n)}$ – średnia wartość różnicy wytrzymałości na ściskanie wyznaczonej na odwiertach i z krzywej bazowej;

s – odchylenie standardowe różnicy wytrzymałości $\delta f_{m(n)}$;

k_1 – współczynnik przyjmowany wg tabeli 3.

Wartość współczynnika k_1 sześciu próbek przyjęto wg [1], w której podano statystyki funkcji OC z autokore-

Tabela 3. Współczynnik k_1 zależny od liczby par wyników wg PN-EN 13791:2008 [1, 6]

Table 3. Values of k_1 coefficient depending on the number of result pairs according to PN-EN 13791:2008 [1, 6]

n	3*	6*	9	10	11	12	13	14	≥ 15
k_1	2,67	1,87	1,67	1,62	1,58	1,55	1,52	1,50	1,48

* wartości wg publikacji [1]; niepodane w normie [6]

lacją [7]. Po obliczeniu parametru przesunięcia, równanie krzywej ma postać:

$$f_{is,R} = f_R + \Delta f = f_{is,R} = 5,33 \cdot 10^{-6} (c_p)^2 - 1,39 \cdot 10^{-2} c_p + 10,9 - 0,79 \quad (9)$$

Stosując zależność (9), obliczono wytrzymałość na ściskanie ABK (tabela 2), a następnie wyznaczono charakterystyczną wytrzymałość na ściskanie muru:

$$f_{k,is} = K f_{Bw}^{0,85} = 0,57 \cdot (1,98)^{0,85} = 1,34 \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

Stosując metodę MDT przedstawioną w [4], uzyskano charakterystyczną wytrzymałość na ściskanie 1,57 N/mm², natomiast wykorzystując metodę ultradźwiękową i procedurę skalowania krzywej wg [6] wytrzymałość była o 15% mniejsza (1,34 N/mm²). Wyskalowaną krzywą (9) można stosować w pozostałych analizowanych miejscach ściany bez konieczności wykonywania dodatkowych badań niszczących oraz wyznaczania wilgotności w, ale tylko w przypadku, gdy prędkość ultradźwięku spełnia warunek 1325 m/s < c_p ≤ 1716 m/s. Wyniki pomiarów prędkości ultradźwięków niespełnia-

jące warunku należy odrzucić lub wyskalować krzywą z większej liczby próbek.

Podsumowanie

Stosując metodę NDT, można wyznaczyć charakterystyczną wytrzymałość na ściskanie muru z ABK ze spoinami cienkowarstwowymi. Metodę skalowania krzywej wg normy PN-EN 13791:2008 [6] (wariant 2) można stosować tylko, gdy dysponuje się wynikami badań niszczących co najmniej dziewięciu rdzeni. Do przybliżonego skalowania wystarczająca może być już liczba par wyników $n \geq 3$ [2]. Przy sześciu próbkach można wyjątkowo zastosować zaproponowaną modyfikację procedury normowej. W przypadku ścian z ABK ze spoinami zwykłej grubości niezbędna jest znajomość wytrzymałości na ściskanie zaprawy f_m .

Literatura

- [1] Brunarski Lesław. 2009. *Podstawy matematyczne kształtowania kryteriów zgodności wytrzymałości materiałów*. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej. Warszawa.
- [2] Brunarski Lesław, Marek Dohojda. (2015). *Diagnostyka wytrzymałości betonu w konstrukcji*. Prace Naukowe ITB, Warszawa.
- [3] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński, Adam Piekarczyk. 2010. *Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali*. Tom I. Warszawa. Wydawnictwo PWN.
- [4] Jasiński Radosław. 2019. „Wyznaczanie charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie muru z ABK metodą MDT”. *Materiały Budowlane* 6 (562): 50 – 51. DOI: 10.15199/33.2019.06.04.
- [5] Jasiński Radosław, Łukasz Drobiec, Wojciech Mazur. 2019. „Validation of Selected Non-Destructive Methods for Determining the Compressive Strength of Masonry Units Made of Autoclaved Aerated Concrete”. *Materials*, Vol. 12, Issue 3, 389. <https://doi.org/10.3390/ma12030389>
- [6] PN-EN 13791:2009 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.
- [7] Taerwe L. 1987. „The influence of autocorrelation on OC-lines of compliance criteria for concrete strength”. *RILEM Materials and Structures*, 20: 418–427.

Przyjęto do druku: 13.05.2019 r.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

