

dr inż. Katarzyna Łaskawiec^{1)*}
 prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski²⁾

Wpływ karbonatyzacji na właściwości użytkowe autoklawizowanego betonu komórkowego

Problematyka trwałości w budownictwie dotyczy materiałów, elementów i całych obiektów. Pojęcia trwałości i odporności oraz metody ich szacowania nie zostały uzgodnione mimo trwającej dyskusji [1]. Trwałość materiałów budowlanych, w tym również autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), jest zagadnieniem bardzo ważnym z punktu widzenia bezpieczeństwa, ochrony cieplnej i ekonomiki budownictwa. Wiąże się z nią wiele zagadnień, które powinny być uwzględnione w technologii produkcji ABK oraz przy projektowaniu i wykonawstwie obiektów. Ze względu na masowość stosowania betonu komórkowego ocena jego trwałości jest szczególnie ważna [2].

Trwałość betonu kruszywowego była tematem wielu prac badawczych, niewiele jest natomiast danych, dotyczących charakterystyki betonu komórkowego jako funkcji jego wieku [3] (ABK jest stosowany w Polsce od lat pięćdziesiątych XX wieku). Zwraca się jednak uwagę, że beton komórkowy ma specyficzne właściwości, odbiegające pod wieloma względami od analogicznych właściwości betonu kruszywowego ze względu na porowatą strukturę, stosowanie autoklawizacji i wrażliwość na zmiany wilgotności i otoczenia [4].

Obecny stan normalizacji europejskiej dotyczącej badań karbonatyzacji obejmuje dwie normy z grupy norm *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań* (PN-EN 13295 [5] oraz PN-EN 14630 [6]), a także dwie normy z serii *Badania betonu stwardniałego* (PN-EN 12390-12 [7]

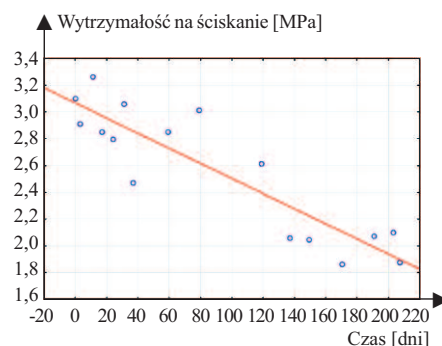
oraz PN-EN 12390-10 [8]). Wymienione normy są dokumentami porządkującymi w skali europejskiej zagadnienie badań odporności na karbonatyzację betonu kruszywowego, natomiast nie ma w nich powiązania wyników badań wg tych norm z klasami ekspozycji XC wg PN-EN 206. W perspektywie takie powiązanie będzie zapewne związane z pojęciem klas odporności (*exposure resistance classes* ERC), w tym klasy odporności na karbonatyzację (*resistance against corrosion induced by carbonation class* XRC), które wprowadziła nowa edycja Eurokodu EC2 (PN-EN 1992-1-1 [9]). Wymienione regulacje dotyczą jednak wyłącznie betonu kruszywowego i ochrony przed korozją zawartego w nim zbrojenia stalowego. Wiadomo, że także w normach PN-EN 771, związanych z elementami murowymi, konieczne jest wprowadzenie dodatkowych warunków związanych z trwałością. Obecnie dotyczy to jedynie badania mrozoodporności. W celu uzyskania miarodajnego wyniku należy zidentyfikować mechanizm i skutki wpływu karbonatyzacji na cechy ABK, ustalić właściwy sposób przechowywania próbek i wybrać odpowiednie powierzchnie pomiarowe, miarodajne do oceny betonu, czyli odpowiednio odwzorować warunki, w jakich znajduje się beton w konstrukcji. Jak wiadomo, w zależności od sposobu ekspozycji próbki, poszczególne jej powierzchnie narażone są w różnym stopniu na działanie zmiennych czynników atmosferycznych, co ma duży wpływ na przebieg karbonatyzacji.

Celem badań przedstawionych w artykule było poznanie mechanizmu i przebiegu karbonatyzacji autoklawizowanego betonu komórkowego w warunkach przyspieszonych i rozważenie inżynierskich aspektów praktycznych tego procesu.

Wpływ przyspieszonej karbonatyzacji na wytrzymałość w funkcji klasy gęstości

Badania miały na celu lepsze zrozumienie wpływu CO_2 na strukturę i właściwości betonu komórkowego. Pierwszy etap dotyczył badań ABK o gęstości $350 - 680 \text{ kg/m}^3$, prowadzonych na serii próbek sześciennych o boku 100 mm . Próbki podzielono na dwie partie – pierwsza (próbki ABK o gęstości 500 i 680) została poddana karbonatyzacji w warunkach: $1\% \text{ CO}_2$; $60\% \text{ RH}$, $T = 20^\circ\text{C}$ przez 180 dni, a druga partia (próbki ABK o gęstości 350 i 400) w warunkach: $1\% \text{ CO}_2$; $60\% \text{ RH}$, $T = 20^\circ\text{C}$ przez 56 dni.

Wyniki badań wskazują, że wytrzymałość na ściskanie ABK zmniejsza się nieznacznie w wyniku karbonatyzacji. Średnia wytrzymałość na ściskanie wszystkich próbek testowych i kontrolnych po 56 dniach przechowywania w środowisku o stężeniu $\text{CO}_2 = 1\%$ okazała się zbliżona, a po 80 dniach ekspozycji w takim samym środowisku (stężenie $\text{CO}_2 = 1\%$), średnia wytrzymałość na ściskanie była porównywalna (rysunki 1 – 3). Model wytrzymałości na ściskanie ABK, w zależności od jego gęstości i czasu ekspozycji w środowisku o stężeniu $\text{CO}_2 1\%$, został opracowany



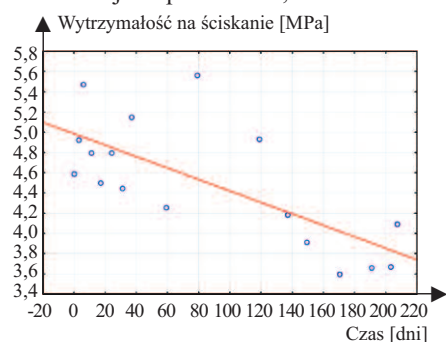
Rys. 1. Zależność wytrzymałości na ściskanie ABK o gęstości 500 kg/m^3 od czasu karbonatyzacji w warunkach przyspieszonych

¹⁾ Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

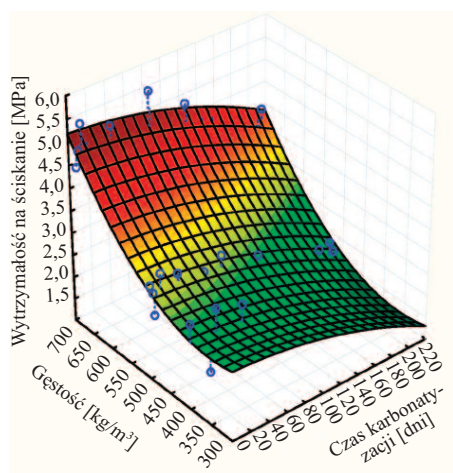
²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

^{*)} Adres do korespondencji: katarzyna.laskawiec@icimb.lukasiewicz.gov.pl

przy użyciu oprogramowania STATISTICA 10 i wykazuje współczynnik determinacji na poziomie 0,95.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie ABK o gęstości 680 kg/m³ od czasu karbonatyzacji w warunkach przyspieszonych



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie ABK w zależności od gęstości i czasu karbonatyzacji w warunkach przyspieszonych

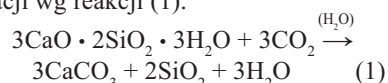
Wpływ przyspieszonej karbonatyzacji na skład fazowy betonów komórkowych

W celu określenia przyczyn zmniejszenia wytrzymałości, w wyniku procesu karbonatyzacji, przeprowadzono badania XRD, które wykazały, że skład fazowy wszystkich badanych próbek jest podobny pod względem jakości i typowy dla betonu komórkowego. W próbkach stwierdzono obecność tobermorytu, C-S-H, kalcytu oraz niezmiennego kwarcu. Z danych przedstawionych w tabeli 1 wynika, że próbki ABK o gęstości 350 i 400 kg/m³ charakteryzują się wyższym stopniem przemiany kwarcu w tobermoryt oraz wyższym poziomem kalcytu niż próbki o gęstości 680 i 500 kg/m³.

Tabela 1. Zawartość faz krystalicznych w próbkach [% wagowy] – wartości początkowe przed karbonatyzacją

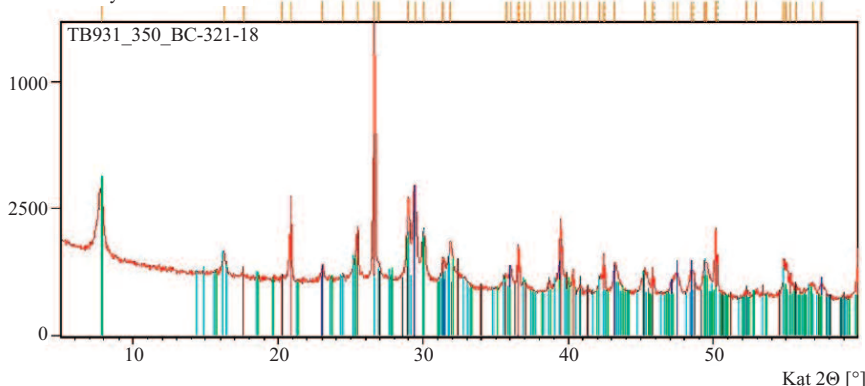
Faza krystaliczna	Gęstość [kg/m³]			
	680	500	400	350
Tobermoryt	31,8±0,3	32,1±0,3	50,3±0,3	49,3±0,3
Kwarc	55,9±0,3	54,6±0,3	32,5±0,2	32,9±0,2
Kalcyt	3,19±0,15	4,27±0,12	7,27±0,14	8,05±0,14
Anhydryt	2,89±0,10	2,62±0,11	3,69±0,12	4,17±0,13
Katoit	1,70±0,12	2,90±0,12	3,34±0,14	2,95±0,14
Na-Ca skałen	2,3±0,2	1,9±0,2	1,45±0,18	1,07±0,19
K-skałen	2,32±0,17	1,63±0,13	1,38±0,18	1,60±0,17

Rysunek 4 przedstawia dyfraktogram wybranej próbki ABK 350, reprezentatywnej dla wszystkich próbek badawczych (56 dni przechowywania w komorze karbonatyzacyjnej); skład fazowy ABK 400 nie został przedstawiony, ponieważ pozostałe wyniki próbek betonu komórkowego o takiej gęstości nie miały istotnego wpływu na dane zaprezentowane na rysunku 4. Jak wykazano, w próbkach ABK klasy gęstości 350 i 400, uwodniony krzemian wapnia, w tym tobermoryt, podlega karbonatyzacji wg reakcji (1).



Stwierdzono, że zawartość kalcytu w próbkach ABK zwiększała się z upływem czasu. Różnica w ilości tobermorytu może wynikać z faktu, że pod wpływem dwutlenku węgla tobermoryt częściowo ulega rozkładowi do węglanu wapnia (kalcytu) i żelu krzemionkowego. Tobermoryt był obecny we wszystkich badanych próbkach.

Intensywność



Rys. 4. Badania XRD dotyczące ABK 350

Po 180 dniach przechowywania w komorze karbonatyzacyjnej tobermoryt zawarty w próbkach ABK uległ całkowitemu rozkładowi do węglanu wapnia (kalcytu) i żelu krzemionkowego (tabela 2). W tym przypadku wykazano obecność innej przejściowej fazy węglanu wapnia, a mianowicie – waterytu, który jeszcze nie został przekształcony w kalcyt.

Tabela 2. Zawartość faz krystalicznych w próbkach po 180 dniach przechowywania w komorze karbonatyzacyjnej [% wagowy]

Faza krystaliczna	Gęstość [kg/m³]	
	680	500
Tobermoryt	–	–
Kwarc	62,6±0,7	58,1±0,3
Kalcyt	23,5±0,5	18,57±0,12
Aragonit	2,4±0,2	0,80±0,16
Wateryt	6,1±0,3	17,09±0,18
Anhydryt	3,57±0,14	2,47±0,07
Na-Ca skałen	ok. 0,2	1,4±0,3
K-skałen	1,7±0,2	1,59±0,15

Wpływ skarbonatyzowania na właściwości użytkowe ABK o gęstości 500

Badania miały na celu ocenę wpływu karbonatyzacji na właściwości ABK 500, a przeprowadzono je na trzech próbkach o wymiarach 240 x 240 x 490 mm. Próbkę były karbonatyzowane przez 56 dni w warunkach: 1% CO₂, 60%RH; T = 20°C. Wykonano badania próbek ABK zarówno przed, jak i po karbonatyzacji zgodnie z PN-EN 771-4 (tabela 3).

W badaniu wykazano, że dwie podstawowe właściwości ABK po karbonatyzacji w komorze (gęstość i wytrzymałość na ściskanie) są zbliżone do właściwości ABK referencyjnego (tabela 3). W żadnej z próbek badawczych po kar-

Tabela 3. Właściwości ABK o gęstości 500 kg/m³

Właściwości	Wartość	
	początkowa	po 56 dniach w komorze karbonatyzacyjnej
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	3,0±0,1	2,8±0,1
Skurcz referencyjny 6 – 30% [mm/m]	0,03±0,01	0,08 ±0,01
Skurcz całkowity [mm/m]	0,19±0,01	0,29 ±0,01
Współczynnik λ [W/m·K]	0,1281±0,001	0,1296±0,001
Mrozoodporność (trwałość)		
Zmniejszenie wytrzymałości [%]	6±1	6±1
Zmniejszenie masy [%]	0	0

bonatyzacji nie zaobserwowano pęknięć. Tabela 3 przedstawia średnie wartości właściwości fizycznych i termicznych ABK przed i po karbonatyzacji.

Karbonatyzacja próbek ABK, po 56 dniach w komorze karbonatyzacyjnej, zwiększyła skurcz podczas suszenia. Norma PN-EN 680, *Oznaczanie skurczu przy wysychaniu autoklawizowanego betonu komórkowego*, określa metodę badań, ale nie podaje żadnych wymagań. W innej normie, PN-EN 771-4, wartość skurczu nie jest podana, a Eurokod 1 określa dopuszczalny skurcz na poziomie 0,4 mm/m. Zgodnie z Eurokodem 1, **skurcz ABK po 56 dniach karbonatyzacji nie zagraża konstrukcji**.

Po okresie przechowywania w komorze karbonatyzacyjnej, właściwości badanych i referencyjnych próbek ABK (przewodność cieplna, odporność na zamrażanie-rozmrażanie) okazały się zbliżone. W żadnej z próbek po kolejnych cyklach zamrażania-rozmrażania nie zaobserwowano utraty masy ani zmian w wyglądzie ABK.

Podsumowanie

Modelowe badania karbonatyzacji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) prowadzono w warunkach laboratoryjnych przez 200 dni, przy podwyższonym stężeniu CO₂ 1%, wilgotności względnej 60% i temperaturze 20°C. Parametry te odpowiadają założeniom dotyczącym betonu zwykłego, jednak w analizowanym przypadku wydłużono czas ekspozycji z 56 do 200 dni. Dla porównania, w badaniach

EAACA dotyczących ABK stosowano łagodniejsze warunki: 0,5% CO₂, 20°C oraz 14 dni ekspozycji. Należy zaznaczyć, że warunki stosowane w badaniach EAACA odpowiadają kilkudziesięcioletniej ekspozycji nieosłoniętych elementów murowych na działanie CO₂ w warunkach naturalnych.

W warunkach komory karbonatyzacyjnej ABK podlega intensywniejszemu oddziaływaniu dwutlenku węgla niż w warunkach naturalnych, gdzie stężenie CO₂ w powietrzu atmosferycznym wynosi ok. 0,03%. Badania w podwyższonym stężeniu CO₂ podjęto m.in. w kontekście rozważenia możliwości wykorzystania efektu sekwestracji dwutlenku węgla w matrycy mineralnej, w warunkach wytwarzania ABK.

Dodatkowo, czynniki środowiskowe, takie jak opady, zmienna wilgotność i temperatura spowalniają proces karbonatyzacji w warunkach rzeczywistych. W kontekście praktycznym należy uwzględnić także fakt, że elementy z ABK wbudowane w konstrukcje są zazwyczaj zabezpieczone warstwą tynku, który znacznie ogranicza dostęp CO₂ i wilgoci, pełniąc rolę bariery dyfuzyjnej. Tym samym tempo karbonatyzacji w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych ulega istotnemu zmniejszeniu.

Karbonatyzacja postępuje od powierzchni elementu, co oznacza, że rdzeń bloczka pozostaje nieskarbonatyzowany, a wytrzymałość elementu nie ulega znacznemu osłabieniu. Analizy mineralogiczne i petrograficzne wykazały korelację między wzrostem zawar-

tości kalcytu a zmniejszeniem ilości tobermorytu, co wynika z powolnego rozkładu krzemianów wapnia na skutek reakcji z CO₂ i powstawania węglanu wapnia oraz żelu krzemionkowego.

Po 80 dniach ekspozycji na CO₂ o stężeniu 1% średnia wytrzymałość na ściskanie próbek ABK nie wykazała istotnej różnicy względem próbek referencyjnych. Spadek wytrzymałości w dłuższym okresie intensywnej karbonatyzacji można przypisać dużemu stężeniu CO₂, uznając, że w warunkach naturalnych taki efekt nie nastąpi. Przedstawione w artykule wyniki potwierdzają, że karbonatyzacja nie stanowi zagrożenia dla trwałości autoklawizowanego betonu komórkowego w zastosowaniach konstrukcyjnych.

Literatura

- [1] Woyciechowski P. Influence of mineral additives on concrete carbonation, *Brittle Matrix Composites 10*, ed. A. M. Brandt, J. Olek, M. A. Glinicki, C. K. Y. Leung, Woodhead Publishing Ltd., Institute of Fundamental Technology Research PAS, s. 115-124.
- [2] Małolepszy J, Łaskawiec K. The today and tomorrow of autoclaved aerated concrete. *Cement Lime Concrete*. 2017; 5: 358 – 370.
- [3] Matsushita F, Aono Y, Shibata S. Microstructure Changes in Autoclaved Aerated Concrete during Carbonation under Working and Accelerated Conditions *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004; Vol. 2, No. 1: 121 – 129.
- [4] Matsushita F, Aono Y, Shibata S. Calcium silicate structure and carbonation shrinkage of a tobermorite-based material *Cement and Concrete Research*. 2004; 34: 1251 – 1257.
- [5] PN-EN 13295:2005 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie odporności na karbonatyzację.
- [6] PN-EN 14630:2007 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie głębokości karbonatyzacji w stwardniałym betonie metodą fenoloftaleinową.
- [7] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu – Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji.
- [8] PN-EN 12390-10:2019-02 Badania betonu – Część 10: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację w warunkach stężeń dwutlenku węgla na poziomie atmosferycznym.
- [9] PN-EN 1992-1-1:2024-05 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne oraz reguły dla budynków, mostów i konstrukcji inżynierskich.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

www.s-p-b.pl

