

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]

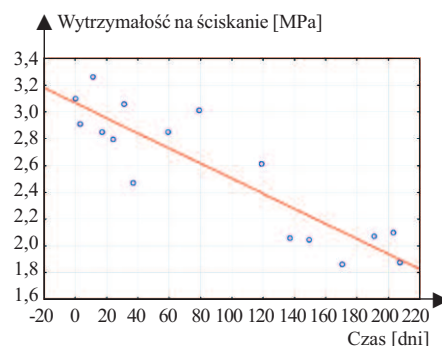
oraz PN-EN 12390-10 [8]). Wymienione normy są dokumentami porządkującymi w skali europejskiej zagadnienie badań odporności na karbonatyzację betonu kruszywowego, natomiast nie ma w nich powiązania wyników badań wg tych norm z klasami ekspozycji XC wg PN-EN 206. W perspektywie takie powiązanie będzie 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 EN 771, związanych z elementami mурowymi, 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 CO₂ na strukturę i właściwości betonu komórkowego. Pierwszy etap dotyczył badań ABK o gęstości 350 – 680 kg/m³, 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% CO₂; 60% RH, T = 20°C przez 180 dni, a druga partia (próbki ABK o gęstości 350 i 400) w warunkach: 1% CO₂; 60% RH, T = 20°C przez 56 dni. Drugi etap testów skupił się na wpływie karbonatyzacji w atmosferze CO₂ na właściwości ABK 500, w tym na wytrzymałość autoklawizowanego betonu komórkowego w czasie (rysunki 1 ÷ 3).

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 CO₂ = 1% okazała się zbliżona, a po 120 dniach ekspozycji w takim samym środowisku (stężenie CO₂ = 1%), średnia wytrzymałość na ściskanie próbek testowych

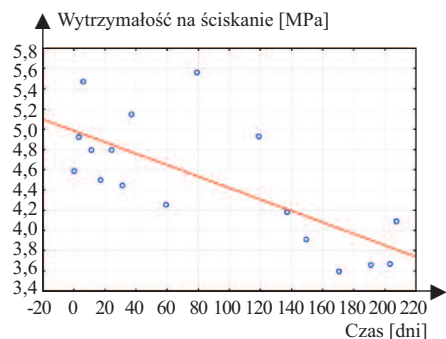


Rys. 1. Zależność wytrzymałości na ściskanie ABK o gęstości 500 kg/m³ od czasu karbonatyzacji w warunkach przyspieszonych

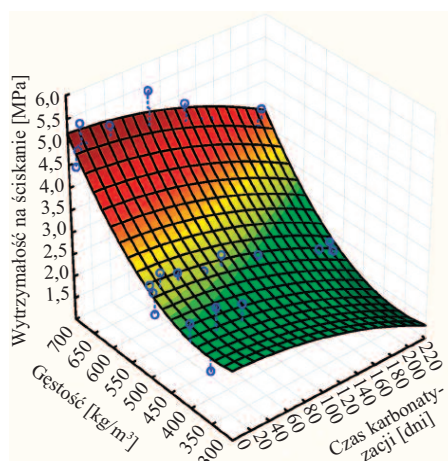
¹⁾ Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

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



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

ABK 500 i 680 kg/m³ była mniejsza o ok. 30 – 35% w porównaniu z próbkami kontrolnymi (rysunki 1 i 2). Model wytrzymałości na ściskanie ABK, w zależności od jego gęstości i czasu ekspozycji w środowisku o stężeniu CO₂ 1%, został opracowany przy użyciu oprogramowania STATISTICA 10 i wykazuje współczynnik determinacji na poziomie 0,95.

Wpływ przyspieszonej karbonatyzacji na skład fazowy betonów komórkowych

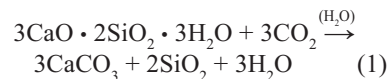
W celu określenia przyczyn zmniejszenia wytrzymałości, w wyniku procesu karbonatyzacji, przeprowadzono badania XRD. Próbkę ABK została poddana rentgenowskiej analizie przy użyciu dyfraktometru Bruker-AXS D8 DAVINCI. Analiza ilościowa faz Rietvela została wykonana za pomocą oprogramowania TOPAS v5, bazującego na strukturach krystalicznych.

Badania XRD wykazały, że skład fazowy wszystkich badanych próbek jest podobny pod względem jakości i typu 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 skaleń	2,3±0,2	1,9±0,2	1,45±0,18	1,07±0,19
K-skaleń	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.

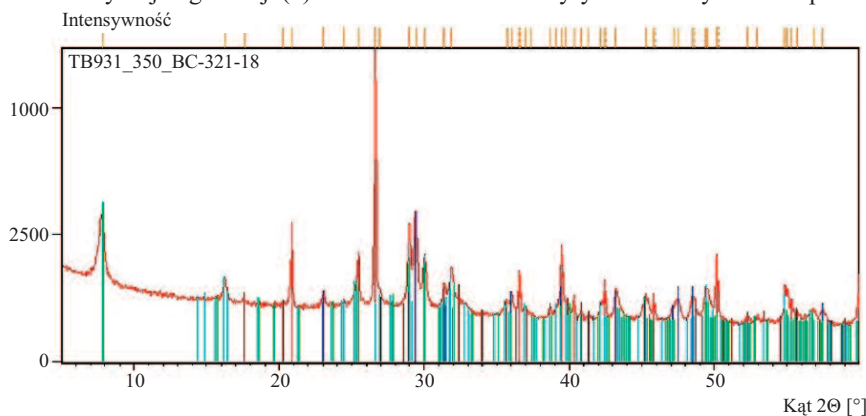
Po 180 dniach przechowywania w komorze karbonatyzacyjnej tobermoryt zawarty w próbkach ABK uległ całkowitemu rozkładowi do węglanu wapnia (kalcytu) i żelu krzemionkowego (tabela 2). W tym przypadku wykazano obecność innej przejściowej fazy węglanu wapnia, a mianowicie – waterytu, który jeszcze nie został 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
Kwarc	–	–
Kalcyt	62,6±0,7	58,1±0,3
Aragonit	23,5±0,5	18,57±0,12
Wateryt	2,4±0,2	0,80±0,16
Anhydryt	6,1±0,3	17,09±0,18
Na-Ca skaleń	3,57±0,14	2,47±0,07
K-skaleń	ok. 0,2	1,4±0,3
Kwarc	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



Rys. 4. Badania XRD dotyczące ABK 350

56 dni w warunkach: 1% CO₂, 60%RH; T = 20°C. Wykonano następujące badania próbek ABK zarówno przed, jak i po karbonatyzacji:

- **gęstość** – zgodnie z normą PN-EN 772-13:2001 *Metody badań elementów murowych – Część 13: Określenie gęstości netto i gęstości brutto elementów murowych w stanie suchym* (z wyjątkiem kamienia naturalnego);

- **wytrzymałość na ściskanie** – zgodnie z PN-EN 772-1+A1:2015-10 *Metody badań elementów murowych – Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie*;

- **skurcz** – zgodnie z normą PN-EN 680:2008 *Oznaczanie skurczu przy wysychaniu autoklawizowanego betonu komórkowego*;

- **odporność na zamrażanie-rozmrażanie** – zgodnie z PN-EN 15304:2010 *Oznaczanie odporności na zamrażanie-rozmrażanie autoklawizowanego betonu komórkowego*;

- **współczynnik przewodzenia ciepła** – zgodnie z PN-ISO 8301:1998/A1:2018-04 *Izolacja cieplna – Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym – Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego*.

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 karbonatyzacji 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 EN 680, *Oznaczanie skurczu przy wysychaniu autoklawizowanego betonu komórkowego*, określa metodę badań, ale nie podaje żadnych wymagań. W innej normie, 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**.

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

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

1. Testy mineralogiczne i petrograficzne nie dostarczyły jednoznacznego wyjaśnienia spadku wytrzymałości na ściskanie, ale ujawniły pewną zależność między wytrzymałością na ściskanie a zwiększeniem zawartości kalcytu kosztem tobermorytu. Przypisuje się to powolnemu rozkładowi krzemianu wapnia w wyniku reakcji atmosferycznych z dwutlenkiem węgla, co prowadzi do tworzenia węgla wapnia i żelu krzemionkowego.

2. Po 120 dniach narażenia na CO₂ = 1%, średnia wytrzymałość na ściskanie próbek testowych ABK okazała się o 30 – 35% mniejsza w porównaniu z próbkami kontrolnymi.

3. W komorze karbonatyzacyjnej ABK jest w większym stopniu narażony na intensywne działanie dwutlenku węgla niż w przypadku ABK w konstrukcji:

- stężenie CO₂ w powietrzu wynosi ok. 0,03%, podczas gdy wewnątrz komory ok. 1%;

- podczas budowy powierzchnie ABK są chronione przez zaprawę, natomiast wewnątrz komory są narażone na działanie CO₂.

Wyniki badań ABK w komorze karbonatyzacyjnej pokazują, że karbonatyzacja nie zagraża trwałości tego betonu w konstrukcjach.

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

