
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 12

ISSN 1899-3230

Rok VI

Warszawa–Opole 2013

MARTA SKORNIIEWSKA*

MARIAN ABRAMOWICZ**

GENOWEFA ZAPOTOCZNA-SYTEK***

Domieszki chemiczne a procesy fizykochemiczne zachodzące przy wytwarzaniu autoklawizowanego betonu komórkowego

Słowa kluczowe: domieszki chemiczne, autoklawizowany beton komórkowy (ABK), tobermoryt, C-S-H, kompatybilność w układzie cement – domieszka.

W artykule przedstawiono możliwość zastosowania wybranych domieszek chemicznych w technologii piaskowej autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) oraz procesy fizykochemiczne zachodzące w ABK przy ich stosowaniu. Sprawdzono kompatybilność w układzie cement – domieszka, wpływ wybranych domieszek na hydratację cementu oraz na pozostałe składniki mieszanki ABK, tj. czas i temperaturę gaszenia wapna oraz szybkość wydzielania wodoru z proszku Al. Określono skład fazowy ABK przed i po procesie wysokotemperaturowej obróbki hydrotermalnej w autoklawach (XRD, DTA/TG, SEM). Przedstawiono parametry użytkowe ABK z domieszkami (gęstość, wytrzymałość na ściskanie, współczynnik przewodzenia ciepła). Wyniki badań potwierdziły korzystny wpływ domieszek na procesy fizykochemiczne, a tym samym i właściwości użytkowe ABK.

1. Wprowadzenie

Postęp w technologii materiałów budowlanych, który zaznacza się od kilkunastu lat, jest w dużej mierze spowodowany wprowadzaniem i udoskonalaniem coraz to nowych grup domieszek chemicznych. Z ich zastosowaniem wiąże się pokonywanie barier technologicznych, zwiększanie zakresu stosowania betonów, podnoszenie ich jakości, długoterminowej trwałości, zmniejszenie praco-

* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie.

** Prof. dr hab. inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie.

*** Prof. ICiMB dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie.

chłonności oraz rozwijanie nowych koncepcji i odpowiednio nowych materiałów na spoiwach cementowych. Rozwój domieszek i odpowiednio technologii betonu wychodzi naprzeciw współczesnym wymaganiom budownictwa. Każda generacja domieszek zwiększa efektywność ich stosowania, nie eliminuje jednak problemów związanych z optymalnym ich wykorzystaniem.

Mając na względzie uzyskiwanie wysokich parametrów betonów kruszywowych z zastosowaniem domieszek, podejmowane są również prace nad wykorzystaniem domieszek do wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK). W publikowanych artykułach temat ten podejmowany jest bardzo ogólnie, w przeciwieństwie do prac traktujących o stosowaniu domieszek w betonach kruszywowych i zaprawach. Odmienność procesów wytwarzania ABK w stosunku do wytwarzania betonu kruszywowego wskazuje, że dobór domieszek podwyższających wytrzymałość ABK oraz innych parametrów użytkowych jest zagadnieniem bardziej złożonym niż to ma miejsce w technologiach betonu kruszywowego.

W niniejszym artykule przedstawiono procesy fizykochemiczne zachodzące przy wytwarzaniu autoklawizowanego betonu komórkowego z zastosowaniem wybranych domieszek chemicznych. Przeprowadzono badania ABK przed i po procesie obróbki hydrotermalnej w autoklawach, bowiem domieszki będą odmiennie działać na przebieg procesu fizykochemicznego w okresie przygotowywania i wyrastania mieszanki betonowej w stosunku do procesu przebiegającego w autoklawach w warunkach wysokotemperaturowej obróbki hydrotermalnej. W przypadku pierwszym będziemy mieć do czynienia ze zjawiskiem zmian właściwości reologicznych mieszanki, ale również z różną szybkością wydzielania się wodoru, tworzenia mikrostruktury, obejmującej powstawanie portlandytu, fazy C-S-H, uwodnionych glinianów i siarczano-glinianów wapnia. Natomiast w procesie autoklawizacji mamy do czynienia z tworzeniem trwałej mikrostruktury i modyfikacją morfologii takich składników, jak faza C-S-H oraz tobermoryt $(\text{CaO})_5 \cdot (\text{SiO}_2)_6 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$ i ewentualnie powstawania nowych faz tworzących się z grupami funkcyjnymi domieszek chemicznych.

Wyniki tych badań stanowią wybrane ważniejsze zagadnienia, będące częścią zrealizowanego projektu badawczego prowadzonego w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Centrum Badań Betonów CEBET. Projekt ten obejmował szeroki zakres prac:

1. Badanie wpływu domieszek na proces hydratacji składników mieszanki betonowej autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) i proces gazowania proszku Al w zmiennych warunkach temperaturowych (20°C i 70–90°C).
2. Zaprojektowanie składów mieszanki betonowej ABK. Analiza reologii, ustalenie możliwości redukcji ilości wody i spoiwa w mieszance betonowej.
3. Opracowanie wstępnych wytycznych prowadzenia prób technologicznych wytwarzania ABK z domieszkami w warunkach doświadczalnych.

4. Próby laboratoryjne wykonania ABK z domieszkami:

- wykonanie ABK według różnych wariantów recepturowych (przewaga w recepcie cementu, przewaga w recepcie wapna, równowaga wapna i cementu w recepcie);
- monitoring i określenie parametrów technologicznych i właściwości reologicznych mas zarobowych ABK podczas procesu wyrastania i wiązania;
- określenie składu fazowego powstających produktów hydratacji w warunkach wyrastania i dojrzewania masy betonowej (XRD);
- określenie mikrostruktury i składu fazowego betonu komórkowego po procesie autoklawizacji (XRD, kompleksowa analiza termiczna, skaningowa mikroskopia elektronowa);
- określenie właściwości użytkowych betonu komórkowego.

2. Wpływ domieszek na proces hydratacji składników mieszanki ABK

Próby wytwarzania ABK prowadzono według technologii SW [1]. W technologii tej wapno palone i cement, stanowiące spoiwo betonu komórkowego, stosowane są do produkcji bez dodatkowej obróbki (domielania). Jako kruszywo wykorzystywany jest szlam piaskowy, uzyskany przez wspólny przemiał piasku z wodą w młynie kulowo-rurowym. W skład mieszaniny surowcowej wchodzi dodatkowo środek porotwórczy, woda korekcyjna oraz środek powierzchniowo czynny.

Do badań zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R pochodzący od różnych producentów, tj. cement I – CEM I 42,5 R producent I; cement II – CEM I 42,5 R producent II; cement III – CEM I 42,5 R producent III. W tabeli 1 przedstawiono stosowane w trakcie badań domieszki. Do badań zastosowano domieszki upłynniające nowej generacji, które wytypowane zostały na podstawie analizy krajowego rynku domieszek oraz wyników badań dostępnych w literaturze [2–5].

T a b e l a 1

Stosowane domieszki

Oznaczenie domieszki	Baza chemiczna/podstawowe informacje	Dozowanie [% masy cementu]
A	znaczna ilość grup sulfonowych	–
B	superplastyfikator na bazie eteru polikarboksylianowego	0,2–2,5
C	superplastyfikator 3 generacji na bazie eteru polikarboksylianowego z długimi łańcuchami bocznymi	0,1–1,1

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

2.1. Badanie wpływu domieszek na proces hydratacji cementu

Badając wpływ domieszek upłynniających na proces hydratacji cementu określono jednocześnie kompatybilność w układzie cement – domieszka, czyli zdolność do utrzymywania efektu upłynnienia w czasie [6]. Kompatybilność domieszki z cementem uwarunkowana jest z jednej strony składem chemicznym, masą i strukturą cząsteczki superplastyfikatora oraz koncentracją polimeru w objętości domieszki, a z drugiej – rodzajem, składem chemicznym i mineralnym oraz rozdrobnieniem cementu [7]. Dlatego dobór kompatybilnej z zastosowanym cementem domieszki i jej dawki, która zapewniłaby najlepszy efekt upłynnienia mieszanki, wymaga przeprowadzenia porównawczych badań efektów upłynnienia. Problem kompatybilności może być też rozwiązywany za pomocą kalorymetrii, ponieważ niezależnie od mechanizmu działania domieszek wszystkie one wpływają na zmianę wskaźnika szybkości i stopnia hydratacji [7].

Czas wiązania i wodożądność

Badając właściwości fizyczne cementów, tj. plastyczność, wodożądność, czas wiązania, sprawdzano jak dodatek domieszki zmieni te właściwości [8]. Na podstawie otrzymanych wyników określono, która z zastosowanych domieszek okaże się najbardziej efektywna, czyli jak zmieni w/s (w – woda, s – składniki suche) przy stałych właściwościach reologicznych.

Badania prowadzone były przy założeniu stałej konsystencji zaczynu.

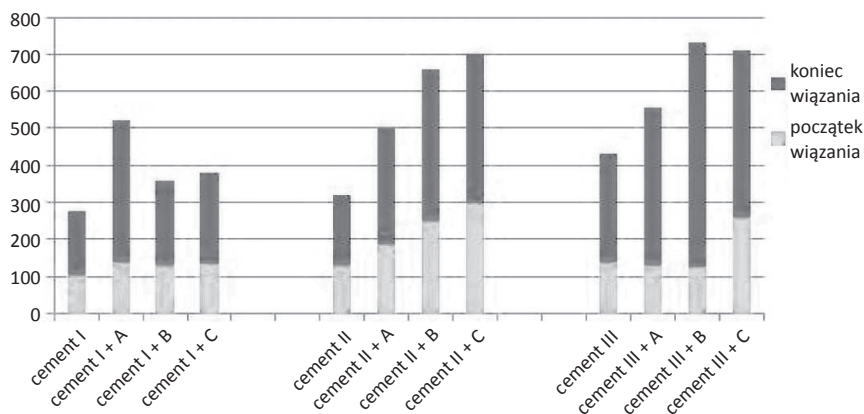
T a b e l a 2

Właściwa ilość wody i czas wiązania zaczynów cementowych

Rodzaj cementu	Oznaczenie cementu	Rodzaj domieszki	Ilość użytej domieszki	Wodożądność	w/s
			[%]	[%]	
CEM I 42,5 R Producent I	cement I	bez domieszki	–	27,4	0,27
		A	2,0	24,4	0,24
		B	0,8	22,0	0,22
		C	0,8	20,4	0,20
CEM I 42,5 R Producent II	cement II	bez domieszki	–	27,8	0,28
		A	2,5	24,4	0,24
		B	1,0	22,0	0,22
		C	0,8	21,6	0,22
CEM I 42,5 R Producent III	cement III	bez domieszki	–	27,8	0,28
		A	2,0	24,4	0,24
		B	1,5	22,4	0,22
		C	1,0	21,8	0,22

Ź r ó ł o: Opracowanie własne.

Wyniki wskazują, że wodozadność zaczynu z domieszkami upłynniającymi zmniejszyła się o ok. 12–26%. W przypadku cementu I najsilniej działa domieszka C, natomiast w odniesieniu do cementów II i III domieszki B, C. Oznaczono również czasy wiązania poszczególnych mieszanek. Domieszki upłynniające wydłużały początek i koniec wiązania.



Źródło: Opracowanie własne.

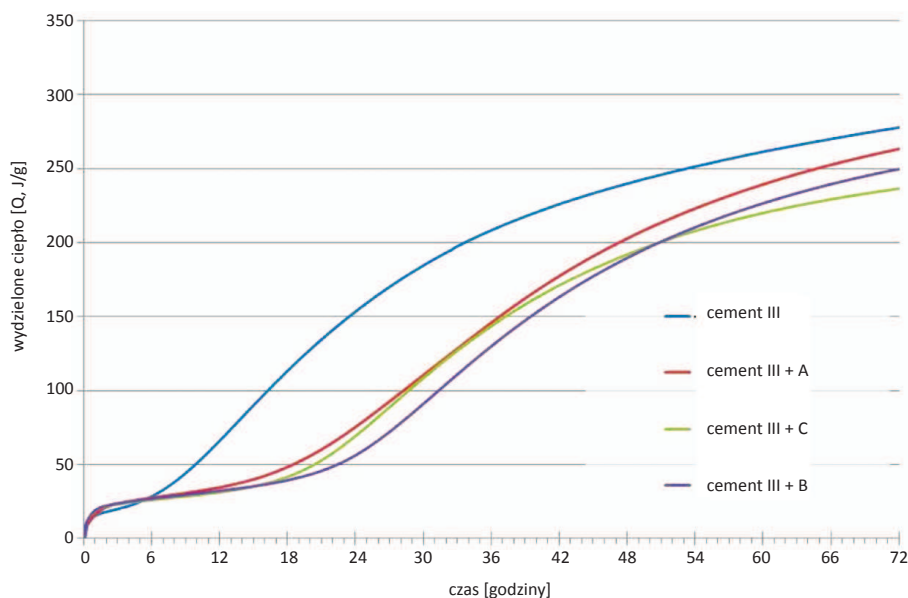
Ryc. 1. Wpływ domieszek na czasy wiązania cementów

Badania wykazały (ryc. 1), że w przypadku cementu I najbardziej wydłużała czas wiązania (początek i koniec) domieszka A. W odniesieniu do cementu II czasy wiązania wydłużały najbardziej domieszki C i B. W przypadku cementu III początek wiązania wydłużała najbardziej domieszka C, a koniec wiązania domieszka B. Analiza świadczy o tym, że najsilniejszy wpływ na hydratację cementów miały domieszki B i C.

Wpływ domieszek na kinetykę wydzielania ciepła hydratacji

Procesowi wiązania i twardnienia towarzyszy wzrost temperatury, którego przyczyną jest wydzielanie ciepła w procesie hydratacji spoiwa. Do oceny postępu reakcji cementu z wodą służą badania kalorymetryczne, które pozwalają na śledzenie hydratacji w sposób ciągły.

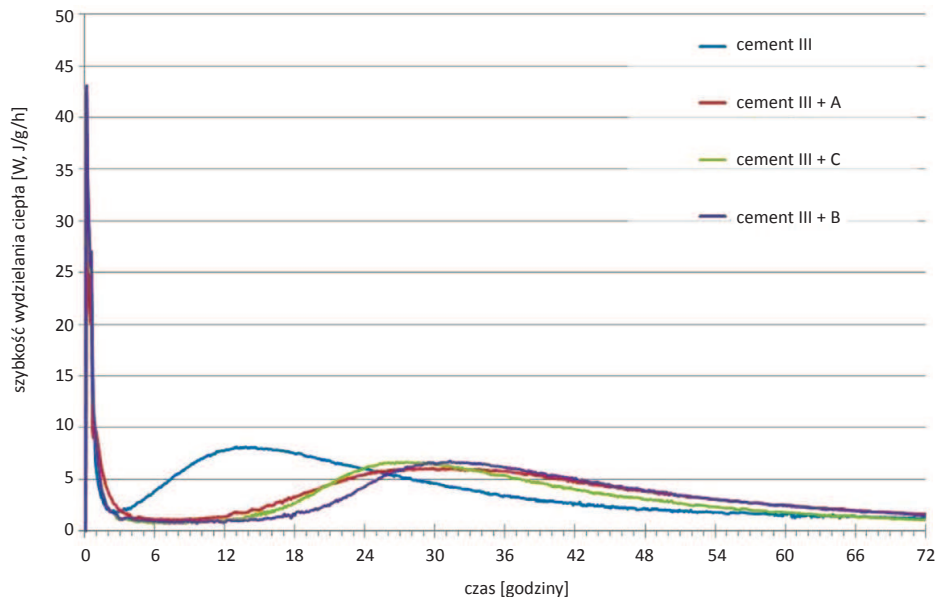
Badanie ciepła hydratacji wykonano dla cementu III z domieszkami A, B, C. Pomiary przeprowadzono w mikrokalorymetrze po 12, 24, 36, 41, 48 i 72 godzinach przy różnej ilości dodawanej domieszki oraz zmiennym w/c. Sprawdzone ilość wydzielonego ciepła hydratacji (ryc. 2) oraz szybkość wydzielania ciepła hydratacji (ryc. 3).



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Wydzielone ciepło hydratacji

Dodatek domieszek A, B, C (domieszek upłynniających) zmniejsza ilość wydzielnego ciepła hydratacji (ryc. 2).



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 3. Szybkość wydzielenia ciepła hydratacji

Zastosowane domieszki wpływają również na szybkość wydzielenia ciepła hydratacji. Domieszki z grupy upłynniaczy, tj. A, B, C, w początkowym etapie

wpływają na zahamowanie procesu hydratacji (ryc. 3). Może być to związane z mechanizmem działania tych domieszek, w tym przypadku mechanizmem sterycznym, który sprzyja utrzymywaniu płynnej konsystencji domieszki – wydłuża czas wiązania. Po upływie ok. 18 h następuje okres przyspieszenia reakcji, a po ok. 48 h szybkość hydratacji jest podobna jak w przypadku cementu bez dodatku domieszek.

2.2. Wpływ domieszek na reaktywność wapna

Reaktywność wapna analizowano metodą wzorcową [9]. Badano czas i temperaturę gaszenia wapna oraz czas, po którym temperatura gaszenia wapna wyniesie 60°C (tab. 3). W trakcie badania do wody dodawano domieszki w ilości [%] określonej w poprzednich badaniach. Ilość domieszki obliczono w stosunku do masy wapna.

Tabela 3

Czas i temperatura gaszenia wapna

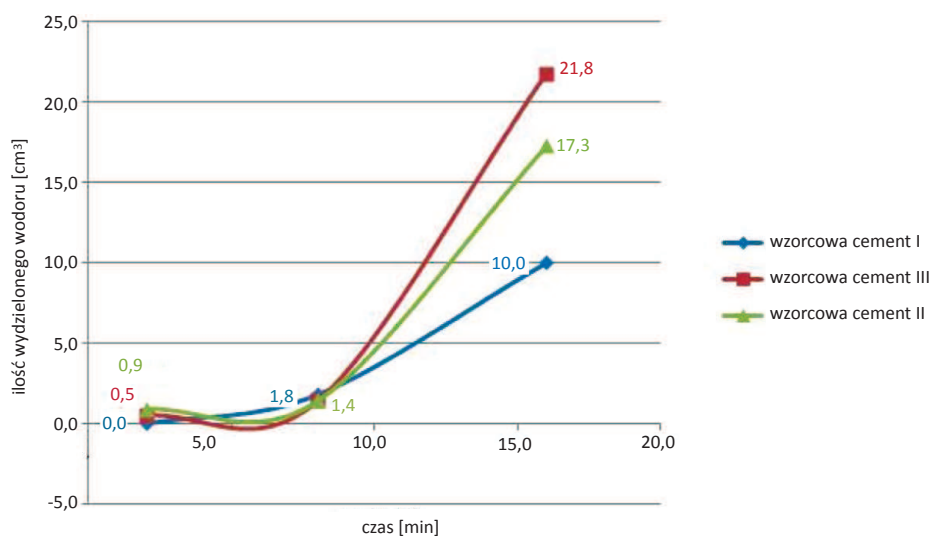
Rodzaj domieszki	$t_{60^{\circ}\text{C}}$	T_{max}	Czas gaszenia
	[min]	[°C]	[min]
Bez domieszki	12	67	22
A	48	66	58
B	16	67	28
C	14	70	26

Źródło: Opracowanie własne.

Zastosowane domieszki wpływały w różnym stopniu na przebieg gaszenia: czas wydłużał się – zwłaszcza w przypadku domieszki A. Domieszki nie wpływały lub w minimalnym stopniu wpływały na temperaturę maksymalną gaszenia wapna.

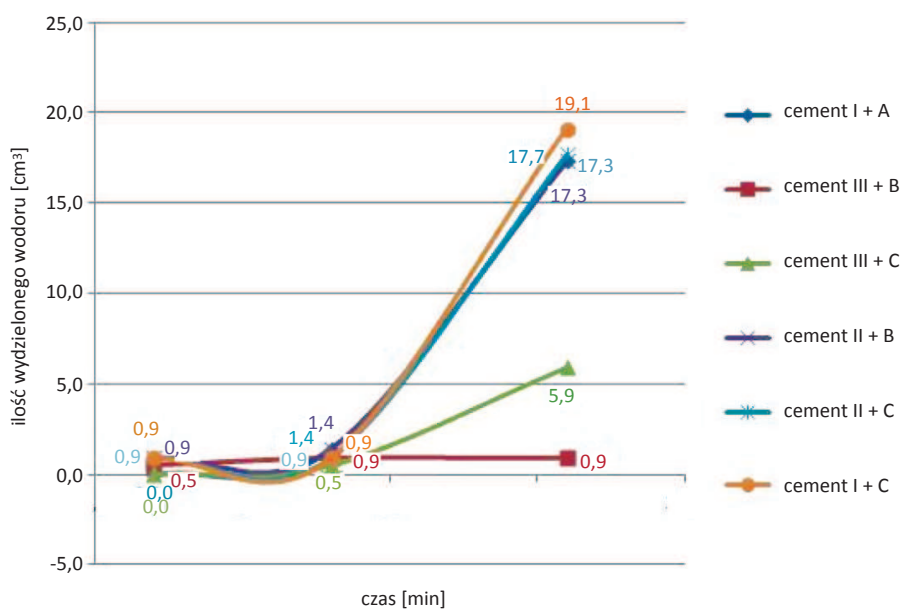
2.3. Wpływ domieszek na szybkość wydzielania wodoru

Dla danych składów mieszanek przeprowadzono badanie szybkości wydzielania wodoru. Posłużono się metodyką opisaną w normie [10], z tą różnicą, że zamiast wapna użyto mieszanki spoiwowej (cement + wapno), a ilość proszku aluminiowego dobrano w ilości proporcjonalnej do składu mieszanek. Przy mieszankach modyfikowanych domieszkami, zawartość domieszki podawano jako procent masy cementu. Badanie przeprowadzono w temperaturze 20°C i 70°C.



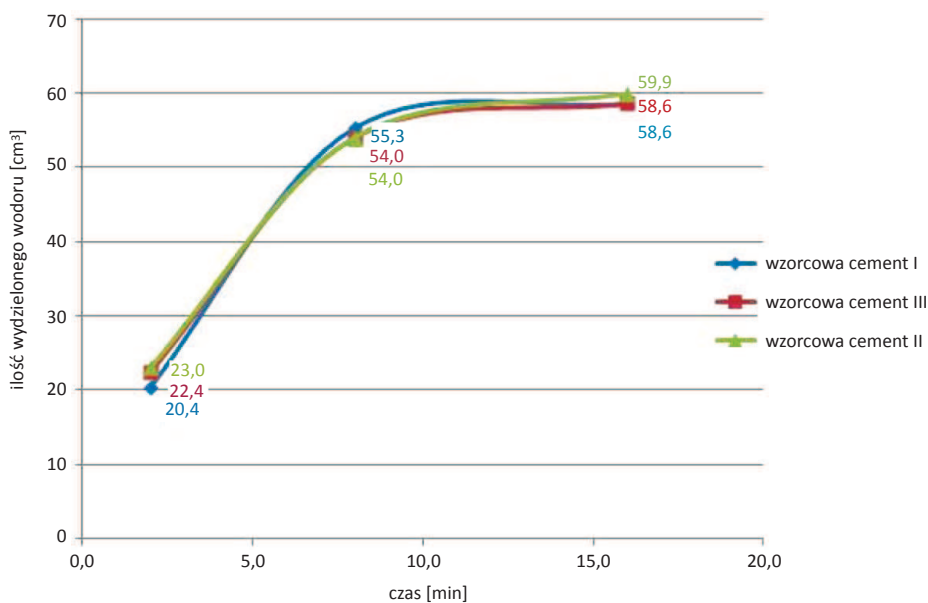
Ź r ó ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Krzywe wydzielania wodoru dla wzorcowych próbek w temperaturze 20°C



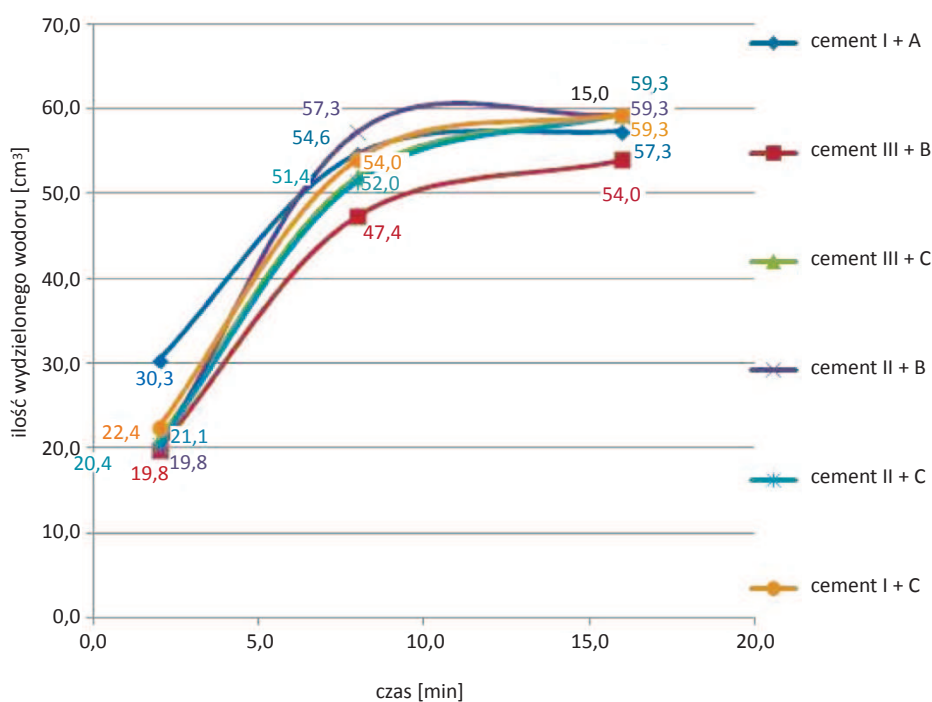
Ź r ó ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 5. Krzywe wydzielania wodoru dla próbek z domieszkami w temperaturze 20°C



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 6. Krzywe wydzielania wodoru dla wzorcowych próbek w temperaturze 70°C



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 7. Krzywe wydzielania wodoru dla próbek z domieszkami w temperaturze 70°C

Na podstawie wyników wydzielania wodoru (ryc. 4–7) można stwierdzić, że obecność domieszek nie wpływa negatywnie na szybkość i ilość wydzielania wodoru zarówno w temperaturze 20°C, jak i 70°C. Z analizy wykresów widać

również jak temperatura wpływa na ilość wydzielanego wodoru – w podwyższonych temperaturach, tj. 70°C, ilość wydzielanego wodoru jest znacznie większa niż w temperaturze 20°C.

3. Wpływ domieszek chemicznych na skład fazowy betonu komórkowego

Biorąc pod uwagę wyniki badań wpływu domieszek na proces hydratacji składników mieszanki ABK, przeprowadzono próby wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego [11]. W receptach [11] podczas stosowania domieszek możliwe było ograniczenie ilości wody o co najmniej 25%, a tym samym zmniejszenie współczynnika w/s z 0,65 do 0,49. Prowadzony monitoring procesu wyrastania i wiązania masy wykazał brak różnic w zachowaniu się mas z domieszkami oraz bez domieszek. Po autoklawizacji, która ma zapewnić optymalne warunki cieplno-wilgotnościowe przebiegu reakcji chemicznych między spoiwem i kruszywem w masie betonu komórkowego oraz tworzenia się, w wyniku tych reakcji, niskozasadowych uwodnionych krzemianów wapnia, przeprowadzono badania gotowego wyrobu [11]. Zaobserwowano wzrost wytrzymałości przy stosowaniu domieszek, najwyższy przy stosowaniu domieszki B o 65%. Współczynnik przewodzenia ciepła λ oznaczony w stanie suchym [12], we wszystkich przebadanych próbach ABK spełniał wymagania normowe [13], które określają, że dla gęstości ABK od 500 do 600 kg/m³ nie powinien być on wyższy niż 0,15 W/m·K.

W celu wyjaśnienia korzystnego wpływu domieszek na właściwości reologiczne mas zarobowych betonów oraz poprawy cech wytrzymałościowych w stosunku do prób kontrolnych (bez domieszek), próbki betonu komórkowego zostały poddane badaniom składu fazowego. Określono skład fazowy próbek przed i po procesie autoklawizacji. Sprawdzone wybrane parametry próbek ABK wytypowanych do badań mikrostruktury (tab. 4).

Tabela 4

Parametry ABK wytypowanych do badań mikrostrukturalnych

Oznaczenie próbki	Cement	Domieszka	Ilość domieszki [%]	w/s	Parametry betonu komórkowego			
					ρ [kg/m ³]	$R_{k\perp}$ [MPa]	Wzrost $R_{k\perp}$ [%]	λ [W/m·K]
Przewaga cementu w recepturze								
1	III	–	–	0,65	550	2,6	–	0,1092
2	III	A	2,0	0,52	550	3,2	23	0,1182
3	III	B	1,5	0,45	550	4,3	65	0,1286
4	III	C	1,0	0,45	550	4,2	61	0,1223

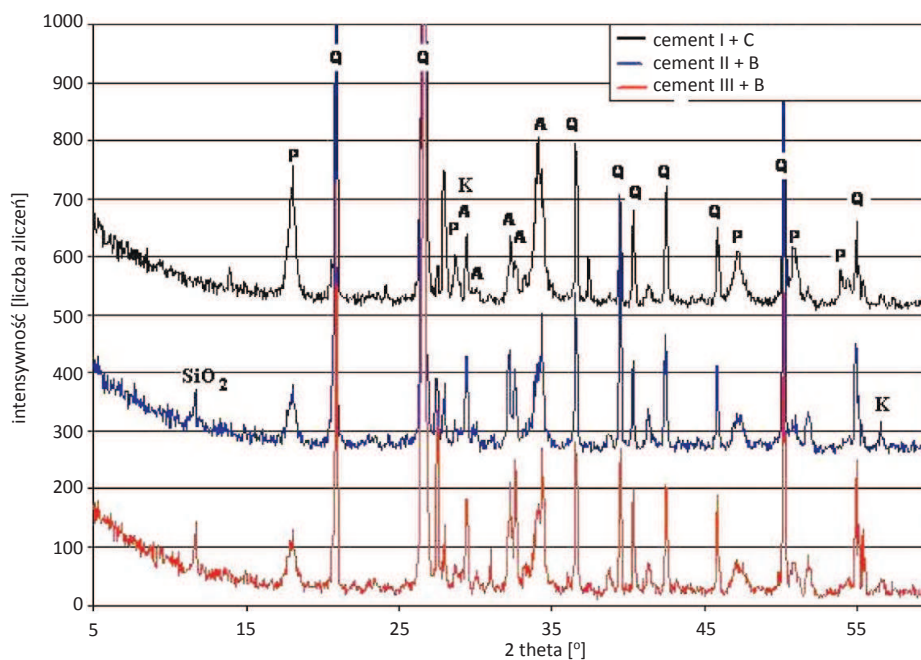
cd. tab. 4

Oznaczenie próbki	Cement	Domieszka	Ilość domieszki [%]	w/s	Parametry betonu komórkowego			
					ρ [kg/m ³]	$R_{k,L}$ [MPa]	Wzrost $R_{k,L}$ [%]	λ [W/m·K]
5	II	–	–	0,65	550	2,9	–	0,1151
6	II	A	2,5	0,54	550	3,6	24	0,1246
7	II	B	1,0	0,45	550	3,6	24	0,1271
8	II	C	0,8	0,45	550	3,1	7	0,1125
Przewaga wapna w recepturze								
9	I	–	–	0,58	550	2,9	–	0,1124
10	I	A	2,0	0,53	550	3,1	7	0,1189
11	I	B	0,8	0,50	550	3,5	20	0,1129
12	I	C	0,8	0,50	550	3,8	31	0,1204

Źródło: Opracowanie własne.

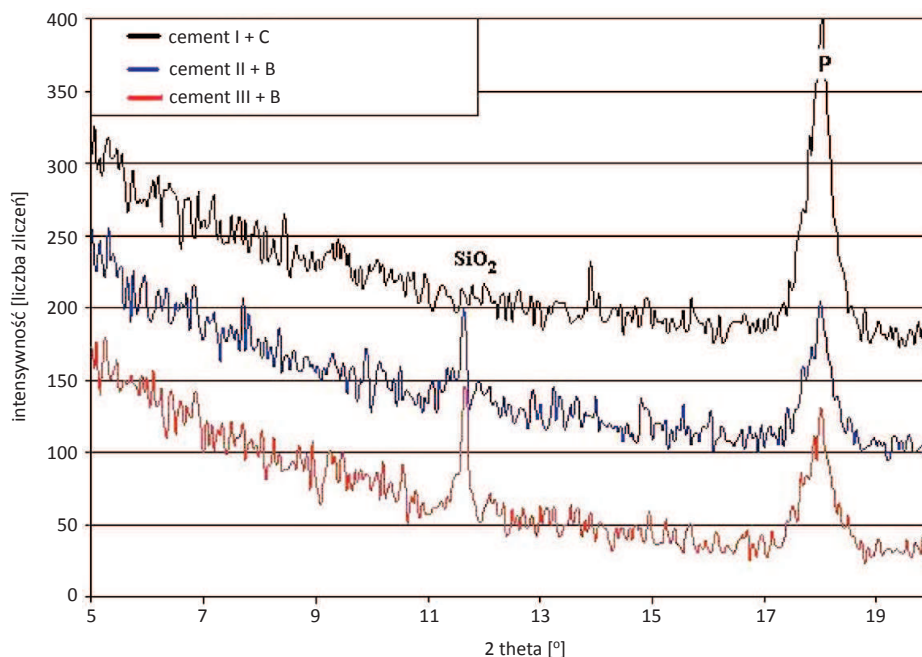
3.1. Określenie składu fazowego powstających produktów hydratacji przed procesem autoklawizacji

Wybrane próbki betonu komórkowego (tab. 4) poddano badaniom składu fazowego z użyciem dyfrakcji promieni X.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 8. Dyfraktogramy wybranych próbek betonu komórkowego przed procesem autoklawizacji: P – portlandyt, A – alit, Q – kwarc, K – kalcyt



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

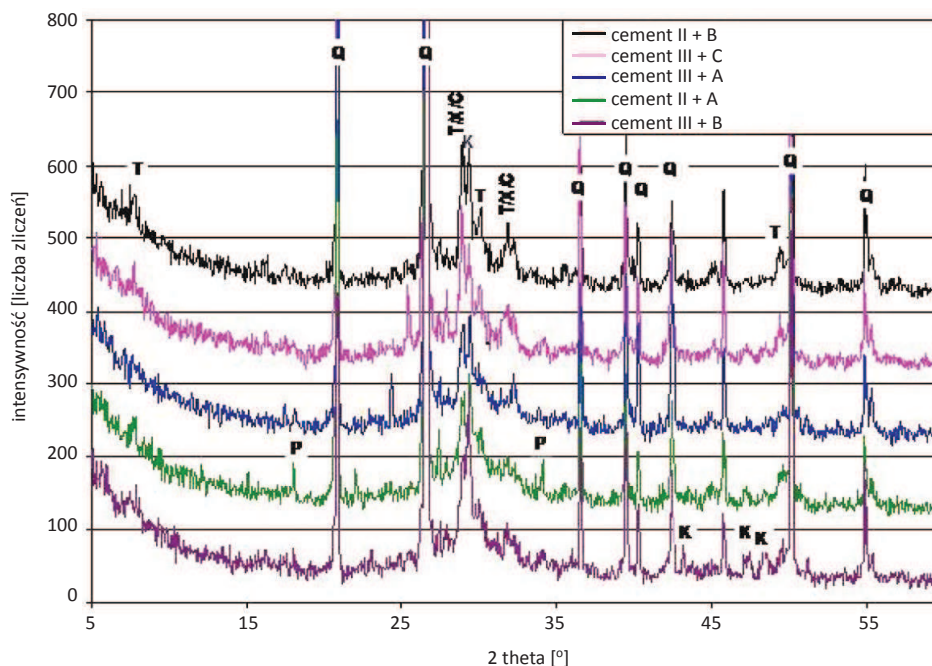
Ryc. 9. Dyfraktogramy wybranych próbek betonu komórkowego w zakresie 5–20° 2θ przed procesem autoklawizacji: P – portlandyt

Analiza dyfraktogramów pokazuje różnice pomiędzy próbkami zawierającymi domieszkę B oraz domieszkę C. Próbki zawierające domieszkę B wykazują obecność refleksów SiO_2 . Zaobserwować można również różnice w intensywności refleksów portlandytu. Tu z kolei większą intensywność zanotowano w przypadku dyfraktogramu próbki z domieszką C. Zestawienie tych faktów wskazuje na to, że w obecności domieszki B następuje opóźnienie hydratacji cementu. Świadczy o tym również to, że refleksy alitu są silniejsze w przypadku próbki z domieszką B.

3.2. Określenie mikrostruktury i składu fazowego betonu komórkowego po procesie autoklawizacji

Dyfrakcja rentgenowska próbek betonu komórkowego po procesie autoklawizacji

Wyniki badanych próbek ABK z domieszkami są typowe jak dla ABK bez domieszek (ryc. 10). Wskazują na obecność tobermorytu, kalcytu oraz nieprzereagowanego kwarcu.



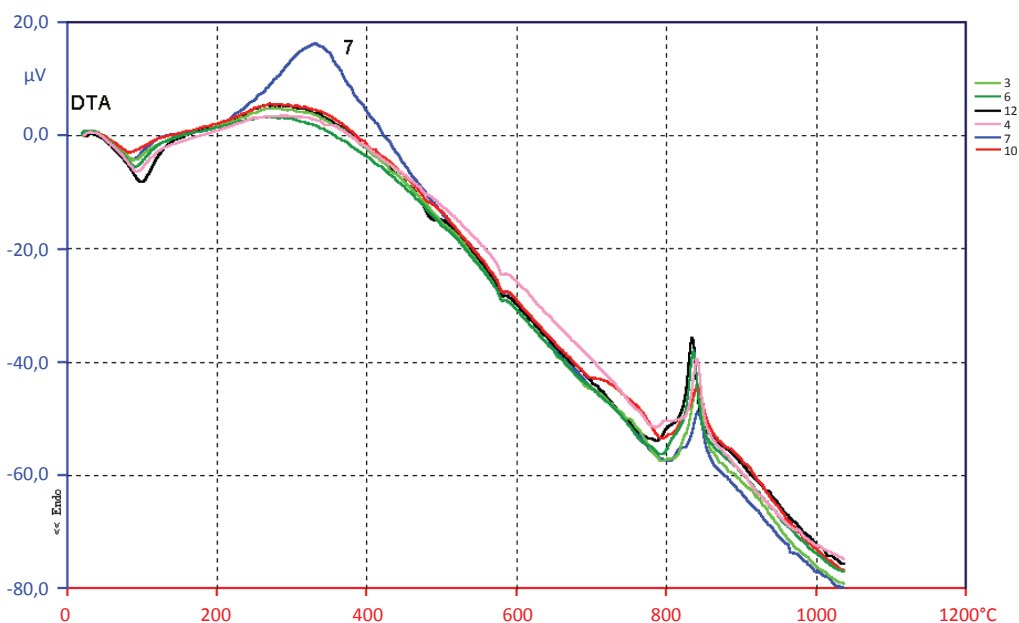
Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 10. Zestawienie dyfraktogramów próbek autoklawizowanego betonu komórkowego: T – tobermoryt, X – xonotlit, Q – kwarc, C – C-S-H, K – kalcyt, A – anhydryt

Termiczna analiza różnicowa

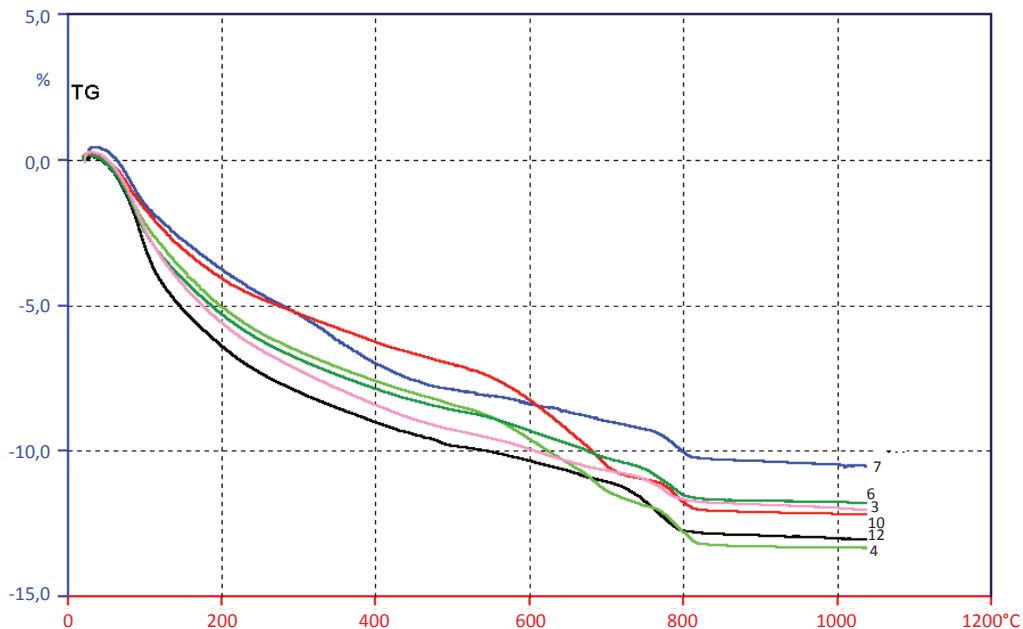
Kompleksowa analiza termiczna stanowi uzupełnienie do badań XRD. Na podstawie analizy krzywych DTA próbek autoklawizowanych betonów komórkowych (ryc. 11–12) zidentyfikowano:

- efekt endotermiczny z maksimum temperatury w zakresie 110–130°C, który jest związany z odwodnieniem 11,3 Å tobermorytu i innych uwodnionych krzemianów wapnia. Ubytek masy odpowiadający temu efektowi wynosi 1,5–2,4%;
- efekt egzotermiczny z maksimum temperatury 315°C, najsilniejszy w przypadku próbki 7 związany z przejściem 11,3 Å tobermorytu w 9,3 Å tobermoryt [17]. Ubytek masy odpowiadający temu efektowi wynosi 0,3%;
- efekt endotermiczny z maksimum temperatury 680–780°C, który jest związany z rozkładem węgla wapniowego – kalcytu. Ubytek masy odpowiadający temu efektowi wynosi odpowiednio 0,4–1,6%;
- efekt egzotermiczny z maksimum temperatury w zakresie 800–850°C, który jest związany z przemianą krzemianu wapniowego C-S-H I w wollastonit. Efektowi temu nie towarzyszy zmiana masy;
- całkowity ubytek masy do temperatury 1000°C kształtuje się na poziomie 10,3–11,8%.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 11. Krzywe DTA dla wytypowanych próbek: cement III + B (próbka nr 3); cement II + A (próbka nr 6); cement I + C (próbka nr 12); cement III + C (próbka nr 4); cement II + B (próbka nr 7); cement I + A (próbka nr 10)



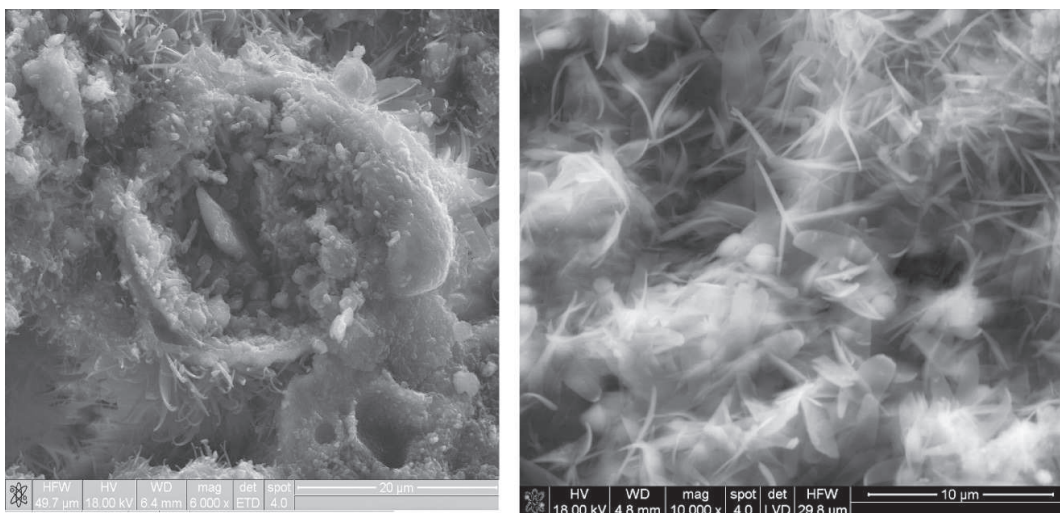
Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 12. Krzywe TG dla wytypowanych próbek: cement II + B (próbka nr 7); cement II + A (próbka nr 6); cement III + B (próbka nr 3); cement I + A (próbka nr 10); cement I + C (próbka nr 12); cement III + C (próbka nr 4)

Skaningowa mikroskopia elektronowa

Obserwacje mikrostruktury prowadzono z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego Nova NanoSEM 200. Przykładowe wyniki z badań przedstawiono na rycinach 13–16.

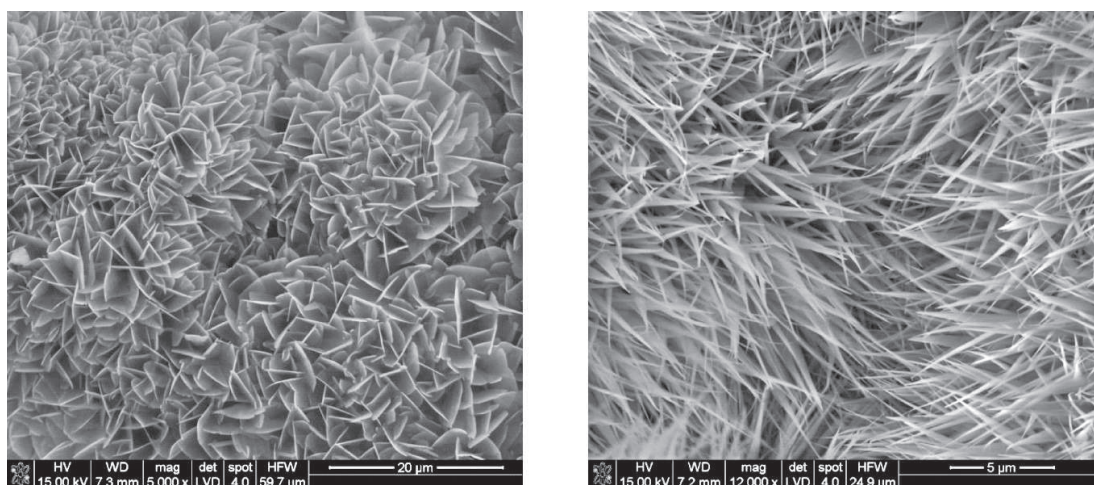
Wśród rozpoznanych elementów struktury betonu komórkowego próbki kontrolnej bez domieszki (ryc. 13) dominują uwodnione krzemiany wapnia C-S-H wykształcone w formie igieł bądź drobnych płytek, strukturalnie odpowiadające tobermorytowi. W matrycy C-S-H zaobserwowano liczne skupienia kalcytu w postaci drobnokrystalicznej.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 13. Obrazy SEM mikrostruktury próbki kontrolnej bez domieszek

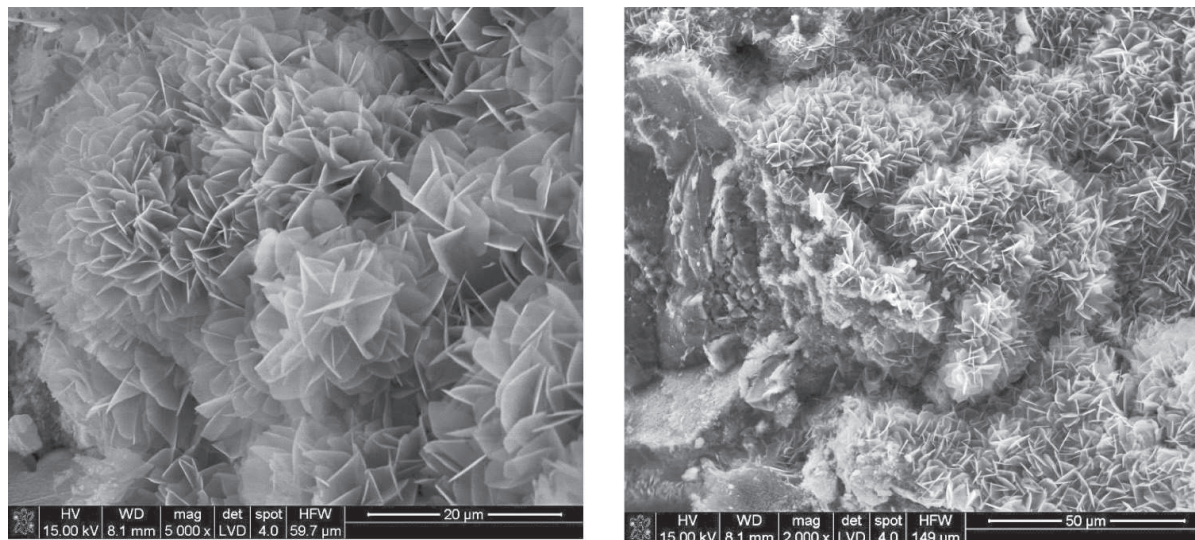
W próbce 3 (ryc. 14) zaobserwowano tobermoryt w postaci dobrze wykształconych płytek. Dodatkowo w próbce występowała faza C-S-H typu II według klasyfikacji Diamonda [14–15].



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 14. Obrazy SEM mikrostruktury próbki 3 – ABK wykonany z cementu III + domieszka B

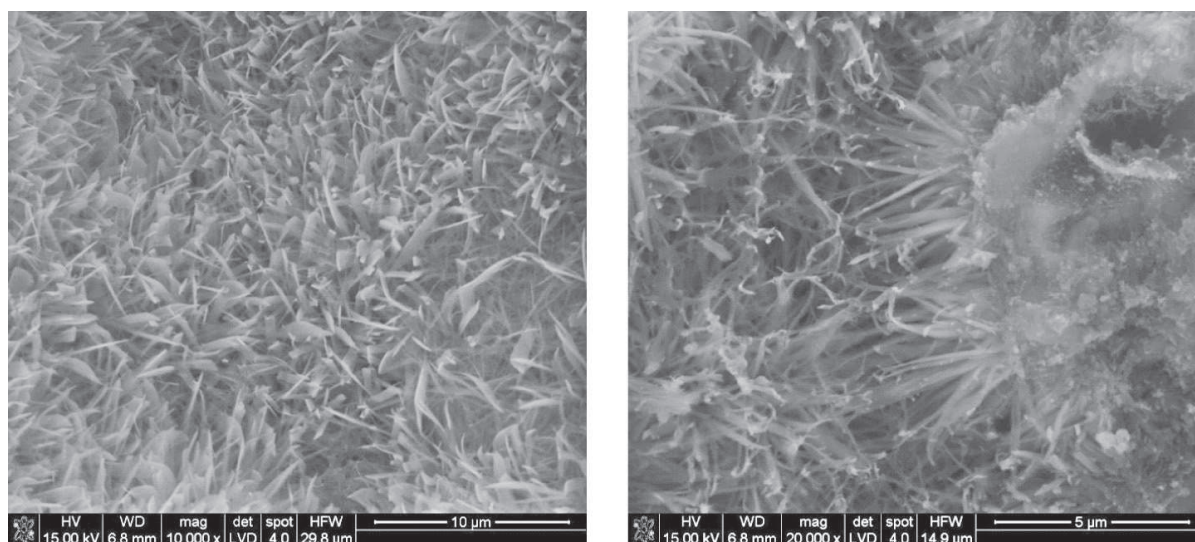
W próbce 12 (ryc. 15) zaobserwowano duże ilości tobermorytu występującego w postaci stosunkowo dużych, bardzo dobrze wykształconych płytkowych kryształów. W próbce zaobserwowano również niewielkie ilości fazy C-S-H typu II [14–15].



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 15. Obrazy SEM mikrostruktury próbki 12 – ABK wykonany z cementu I + domieszka C

W próbce 7 (ryc. 16) stwierdzono obecność płytkowo-włóknistych form, które prawdopodobnie są fazą C-S-H tworzącą się w oparciu o strukturę typu plastra pszczelego (C-S-H typu II [14–15]), zdecydowanie lepiej wykształconą w porównaniu z innymi badanymi próbkami oraz włóknisty tobermoryt.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 16. Obrazy SEM mikrostruktury próbki 7 – ABK wykonany z cementu II + domieszka B

4. Podsumowanie

Badania wykazały, że domieszki wpływają zarówno na właściwości reologiczne masy przed procesem autoklawizacji, jak i na przebieg procesów fizykochemicznych w procesie autoklawizacji. Na właściwości reologiczne masy betonu komórkowego najefektywniej wpływa domieszka C. Zbliżone wyniki dawała domieszka B. Domieszki te najsilniej upłynniały mieszanki betonowe z cementem II i III. W obu przypadkach możliwe było zmniejszenie ilości wody o co najmniej 25%, co w efekcie dało zmniejszenie w/s z 0,65 do 0,49.

Zdecydowane obniżenie współczynnika w/s prowadzi do ułatwienia penetracji ciepła do wnętrza masy, korzystniejszego przebiegu autoklawizacji skutkującego podwyższeniem wytrzymałości matrycy autoklawizowanego betonu komórkowego, a w konsekwencji i trwałości materiału. Obniżenie współczynnika w/s to również zmniejszenie wilgotności poautoklawizacyjnej ABK, co wpływa na szybsze osiągnięcie w przegrodach budowlanych wilgotności ustabilizowanej.

Na podstawie obserwacji mikrostruktury betonów komórkowych modyfikowanych domieszkami chemicznymi stwierdzić można, że obecność domieszek oddziałuje zarówno na skład fazowy, jak i na morfologię tworzących się produktów. Dyfrakcja rentgenowska i SEM pozwalają określić typ, ilość i koncentrację produktów hydratacji, które mają wpływ na wytrzymałość i trwałość ABK [11, 16].

Przed procesem autoklawizacji zauważono, że w przypadku domieszki C próbka wykazuje większą zawartość portlandytu. Próbki zawierające domieszkę B wykazują mniejszą jego zawartość. Wskazywać to może na opóźniające działanie domieszki B na przebieg procesu hydratacji.

Po procesie autoklawizacji najsilniejszy wpływ na budowę badanego materiału wydaje się mieć domieszka B. W jej obecności zaobserwowano istotne zmiany, przede wszystkim w ilości i pokroju kryształów tobermorytu. Kryształował on w postaci dużych, bardzo dobrze wykształconych płytkowych kryształów lub włókien. Zaobserwowano również obecność fazy C-S-H tworzącą strukturę typu plastra pszczelego. Podobnie kształtowała się struktura w przypadku domieszki C. Występowanie tych faz może tłumaczyć polepszenie właściwości użytkowych, jak np. wzrost wytrzymałości o 65% przy zastosowaniu domieszki B.

Przeprowadzony zakres badań wykazał, że zastosowane domieszki miały korzystny wpływ na procesy fizykochemiczne, a tym samym na właściwości użytkowe autoklawizowanego betonu komórkowego. Wyniki badań wymagają jednak potwierdzenia w skali półtechnicznej i przemysłowej*.

* Badania zostały sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, nr projektu N N506 430236.

Literatura

- [1] J a t y m o w i c z H., S i e j k o J., Z a p o t o c z n a - S y t e k G., *Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego*, Arkady, Warszawa 1980.
- [2] Ł u k o w s k i P., *Domieszki chemiczne do zapraw i betonów*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 1998.
- [3] S p i r a t o s N., P a g é M., M a i l v a g a n a m N.P., M a l h a t o r a V.M., J o l i c o e u r C., *Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology and practice*, Handy Chemicals Ltd., Ottawa 2003.
- [4] K u c h a r s k a L., *Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zmniejszające ilość wody zarobowej*, „Cement, Wapno, Beton” 2000, nr 2, s. 46–60.
- [5] C o l l e p a r d i M., *Chemical admixtures today*, [w:] *Proceedings of Second International Symposium on Concrete Technology for Sustainable February – Development with Emphasis on Infrastructure*, Hyderabad [2005], s. 527–541.
- [6] A i t c i n P.C., *Binders for durable and sustainable concrete*, Taylor and Francis, London 2008.
- [7] C i a k M.K., U s z e r o w - M a r s z a k A., *Fenomenologiczna koncepcja i sposób oceny kompatybilności cementów z domieszkami*, [w:] *Konferencja „Dni Betonu”, Szczyrk 8–10 października 2002 r.*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002, s. 595–606.
- [8] PN-EN 196-3+A1: 2009 – Metody badania cementu. Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości.
- [9] PN-EN 459-2: 2010 – Wapno budowlane. Część 2: Metody badań.
- [10] PN-H-97021: 1998/Ap1: 1999 – Aluminium – Proszek płatkowy do produkcji betonu komórkowego.
- [11] A b r a m o w i c z M., S k o r n i e w s k a M., Z a p o t o c z n a - S y t e k G., Ł a s k a w i e c K., M a ł o l e p s z y J., *Wpływ domieszek chemicznych na procesy fizykochemiczne zachodzące przy wytwarzaniu autoklawizowanego betonu komórkowego. Sprawozdanie z projektu badawczego N N506 430236; ICiMB CBB CEBET*, Warszawa 2011.
- [12] PN ISO 8301: 1998 – Izolacja cieplna – Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym – Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego.
- [13] PN-EN 1745: 2004 – Mury i wyroby murowe – Metody określania obliczeniowych wartości cieplnych.
- [14] D i a m o n d S., *Cement Paste Microstructure – an Overview at Several Levels*, [w:] *Proceedings of the Conference on Hydraulic Cement Paste: their Structure and Properties*, Sheffield 1976.
- [15] K u r d o w s k i W., *Faza CSH – stan zagadnienia*, cz. 1, „Cement, Wapno, Beton” 2008, nr 4, s. 216.
- [16] D z i e k a n E., L a s k a J., M a ł o l e p s z y J., *Influence of polymer superplasticizers on the properties of autoclaved aerated concrete*, [w:] *5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete Securing a sustainable future to be held at Bydgoszcz to celebrate 60 years of AAC experience in Poland*, ed. J. Prusiński, University of Technology and Life Sciences Press, Bydgoszcz 2011, s. 207–214.
- [17] K l i m e s c h D.S., R a y A., *DTA-TG Study of the CaO-SiO₂-H₂O and CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O Systems Under Hydrothermal Conditions*, „Journal of Thermal Analysis and Calorimetry” 1999, Vol. 56, Issue 1, s. 27–34.

*MARTA SKORNIIEWSKA
MARIAN ABRAMOWICZ
GENOWEFA ZAPOTOCZNA-SYTEK*

CHEMICAL ADMIXTURES IN PHYSICOCHEMICAL PROCESSES DURING
MANUFACTURE OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE (AAC)

Keywords: chemical admixtures, autoclaved aerated concrete (AAC), tobermorite, C-S-H, cement – admixture compatibility.

The article presents possibility use chemical admixtures in autoclaved aerated concrete (AAC) on sand technology. We checked which physical and chemical processes take place in AAC when we apply chemical admixtures. We checked cement – admixture compatibility, influence admixtures on cement hydrating process and their influence on rest of components on AAC mixture. We identify crystalline phases and their concentrations before and after autoclaving process (X-Ray diffraction, DTA/TG, SEM analysis). The article presents the properties obtained for AAC with chemical admixtures (density, compressive strength, thermal conductivity factor). The results of research proved the positive effects of admixtures on physical and chemical processes in AAC and their positive effect on properties of AAC.