dr inż. Albin Garbacik, prof. ICiMB[1)]
prof. dr hab. inż. Zbigniew Giergiczny[2)]
mgr inż. Artur Golda[3)]
dr inż. Damian Dziuk[3)]
mgr inż. Mikołaj Ostrowski[1)]

Cementy napowietrzające beton

Air entraining cements

DOI: 10.15199/33.2015.10.31

Streszczenie. W polskich warunkach klimatycznych mrozoodporność betonu jest jedną z głównych cech użytkowych kształtujących trwałość konstrukcji betonowych. Istnieje wiele rozwiązań i czynników technologicznych mających wpływ na mrozoodporność betonu. Najbardziej efektywnym ze stosowanych obecnie rozwiązań poprawy mrozoodporności betonu jest modyfikacja struktury porowatości matrycy cementowej przez wprowadzenie domieszki napowietrzającej do mieszanki betonowej. W artykule przedstawiono sposób kształtowania mrozoodporności betonu przez poprowadzenie domieszki napowietrzającej z cementem, w przeciwieństwie do stosowanych rozwiązań dozowania domieszki in situ w węźle betoniarskim. Tematyka ta jest przedmiotem realizowanego programu badawczego w ramach projektu NCBiR pt. *Innowacyjne cementy napowietrzające beton*.

Słowa kluczowe: cement, cementy napowietrzające beton, mrozoodporność betonu.

Abstract. In Polish climatic conditions frost resistance of concrete is one of its most important durability properties. There are many material and technological factors influencing on that property of concrete, however, it can be assumed that modification of structure of cement matrix porosity by introducing air-entraining admixtures into concrete mix is the most effective used solution. In the paper innovative way in that manner, based on the production of air-entraining cement (AEC) was presented. The problem of frost resistance of concrete made with cement containing mineral additives is included in the research project realized within Polish National Research and Development Centre "Innovative air-entraining cements in concrete." The general aim of the project cover an innovative way of shaping frost resistance of concrete based on introduction the air-entraining admixture with cement, as opposed to generally used solutions by introducing air-entraining admixtures into concrete mix in concrete plant.

Keywords: cement, air entraining cement, frost resistance of concrete.

Beton narażony jest na ekstremalne oddziaływania środowiska, przede wszystkim na agresję chemiczną, wilgoć i mróz. Odpowiednie zaprojektowanie, wykonanie, zabudowanie oraz pielęgnacja zapewnia trwałość betonu w określonych warunkach jego eksploatacji [1]. Do obiektów budowlanych najbardziej narażonych na niszczące oddziaływanie środowiska należą mosty i wiadukty, betonowe nawierzchnie drogowe, chodniki i krawężniki drogowe, konstrukcje betonowe będące w kontakcie z wodą morską. Nieodporny na działanie mrozu beton jest bardzo często przyczyną wad i uszkodzeń konstrukcji budowlanych, których naprawa jest bardzo kosztowna i nie zawsze do końca skuteczna. Najczęściej występujące wady związane z brakiem mrozoodporności betonu omówiono w monografii [2].

[1)] Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie
[2)] Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; Górażdże Cement S.A.
[3)] Centrum Technologiczne BETOTECH w Dąbrowie Górniczej
[*)] Autor do korespondencji:
e-mail: zbigniew.giergiczny@polsl.pl

Obszerna literatura przedmiotu oraz praktyka dowiodły, że beton wykonany z udziałem cementów wieloskładnikowych z dużą zawartością dodatków mineralnych (żużla wielkopiecowego i/lub popiołu lotnego krzemionkowego), pomimo lepszej szczelności, jest mniej mrozoodporny niż beton z cementem CEM I [3, 4]. Zgodnie z zaleceniami Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI) [14] można zapewnić mrozoodporność betonu wykonanego z cementu z dodatkami mineralnymi, jednak pod warunkiem poprawnego napowietrzenia mieszanki betonowej. Problem ten uwzględnia PN-EN 206-1:2014, zalecając napowietrzanie mieszanki w przypadku klas ekspozycji XF (agresja mrozowa). Uzyskanie odpowiedniego napowietrzenia betonu z cementem o dużej zawartości dodatków mineralnych jest trudne i wymaga doboru ilości domieszki napowietrzającej w zależności od rodzaju i ilości dodatku mineralnego zawartego w składzie cementu [1÷3]. Możliwość napowietrzania mieszanki betonowej przez domieszkę wprowadzoną z cementem uwzględniają normy amerykańskie ASTM C150 [5] i ASTM C595 [6], klasyfikując odmiany A cementów napowietrzających.

Problematyka mrozoodporności betonów wykonanych z cementów zawierających dodatki mineralne została uwzględniona w projekcie badawczym Narodowego Centrum Badań i Rozwoju pt. *Innowacyjne cementy napowietrzające beton*, którego celem jest opracowanie technologii produkcji cementów napowietrzających beton; zarówno portlandzkich CEM I, jak i wieloskładnikowych CEM II ÷ CEM V z dużą zawartością dodatków mineralnych.

W artykule skoncentrowano się na określeniu warunków techniczno-technologicznych produkcji cementów napowietrzających w przypadku ustalonych wartości napowietrzenia zaprawy normowej, gwarantujących stopień napowietrzenia betonu na poziomie 4 – 6%. Rezultaty uzyskane w skali laboratoryjnej zweryfikowano na betonie wyprodukowanym w warunkach przemysłowych z cementu hutniczego napowietrzającego CEM III/A 42,5N NA AirPak.

Metody i materiały do badań

Przedmiotem analizy były napowietrzające cementy powszechnego użytku zgodne z PN-EN 197-1: cement por-

tlandzki CEM I; cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V; cement portlandzki żużlowy CEM II/B-S; cement hutniczy CEM III/A NA oraz cement wieloskładnikowy żużlowo-popiołowy CEM V/A (S-V). Cementy napowietrzające wyprodukowano metodą wspólnego mieszania składników, tj. cementu portlandzkiego CEM I 52,5R z mielonym granulowanym żużlem wielkopiecowym (o powierzchni właściwej 4800 cm^2/g) i/lub popiołem lotnym. Cementy korygowano dodatkiem gipsu w ilości zapewniającej stałą zawartość 3% SO_3 w cemencie. Cementy napowietrzające produkowano z ilością domieszki AirPak dobraną na podstawie badań kontrolnych zawartości powietrza w zaprawach normowych, gwarantujących napowietrzenie mieszanek betonowych na poziomie 4 – 6%.

Zakres badań cementów napowietrzających obejmował:

- **wodożądność**, początek i koniec czasu wiązania, stałość objętości wg normy PN-EN 196-3;
- **konsystencję** zaprawy (rozpływ na stoliku) wg normy PN-EN 1015-3;
- **wytrzymałość** na ściskanie wg normy PN-EN 196-1;
- **zawartość powietrza w zaprawie** wg normy PN-EN 1015-7.

Zakres badań betonów z cementami CEM II/B-V i CEM III/A NA obejmował:

- **zawartość powietrza w mieszance betonowej** wg normy PN-EN 12350;
- **stopień napowietrzenia w stwardniałym betonie** z cementu CEM II/B-V – zawartość powietrza, wielkość i rozkład porów wg PN-EN 480-11;
- **wytrzymałość betonu na ściskanie** wg normy PN-EN 12390-3;
- **mrozoodporność** betonu wg normy PN-88/B-06250.

Cement hutniczy CEM III/A zastosowano także do wykonania betonu w warunkach poligonowych, w przypadku którego oznaczono:

- konsystencję mieszanki betonowej zgodnie z PN-EN 12350-2: 2011;
- zawartość powietrza w mieszance betonowej zgodnie z normą PN-EN 12350-7:2011;
- charakterystykę porów powietrznych w mieszance betonowej metodą AVA (Air-Void-Analyzer);
- wytrzymałość betonu wg normy PN-EN 12390-3:2011;
- nasiąkliwość wagową wg normy PN-B-06250:1988;
- mrozoodporność zwykłą dla stopnia F150 zgodnie z PN-B-06250:1988;
- mrozoodporność z udziałem soli odladzających zgodnie z normą PKN-CEN/TS 12390-9:2007;
- wodoszczelność betonu dla stopnia W8 zgodnie z PN-B-06250:1988.

Omówienie wyników badań

Właściwości cementów napowietrzających. Wyniki badań stopnia napowietrzenia i cech normowych zapraw cementowych podano w tabelach 1 i 2. Na podstawie uzyskanego czasu wiązania stwierdzono, że cementy z domieszką napowietrzającą wykazują wydłużony początek czasu wiązania od 30 do 45 min. Ponadto cementy napowietrzające charakteryzują się mniejszą wodożądnością wymaganą do osiągnięcia konsystencji normowej zaczynu cementowego oraz wyraźnie lepszą konsystencją w porównaniu z cementami referencyjnymi bez domieszki (tabela 1).

Wytrzymałość na ściskanie po 2 i 28 dniach twardnienia w przypadku badanych cementów z domieszką napowietrzającą i bez domieszki podano w tabeli 2. Zastosowanie domieszki napowietrzającej do cementów prowadzi do wyraźnego zmniejszenia wytrzymałości zaprawy normowej po 2 i 28 dniach w porównaniu z cementem bez domieszki. Spadek wytrzymałości wczesnej waha się od 10 do 25%, nie uwzględniając cementu CEM II/B-S, w przypadku którego nie zaobserwowano spadku wytrzymałości. Podobne zależności występują w przypadku wytrzymałości po 28 dniach twardnienia. Można zakładać, że w porównaniu z cementami powszechnego użytku bez domieszki napowietrzającej wytrzymałość zaprawy normowej cementów napowietrzających obniża się o jedną klasę przy zbliżonych parametrach uziarnienia.

Właściwości betonu. Do przygotowania mieszanek betonowych zastosowano, jak wspomniano wcześniej, cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V oraz cement hutniczy CEM III/A NA. Skład mieszanki betonowej odpowiadał składowi betonu wzorcowego wg normy PN-EN 480-1 [7] oraz PN-EN 934 [8]. Proporcje składników mieszanek betonowych zostały ustalone doświadczalnie, przy stałym współczynniku w/c = 0,45 i konsystencji V2. Stopień napowietrze-

Tabela 1. Wyniki badań cementów napowietrzających
Table 1. Investigation results of air entraining cements

Cement		Zawartość powietrza [%]	Wodożądność [%]	Początek i koniec czasu wiązania [min]		Konsystencja zaprawy [cm]	Stałość objętości [mm]
CEM I	ref.*	–	29,9	148	178	15,8	0
	napow.**	11,0	29,4	166	198	17,4	0
CEM II/B-V	ref.	–	30,7	182	227	17,1	0
	napow.	9,4	30,3	209	294	18,0	0
Cem II/B-S	ref.	–	30,0	225	295	16,7	0
	napow.	10,0	30,2	225	295	18,6	0
CEM III/A NA	ref.	–	31,0	230	325	16,3	0
	napow.	8,6	29,5	270	374	16,7	0
CEM V/A-(S-V)	ref.	–	31,7	251	313	16,0	0
	napow.	10,0	30,7	282	343	17,1	1

* referencyjny (odniesienia); ** napowietrzający

Tabela 2. Wyniki badań dotyczące wytrzymałości na ściskanie
Table 2. Investigation results concerned with compressive strength

Cement		Wytrzymałość zaprawy normowej [MPa]		Spadek wytrzymałości [%]	
		2 dni	28 dni	2 dni	28 dni
CEM I	referencyjny	27,3	55,2	0	0
	napowietrzający	23,3	50,3	-15,0	-9,0
Cem II/B-V	referencyjny	25,0	43,4	0	0
	napowietrzający	18,5	32,5	-26,0	-25,0
Cem II/B-S	referencyjny	19,4	53,5	0	0
	napowietrzający	20,0	47,9	+1,0	-10,0
CEM III/A NA	referencyjny	12,3	52,4	0	0
	napowietrzający	9,7	39,2	-10,5	-25,2
CEM V/A-(S-V)	referencyjny	22,3	51,3	0	0
	napowietrzający	18,5	39,8	-17,0	-22,4

nia normowej zaprawy cementowej wynosił 9,5% i 8,6%. Beton z cementem napowietrzającym CEM III/A NA AirPak wyprodukowany został podczas próby technologicznej w wytwórni betonu towarowego. Skład mieszanki dobrano tak, aby spełniał wymagania klasy ekspozycji XF4 wg PN-EN 206:2014, tzn. zawartość cementu w 1 m^3 mieszanki wynosiła co najmniej 340 kg, maksymalny stosunek wody do cementu był ≤ 0,45. Skład i właściwości betonów przedstawiono w tabeli 3.

Próbki betonu do badań laboratoryjnych wykonano zgodnie z PN-EN 480-1 w formach sześciennych o boku 150 mm. Wyniki badań wytrzymałości i mrozoodporności metodą zwykłą zestawiono w tabeli 4, a porowatości w tabeli 5.

Całkowita zawartość powietrza w betonie z cementem napowietrzającym CEM II/B-V wyniosła 4,86%, a betonu z cementem bez domieszki napowietrzającej 2,05% (tabela 5). Wartość 4,86% spełnia wymaganą ilość powietrza określaną w PN-EN 206-1 dla klas ekspozycji XF, która powinna wynosić 4 – 6%.

Analizując charakterystykę porowatości betonu z cementem napowietrzającym CEM II/B-V, należy podkreślić bardzo korzystne wartości parametrów L, α i A_{300} odpowiadające odpowiednio: wskaźnikowi rozmieszczenia porów; powierzchni właściwej porów oraz zawartości mikroporów średnicy mniejszej niż 0,3 mm. Wyniki podane w tabeli 5 potwierdzają wyraźnie większą zawartość mikroporów średnicy mniejszej niż 0,3 mm regularnie rozproszonych w matrycy zaczynu cementowego. Wartość 2,67% A_{300} jest znacznie większa od standardowej wartości wg wymagań normowych, tj. 1,8% dla klasy ekspozycji XF4 [9, 10]. Wskaźnik rozmieszczenia porów L także spełnia standardowe wymagania w przypadku wartości < 0,2 mm. Wymienione wskaźniki potwierdzają skuteczność działania domieszki napowietrzającej wprowadzonej przez cement do mieszanki betonowej i mogą być pomocne w projektowaniu i wykonawstwie betonów mrozoodpornych [11]. Wyniki podane w tabeli 4 potwierdzają, podobnie jak badania zapraw, efekt spadku wytrzymałości na ściskanie betonu z domieszką napowietrzającą wprowadzaną z cementem. Taka zależność musi być brana pod uwagę przy projektowaniu zakładanych klas betonu.

Próba technologiczna polegała na zabudowaniu elementu w postaci płyty o wymiarach 3 x 3 x 0,2 m w warunkach atmosferycznych późnojesiennych. Podstawowym celem tej próby było uzyskanie zakładanego poziomu napowietrzenia (co najmniej 4 %) i jego stabilność w czasie bez dodatkowego stosowania domieszek napowietrzających dodawanych do mieszanki betonowej. Wyniki badań uzyskane metodą ciśnieniową wykazały, że zawartość powietrza była stabilna w czasie i wyniosła 4 ÷ 5% (rysunek 1).

Tabela 3. Skład i właściwości mieszanki betonowej i betonu
Table 3. Composition and properties of concrete mix and concrete

Składniki	Beton		
	CEM II/B-V	CEM III/A NA	CEM III/A NA AirPak – próba technologiczna
Piasek 0/2	525 kg/m^3	525 kg/m^3	670
Żwir 2/8	–	–	456
Żwir 8/16	–	–	640
Kruszywo granitowe 2/8	390 kg/m^3	390 kg/m^3	–
Kruszywo granitowe 8/18	373 kg/m^3	373 kg/m^3	–
Kruszywo granitowe 16/22	515 kg/m^3	515 kg/m^3	–
Cement	380 kg/m^3	380 kg/m^3	350
Woda	171 dm^3	171 dm^3	158
Domieszka upłynniająca	0,4%/0,2%*	0,5%/0,3%*	0,9%*
Konsystencja – czas Vebe V2	12s/11s*	12 s/12s*	–
Zawartość powietrza: beton nienapowietrzony beton napowietrzony	1,4% 5,6%*	1,8% 3,4%*	– 4,5%*

* – wartości dla cementów napowietrzonych

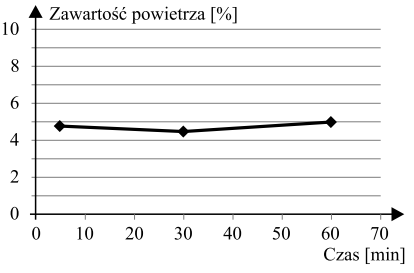
Tabela 4. Wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność
Table 4. Compressive strength and frost resistance

Beton		Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Mrozoodporność – wytrzymałość na ściskanie [MPa]		Mrozoodporność –150 cykli	
		28 dni	150 cykli		spadek wytrzymałości [%]	spadek masy [%]
			warunki normalne	zamraż/ /odmraż		
CEM II/B-V	referencyjny	59,3	70,1	66,7	-5,0	1,10
	napowietrzony	42,5	53,6	56,7	+1,1	0.11
CEM III/A NA	referencyjny	68,4	72,0	72,0	0	0,13
	napowietrzony	57,4	63,5	65,0	+1,0	0,08

Tabela 5. Wyniki badań charakterystyki porowatości wg PN-EN 480-11
Table 5. Porosity characteristics acc. to PN-EN 480-11

Beton		Charakterystyka porowatości			
		A [%]	α [1/mm]	L [mm]	A_{300} [%]
CEM II/B-V	referencyjny	2,05	51,8	0,134	0,63
CEM II/B-V	napowietrzony	4,86	44,1	0,115	2,67

L – wskaźnik rozmieszczenia porów; A – całkowita zawartość powietrza; A_{300} – zawartość mikroporów średnicy mniejszej niż 0,3 mm; α – powierzchnia właściwa porów



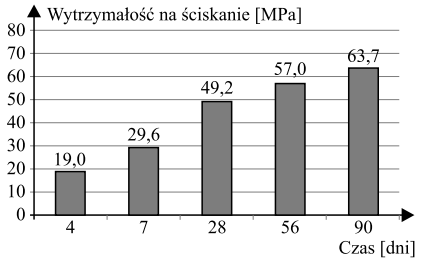
Rys. 1. Zawartość powietrza w mieszance betonowej
Fig. 1. Air content in concrete mix

Charakterystyka napowietrzenia mieszanki zbadana metodą AVA pokazała, że wskaźnik rozmieszczenia porów powietrza (0,192 mm) oraz zawartość mikroporów (< 0,300 mm) potwierdzają, że stwardniały beton będzie mrozoodporny (tabela 6).

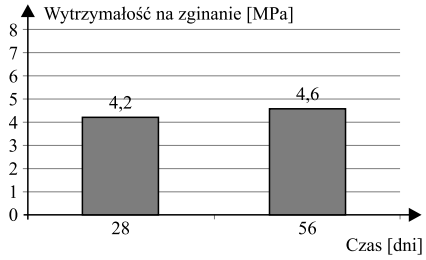
Tabela 6. Charakterystyka porów powietrza w mieszance betonowej badana metodą AVA
Table 6. Pore structure in fresh concrete acc. to AVA test method

Całkowita zawartość powietrza [%]	Zawartość mikroporów A_{300} [%]	Wskaźnik rozmieszczenia [mm]
5,0	2,2	0,193

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono rozwój wytrzymałości badanego betonu. Rezultaty tych badań wykazały wyraźny **przyrost wytrzymałości** w czasie. Tendencja ta jest charakterystyczna w przypadku betonów z cementami zawierają-



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie
Fig. 2. Compressive strength



Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie
Fig. 3. Bending strength

cymi, oprócz klinkieru portlandzkiego, znaczną ilość składników głównych o utajonych właściwościach hydraulicznych (mielony granulowany żużel wielkopiecowy) lub pucolanowych (popioły lotne). Dotyczy to przede wszystkim cementów hutniczych CEM III.

Wyniki badania trwałości (tabela 7) **wykazały, że beton jest wodoszczelny oraz mrozoodporny**. Wprawdzie nasiąkliwość była większa niż 5% wymagane przez wycofaną normę PN-B-06250:1988 na beton zwykły, jednak wobec zadowalających rezultatów badania odporności na działanie mrozu, wymaganie to można uznać za nieistotne. Naszym zdaniem nasiąkliwość przekraczająca nieznacznie 5% wynikała z dodatkowego napowietrzenia mieszanki betonowej. Zadaniem tego dodatkowego powietrza było osiągnięcie mrozoodporności w obecności środków odladzających, co zostało potwierdzone pozytywnymi wynikami badań. Istotną cechą badanego betonu było zmniejszenie głębokości wnikania wody pod ciśnieniem oraz zwiększenie odporności na działanie mrozu wraz z upływem czasu. Sytuacja ta została spowodowana, podobnie jak w przypadku wytrzymałości, zastosowaniem w betonie cementu hutniczego CEM III. Zaobserwowane trendy są spójne z danymi literaturowymi [12, 13], w których podkreśla się pozytywny wpływ mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego na kształtowanie mikrostruktury twardniejącego zaczynu cementowego.

Podsumowanie

Zaprezentowane w artykule wyniki badań właściwości cementów napowietrzających beton potwierdzają ich zgodność z wymaganiami normy PN-EN 197-1 dotyczącymi cementów powszechnego użytku, wykazując jednocześnie szczególne właściwości napowietrzania mieszanki betonowej.

Wprowadzenie domieszki napowietrzającej do cementu skutkuje wyraźnym obniżeniem normowej wytrzymałości mechanicznej zaprawy (nawet o klasę wytrzymałości) w porównaniu z cementem bez domieszki. Cementy napowietrzające zapewniają jednak uzyskanie odpowiedniego stopnia napowietrzenia mieszanki betonowej, gwarantując wymaganą wielkość i rozmieszczenie porów, co jest niezbędne przy projektowaniu mrozoodpornego betonu.

Badania poligonowe mieszanki betonowej wykazały stabilność napowietrzenia oraz niewielki spadek konsystencji. Struktura napowietrzenia zbadana metodą AVA była taka, jaką powinny charakteryzować się betony odporne na działanie mrozu. Potwierdzeniem uzyskania właściwej charakterystyki napowietrzenia były pozytywne wyniki badania odporności na działanie mrozu metodą zwykłą oraz metodą złuszczeń powierzchniowych w obecności soli odladzającej

Tabela 7. Właściwości trwałościowe badanego betonu
Table 7. Durability of hardened concrete

Właściwość	Wynik badania	Wymaganie normowe
Nasiąkliwość [%] po: – 28 dniach – 56 dniach – 90 dniach	 5,6 5,2 5,1	< 5,0 w przypadku betonów narażonych na działanie czynników atmosferycznych wg PN-B-06250:1988
Głębokość penetracji wody [mm] podczas badania stopnia wodoszczelności W8 po: – 28 dniach – 56 dniach – 90 dniach	 47 38 30	< 150 mm wg PN-B-06250:1988
Ubytek masy [%] po badaniu mrozoodporności dla stopnia F150	2,6	< 5,0 wg PN-B-06250:1988
Spadek wytrzymałości [%] po badaniu mrozoodporności dla stopnia F150	5,1	< 20,0 wg PN-B-06250:1988
Złuszczenie betonu [kg/m^2] po badaniu mrozoodporności w obecności soli odladzającej (28 cykli) – rozpoczęcie badania po 28 dniach	0,64	< 1,0 dla kategorii FT1 wg PN-EN 13877:2007
Złuszczenie betonu [kg/m^2] po badaniu mrozoodporności w obecności soli odladzającej (28 cykli) – rozpoczęcie badania po 56 dniach	0,38	< 0,5 dla kategorii FT2 wg PN-EN 13877:2007
Złuszczenie betonu [kg/m^2] po badaniu mrozoodporności w obecności soli odladzającej (28 cykli) – rozpoczęcie badania po 90 dniach	0,12	

Literatura

[1] Neville A.: Właściwości betonu. V edycja. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków, 2012, 931.

[2] Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków, 2002, 182.

[3] Glinicki M. A.: Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka. Wydawnictwo Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Warszawa, 2011, 286.

[4] Giergiczny Z.: Popiół lotny w składzie cementu i betonu. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013, 189.

[5] ASTM C 150-04 Standard Specification for Portland Cement.

[6] ASTM C 595-03 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.

[7] PN-EN 480-11:2008 Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of air void characteristics in hardened concrete.

[8] Jakobsen U. H., Pade C., Thaulow N., Brown D., Sahu S., Magnusson O., De Buck S., De Schutter G.: Automated air void analysis of hardened concrete – a Round Robin study. Cement and Concrete Research 36 (2006) 1444 – 1452.

[9] Danish standard DS2426 Concrete – Materials – Rules for application of EN 206-1 in Denmark.

[10] Beton-Teil1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1).

[11] Giergiczny Z., Baran T., Najduchowska M., Ostrowski M., Cements for frost resistant concrete, Materiały ICCC, Pekin 2015.

[12] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu – Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków – Warszawa 2010.

[13] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2002.

[14] Guide to durable concrete. Reported by ACI Committee 201, ACI Journal, Vol. 74, No. 12, 1979, pp. 573 – 582.

Przyjęto do druku: 30.08.2015 r.