

Damian Dziuk¹

Łukasz Burcon²

Mirosław Saferna³

BADANIA POLIGONOWE BETONÓW WYKONANYCH Z CEMENTÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH

1. Wprowadzenie

Odporność na działanie mrozu jest jedną z najważniejszych cech trwałościowych betonu. Szczególnie istotna, gdy elementy konstrukcji betonowej są narażone na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności wody nasyconej środkami odladzającymi. Niszczące oddziaływanie mrozu na stwardniały beton jest spowodowane zamarzaniem wody uwięzionej w zaczynie i kruszywie. Podstawowym czynnikiem uzyskania odporności betonu na cykliczne zamarzanie jest zastosowanie mrozoodpornego kruszywa, tzn. takiego kruszywa, które charakteryzuje się małą porowatością i nasiąkliwością oraz nie pęka pod wpływem cyklicznego zamrażania/rozmrażania. Istotne jest także, aby kruszywo było otoczone stwardniałym zaczynem o takiej porowatości, który ogranicza zamarzanie wody. Pod wpływem ujemnej temperatury następuje zamarzanie wody zgromadzonej w kapilarach stwardniałego zaczynu. Podczas zamarzania woda zwiększa swoją objętość o około 9 %. Wskutek obniżenia temperatury i różnicy entropii, woda z porów żelowych migruje do pustek kapilarnych, co powoduje powiększanie się bryłek lodu. Gdy rosnące ciśnienie powstające w wyniku powstawania lodu jest większe od wytrzymałości betonu na rozciąganie wówczas następuje pękanie betonu. Gdy zjawiska te mają miejsce w strefie przypowierzchniowej

¹dr inż., CT Betotech Sp. z o.o., Dąbrowa Górnicza, damian.dziuk@betotech.pl

²mgr inż., CT Betotech Sp. z o.o., Dąbrowa Górnicza, lukasz.burcon@betotech.pl

³mgr inż., CT Betotech Sp. z o.o., Dąbrowa Górnicza, miroslaw.saferna@betotech.pl

betonu następuje odpryskiwanie jego fragmentów, co jest określane jako złuszczenie. Zamarzanie wody w porach żelowych betonu jest mało prawdopodobne, ponieważ temperatura wewnątrz betonu powinna spaść poniżej $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Decydujące znaczenie dla mrozoodporności betonu jest uzyskanie jak największej objętości porów żelowych kosztem porów kapilarnych.

Należy mieć na uwadze także to, że powtarzające się często cykle zamarzania i rozmrażania dają tzw. efekt kumulacji. Powoduje to, że beton jest najbardziej narażony na destrukcyjne działanie mrozu w klimacie umiarkowanych, dla którego charakterystyczna jest stosunkowo duża liczba cykli przejść przez $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kluczowymi czynnikami dla uzyskania betonu mrozoodpornego są: mrozoodporne kruszywo, niski stosunek wody do cementu i właściwe napowietrzenie mieszanki betonowej. Przez właściwe napowietrzenie rozumie się wprowadzenie do betonu równomiernie rozmieszczonych, drobnych pęcherzyków powietrza, które są rozmieszczone dostatecznie blisko siebie, aby kompensować naprężenia powstające wskutek przyrostu objętości wody w kapilarach w wyniku zamrażania. Należy także pamiętać o właściwej pielęgnacji, która zapobiega przesuszeniu powierzchni betonu i ogranicza powstawanie porów kapilarnych [1÷5]. Właściwa pielęgnacja wilgotnościowa, w przypadku cementów z dodatkami CEM II÷CEM V, ogranicza postęp karbonatyzacji w początkowym okresie dojrzewania, co jest istotne dla odporności powierzchniowej betonu na działanie niskich temperatur.

Najczęściej stosowanym sposobem na uzyskanie właściwej struktury napowietrzenia betonu jest stosowanie domieszek napowietrzających. Są to substancje powierzchniowo czynne, które obniżają napięcie powierzchniowe wody, ułatwiają powstawanie bąbeczek powietrznych oraz przeciwdziałają ich łączeniu się [6]. Domieszki stosowane do napowietrzenia mieszanki betonowej powinny spełniać wymagania serii norm PN-EN 934. Zgodnie z PN-EN 934-2 domieszka napowietrzająca powinna tak zmienić charakterystykę porów w stwardniałym betonie aby wskaźnik ich rozmieszczenia był $\leq 0,200\text{ mm}$ [7]. Zgodnie z definicją normową wskaźnik rozmieszczenia oznacza maksymalną odległość z dowolnego punktu zaczynu cementowego od krawędzi najbliższego poru powietrznego. Każda domieszka napowietrzająca przed wprowadzeniem na rynek jest badana pod kątem jej wpływu na charakterystykę porów w betonie. Metoda badawcza wg PN-EN 480-11 polega na badaniu próbki stwardniałego betonu napowietrzonego, która jest przecinana prostopadłe do górnej powierzchni. Następnie próbka jest szlifowana i polerowana w celu uzyskania zglądu

do badania mikroskopowego. W badaniu tym strukturę porów bada się prowadząc obserwację wzdłuż serii linii pomiarowych. Rejestruje się liczbę porów powietrznych przeciętych tymi liniami oraz długość każdej cięciwy poru. Analiza zarejestrowanych danych umożliwia opisanie systemu porów powietrznych za pomocą wymaganych parametrów. Wynikiem badania są: wskaźnik rozmieszczenia, całkowita zawartość powietrza oraz zawartość mikroporów (tzn. porów o średnicy do 0,3 mm) [8].

Alternatywnym sposobem może być zastosowanie cementu, do którego podczas procesu produkcji dodano domieszkę i w efekcie cement ten napowietrza mieszanekę betonową. Tego rodzaju cementy zostały zdefiniowane przez amerykańskie normy ASTM C 150-04 i ASTM C 595-03. Spoiwa te powinny charakteryzować się takimi właściwościami jak cementy powszechnego użytku i dodatkowo powodować napowietrzenie zaprawy normowej w zakresie od 16 % do 22 %. Dla porównania, zawartość powietrza w zaprawach na cementach bez domieszki napowietrzającej może maksymalnie wynosić 12 %. W wymaganiach wspomnianych norm uwzględniono także obniżenie wytrzymałości spowodowane dodatkowym napowietrzeniem[9],[10].

Cementy napowietrzające beton są przedmiotem zainteresowania projektu badawczego pn.: „Innowacyjne cementy napowietrzające beton” [11] realizowanego przez konsorcjum Politechniki Śląskiej oraz Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych Oddział w Krakowie. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań mieszanki betonowej i stwardniałego betonu wyprodukowanego podczas próby technologicznej produkcji betonu towarowego z użyciem cementu hutniczego napowietrzającego CEM III/A 42,5N – LH/HSR/NA zawierającego domieszkę napowietrzającą Air Pak.

2. Wyniki badań i dyskusja

Skład badanej mieszanki betonowej pokazano w tabeli 1.

Zakresie badań obejmował:

- a. określenie właściwości mieszanki betonowej
 - oznaczenie konsystencji mieszanki betonowej zgodnie z PN-EN 12350-2:2011;
 - oznaczenie zawartości powietrza w mieszance betonowej zgodnie z PN-EN 12350-7:2011;

- oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w mieszance betonowej metodą AVA (Air-Void-Analyzer).

Tabela 1. Skład badanej mieszanki betonowej

Lp.	Nazwa składnika	Ilość w 1m ³
1	Piasek 0/2	670 kg
2	Żwir 2/8	456 kg
3	Żwir 8/16	640 kg
4	CEM III/A 42,5N –LH/HSR/NA AirPac	350 kg
5	Woda	158 kg
6	Domieszka upłynniająca na bazie naftalenu (0,9 % m.c.)	3,15 kg
7	Napowietrzenie (założone)	4%

b. Określenie właściwości stwardniałego betonu wykonano:

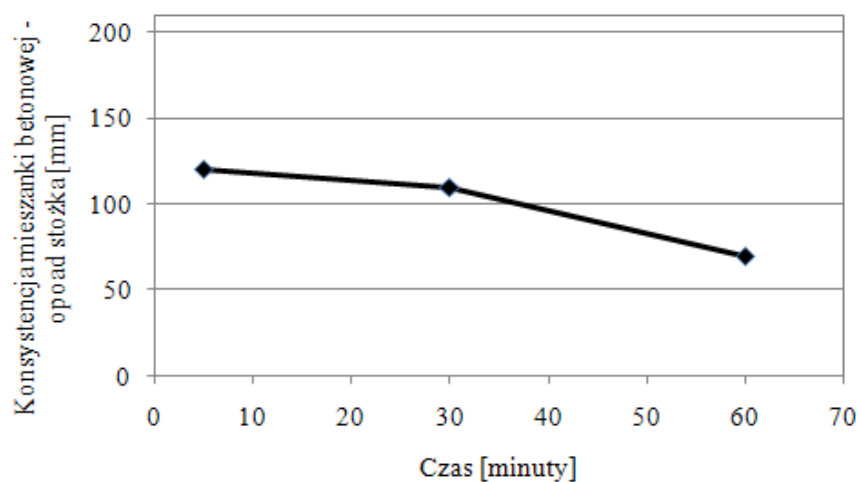
- wytrzymałości na ściskanie zgodnie z PN-EN 12390-3:2011;
- wytrzymałości na zginanie zgodnie z PN-EN 12390-5:2011;
- nasiąkliwości wagowej zgodnie z PN-B-06250:1988;
- mrozoodporności zwykłej dla stopnia mrozoodporności F150 zgodnie z PN-B-06250:1988;
- mrozoodporności z udziałem soli odladzających zgodnie z PKN-CEN/TS 12390-9:2007;
- wodoszczelności betonu dla stopnia W8 zgodnie z PN-B-06250:1988.

Próbki do badań zostały pobrane zgodnie z normą PN-EN 12350-1:2011. Zaformowanie próbek i ich sezonowanie prowadzono wg PN-EN 12390-2:2011. Skład mieszanki dobrano tak, aby spełniała wymagania dla klasy ekspozycji XF4 wg PN-EN 206:2014, tzn. zawartość cementu w 1 m³ mieszanki wynosiła co najmniej 340 kg, a maksymalny stosunek wody do cementu był $\leq 0,45$.

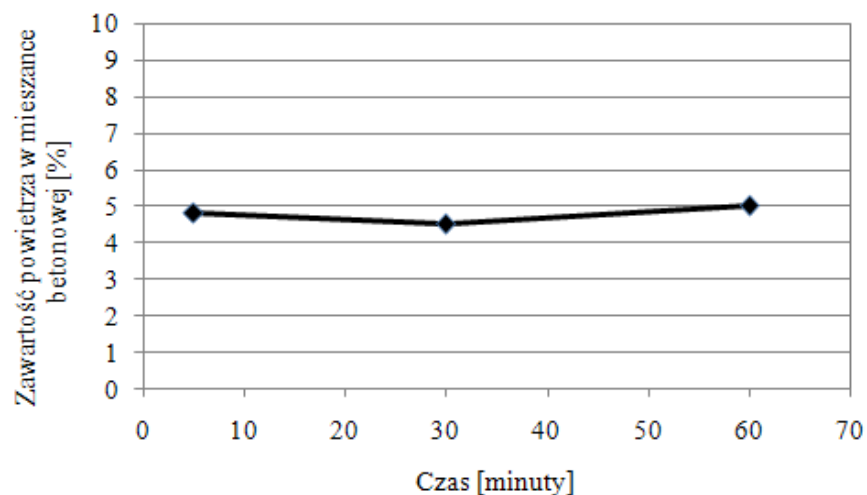
Konsystencja mieszanki betonowej, przez pierwsze 30 minut od momentu pierwszego kontaktu cementu z wodą, utrzymywała się na poziomie klasy S3 wg PN-EN 206:2014. Po kolejnych 30 minutach opad stożka był już wyraźnie mniejszy (klasa S2, rys.1). Należy jednak zaznaczyć, że uzyskanie konkretnej konsystencji mieszanki betonowej i jej utrzymanie nie było głównym celem prowadzonych badań. W warunkach konkretnej aplikacji, jeżeli

zachodzi taka potrzeba, konsystencja mieszanki i jej utrzymanie jest regulowane poprzez dobór plastyfikatorów, superplastyfikatorów i/lub domieszek opóźniających.

Podstawowym celem przeprowadzonej próby technologicznej 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 kształtowała się w zakresie od 4% do 5 % (rys 2).



Rys. 1. Konsystencja mieszanki betonowej



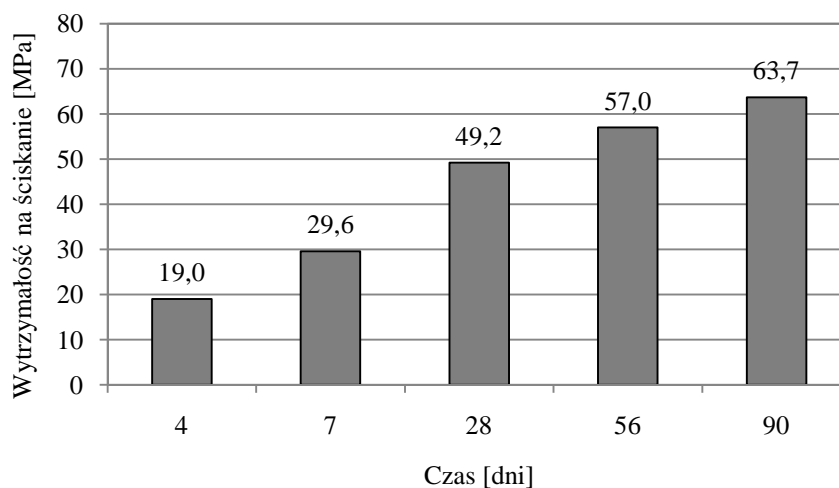
Rys. 2. Zawartość powietrza w mieszance betonowej

Charakterystyka napowietrzenia mieszanki zbadana metodą AVA (tabela 2) pokazała, że wskaźnik rozmieszczenia porów powietrza (0,192 mm) oraz zawartość mikroporów (< 0,300 mm) pozwalają przypuszczać, że beton będzie dobrze napowietrzony i spełni kryteria dla betonu mrozoodpornego.

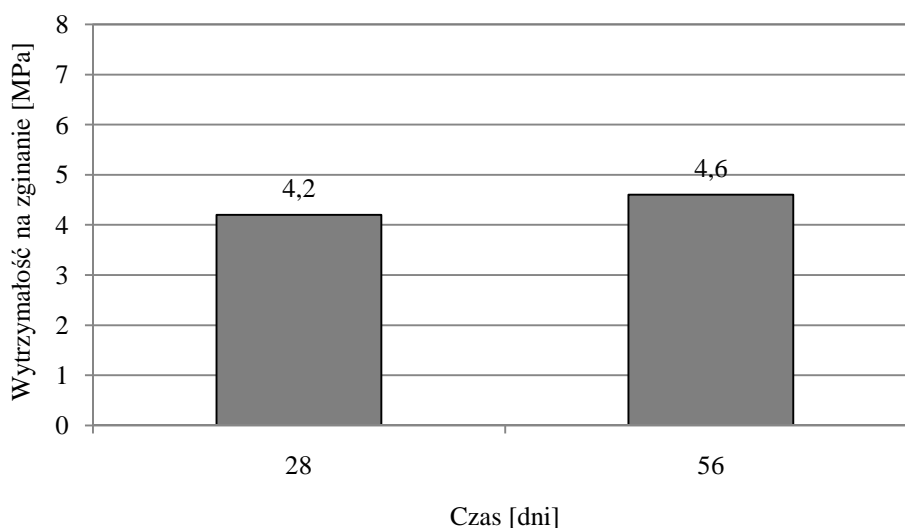
Tabela 2. Charakterystyka porów powietrza w mieszance betonowej badana metodą AVA

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

Na rys.3 i rys.4 przedstawiono rozwój wytrzymałości badanego betonu. Wyniki tych badań wykazały wyraźny przyrost wytrzymałości w czasie. Tendencja ta jest charakterystyczna dla betonów z cementów zawierających, oprócz klinkieru portlandzkiego, inne składniki o utajonych właściwościach hydraulicznych (mielony granulowany żużel wielkopiecowy) lub pucolanowych (popioły lotne). Dotyczy to w szczególności cementów hutniczych CEM III/A,B.



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie



Rys. 4. Wytrzymałość na zginanie

Badania trwałościowe (tabela 3) wykazały, że testowany beton jest wodoszczelny oraz mrozoodporny. Wprawdzie nasiąkliwość była większa niż 5 % (wymaganie stawiane przez wycofaną normę PN-B-06250:1988 „Beton zwykły”), jednak wobec zadowalających rezultatów badań odporności na działanie mrozu, wymaganie to można uznać za nieistotne. Zdaniem autorów nasiąkliwość przekraczająca nieznacznie 5 % była spowodowana dodatkowym napowietrzeniem mieszanki betonowej. Zadaniem tego dodatkowego powietrza było osiągnięcie mrozoodporności w obecności środków odladzających, co zostało potwierdzone pozytywnymi wynikami badań. Istotną cechą badanego betonu był fakt, że wraz z czasem jego cechy trwałościowe (tj.: głębokość wnikania wody pod ciśnieniem oraz odporność na działanie mrozu) ulegały poprawie. Sytuacja ta była spowodowana, podobnie jak w przypadku wytrzymałości, zastosowaniem w betonie cementu hutniczego CEM III. Zaobserwowane trendy są zgodne z danymi literaturowymi [2], [6],[12] w których podkreśla się pozytywny wpływ mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego na kształtowanie mikrostruktury twardniejącego zaczynu cementowego. Dlatego też bardzo często jakość betonu na cemencie hutniczym CEM III/A,B określana jest nie po 28 dniach twardnienia, ale po 90.

Tabela 3. Właściwości trwałościowe stwardniałego betonu

Właściwość	Wynik badania	Wymaganie normowe
Nasiąkliwość [%] po: - 28 dniach - 56 dniach - 90 dniach	5,6 5,2 5,1	< 5,0 dla betonów narażonych na działanie czynników atmosferycznych wg PN-B-06250:1988
Śc penetracji wody [mm] podczas badania stopnia wodoszczelności W8 po: - 28 dniach - 56 dniach - 90 dniach	47 38 30	< 150 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) – rozpoczęcia 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) – rozpoczęcia badania po 90 dniach	0,12	

Podsumowanie

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań betonu wyprodukowanego w warunkach przemysłowych z cementu hutniczego napowietrzającego CEM III/A 42,5N –LH/HSR/NA AirPac. Zadaniem tego innowacyjnego cementu było właściwe napowietrzenie betonu i zwiększenie jego odporności na działanie mrozu. Stwierdzono, że została w mieszance betonowej właściwie ukształtowana struktura porów powietrznych. Badania przeprowadzone na mieszance betonowej wykazały także stabilność napowietrzenia oraz niewielki spadek konsystencji. Potwierdzeniem uzyskania właściwej charakterystyki napowietrzenia były pozytywne wyniki badań mrozoodporności stwardniałego betonu metodą zwykłą oraz w obecności soli odladzającej.

Prezentowane badania były finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Projektu PBS1/A2/4/2012 pt. „Innowacyjne Cementy Napowietrzające Beton”.

Literatura

- [1] Czarnecki L., Emmons P. H., *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*, Polski Cement, Kraków 2002
- [2] Neville A.M., *Właściwości betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2012
- [3] Jackiewicz-Rek W., *Kształtowanie mrozoodporności betonów wysokopopiołowych*, Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010
- [4] Rusin Z., *Technologia betonów mrozoodpornych*, Polski Cement, Kraków 2002
- [5] Glinicki M.A., *Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych – wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie, Warszawa 2011
- [6] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu – Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków – Warszawa 2010
- [7] PN-EN 934-2:1999 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Definicje i wymagania*
- [8] PN-EN 480-11:2008 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów w stwardniałym betonie*
- [9] ASTM C 150 – 04 *Standard specification for Portland Cement*
- [10] ASTM C 595 – 03 *Standard specification for Blended Hydraulic Cements*
- [11] Giergiczny Z., Garbacik A., Drożdż W., Baran T., *Nowa koncepcja kształtowania mrozoodporności betonu*, Dni Betonu 2014 – materiały konferencyjne, Wisła 2014, str. 659 – 667
- [12] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2002