

# **Mrozoodporność betonów z dodatkiem mikrowłókien polimerowych**

## **FROST RESISTANCE OF CONCRETE WITH THE ADDITION OF POLYMER MICROFIBERS**

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wpływ dodatku mikrowłókien polipropylenowych na mrozoodporność betonów nienapowietrzonych oraz na niektóre właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Do badań użyto mikrowłókien klasy Ia (pojedyncze) i Ib (fibrylowane). Włókna dozowano w różnych ilościach do betonu referencyjnego, wszystkie badania wykonano porównawczo. Wyniki badań mrozoodporności skorelowano z badaniami rozkładu porów powietrznych w stwardniałym betonie. Z badań wynika, że mikrowłókna polipropylenowe pojedyncze i fibrylowane wpływają na poprawę mrozoodporności betonów nienapowietrzonych. Najlepsze wyniki i znaczną poprawę mrozoodporności uzyskał beton z dodatkiem mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia (włókna pojedyncze). Głównym mechanizmem wpływającym na poprawę odporności na zamrażanie/rozmarzanie wydaje się być mechanizm mostkowania mikropęknięć przez włókna.

### **Abstract**

In this paper, the effect of the addition of polypropylene microfiber class Ia and Ib on the frost resistance of not-aerated concrete and some properties of fresh concrete and hardened concrete was described. In the studies used microfibers class Ia (single) and Ib (fibrillated). The fibers were dosed in different amounts to the reference concrete, all testing was performed for comparison. The test results of frost resistance correlated with determination of air void characteristic in the hardened concrete. The best results and

a significant improvement of frost resistance of concrete was obtained with the addition of polypropylene microfiber class Ia (single fiber). The main mechanism which contributing to the improvement of resistance to freezing / thawing of concrete seems to be the mechanisms of crack bridging by the fibers

## 1. Wstęp

Dodanie do mieszanki betonowej włókien w postaci zbrojenia rozproszonego tworzy nowy rodzaj betonu nazwany fibrobetonem. W porównaniu do betonów bez włókien fibrobetony charakteryzują się większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu, na ściskanie oraz na ścinanie, a także zwiększoną odpornością zmęczeniową i udatnością.

Obecność włókien wpływa istotnie na hamowanie procesów mikro i makro pękania kompozytów cementowych zarówno na etapie wiązania i dojrzewania, redukując skutki osiadania plastycznego, skurczu termicznego, a także skurczu wskutek wysychania, jak również w trakcie użytkowania ograniczając wpływ obciążeń eksploatacyjnych. Mankamentem zastosowania włókien jest pogorszenie właściwości mieszanki betonowej, takich jak konsystencja czy urabialność, jednak dzięki zastosowaniu odpowiednich domieszek uplastyczniających można bardzo znacząco zniwelować ten problem. Włókna do betonu wykonuje się z różnych materiałów. Najbardziej popularne są włókna polipropylenowe, stalowe, szklane (cyrkonowane) i bazaltowe. Część z nich: polipropylenowe i stalowe objęte są normami zharmonizowanymi [10, 11], natomiast pozostałe wprowadza się do obrotu na podstawie aprobat technicznych.

Włókna stosowane do betonów ze względu na oddziaływanie można umownie podzielić na dwie grupy: włókna przeciwskurczowe i zbrojące. Włókna przeciwskurczowe zapobiegają tworzeniu się mikrospeków, spowodowanych różnego rodzaju skurczem. Natomiast włókna zbrojące pełnią rolę rozproszonego mikrozbrowienia.

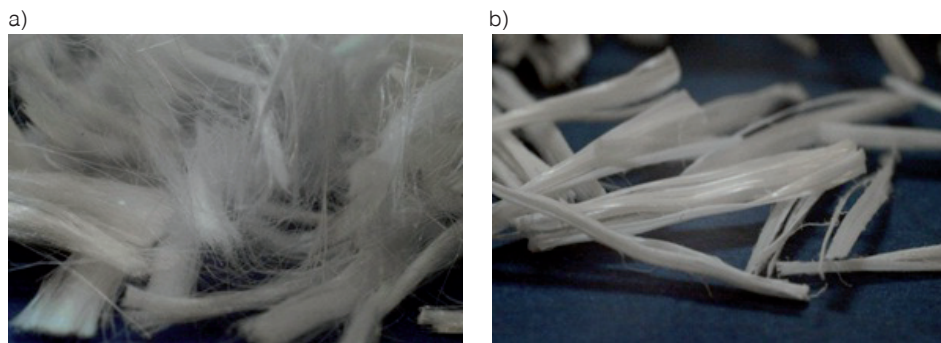
Analizując literaturę dotyczącą betonów z włóknami (fibrobetonów) można zauważyć, że najwięcej uwagi poświęcono właściwościom mechanicznym lub reologicznym [1–6] niewiele miejsca jest poświęcone tematyce trwałości, w tym mrozoodporności [7]. Zagadnienie to jest istotne gdyż coraz częściej w konstrukcjach narażonych na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie [14] stosuje się różnego rodzaju włókna. W literaturze pojawiają się badania wpływu włókien na mrozoodporność betonu, lecz wyniki te nie są jednoznaczne [8, 9], nie można porównać wyników ze sobą ze względu na odmienne składy betonów. Aktualnie brak jest kompleksowej pracy, w której zestawiono by wyniki badań powszechnie stosowanych włókien do betonu i ich wpływ na cechy mieszanki betonowej i stwardniałego betonu, a głównie na mrozoodporność, stąd w Instytucie Techniki Budowlanej rozpoczęto projekt dotyczący badania wpływu różnego rodzaju włókien (polimerowych klasy I i II, stalowych) na mrozoodporność betonów. Niniejszy artykuł zawiera badania betonów z zastosowaniem mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia i Ib, zgodnych z normą PN-EN 14889-2:2007 [11], używanych w praktyce, w celu ograniczenia skutków skurczu betonu. Wybrano wyniki badań tych włókien gdyż, dla nich stwierdzono istotny wpływ na poprawę mrozoodporności w porównaniu z włóknami polimerowymi klasy II.

## 2. Wpływ mikrowłókien polimerowych na właściwości betonu

### 2.1. Włókna użyte do badań

Do badań użyto dwóch rodzajów włókien polipropylenowych: klasy Ia i klasy Ib, zgodnych z normą PN-EN 14889-2:2007 [11]. Włókna do betonu klasy Ia i klasy Ib to mikrowłókna o średnicy mniejszej od 0,30 mm, z tym że włókna klasy Ia to włókna pojedyncze, a włókna

klasy Ib to włókna fibrylowane (jako nacięte wzdłuż fragmenty taśmy), zdjęcia włókien przedstawiono na fotografii 1.



Fot 1. Mikrowłókna polipropylenowe, a) pojedyncze klasy Ia, b) fibrylowane klasy Ib

Włókna te są dodawane do betonu głównie w celu ograniczenia jego skurczu zarówno plastycznego, jak i skurczu twardnienia. Dodatkowo ich obecność w betonie może ograniczać występowanie zjawiska bleedingu (odsączania), czyli wydzielania się wody lub mleczka cementowego (zaczynu) na powierzchnię wbudowanego betonu. Producenci włókien informują również, że mogą mieć one wpływ na poprawę innych właściwości betonu w tym wytrzymałości i nasiąkliwości. Najczęściej włókna tej klasy stosuje się do betonów przeznaczonych do wykonywania podkładów podłogowych i posadzek.

Zbadane właściwości włókien przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości użytych włókien klasy Ia i Ib

Cecha	Deklarowana wartość	
	pojedyncze	fibrylowane
Klasa	Ia	Ib
Długość	12 mm	19 mm
Masa liniowa wiązki	3,4 dtex	19600 dtex
Wytrzymałość na zrywanie	364 N/mm <sup>2</sup>	Wytrzymałość wiązki 3,71 cN/dtex
Konsystencja przy zawartości włókien 0,9 kg/m <sup>3</sup>	Czas Vebe 10 s	Czas Vebe 13 s

## 2.2. Cel i program badań

Celem pracy było zbadanie wpływu dodatku mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia i Ib na mrozoodporność betonu oraz dodatkowo pozostałe cechy stwardniałego betonu i mieszanki betonowej.

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. Etap I obejmował badania mieszanki betonowej:

- konsystencję metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2:2011
- gęstość mieszanki betonowej wg PN-EN 12350-6:2011
- zawartość powietrza metodą ciśnieniową wg PN-EN 12350-7:2011

natomiast etap II dotyczył badania stwardniałego betonu:

- wytrzymałość na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2011+AC:2012
- nasiąkliwość wg PN-B-06250:1988
- gęstość wg PN-EN 12390-7:2011
- odporność na zamrażanie i rozmrażanie wg PN-B-06250:1988
- charakterystyka rozkładu porów powietrznych wg PN-EN 480-11:2008

### 2.3. Badane betony

Do badań zaprojektowano beton referencyjny klasy ekspozycji XC1 wg PN-EN 206:2014-04 [12], który z założenia miał mieć niską odporność na zamrażanie/rozmrażanie, w celu sprawdzenia wpływu mikrowłókien na ten parametr. Betony klasy ekspozycji XC1 wykorzystywane są m.in. wewnątrz budynków o niskiej wilgotności powietrza, w elementach stale zanurzonych w wodzie.

W tabeli 2 przedstawiono skład jakościowy i ilościowy betonu referencyjnego (bez dodatku włókien), do którego dodawano włókna polipropylenowe klasy Ia i Ib w ilości zalecanej przez producenta (0,9 kg/m<sup>3</sup>) oraz w ilości dwukrotnie wyższej (1,8 kg/m<sup>3</sup>). Podwojoną ilość zastosowano w celu zbadania jak zmieniają się właściwości użytkowe betonów w przypadku zwiększenia ilości mikrowłókien (np. w podczas przedozowania). Oznaczenia betonów podano w tabeli 3.

Tabela 2. Skład betonu referencyjnego zaprojektowanego dla klasy ekspozycji XC1; w/c=0,65

Składnik	Skład jakościowy	Skład ilościowy [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement	Cement portlandzki CEM I 42,5 R	300
Woda	Wodociągowa	195
Kruszywo	Piasek 0/2 mm	475
	Żwir węglanowo-granitoidowy 2/16 mm	1390

Tabela 3. Szczegóły oznaczenia i zawartości włókien w betonach badawczych klasy ekspozycji XC1

Oznaczenie betonu	Rodzaj włókien polipropylenowych	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ]
XC ref	-	-
XC Ia 0,9	Klasa Ia	0,9
XC Ia 1,8		1,8
XC Ib 0,9	Klasa Ib	0,9
XC Ib 1,8		1,8

Beton z włóknami wykonano dodając włókna do kruszywa bezpośrednio przed cementem w czasie pierwszej z trzech minut mieszania.

## 2.4. Analiza wyników badań mieszanki betonowej

W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań mieszanki betonowej referencyjnej oraz z dodatkiem włókien klasy Ia i Ib.

Tabela 4. Wyniki badań mieszanki betonowej referencyjnej i z włóknami

Oznaczenie betonu	Konsystencja metodą opadu stożka [mm]	Gęstość mieszanki [kg/m <sup>3</sup> ]	Zawartość powietrza [%]
XC ref	170	2290	0,5
XC Ia 0,9	120	2260	1,2
XC Ia 1,8	90	2230	1,6
XC Ib 0,9	170	2280	0,6
XC Ib 1,8	150	2280	0,6

Większy wpływ na spadek konsystencji miały mikrowłókna klasy Ia (pojedyncze), przy dozowaniu 1,8 kg/m<sup>3</sup> spadek konsystencji wyniósł 47% w porównaniu z betonem bez włókien. Włókna Ib dozowane w ilości zalecanej przez producenta 0,9 kg/m<sup>3</sup> nie wpłynęły na zmianę konsystencji w odniesieniu do betonu referencyjnego.

Dodatek mikrowłókien polipropylenowych spowodował wzrost zawartości powietrza w mieszankach betonowych, przy czym większy wzrost nastąpił w przypadku pojedynczych włókien klasy Ia, które dozowane w ilości 0,9 i 1,8 kg/m<sup>3</sup> spowodowały zwiększenie zawartości powietrza o odpowiednio 0,7 i 1,1%. Napowietrzenie mieszanki betonowej potwierdzają również wyniki badania gęstości objętościowej. Największe spadki gęstości odpowiadają wynikom największego napowietrzenia.

## 2.5. Analiza wyników badań stwardniałego betonu

Tabela 5 zawiera zestawienie wyników badań stwardniałego betonu referencyjnego i z dodatkiem mikrowłókien polipropylenowych pojedynczych klasy Ia i fibrylowanych klasy Ib.

Wytrzymałość na ściskanie przeprowadzono na sześciu próbkach sześciennych o wymiarach 150x150x150 mm, badanie wykonano po 28 dniach dojrzewania.

Tabela 5. Wyniki badań stwardniałego betonu referencyjnego i z włóknami

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Nasiąkliwość [%]	Gęstość w stanie suchym [kg/m <sup>3</sup> ]
XC ref	49,2	5,9	2280
XC Ia 0,9	45,7	6,0	2260
XC Ia 1,8	45,7	6,3	2230
XC Ib 0,9	50,0	6,2	2270
XC Ib 1,8	46,8	6,3	2270

Mikrowłókna pojedyncze klasy Ia spowodowały zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu referencyjnego o 7%, powodem tego mogło być napowietrzenie mieszanki betonowej, co wykazały badania mieszanek. Mikrowłókna fibrylowane klasy Ib dozowane w ilości zalecanej przez producenta nieznacznie polepszyły wytrzymałość na ściskanie,

natomiast przy podwojonej ilości spowodowały zmniejszenie wytrzymałości o ok 5%. Różnice te nie są duże i mieszczą się w granicach błędu pomiaru.

W badaniu nasiąkliwości dodatek włókien spowodował nieznaczne pogorszenie tej cechy.

W przypadku badania gęstości w stanie suchym wszystkie betony z włóknami uzyskały niższą gęstość niż beton referencyjny. Największy spadek wystąpił przy mikrowłóknach pojedynczych klasy Ia w ilości 1,8 kg/m<sup>3</sup>, co koreluje się z właściwościami mieszanki.

## 2.6. Badanie mrozoodporności betonu z mikrowłóknami polipropylenowymi

Badanie mrozoodporności betonu przeprowadzono wg metody zwykłej PN-B-06250:1988 poprzez cykliczne zamrażanie w powietrzu i rozmrażanie w wodzie. Próbkki referencyjne przebywały w tej samej komorze co próbki z włóknami. Badanie zakończono po 75 cyklach, po pojawieniu się siatki spękań na próbkach z betonu referencyjnego i z włóknami klasy Ib. Następnie określono ubytek masy próbek i spadek ich wytrzymałości w odniesieniu do świadków przechowywanych w wodzie. Wyniki podano w tabeli 6 oraz na rysunku 1.

Tabela 6. Wyniki badań mrozoodporności betonu referencyjnego i z włóknami

Oznaczenie betonu	Spadek wytrzymałość na ściskanie [%]	Zmiana masy po badaniu [%]
XC ref	35,1	-0,5
XC Ia 0,9	1,3	0,0
XC Ia 1,8	6,6	-0,1
XC Ib 0,9	27,3	-0,4
XC Ib 1,8	16,7	-0,2

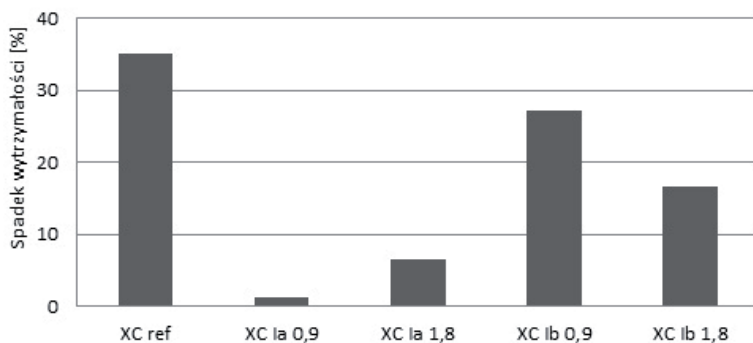
Z wyników badań wynika, że mikrowłókna polipropylenowe klasy Ia i Ib wpływają na poprawę mrozoodporności betonu – spadek wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności w próbkach z włóknami jest w każdym przypadku mniejszy niż dla betonu referencyjnego bez włókien. Włókna klasy Ia (mikrowłókna pojedyncze) spowodowały większą poprawę mrozoodporności niż włókna klasy Ib (fibrylowane).

Najlepsze wyniki odporności na cykliczne zamrażanie / rozmrażanie uzyskano przy dozowaniu mikrowłókien klasy Ia w ilości zalecanej przez producenta (0,9 kg/m<sup>3</sup>), gdzie spadek wytrzymałości na ściskanie po badaniu jest nieznaczny (1,3%) i o 96% mniejszy niż w przypadku betonu referencyjnego, dodanie tych włókien w ilości dwukrotnie większej również znacząco poprawia mrozoodporność, powodując ograniczenie spadku wytrzymałości na ściskanie o 81%.

W przypadku włókien fibrylowanych klasy Ib dozowanych w ilości 0,9 i 1,8 kg/m<sup>3</sup> ograniczenie spadku wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności wyniosło odpowiednio o 22 i 52% w porównaniu do betonu wzorcowego.

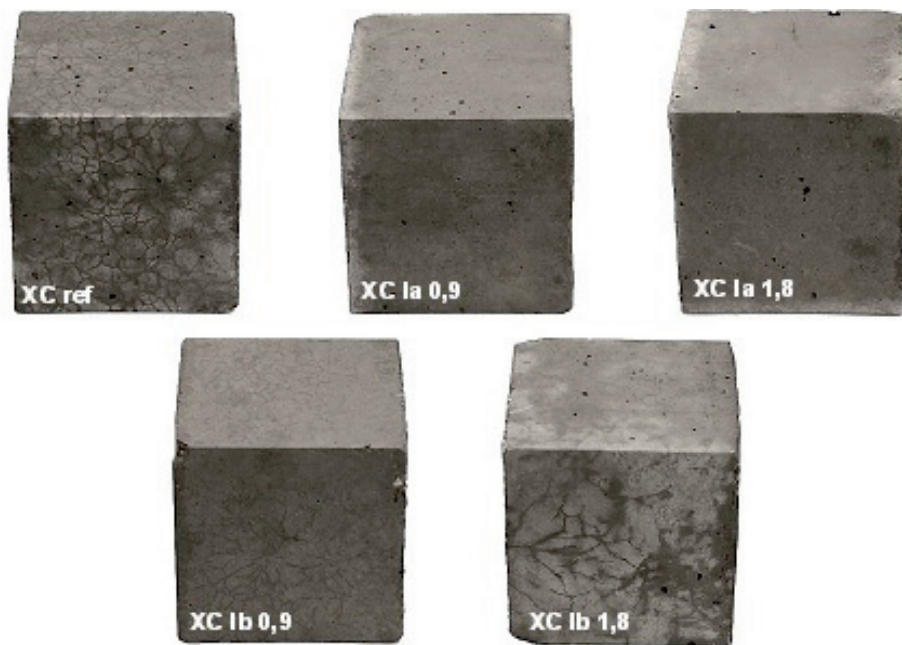
Dodatek dwukrotnie większej ilości włókien klasy Ib wpłynął na uzyskanie większej poprawy mrozoodporności niż w przypadku ilości zalecanej przez producenta. Odwrotna tendencja wystąpiła w przypadku włókien klasy Ia.

Analizując zmianę masy po 75 cyklach (zaraz po pojawieniu się siatki spękań na próbkach), najmniejszy ubytek masy zaobserwowano również w próbkach z włóknami klasy Ia, natomiast zmiany masy pomiędzy wszystkimi badanymi betonami nie są duże.



Rys 1. Spadek wytrzymałości na ściskanie po 75 cyklach zamrażania/rozmrzania betonu referencyjnego i betonu z włóknami polipropylenowymi klasy Ia i Ib

Na fotografii 2 przedstawiono wygląd próbek betonowych po 75 cyklach zamrażania/rozmrzania, na których wyraźnie widać, że próbki z mikrowłóknami polipropylenowymi klasy Ia odznaczają się brakiem siatki spękań w porównaniu z próbkami referencyjnymi i próbkami z włóknami klasy Ib.



Fot. 2. Wygląd próbek po 75 cyklach zamrażania i rozmrażania



## 2.7. Charakterystyka rozkładu porów powietrznych w stwardniałym betonie

Badanie wykonano wg metody opisanej w normie PN-EN 480-11:2011 [13]. Badanie to przeprowadza się zazwyczaj dla betonów napowietrzonych w celu sprawdzenia domieszki napowietrzającej z wymaganiami oraz do wstępnej oceny mrozoodporności betonów napowietrzonych, jednak w niniejszej pracy wykorzystano tą metodę do sprawdzenia czy mikrowłókna polipropylenowe klasy Ia i Ib dodawane w różnych ilościach do betonu nienapowietrzonego mają wpływ na zmianę zawartości powietrza w betonie oraz innych parametrów związanych z mrozoodpornością (m.in. wskaźnik rozmieszczenia porów L, zawartość mikroporów  $A_{300}$ ).

W tabeli 7 przedstawiono wyniki charakterystyki porów powietrznych w betonach wg metody PN-EN 480-11.

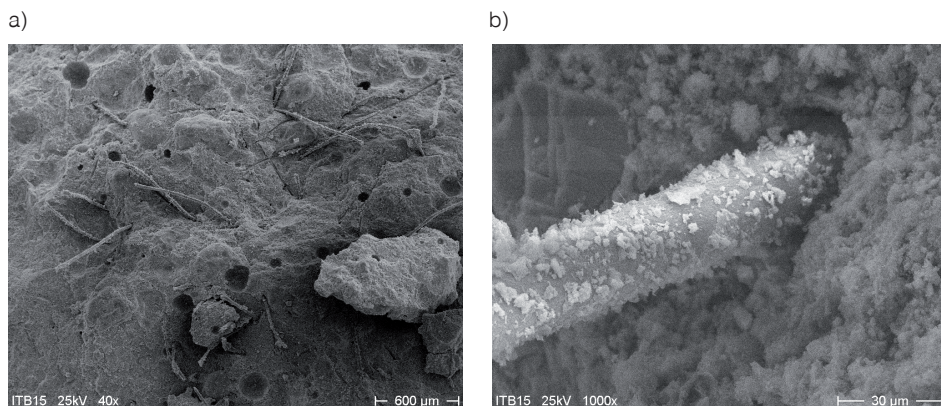
Tabela 7. Wyniki badań charakterystyki rozkładu porów powietrznych

Oznaczenie betonu	Całkowita zawartość powietrza A [%]	Wskaźnik rozmieszczenia porów L [mm]	Zawartość mikroporów (średnica $\leq 300 \mu\text{m}$ ) $A_{300}$ [%]	Całkowita liczba mierzonych cięciw
XC ref	0,5	0,332	0,25	60
XC Ia 0,9	1,0	0,227	0,26	139
XC Ia 1,8	1,5	0,259	0,59	151
XC Ib 0,9	0,5	0,189	0,33	109
XC Ib 1,8	0,8	0,294	0,32	88

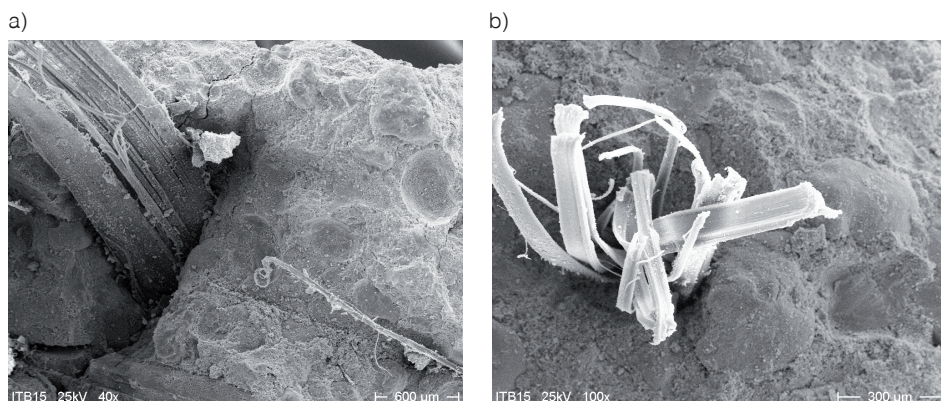
Z wyników badań wynika, że mikrowłókna polipropylenowe klasy Ia spowodowały niewielką poprawę parametrów mogących mieć wpływ na polepszenie mrozoodporności betonu: nieznacznie wzrosła całkowita zawartość powietrza A oraz zawartość mikroporów  $A_{300}$ , natomiast wskaźnik rozmieszczenia porów L uległ zmniejszeniu w porównaniu z betonem referencyjnym. Zmiany te z punktu widzenia odporności na korozję mrozową są korzystne (wymagany dla betonów mrozoodpornych z domieszką napowietrzającą wskaźnik rozmieszczenia porów L powinien wynosić  $\leq 200$  mm).

W przypadku mikrowłókien klasy Ib całkowita zawartość powietrza nie uległa większej zmianie, natomiast również poprawie (zmniejszeniu) uległ wskaźnik rozmieszczenia porów L. Zmiany parametrów związanych z rozkładem porów powietrznych nie są na tyle duże, aby wnioskować że poprawa mrozoodporności betonów z mikrowłóknami polipropylenowymi nastąpiła tylko w wyniku napowietrzenia.

Na fotografiach 3 i 4 przedstawiono zdjęcia wykonane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego typu JOEL-35C badanych betonów z włóknami klasy Ia i Ib.



Fot. 3. Mikrowłókna polipropylenowe klasy Ia (pojedyncze) w betonie przy powiększeniu 40x (a) i 1000x (b)



Fot. 4. Mikrowłókna polipropylenowe klasy Ib (fibrylowane) w betonie przy powiększeniu 40x (a) i 100x (b)

### 3. Podsumowanie wyników badań

W artykule przedstawiono wpływ dodatku mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia i Ib, dozowanych w ilości zalecanej przez producenta  $0,9 \text{ kg/m}^3$  i dwukrotnie większej  $1,8 \text{ kg/m}^3$  na mrozoodporność betonu oraz dodatkowo na niektóre właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu.

Badane mikrowłókna klasy I wpływają na spadek konsystencji, większy spadek spowodowały badane włókna klasy Ia (pojedyncze, długość 12 mm) niż włókna klasy Ib (fibrylowane, długość 19 mm). Włókna klasy I powodują napowietrzenie mieszanki betonowej, większe napowietrzenie spowodowały badane włókna klasy Ia, również włókna klasy Ia wpłynęły na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach.

Analizując wyniki odporności na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie widać, że mikrowłókna polipropylenowe klasy I pojedyncze i fibrylowane wpływają na poprawę mrozoodporności betonów nienapowietrzonych. Najlepsze wyniki uzyskał beton z dodatkiem mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia (włókna pojedyncze) w ilości zalecanej przez producenta ( $0,9 \text{ kg/m}^3$ ), gdzie spadek wytrzymałości na ściskanie po 75 cyklach zamrażania i rozmarzania wyniósł 1,3% (dla porównania w betonie referencyjnym wyniósł 35,1%).

Na poprawę mrozoodporności betonów nienapowietrzonych z włóknami klasy Ia i Ib mogła mieć wpływ poprawa parametrów związanych z charakterystyką porów powietrznych określaną wg PN-EN 480-11, gdzie w betonach z włóknami widać niewielki wzrost zawartości powietrza (zwłaszcza zawartość mikroporów o średnicy  $\leq 300 \mu\text{m}$ ) oraz korzystne zmniejszenie wskaźnika rozmieszczenia porów L.

Napowietrzenie przez włókna nie jest jednak na tyle duże, żeby można stwierdzić że jest to jedyna przyczyna poprawy mrozoodporności.

Głównym mechanizmem wpływającym na poprawę odporności na zamrażanie/rozmarzanie wydaje się być mechanizm tzw. mostkowania mikropęknięć przez włókna. Włókno spina (mostkuje) pęknięcie, powstrzymuje jego dalsze rozprzestrzenianie przy zachowaniu spójności betonu.

W Instytucie Techniki Budowlanej prowadzone są kolejne etapy pracy m.in. obejmujące betony napowietrzane oraz pozostałe rodzaje włókien zarówno przeciwskurczowych, jak i zbrojeniowych.

## Literatura

- [1] A. Banaś: Zastosowanie zbrojenia rozproszonego z włókien syntetycznych w produkcji betonu, Materiały Budowlane, 2/2008 (nr 426)
- [2] M.A. Glinicki: Efektywność mechaniczna makrowłókien syntetycznych w betonie, Budownictwo-Technologie-Architektura, Wydanie 2(46)/2009
- [3] J. Karwacki: Beton kompozytowy z włóknami, Budownictwo Technologie Architektura, Wydanie 3(15)/2001
- [4] M.A. Glinicki: Badania właściwości fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, przeznaczonego na podłogi przemysłowe, Cement Wapno Beton, nr 4/2008.
- [5] T. Ponikiewski, G. Cygan: Wybrane właściwości samozagęszczających się fibrobetonów z włóknami stalowymi, Cement Wapno Beton, nr 4/2011
- [6] T. Ponikiewski: Reologiczne i mechaniczne właściwości betonów samozagęszczalnych z włóknami stalowymi, Cement Wapno Beton, nr 5/2012
- [7] J. Szwabowski, P. Miera: Mrozoodporność betonu samozagęszczalnego zbrojonego włóknami polipropylenowymi, Konferencja Dni Betonu 2010 – tradycja i nowoczesność, 11-13.11.2010 Wisła.
- [8] A.E. Richardson, K.A. Coventry, S. Wilkinson: Freeze/thaw durability of concrete with synthetic fibre additions, Cold Regions Science and Technology 83–84 (2012) 49–56
- [9] Okan Karahan, Cengiz Duran Atis: The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, Materials and Design 32 (2011) 1044–1049
- [10] PN-EN 14889-1:2007 Włókna do betonu – Część 1: Włókna stalowe – Definicje, wymagania i zgodność
- [11] PN-EN 14889-2:2007 Włókna do betonu – Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność
- [12] PN-EN 206:2014-04 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [13] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [14] Z Rusin: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement, Kraków, 2002