

Ocena mrozoodporności betonu z dodatkiem mikrowłókien polimerowych



Mgr inż. Agnieszka Michalik, mgr inż. Piotr Kupisz, Instytut Techniki Budowlanej

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój technologii betonu spowodował powstanie szeregu jego odmian, o polepszonych właściwościach, jednym z takich betonów jest fibrobeton. Włókna do betonu wykonuje się z różnych materiałów. Najbardziej popularne są włókna polimerowe (w tym polipropylenowe) [1], stalowe. Włókna stosowane do betonów ze względu na oddziaływanie można umownie podzielić na dwie grupy: włókna przeciwskurczowe i zbrojące. Włókna przeciwskurczowe zapobiegają tworzeniu się mikropęknięć, spowodowanych różnego rodzaju skurczem (np. plastycznym, termicznym, wysychania). Natomiast włókna zbrojące pełnią rolę rozproszonego mikrobrojenia, poprawiając właściwości mechaniczne betonu. Włókna przeciwskurczowe są zazwyczaj cieńsze i krótsze, natomiast włókna zbrojące mają większą średnicę i są dłuższe. Bywa też, że włókna jednocześnie przeciwdziałają skurczowi młodego betonu, jak również poprawiają jego właściwości mechaniczne w późniejszym okresie [2–4].

W porównaniu do betonów bez włókien fibrobetonu charakteryzują się głównie większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu, ścinanie, a także zwiększoną odpornością zmęczeniową i udarnością, często też wpływają na wzrost wytrzymałości na ściskanie i ścieranie. Obecność włókien wpływa istotnie na hamowanie procesów mikro- i makropęknięcia kompozytów cementowych, zarówno na etapie wiązania i dojrzewania, jak również w trakcie użytkowania, ograniczając wpływ obciążeń eksploatacyjnych [5–7]. Oprócz właściwości mechanicznych i reologicznych fibrobetonów [2–7] istotnym problemem jest ocena wpływu

włókien na trwałość, a zwłaszcza mrozoodporność. Zagadnienie to jest istotne, gdyż coraz częściej w konstrukcjach narażonych na cykliczne zamrażanie-rozmarzanie stosuje się różnego rodzaju włókna. W literaturze w ostatnich latach pojawiły się badania wpływu włókien na mrozoodporność zapraw oraz betonów [8–10]. Wyniki te są rozbieżne i często niemożliwe do porównania, ze względu na różne składy betonów, różne metody badania i oceny mrozoodporności. W kilku badanych przypadkach włókna wpłynęły na poprawę mrozoodporności poprzez napowietrzenie mieszanki betonowej i poprawę struktury porów powietrznych w betonie [10–13]. Efekt ten szczególnie zaobserwowano dla mikrowłókien. Długie makrowłókna nie wpływały na zmianę porowatości betonu.

W Instytucie Techniki Budowlanej realizowano pracę dotyczącą określenia wpływu włókien na mrozoodporność betonu. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań betonów z zastosowaniem dwóch rodzajów mikrowłókien polipropylenowych – prostych i fibrylowanych, gdyż dla nich stwierdzono istotny wpływ na poprawę mrozoodporności. Celem pracy było zbadanie wpływu dodatku mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia i Ib na mrozoodporność oraz inne wybrane cechy betonu.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

W badaniach zastosowano dwa rodzaje mikrowłókien polipropylenowych klasy I, czyli włókien o średnicy < 0,30 mm według [1]. Włókna klasy Ia to włókna pojedyncze, a włókna



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

Tabela 1. Właściwości użytych włókien klasy Ia i Ib

Cecha	Deklarowana wartość	
	pojedyncze	fibrylowane
Klasa wg EN 14889-2	Ia	Ib
Długość	12 mm	19 mm
Masa liniowa wiązki	3,4 dtex ^{*)}	19600 dtex ^{*)}
Wytrzymałość na zrywanie	364 N/mm ²	Wytrzymałość wiązki 3,71 cN/dtex ^{**)}
Konsystencja mieszanki betonowej wzorcowej wg PN-EN 14845-1 przy zawartości włókien 0,9 kg/m ³	Czas Vebe 10 s	Czas Vebe 13 s

^{*)} dtex – jednostka gęstości liniowej stosowana we włókiennictwie; 1 dtex = 0,001 g/m

^{**)} 1 cN = 0,01 N

klasy Ib to włókna fibrylowane (jako nacięte wzdłuż fragmenty taśmy). Zdjęcia włókien przedstawiono na rysunku 1. Włókna klasy I dodawane są do betonu głównie w celu zmniejszenia jego skurczu zarówno plastycznego, jak i skurczu twardnienia, ograniczając powstawanie rys skurczowych. Dodatkowo ich obecność w betonie może ograniczać występowanie zjawiska bleedingu (odsączenia), czyli wydzielania się wody lub mlecza cementowego na powierzchnię wbudowanego betonu.

Właściwości włókien użytych do badań przedstawiono w tabeli 1.

2.2. Metody

Do badań zaprojektowano beton referencyjny klasy ekspozycji XC1 według [14] (środowisko suche lub stale mokre), który z założenia miał mieć niską odporność na zamrażanie/rozmarzanie, w celu sprawdzenia wpływu mikrowłókien na mrozoodporność.

Recepturę betonu referencyjnego (bez dodatku włókien), do którego dodawano włókna polipropylenowe klasy Ia i Ib w ilości zalecanej przez producenta (0,9 kg/m³) oraz w ilości dwukrotnie wyższej (1,8 kg/m³) przedstawiono w tabeli 2. Podwojoną ilość zastosowano w celu zbadania, jak zmieniają się właściwości użytkowe betonów w przypadku zwiększenia ilości mikrowłókien (np. podczas przedozowania lub w celu bardziej jednorodnego rozkładu włókien w mieszance). Oznaczenia i zawartości włókien w betonach podano w tabeli 3.

Wszystkie badania wykonano porównawczo, wyniki badań betonów z włóknami porównywano z wynikami badań betonu referencyjnego, bez włókien. Do badań wybrano

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

Składnik betonu		Zawartość [kg/m ³]
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

Oznaczenie betonu	Rodzaj włókien polipropylenowych	Zawartość [kg/m ³]
Ref	-	0,0
Ia 0,9	Klasa Ia – pojedyncze	0,9
Ia 1,8	Klasa Ia – pojedyncze	1,8
Ib 0,9	Klasa Ib – fibrylowane	0,9
Ib 1,8	Klasa Ib – fibrylowane	1,8

najbardziej charakterystyczne dla betonu cechy. Badano następujące właściwości:

- konsystencję metodą opadu stożka według PN-EN 12350-2,
- gęstość mieszanki betonowej według PN-EN 12350-6,
- zawartość powietrza w mieszance betonowej metodą ciśnieniową według PN-EN 12350-7,
- wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania według PN-EN 12390-3,
- nasiąkliwość betonu według PN-B-06250,
- gęstość stwardniałego betonu według PN-EN 12390-7,
- odporność na zamrażanie i rozmarzanie metodą zwykłą według PN-B-06250,
- charakterystykę rozkładu porów powietrznych według PN-EN 480-11.

3. Wyniki

Wyniki badań mieszanki betonowej referencyjnej oraz z dodatkiem mikrowłókien klasy Ia i Ib przedstawiono w tabeli 4. Zestawienie wyników badań stwardniałego betonu referencyjnego i z dodatkiem mikrowłókien polipropylenowych pojedynczych klasy Ia i fibrylowanych klasy Ib zawiera tabela 5.

Badanie mrozoodporności przeprowadzono na 12 próbkach sześciennych o boku 100 mm, z czego 6 próbek przebywało w wodzie jako świadki, a pozostałe sześć poddano cyklicznemu zamrażaniu-rozmarzaniu. Wszystkie próbki badano równolegle w jednej komorze. Badanie zakończono po 75 cyklach, z powodu pojawienia się siatki spękań na próbkach z betonu referencyjnego i z włóknami klasy Ib (pozostałe

Tabela 4. Wyniki badań mieszanki betonowej referencyjnej i z włóknami

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

Tabela 5. Wyniki badań wybranych cech użytkowych betonu

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Nasiąkliwość [%]	Gęstość w stanie suchym [kg/m ³]
Ref	49,2	5,9	2280
Ia 0,9	45,7	6,0	2260
Ia 1,8	45,7	6,3	2230
Ib 0,9	50,0	6,2	2270
Ib 1,8	46,8	6,3	2270

próbki nie miały widocznych na powierzchni zniszczeń). Następnie określono ubytek masy próbek i spadek ich wytrzymałości w odniesieniu do próbek-świadków przechowywanych w wodzie. Wyniki podano w tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki badań mrozoodporności betonu

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

W niniejszej pracy wykorzystano metodę oznaczenia rozkładu porów powietrznych według PN-EN 480-11 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. Wyniki charakterystyki porów powietrznych w betonach przedstawiono w tabeli 7.

4. Podsumowanie wyników

W artykule przedstawiono wpływ dodatku mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia i Ib na mrozoodporność betonu oraz inne wybrane cechy użytkowe betonu i mieszanki betonowej. Mikrowłókna klasy Ia, pojedyncze, wpłynęły na zmianę właściwości referencyjnej mieszanki betonowej – spowodowały spadek konsystencji, wzrost zawartości powietrza w mieszance betonowej i tym samym spadek gęstości objętościowej. Włókna Ib nie wpłynęły istotnie na zmianę konsystencji. Dodatek mikrowłókien polipropylenowych spowodował wzrost zawartości powietrza w mieszance betonowej, przy czym

większy wzrost nastąpił w przypadku pojedynczych włókien klasy Ia, które dozowane w ilości 0,9 i 1,8 kg/m³ spowodowały zwiększenie zawartości powietrza o odpowiednio 0,7 i 1,1%. Mikrowłókna pojedyncze klasy Ia spowodowały zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu referencyjnego o 7%, co spowodowane mogło być napowietrzeniem mieszanek betonowych przez te włókna. Mikrowłókna fibrylowane klasy Ib dozowane w ilości zalecanej przez producenta nieznacznie polepszyły wytrzymałość na ściskanie. 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/m³, co koreluje się z właściwościami mieszanki. Wzrost nasiąkliwości i obniżenie gęstości betonów z włóknami mogą być związane z napowietrzeniem mieszanki przez włókna.

Z wyników badań okazuje się, że mikrowłókna polipropylenowe klasy Ia i Ib wpływają na poprawę mrozoodporności betonu – spadek wytrzymałości na ściskanie, a wynik cyklicznego zamrażania i odmrażania 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 0,9 kg/m³, gdzie spadek wytrzymałości na ściskanie po badaniu jest nieznaczny (1,3%). Dodanie tych włókien w ilości dwukrotnie większej również znacząco poprawia mrozoodporność. Dodatek dwukrotnie większej ilości włókien fibrylowanych klasy Ib wpłynął na uzyskanie większej poprawy mrozoodporności niż w przypadku ilości zalecanej przez producenta. Zmiana masy po 75 cyklach (zaraz po pojawieniu się siatki spękań na próbkach) jest dla wszystkich próbek na podobnym poziomie.

Tabela 7. Parametry charakteryzujące strukturę 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 cięw porów
Ref	0,5	0,332	0,25	60
la 0,9	1,0	0,227	0,26	139
la 1,8	1,5	0,259	0,59	151
lb 0,9	0,5	0,189	0,33	109
lb 1,8	0,8	0,294	0,32	88

Z wyników badań charakterystyki rozkładu porów powietrznych okazuje się, że mikrowłókna polipropylenowe klasy la spowodowały poprawę parametrów mogących mieć wpływ na polepszenie mrozoodporności betonu: dwukrotnie wzrosła całkowita zawartość powietrza A oraz nieznacznie wzrosła zawartość mikroporów A300, natomiast wskaźnik rozmieszczenia porów L uległ zmniejszeniu w porównaniu z betonem referencyjnym. Zmiany te z punktu widzenia odporności na zamrażanie-rozmrażanie są korzystne (wymagany dla betonów mrozoodpornych z domieszką napowietrzającą wskaźnik rozmieszczenia porów L powinien wynosić ≤ 200 mm). W przypadku mikrowłókien klasy lb całkowita zawartość powietrza również wzrosła oraz poprawie (zmniejszeniu) uległ wskaźnik rozmieszczenia porów L.

5. Podsumowanie

- Badane betony z dodatkiem mikrowłókien klasy I wpływają na spadek konsystencji: większy spadek spowodowały badane włókna klasy la (pojedyncze, długość 12 mm) niż włókna klasy lb (fibrylowane, długość 19 mm). Włókna klasy I powodują napowietrzenie mieszanki betonowej, większe napowietrzenie spowodowały włókna klasy la. Włókna klasy la wpłynęły na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach.
- Analizując wyniki odporności na cykliczne zamrażanie/rozmrażanie widać, że mikrowłókna polipropylenowe klasy I pojedyncze i fibrylowane wpływają na poprawę mrozoodporności betonów nienapowietrzonych. Najlepsze wyniki uzyskał beton z dodatkiem mikrowłókien polipropylenowych klasy la (włókna pojedyncze) w ilości zalecanej przez producenta ($0,9 \text{ kg/m}^3$), gdzie spadek wytrzymałości na ściskanie po 75 cyklach zamrażania i rozmrażania wyniósł 1,3% (dla porównania w betonie referencyjnym wyniósł 35,1%).
- Na poprawę mrozoodporności betonów nienapowietrzonych z włóknami klasy la i lb mogła mieć wpływ poprawa parametrów związanych z charakterystyką porów powietrznych, gdzie w betonach z włóknami zaobserwowano 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. Dodatkowym mechanizmem

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

Niniejszy artykuł został przygotowany na XXI Konferencję Naukowo-Techniczną „Kontra 2020 – Trwałość budowli i ochrona przed korozją” i uzyskał pozytywną opinię Komitetu Naukowego Konferencji. Z powodu sytuacji epidemiologicznej XXI Konferencja KONTRA nie może odbyć się w przewidzianym terminie, pragniemy jednak zaprezentować Państwu jej dorobek publikacyjny.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 14889-2:2007 Włókna do betonu – Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność
- [2] Glinicki M. A., Efektywność mechaniczna makrowłókien syntetycznych w betonie, *Budownictwo-Technologie-Architektura* 2(46)/2009
- [3] Glinicki M. A., Badania właściwości fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, przeznaczonego na podłogi przemysłowe, *Cement Wapno Beton* 4/2008
- [4] Ponikiewski T., Reologiczne i mechaniczne właściwości betonów samozagęszczalnych z włóknami stalowymi, *Cement Wapno Beton* 5/2012
- [5] Alberti M. G., Enfedaque A., Gálvez J. C., A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibres for concrete, *Composites Part B* 151/2018, str. 274–290
- [6] Sadrinejad I., Madandoust R., Ranjbar M. M., The mechanical and durability properties of concrete containing hybrid synthetic fibers, *Construction and Building Materials* 178/2018, str. 72–82
- [7] Memon I. A., Jhatial A. A., Sohu S., Lakhari M. T., Hussain Z., Influence of Fibre Length on the Behaviour of Polypropylene Fibre Reinforced Cement Concrete, *Civil Engineering Journal* tom 4, nr 9, wrzesień 2018
- [8] Borowska S. A., Kosior-Kazberuk M., Mrozoodporność betonów ze zbrojeniem rozproszonym, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 24/2018, str. 24–29
- [9] Szwabowski J., Miera P., Mrozoodporność betonu samozagęszczalnego zbrojonego włóknami polipropylenowymi, *Konferencja Dni Betonu, Wisła, 2010*
- [10] Cavdar A., Investigation of freeze-thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars, *Composites: Part B* 58/2014, str. 463–472
- [11] Berkowska P., Kosior-Kazberuk M., Effect of fiber on the concrete resistance to surface scaling due to cyclic freezing and thawing, *Procedia Engineering* 111/2015, str. 121–127
- [12] Richardson A. E., Coventry K.A., Wilkinson S., Freeze/thaw durability of concrete with synthetic fibre additions, *Cold Regions Science and Technology* 83–84/2012, str. 49–56
- [13] Mardani-Aghabaglou A., Özen S., Altun M. G., Durability performance and dimensional stability of polypropylene fiber reinforced concrete, *Journal of Green Building*, czerwiec 2018
- [14] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność