

mgr inż. Agnieszka Michalik^{1*)}
mgr inż. Paweł Szaj¹⁾

Wpływ mikrowłókien polimerowych na mrozoodporność betonu

DOI: 10.15199/33.2015.11.08

Lączenie materiałów o różnych właściwościach fizyko mechanicznych jest w inżynierii materiałowej praktykowane od wielu lat. W technologii betonu również są stosowane takie rozwiązania w celu poprawy właściwości tradycyjnych betonów. Dodanie do mieszanki betonowej włókien w postaci zbrojenia rozproszonego tworzy nowy rodzaj betonu nazwany fibrobetonem, który w porównaniu ze zwykłym betonem charakteryzuje się większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu, na ściskanie, na ścinanie oraz odpornością zmęczeniową i udarnością. Obecność włókien istotnie hamuje proces mikro- i makropęknięcia 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 niektórych właściwości mieszanki betonowej, takich jak konsystencja czy urabialność, ale dzięki zastosowaniu odpowiednich domieszek uplastyczniających można rozwiązać ten problem. Włókna do betonu wykonuje się z różnych materiałów, a najbardziej popularne są polipropylenowe, stalowe, szklane (cyrkonowane) oraz bazaltowe. Włókna: polipropylenowe i stalowe objęte są normami zharmonizowanymi [10, 11], natomiast pozostałe wprowadza się do obrotu na podstawie Aprobata Technicznych (obecnie Ocen Technicznych).

Analizując literaturę krajową dotyczącą fibrobetonów, można zauważyć, że najczęściej uwagi poświęcono właściwościom mechanicznym lub reologicznym [1-6], a niewiele miejsca trwałości, w tym mrozoodporności [7]. W literaturze zagranicznej pojawiają się informacje dotyczące badań wpływu różnego rodzaju włókien na mrozoodporność betonu, lecz wyniki te nie są

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Betonu
^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: a.michalik@itb.pl

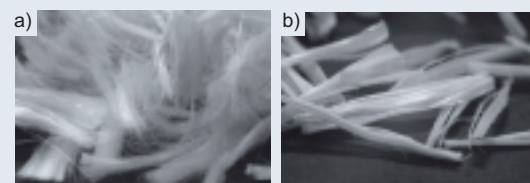
jednoznaczne [8, 9]. W związku z tym w Zakładzie Betonu Instytutu Techniki Budowlanej rozpoczęto projekt dotyczący badania wpływu różnego rodzaju włókien na mrozoodporność betonów.

Skład badanych betonów

Do badań użyto dwóch rodzajów włókien polipropylenowych o średnicy mniejszej od 0,30 mm, klasy Ia i klasy Ib (tabela 1, fotografia) zgodnych z normą

Tabela 1. Właściwości włókien klasy Ia i Ib użytych do badań

Cecha	Włókna	
	pojedyncze	fibrylowane
Klasa	Ia	Ib
Długość [mm]	12	19
Masa liniowa wiązki [dtex]	3,4	19600
Wytrzymałość na zrywanie	364 N/mm ²	wytrzymałość wiązki 3,71 cN/dtex
Konsystencja przy zawartości włókien 0,9 kg/m ³ wg metody Vebe [s]	10	13



Mikrowłókna polipropylenowe: a) pojedyncze klasy Ia; b) fibrylowane klasy Ib

PN-EN 14889-2:2007 [11]. Włókna klasy Ia są pojedyncze, a klasy Ib fibrylowane (jako nacięte wzdłuż fragmenty taśmy). Dodatek do betonu tego typu włókien głównie ma na celu ograniczenie skurczu zarówno plastycznego, jak i skurczu twardnienia, a także występowania zjawiska bleedingu (odsączania), czyli wydzielania się wody lub mleczka cementowego (zaczynu) na powierzchnię betonu oraz wpływa na poprawę m.in. wytrzymałości i nasiąkliwości. Najczęściej włókna tej klasy stosu-

je się w betonach przeznaczonych do wykonywania podkładów podłogowych i posadzek.

Do badań zaprojektowano beton referencyjny klasy ekspozycji XC1, który z założenia miał mieć małą odporność na zamrażanie/rozmarzanie. W tabeli 2 przedstawiono skład jakościowy i ilościowy betonu referencyjnego (bez dodatku włókien). W czasie pierwszej z trzech minut mieszania dodano do kruszywa **bezpośrednio przed cementem** włókna polipropylenowe klasy Ia i Ib w ilości zalecanej przez producenta (0,9 kg/m³) oraz dwukrotnie większej (1,8 kg/m³). Oznaczenia betonów podano w tabeli 3.

Program badań i analiza wyników

Celem badań było określenie wpływu dodatku mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia i Ib na mrozoodporność betonu oraz pozostałe cechy stwardniałego betonu i świeżej mieszanki betonowej. Badania prowadzono w dwóch etapach. Etap I obejmował badania mieszanki betonowej: konsystencję metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2:2011 [13]; gęstość wg PN-EN 12350-6:2011 [14]; zawartość powietrza metodą ciśnieniową wg normy PN-EN 12350-7:2011 [15], natomiast etap II dotyczył badania stwardniałego betonu, w tym jego: wytrzymałości na ściskanie

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

Składniki		Skład ilościowy [kg/m ³]
Cement	cement portlandzki CEM I 42,5 R	300
Woda	wodociągowa	195
Kruszywo [mm]	piasek 0/2	475
	żwir węglanowo-granitoidowy 2/16	1390

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

Oznaczenie betonu	Rodzaj włókien polipropylenowych	Ilość [kg/m ³]
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

wg PN-EN 12390-3:2011+AC:2012 [16]; nasiąkliwości wg PN-B-06250:1988 [17]; gęstości wg PN-EN 12390-7:2011 [18]; odporności na zamrażanie i rozmrażanie wg normy PN-B-06250:1988 [17]. Obejmował też charakterystykę rozkładu porów powietrznych wg PN-EN 480-11:2008 [12].

Analiza wyników badań mieszanki betonowej. W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań mieszanki betonowej referencyjnej oraz z dodatkiem włókien klasy Ia i Ib. Większy wpływ na zmianę konsystencji miały mikrowłókna klasy Ia (pojedyncze). W przypadku dozowania 1,8 kg/m³ spadek konsystencji wyniósł 47% w porównaniu z betonem bez włókien. Włókna Ib dozowane w ilości zalecanej przez producenta (0,9 kg/m³) nie wpłynęły na zmianę konsystencji w odniesieniu do betonu referencyjnego.

Tabela 4. Wyniki badań mieszanki betonowej referencyjnej i z włóknami

Oznaczenie betonu	Konsystencja metodą opadu stożka [mm]	Gęstość świeżej mieszanki [kg/m ³]	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

Dodatek mikrowłókien polipropylenowych spowodował wzrost zawartości powietrza w mieszance betonowej, przy czym był on większy w przypadku pojedynczych włókien klasy Ia (dozowane w ilości 0,9 i 1,8 kg/m³ spowodowały zwiększenie zawartości powietrza o odpowiednio 0,7 i 1,1%). Napowietrzenie mieszanki betonowej potwierdzają również wyniki badania gęstości objętościowej, której największe spadki odpowiadają wynikom największego napowietrzenia.

Analiza wyników badań stwardniałego betonu. Tabela 5 zawiera wyniki badań stwardniałego betonu referencyjnego i z dodatkiem mikrowłókien polipropylenowych klasy Ia i Ib. Wytrzymałość na ściskanie przeprowadzono na próbkach sześciennych 150 x 150 x 150 mm, po 28 dniach ich dojrzewania.

Tabela 5. Wyniki badań stwardniałego betonu referencyjnego i z włóknami

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Nasiąkliwość [%]	Gęstość w stanie suchym [kg/m ³]
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 o 7% zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu referencyjnego. Powodem mogło być napowietrzenie mieszanki betonowej (co wykazały badania świeżych mieszanek). Mikrowłókna fibrylowane klasy Ib dozowane w ilości zalecanej przez producenta nieznacznie polepszyły wytrzymałość na ściskanie, natomiast przy podwojonej ilości spowodowały jej zmniejszenie o ok. 5%. Dodatek włókien spowodował nieznaczne pogorszenie nasiąkliwości. W przypadku badania gęstości w stanie suchym wszystkie betony z włóknami miały mniejszą gęstość niż beton referencyjny. Największy spadek odnotowano w przypadku mikrowłókien pojedynczych klasy Ia dodanych w ilości 1,8 kg/m³ (co koreluje z właściwościami świeżej mieszanki).

Badanie mrozoodporności betonu z mikrowłóknami polipropylenowymi

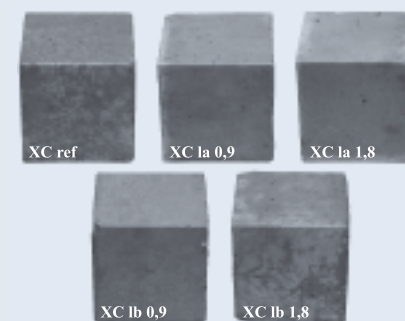
Badanie mrozoodporności betonu przeprowadzono zgodnie z PN-B-06250:1988 [17] (przez cykliczne zamrażanie w powietrzu i rozmrażanie w wodzie). Próbkki referencyjne przebywały w tej samej komorze co próbki z włóknami. Badanie zakończono po 75 cyklach, po pojawieniu się siatki spękań na próbkach z betonu referencyjnego i z włóknami klasy Ib. Następnie określono ubytek masy próbek i spadek ich wytrzymałości w odniesieniu do świadków przechowywanych w wodzie (tabela 6). Wyniki wykazały, że mikrowłókna polipropylenowe klasy Ia i Ib wpływają na poprawę mrozoodporności betonu – spadek wytrzymałości na ściskanie pró-

Tabela 6. Wyniki badań mrozoodporności betonu referencyjnego i z włóknami

Oznaczenie betonu	Spadek wytrzymałości 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

bek z włóknami w każdym przypadku jest mniejszy niż betonu referencyjnego. Włókna klasy Ia (mikrowłókna pojedyncze) spowodowały większą poprawę mrozoodporności niż włókna klasy Ib (fibrylowane). Najlepsze wyniki odporności na cykliczne zamrażanie/rozmrażanie uzyskano w przypadku dozowania mikrowłókien klasy Ia w ilości zalecanej przez producenta (0,9 kg/m³) – 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 – spadek wytrzymałości na ściskanie wynosił 6,6%. W przypadku włókien fibrylowanych klasy Ib dozowanych w ilości 0,9 i 1,8 kg/m³ ograniczenie spadku wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności wyniosło odpowiednio 22 i 52% w porównaniu z betonem wzorcowym. Dodatek dwukrotnie większej ilości włókien klasy Ib, niż to zaleca ich producent, wpłynął na uzyskanie większej poprawy mrozoodporności. Odwrotna tendencja wystąpiła w przypadku włókien klasy Ia.

Po 75 cyklach zamrażania/rozmrażania (zaraz po pojawieniu się siatki spękań na próbkach), najmniejszy ubytek masy zaobserwowano w próbkach z włóknami klasy Ia. Różnice między wszystkimi badanymi betonami nie są duże. **Na fotografii 2**



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

przedstawiono wygląd próbek betonowych po 75 cyklach zamrażania/rozmarzania. Wyraźnie widać, że próbki z mikrowłóknami polipropylenowymi klasy Ia nie mają siatki spękań w przeciwieństwie do próbek referencyjnych i z włóknami klasy Ib.

Charakterystyka rozkładu porów powietrznych w stwardniałym betonie

Badanie wykonano wg metody opisanej w PN-EN 480-11:2011 [12]. Zazwyczaj przeprowadza się je w przypadku betonów napowietrzonych w celu sprawdzenia domieszki napowietrzającej z wymaganiami, jednak my wykorzystaliśmy tę metodę do sprawdzenia, czy mikrowłókna polipropylenowe klasy Ia i Ib dodawane w różnej ilości do betonu nienapowietrzonego mają wpływ na zmianę zawartości powietrza oraz innych parametrów związanych z mrozoodpornością (m.in. wskaźnik rozmieszczenia porów L, zawartość mikroporów A_{300}). Badanie wykonano na dwóch próbkach ok. 150 x 100 x 20 mm, wyciętych z kostek sześciennych 150 x 150 x 150 mm z każdego rodzaju betonu. Probki badawcze poddano kolejno procesowi polerowania, szlifowania i kontrastowania (w celu uzyskania płaskiej, gładkiej powierzchni zglądu odpowiedniej do oględzin mikroskopowych). Wykonano analizę obrazu próbek betonowych za pomocą automatycznego aparatu (seria równoległych linii pomiarowych przechodzi przez pole badawcze próbki, rejestrując liczbę porów powietrznych, długość każdej cięciwy oraz inne parametry, a analiza matematyczna zarejestrowanych danych umożliwia opisanie systemu porów powietrznych za pomocą wymaganych parametrów). W tabeli 7 przedstawiono wyniki badania charakterystyki rozkładu porów powietrz-

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

nych w betonach. Wynika z nich, że mikrowłókna polipropylenowe klasy Ia spowodowały niewielką poprawę parametrów mogących mieć wpływ na mrozoodporność betonu: nieznacznie zwiększyła się całkowita zawartość powietrza A oraz zawartość mikroporów A_{300} , natomiast wskaźnik rozmieszczenia porów L zmniejszył się w porównaniu z betonem referencyjnym. Zmiany te z punktu widzenia odporności na korozję mrozową są korzystne (wskaźnik rozmieszczenia porów L wymagany dla betonów mrozoodpornych z domieszką napowietrzającą powinien wynosić ≤ 200 mm). W przypadku mikrowłókn klasy Ib całkowita zawartość powietrza nie uległa dużej zmianie, natomiast zmniejszył się 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.

Podsumowanie

Z badań wynika, że mikrowłókna polipropylenowe pojedyncze i fibrylowane poprawiają mrozoodporność betonów nienapowietrzonych. Najlepsze wyniki odnotowano w przypadku betonu z dodatkiem mikrowłókn 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 35,1%). Na mrozoodporność betonów nienapowietrzonych z włóknami klasy Ia i Ib mogła mieć wpływ poprawa parametrów związanych z charakterystyką porów powietrznych określaną wg PN-EN 480-11 [12]. W betonach z włóknami zaobserwowano niewielki wzrost zawartości powietrza (zwłaszcza zawartości 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 jest tzw. mostkowanie mikropęknięć przez włókna. Włókno spina (mostkuje) pęknięcie, powstrzymuje jego dalsze rozprzestrzenianie przy zachowaniu spójności betonu. W Instytucie Techniki Budowlanej prowadzone są kolejne etapy badań obejmujące m.in. betony na-

powietrzne oraz inne rodzaje włókn zarówno przeciwskurczowych, jak i zbrojeniowych.

Literatura

- [1] Banaś A. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego z włókn syntetycznych w produkcji betonu, Materiały Budowlane, 2/2008 (nr 426).
- [2] Glinicki M. A., Efektywność mechaniczna makrowłókn syntetycznych w betonie, Budownictwo-Technologie-Architektura, Wydanie 2 (46)/2009.
- [3] Karwacki J., Beton kompozytowy z włóknami, Budownictwo Technologie Architektura, Wydanie 3 (15)/2001.
- [4] Glinicki M. A., Badania właściwości fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, przeznaczony na podłogi przemysłowe, Cement Wapno Beton, nr 4/2008.
- [5] Ponikiewski T., Cygan G., Wybrane właściwości samozagęszczających się fibrobetonów z włóknami stalowymi, Cement Wapno Beton, nr 4/2011.
- [6] Ponikiewski T., Reologiczne i mechaniczne właściwości betonów samozagęszczalnych z włóknami stalowymi, Cement Wapno Beton, nr 5/2012.
- [7] Szwabowski J., Miera P., Mrozoodporność betonu samozagęszczalnego zbrojonego włóknami polipropylenowymi, Konferencja Dni Betonu 2010 – tradycja i nowoczesność, 11 – 13.11.2010 Wisła.
- [8] 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) 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 480-11: 2011 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
- [13] PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [14] PN-EN 12350-6:2011 Badania mieszanki betonowej: Część 6: Gęstość.
- [15] PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej: Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- [16] PN-EN 12390-3:2011 + AC:2012 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [17] PN-B-06250:1988 Beton zwykły.
- [18] PN-EN 12390-7:2011 Badania betonu. Część 7: Gęstość betonu.

Przyjęto do druku: 02.10.2015 r.