



## Mrozoodporność betonów ze zbrojeniem rozproszonym

Sylwia Anna Borowska<sup>1</sup>, Marta Kosior–Kazberuk<sup>2</sup>

### STRESZCZENIE:

W pracy przedstawiono porównanie odporności na powierzchniowe łuszczenie pod wpływem oddziaływania mrozu betonów zawierających trzy typy zbrojenia rozproszonego (włókna syntetyczne, makro- i mikro-włókna stalowe) zastosowane w ilości 0,5 oraz 1,0% objętości mieszanki betonowej, a także betonów bez włókien. Badanie prowadzono na podstawie normy PKN–CEN/TS 12390–9: (2007), metodą Slab test, w warunkach cyklicznych zmian temperatury, w obecności 3% roztworu solnego. Na podstawie wyników badania mrozoodporności określono najbardziej efektywny rodzaj dodatku do betonu w postaci włókien oraz korzystną zawartość. Wykonano dodatkowe badania właściwości fizycznych betonów, takich jak: nasiąkliwość, podciąganie kapilarne roztworu NaCl, gęstość objętościowa.

### SŁOWA KLUCZOWE:

beton; mrozoodporność; złuszczenia powierzchniowe; zbrojenie rozproszone; trwałość konstrukcji z betonu

## 1. Wprowadzenie

Prężnie rozwijający się przemysł wraz z towarzyszącym mu dynamicznym rozwojem nowoczesnych technologii wytwarzania materiałów budowlanych stawia przed współczesnymi konstrukcjami inżynierskimi coraz większe wymagania. Aktualnie to trwałość postrzegana jest jako jeden z najistotniejszych parametrów opisujących obiekty budowlane. Ma ona decydujący wpływ na wygląd, użyteczność, zachowanie się budowli w określonych warunkach klimatycznych [1]. W warunkach obniżonych temperatur, a zwłaszcza w obecności środków oddladzających, własności betonów ulegają drastycznemu pogorszeniu [2]. Pojawiają się liczne zarysowania, spękania elementów, oddzieleniu ulega kruszywo. Poszukuje się innowacyjnych rozwiązań zapewniających konstrukcjom betonowym odpowiednią nośność i niezawodność przy zachowaniu estetycznego wyglądu. Rozwój metodologii wytwarzania betonów przechodził liczne etapy modyfikacji i udoskonalania składu [3]. Pierwotnie betony oceniano na podstawie wytrzymałości, jaką osiągały pod działaniem różnorodnych obciążeń [4]. Obecnie nie jest to wystarczający wyznacznik jakości. Wraz z należyтыми właściwościami mechanicznymi zapewniona musi być również trwałość konstrukcji w ekstremalnych warunkach środowiskowych. Cykliczne zmiany temperatury spadającej poniżej 0°C oraz bezpośredni kontakt ze środowiskiem agresywnym wywołują w betonie znaczące zmiany wpływające na pogorszenie jego właściwości użytkowych oraz walorów estetycznego wyglądu powierzchni [5].

Liczne analizy oraz publikacje potwierdzają wpływ włókien na poprawę cech mechanicznych betonów, lecz dotychczas niewiele uwagi poświęcono podatności fibrobetonów na oddziaływanie agresywnego środowiska zewnętrznego. W pracach [6] oraz [7] przedstawiono przegląd właściwości fizykomechanicznych różnych typów włókien stosowanych jako zbrojenie rozproszone, wskazując przy tym, na podstawie wyników badań własnych, na znacznie korzystniejsze

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15–001 Białystok, e-mail: s.borowska@doktoranci.pb.edu.pl, orcid id: 0000-0003-2100-2673

<sup>2</sup> Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15–001 Białystok, e-mail: m.kosior@pb.edu.pl, orcid id: 0000-0001-8171-2242

właściwości wytrzymałościowe betonów ze zbrojeniem rozproszonym w stosunku do betonu zwykłego. W krajach o przeważającej liczbie dni z temperaturą poniżej 0°C, takich jak Dania czy Austria, istnieje szczególne zagrożenie betonowych konstrukcji. Zostały tam wprowadzone dodatkowe znormalizowane wytyczne dotyczące powierzchniowego łuszczenia oraz stosowania zbrojenia rozproszonego. Normy DS/EN 206 [8] oraz ÖNORM EN 206 [9] podają minimalną zawartość porów w betonie oraz graniczne wartości wskaźników ich rozmieszczenia. W Polsce z uwagi na brak krajowych producentów tego typu dodatku do betonu przed długi czas nie stosowano go zbyt powszechnie. Wiele analiz [10–12] jednoznacznie potwierdza ogromne korzyści konstrukcyjne oraz ekonomiczne wynikające ze stosowania włókien jako zbrojenia rozproszonego. Istotne są także badania nad pozostałymi cechami towarzyszącymi bezpośrednio mrozoodporności (nasiąkliwość, porowatość).

Celem badań opisanych w pracy było określenie odporności na powierzchniowe łuszczenie betonów zawierających zbrojenie rozproszone w postaci makrowłókien stalowych, mikrowłókien stalowych oraz włókien polimerowych w warunkach cyklicznych zmian temperatury w obecności 3% roztworu NaCl.

## 2. Materiały i metody badań

### 2.1. Charakterystyka badanych betonów

Do wykonania próbek przeznaczonych do badań mrozoodporności wykorzystano cement portlandzki CEM I 42,5 R w ilości 350 kg/m<sup>3</sup>, co przy zastosowaniu 140 kg/m<sup>3</sup> wody pozwalało osiągnąć wskaźnik wodno-cementowy  $w/c = 0,40$ . Kruszywo użyte do przygotowania betonów składało się z mieszaniny piasku o uziarnieniu do 2 mm oraz kruszywa grubego o uziarnieniu do 8 mm. Stos okruszowy składał się w 40% z kruszywa drobnoziarnistego, zaś pozostałe 60% stanowiły frakcje 2–4 mm (25%) oraz 6–8 mm (35%). W celu uzyskania odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej, umożliwiającej właściwe rozprowadzenie włókien w całej jej objętości, dodano superplastyfikator typu FM 2 w ilości 1,10% objętości mieszanki betonowej. Wykonano siedem rodzajów próbek, różniących się typem zastosowanego zbrojenia rozproszonego oraz jego zawartością objętościową w mieszance betonowej. Porównawczo badano próbki betonowe ze zbrojeniem włóknami stalowymi długości 50 mm, włóknami polimerowymi długości 39 mm oraz mikrowłóknami stalowymi długości 13 mm. Właściwości fizyczne oraz mechaniczne włókien biorących udział w badaniu zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1**

Właściwości fizyczne i mechaniczne włókien zastosowanych do badań mrozoodporności

Rodzaj włókien	Makrowłókna stalowe	Mikrowłókna stalowe	Włókna polimerowe
Długość [mm]	50	13	39
Średnica [mm]	0,75	0,20	0,78
Materiał	Stal wysokowęglowa	Stal wysokowęglowa	Polimer
Gęstość [kg/dm <sup>3</sup> ]	7,85	7,85	~ 1,00
Wytrzymałość na rozciąganie [N/mm <sup>2</sup> ]	1225	2000	520
Moduł Younga [GPa]	~ 200	~ 200	~ 4,0

Dodatek włókien stalowych wynosił 1% objętości mieszanki (78 kg/m<sup>3</sup>) bądź 0,50% (39 kg/m<sup>3</sup>), zaś polimerowe zbrojenie rozproszone wykorzystano w mieszance w ilości 1,0% (10 kg/m<sup>3</sup>) bądź 0,50% (5 kg/m<sup>3</sup>). Przyjęto następujące oznaczenia serii betonów: MB1 – beton bez dodatku zbrojenia rozproszonego; MB2 – beton z włóknami polimerowymi w ilości 0,50%; MB3 – beton z włóknami polimerowymi w ilości 1,0%; MB4 – beton z włóknami stalowymi 0,50%; MB5 – beton z włóknami stalowymi 1,0%; MB6 – beton z mikrowłóknami stalowymi 0,50%; MB7 – beton z mikrowłóknami stalowymi 1,0%. Po 24 h od wykonania próbek roz-

formowano je, a następnie do momentu rozpoczęcia badania przechowywano w kąpeli wodnej o temperaturze  $18 \pm 2^\circ\text{C}$ .

## 2.2. Przygotowanie próbek i metodyka badań

Badania odporności na powierzchniowe łuszczenie próbek betonowych przeprowadzono według procedury Slab test zawartej w normie PKN-CEN/TS 12390-9: (2007). Jest to metoda zakwalifikowana jako najdokładniejsza oraz symulująca najbardziej zbliżone do rzeczywistych warunki pracy elementów konstrukcyjnych z betonu. Procedura ta została oparta na szwedzkiej metodzie Boräs [13], opracowanej z przeznaczeniem do weryfikacji trwałości konstrukcji mostowych. Ocenę mrozoodporności betonów metodą Boräs przedstawiono w tabeli 2. Procedura Slab test należy do szeroko stosowanych metod, zapewniających prawidłową klasyfikację mrozoodporności wykonywanych obiektów budowlanych. Próbki poddane badaniu zostały wycięte z belek betonowych o wymiarach przekroju poprzecznego  $10 \times 10$  cm. Każda seria liczyła po 5 próbek. Górne płaszczyzny tak uzyskanych próbek betonów z dodatkiem włókien, przed przystąpieniem do badań, zmierzono w trzech punktach oraz dwóch kierunkach w celu określenia dokładnych wymiarów przekroju górnej powierzchni, po czym przyjęto uśrednione wartości wymiarów powierzchni poddanej zamrażaniu.

**Tabela 2**

Ocena mrozoodporności betonów metodą Boräs [13]

Mrozoodporność	Wymagania
Bardzo dobra	$m_{56} < 0,10 \text{ kg/m}^2$
Dobra	$m_{56} < 0,20 \text{ kg/m}^2$ bądź $m_{56} < 0,50 \text{ kg/m}^2$ , gdy $m_{56}/m_{28} < 2$ , bądź $m_{112} < 1,00 \text{ kg/m}^2$
Dostateczna	$m_{56} < 1,00 \text{ kg/m}^2$ , gdy $m_{56}/m_{28} < 2$ , bądź $m_{112} < 1,00 \text{ kg/m}^2$
Niedostateczna	Nie są spełnione wymogi dla mrozoodporności dostatecznej

Przygotowanie do badań próbek polega na pozostawieniu odsłoniętej jedynie górnej powierzchni każdej z nich, zaś pozostałe płaszczyzny zostały całkowicie odizolowane od wpływu czynników zewnętrznych. Badanie rozpoczęto się po 28 dniach dojrzewania betonu, wtedy na okres 72 godzin ( $\pm 2$  godz.) pokryto górną powierzchnię trzymilimetrową warstwą dejonizowanej wody o temperaturze  $+20^\circ\text{C}$  ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). Po upływie tego czasu wodę zastąpiono roztworem solnym o stężeniu 3%, a następnie próbki umieszczono w komorze zamrażalniczej na okres 56 cykli zamrażania i rozmrażania. Jeden cykl trwał 24 h. Górne powierzchnie próbek zabezpieczono przed parowaniem roztworu solnego.

Masy złuszczonego z badanej powierzchni materiału określono po 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56 cyklach ( $\pm 1$  cykl) z dokładnością do 0,1 g. Po upływie  $n$  cykli zamrażania/rozmrażania podlicza się skumulowaną masę złuszczeń w odniesieniu do pola powierzchni poddanej zamrażaniu.

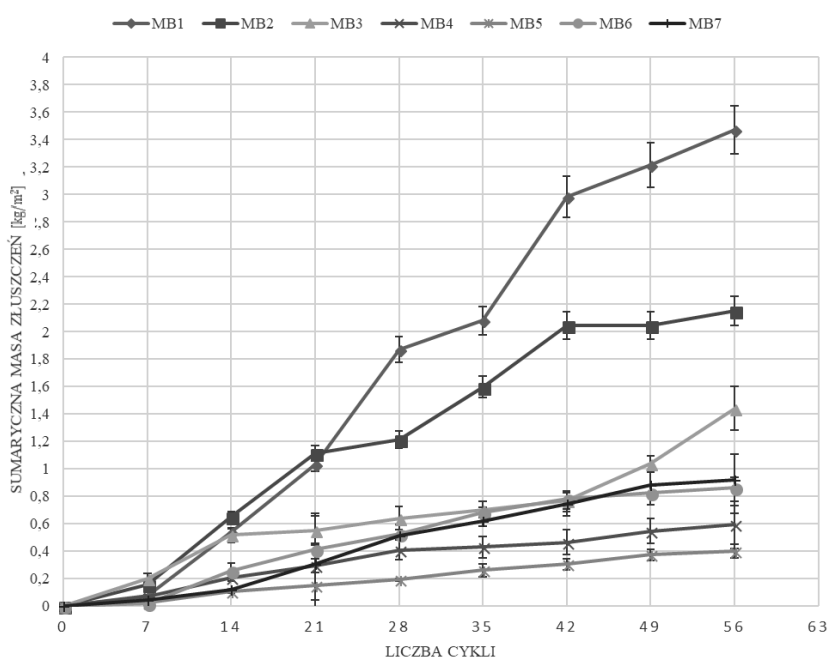
## 3. Wyniki badań

W tabeli 3 przedstawiono wyniki oceny mrozoodporności betonów z włóknami. Narastanie skumulowanej masy złuszczonego materiału pokazano na rysunku 1. Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, iż największą mrozoodporność po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania w obecności soli odładzającej wykazały próbki betonów zawierających zbrojenie w postaci włókien stalowych w ilości 1,0% objętości. Wartość powierzchniowej masy złuszczeń w tym przypadku po 56 cyklach wyniosła  $0,401 \text{ kg/m}^2$ . Jest to jednak wartość nieznacznie różniąca się od tej, którą otrzymano dla dodatku włókien stalowych w ilości 0,50% ( $0,592 \text{ kg/m}^2$ ). Oznacza to, iż korzystniejsze ze względów ekonomicznych oraz z uwagi na łatwiejszy sposób dozowania zbrojenia do betonu i przebieg procesu jego wytwarzania jest stosowanie mniejszej ilości włókien stalowych przy zachowaniu zadowalającej mrozoodporności.

Tabela 3

Średnia skumulowana masa złuszczeń powierzchniowych i ocena mrozoodporności

Seria	Rodzaj włókien	Objętościowa zawartość w mieszance	Średnia sumaryczna masa złuszczeń [kg/m <sup>2</sup> ]		m <sub>56</sub> /m <sub>28</sub>	Klasa mrozoodporności wg tabeli 2
			m <sub>28</sub>	m <sub>56</sub>		
MB1	Bez włókien	-	1,873	3,473	1,854	Niedostateczna
MB2	Włókna polimerowe	0,50%	1,215	2,152	1,771	Niedostateczna
MB3	Włókna polimerowe	1,00%	0,641	1,442	2,248	Niedostateczna
MB4	Makrowłókna stalowe	0,50%	0,41	0,592	1,446	Dostateczna
MB5	Makrowłókna stalowe	1,00%	0,193	0,401	2,077	Dobra
MB6	Mikrowłókna stalowe	0,50%	0,527	0,866	1,641	Dostateczna
MB7	Mikrowłókna stalowe	1,00%	0,515	0,921	1,788	Dostateczna

Rys. 1. Średnia skumulowana masa powierzchniowych złuszczeń betonu określona po  $n$  cyklach zamrażania/rozmarzania

W początkowej fazie badań (7 cykl zamrażania/rozmarzania) masy złuszczeń dla wszystkich typów próbek były zbliżone (rys. 1). Nagły przyrost złuszczonego materiału dla betonów ze zbrojeniem włóknami polimerowymi w ilości 0,50 oraz 1,0%, a także dla betonu bez zbrojenia rozproszonego zaobserwowano w drugim tygodniu badań (po 14 cyklach). Beton bez włókien po 56 cyklach osiągnął masę złuszczeń powierzchniowych przekraczającą 3 kg/m<sup>2</sup>, co oznacza, iż bez powłok ochronnych nie nadaje się on do wytwarzania elementów konstrukcji narażonych na cykliczne zmiany temperatur w obecności środków odładzających. Masa złuszczeń blisko dwukrotnie przewyższa wskaźnik mrozoodporności określony dla betonów ze zbrojeniem polimerowym, zaś ponad sześciokrotnie – wartość wyznaczoną dla betonów z włóknami stalowymi. W przypadku mikrowłókien stalowych różnice mas powierzchniowych złuszczeń przy zawartościach 0,50 oraz 1,0% są na tyle niewielkie, że wystarczające okazuje się użycie mniejszej ilości dodatku. Zgodnie z wymaganiami podanymi w tabeli 2, zawierającej

klasyfikację mrozoodporności betonów według metody Borås, można przyporządkować odpowiednio (tab. 3) mrozoodporność niedostateczną dla próbek bez dodatku zbrojenia oraz próbek z włóknami polimerowymi. Dostateczną mrozoodpornością charakteryzowały się betony z mikrowłóknami oraz włóknami stalowymi w ilości 0,5%, zaś dobrą odporność mrozową wykazały próbki z włóknami stalowymi w ilości 1,0% (tab. 4). Obecność makrowłókien stalowych w matrycy cementowej przyczynia się do znacznego ograniczenia ilości złuszczeń w porównaniu do kompozytu z włóknami stalowymi o długości 13 mm, jednak nadal beton z mikrowłóknami klasyfikuje się do dostatecznej mrozoodporności. Do zbrojenia mającego służyć podwyższeniu mrozoodporności betonów korzystniej zatem wybrać mikrowłókna, które charakteryzują się mniejszą podatnością korozyjną oraz łatwiejszym i tańszym dozowaniem do mieszanki betonowej.

**Tabela 4**

Charakterystyka fizycznych cech betonów poddanych analizie mrozoodporności

Seria	Rodzaj włókien	Objętościowa zawartość w mieszance	Nasiąkliwość wagowa [%]	Podciąganie kapilarne [kg/m <sup>2</sup> ]	Gęstość objętościowa [kg/m <sup>2</sup> ]
MB1	Bez włókien	–	4,97 (0,06)*	4,75 (0,12)*	2490,48 (41,26)*
MB2	Włókna polimerowe	0,50%	5,53 (0,05)*	5,25 (0,15)*	2481,21 (87,57)*
MB3	Włókna polimerowe	1,00%	5,56 (0,15)*	5,39 (0,08)*	2423,27 (43,48)*
MB4	Makrowłókna stalowe	0,50%	5,12 (0,07)*	5,01 (0,10)*	2490,37 (66,68)*
MB5	Makrowłókna stalowe	1,00%	5,11 (0,07)*	5,12 (0,35)*	2569,81 (65,57)*
MB6	Mikrowłókna stalowe	0,50%	5,13 (0,11)*	5,03 (0,068)*	2565,24 (36,60)*
MB7	Mikrowłókna stalowe	1,00%	5,09 (0,06)*	5,18 (0,15)*	2631,00 (23,85)*

\* W nawiasach podano odchylenia standardowe wyników pomiarów

Wprowadzenie włókien wpłynęło na nieznaczny wzrost nasiąkliwości betonu. Badanie kapilarnego podciągania roztworu solnego dało wyniki analogiczne do analizy nasiąkliwości. Najmniejszą zdolnością podciągania kapilarnego 3% roztworu solnego NaCl cechowały się próbki ze zbrojeniem włóknami stalowymi o zawartości 0,50%. Wyniosła ona 5,01 kg/m<sup>2</sup>. Świadczy to o występowaniu w próbkach MB4 najmniejszej ilości otwartych porów powietrznych.

#### 4. Wnioski

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na dominację włókien stalowych o długości 50 mm nad pozostałymi typami włókien dodanych do betonów z uwagi na poprawę mrozoodporności. Masa złuszczeń powierzchniowych betonu z włóknami stalowymi w ilości 1,0% po 56 cyklach zamrażania/rozmarzania była ponad 4-krotnie mniejsza niż w przypadku dodatku tej samej zawartości objętościowej włókien polimerowych. Badania wykazały niewielką różnicę pomiędzy ilością złuszczeń powierzchniowych dla zawartości 0,5% włókien stalowych a zawartością 1,0% tych włókien w objętości mieszanki betonowej. Porównywalne, korzystne wyniki świadczą o możliwości zastosowania mniejszej ilości zbrojenia rozproszonego stalowego w celu uzyskania zadowalającej odporności betonu. Według oceny metodą Borås, beton z makrowłóknami stalowymi można zakwalifikować do kategorii dobrej mrozoodporności. Beton bez dodatku włókien wykazał całkowity brak mrozoodporności po 56 cyklach badań. Beton nie nadaje się do stosowania w konstrukcjach narażonych na oddziaływanie środowiska agresywnego w stanie cyklicznych zmian temperatury. Betony z dodatkiem mikrowłókien stalowych o długości 13 mm mieszczą się w granicach stawianych dostatecznej mrozoodporności przy jednoczesnym zachowaniu bardziej estetycznego wyglądu powierzchni zamrażanej. Plamy korozyjne w przypadku mikrowłókien są znacznie mniej dostrzegalne. Z uwagi na wymaganą mrozo-

odporność betonu należy szczegółowo analizować zawartość stosowanych włókien. Na każdy z analizowanych betonów dodatek w postaci włókien wpłynął korzystnie, stanowiąc zabezpieczenie przed odpajaniem się fragmentów mieszanki betonowej z powierzchni poddanej wpływom czynników zewnętrznych.

## Literatura

- [1] Grodzicka A., Odporność BWW na działanie mrozu, Cement, Wapno, Beton 2003, 6, 332–339.
- [2] Rusin Z., Wpływ NaCl na uszkodzenia betonu w elementach konstrukcji drogowych, Przegląd Budowlany 2015, 6, 28–29.
- [3] Jamroży Z., Beton i jego technologie, WN PWN, Warszawa 2015.
- [4] Łukowski P., Modyfikacja materiałowa betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2016.
- [5] Kosior-Kazberuk M., Ocena degradacji betonu konstrukcyjnego poddanego procesom niszczenia mrozowego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2004.
- [6] Karwowska J., Łapko A., Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych, Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2011, 2, 41–46.
- [7] Glinicki M.A., Beton ze zbrojeniem strukturalnym, XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2010.
- [8] DS/EN 206:2013+A1:2016. Concrete – Specification, performance, production and conformity. Dansk Standard.
- [9] ÖNORM EN 206:2017. Concrete – Specification, performance, production and conformity. Austian Standard.
- [10] Krayushkina K., Khymerik T., Skrypchenko O., Moshkovskiy I., Pershakov V., Investigation of fiber concrete for road and bridge building, Procedia Engineering 2017, 187, 620–627.
- [11] Iqbal S., Ali A., Holschemacher K., Bier T.A., Effect of change in micro steel fiber content on properties of High strength steel fiber reinforced lightweight self- compacting concrete (HSLSCC), Procedia Engineering 2015, 122, 88–94.
- [12] Aylie H., Okiyarta A., Okiyarta A.W., Experimental study of steel-fiber reinforcement concrete beams with confinement, Procedia Engineering 2015, 125, 1030–1035.
- [13] SS 13 72 44:1995. Concretetesting; Hardened concrete; Scaling at freezing. Swedish Standard.

## Frost resistance of concrete with fibers

### ABSTRACT:

The influence of different fibers (steel, propylene, microfibers) on the frost resistance of concrete elements was analyzed. Seven types of concrete specimens with various types of fiber reinforcement at 1,0 or 0,5% volumetric ratio were selected for test. Destructive de-icing salt impact in environment of cyclic freezing and thawing was determined based on the procedure of PKN – CEN/TS 12390 – 9: Testinghardened concrete – Part 9: Freeze–thaw resistance – Scaling. It was found that fibers are very important additives in concrete mixture. Frost resistance of concrete without this type of reinforcement is about five times lower than resistance of concrete with steel fibers. Moreover, frost resistance accompanying analyses such as absorbability, capillarity sorption was analyzed. Relationships between examined properties of concrete were noticed. All observations lead to comprehensive understanding of this important material.

### KEYWORDS:

concrete; frost resistance; scaling; fiber reinforcement; durability of concrete structures