

# **Ocena możliwości poprawy odporności mrozowej betonu do nawierzchni poprzez zastosowanie mikrosfer polimerowych**

EVALUATION OF THE POSSIBILITIES TO IMPROVE THE FROST RESISTANCE OF PAVEMENT CONCRETE BY APPLYING A POLYMER MICROSPHERES

## **Streszczenie**

W ramach pracy podjęto badania nad możliwością wykorzystania alternatywnej technologii poprawy mrozoodporności betonu drogowego, poprzez zastąpienie domieszki napowietrzającej mikrosferami polimerowymi. Mikrosfery polimerowe stanowią nowość technologiczną, która może znaleźć wykorzystanie w betonach do nawierzchni dróg kategorii ruchu KR5-KR7. Przyjęty zakres badań obejmował szereg oznaczeń cech zarówno mieszanki betonowej, w tym konsystencji i zawartości powietrza, jak i stwardniałego betonu nawierzchniowego: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i przy zginaniu, mrozoodporności wewnętrznej betonu F150, mrozoodporności powierzchniowej betonu w obecności soli, nasiąkliwości i głębokość penetracji wody pod ciśnieniem oraz skurczu. Wnioski z badań dotyczą zarówno celowości, jak i zakresu stosowania napowietrzenia mikrosferami polimerowymi w betonach drogowych, jak i metod badawczych kontroli jakości takich betonów.

W pracy zaproponowano innowacyjną metodę poprawy odporności betonu na oddziaływanie mrozu i środków odladzających poprzez zastosowanie mikrosfer. W programie badań Autorzy udowodnili, że beton z mikrosferami może być rozwiązaniem technologicznym pozwalającym na budowę trwałych nawierzchni betonowych, których w najbliższej perspektywie 2015-2020 ma powstać ponad 800 km.

## **Abstract**

The subject of the study was to investigate the possibility of using alternative technology to improve the freeze-thaw resistance of concrete for roads, by replacing the air-entraining admixtures by polymer microspheres. Polymer microspheres are new technology, and its use in the pavement concrete for top layer of pavement with KR5-KR7 traffic load category is innovative. The scope of researches is based on General Technical Specification [1] and included compressive strength, bending strength, tensile splitting strength, free-throw resistance on F150 level, scaling resistance with deicing salts, water absorption, depth of penetration of water under pressure and shrinkage. The conclusions of the research concern both the desirability and the scope of application of aeration of pavement concrete by polymer microspheres as well as research methods for quality assurance of such concrete.

The paper proposes an innovative method to improve frost resistance of pavement through the use of polymer microspheres. The authors demonstrated program research that the microspheres can be a technological solution that allows to produce durable concrete for pavements, which in the nearest future 2015 ÷ 2020 is expected to create more than 800 km.

## 1. Wstęp

W 2014 r. GDDKiA przeprowadziła wielokryterialne analizy: ruchu, hałasu, ryzyka wykonania, kosztów budowy i utrzymania, cen materiałów, zużycia paliwa oraz jednorodności na określonym odcinku, w wyniku których zaobserwowano zwiększoną trwałość nawierzchni betonowych. Do budowy dróg w technologii betonowej wytypowano odcinki z natężeniem ruchu przekraczającym 20 tys. pojazdów na dobę, odcinki z tzw. ruchem pełzającym pojazdów (wjazdy, wyloty i obwodnice miast) oraz odcinki narażone na większe natężenie ruchu pojazdów ciężkich.

Nawierzchnie betonowe są stosowane w innych krajach europejskich takich jak Niemcy i to w znacznie większej skali niż w Polsce. W większości są one stosowane jako drogi o największym natężeniu ruchu – autostrady i drogi ekspresowe służące jako drogi tranzytowe. Do października 2012 roku wykonano około 3500 km autostrad w technologii nawierzchni betonowej, co stanowi 26,7% całkowitej liczby autostrad w Niemczech [2]. Niższe koszty utrzymania nawierzchni wykonanych w technologii betonu i konkurencyjne koszty wybudowania nawierzchni, w porównaniu z typowymi nawierzchniami podatnymi sprawiają, że technologia nawierzchni betonowej niczym nie ustępuje technologii nawierzchni podatnej z mieszanki mineralno – asfaltowej.

Jednocześnie, szybko rozwijająca się branża chemiczna stwarza nowe możliwości w technologii betonu. Pojawiają się nowe domieszki, których użycie gwarantuje otrzymanie wymaganych właściwości mieszanek betonowych i stwardniałego betonu. Wśród nich można znaleźć mikrosfery – mikroskopijnych rozmiarów pory powietrzne uwięzione przez tworzywo sztuczne. W niniejszej pracy zostanie sprawdzone, czy ich zastosowanie zapewni wymagane przez Ogólną Specyfikację Techniczną [1] parametry betonu do górnej warstwy nawierzchni o kategorii ruchu KR5÷KR7, w tym głównie odporność na mroz.

## 2. Zapewnienie mrozoodporności betonu

W celu wprowadzenia w strukturę betonu korzystnych ze względu na mrozoodporność porów powietrznych o wymiarach poniżej 300 µm najczęściej stosowane są domieszki napowietrzające, zwykle w postaci płynnej, dodawane podczas dozowania składników betonu. Pory powietrzne umożliwiają redukcję wewnętrznych naprężeń w betonie, powstających na skutek zamarzania i rozmarzania wody w kapilarach. Powszechnie stosowane domieszki i środki napowietrzające są produkowane z rozpuszczalnych w wodzie soli żywic drzewnych lub kalafonii i syntetycznych detergentów, które wprowadzono po raz pierwszy w połowie lat 80.

Mimo, że napowietrzanie betonu jest stosowane od dawna (od lat 30. XX wieku [4]) to wciąż wiąże się z nim szereg trudności, które należy przewidzieć w celu zaprojektowania i wykonania betonu trwałego w warunkach oddziaływania mrozu. Do problemów związanych z napowietrzaniem betonu zalicza się:

### – *potwierdzenie charakterystyki napowietrzenia mieszanki betonowej*

Kontrola całkowitej zawartości powietrza w mieszance betonowej, a nawet i struktury napowietrzenia jest nieodzowna dla uzyskania jednorodnych właściwości wytrzymałościowych i zapewnienia trwałości betonu w konstrukcji. Jednak zapanowanie nad szeregiem czynników wpływających na zawartość powietrza w mieszance betonowej oraz na jakość rozmieszczenia porów powietrznych w stwardniałym betonie nastęrcza trudności. Do tych

czynników należą właściwości cementu, kruszyw, domieszek chemicznych, dodatków takich jak popiół lotny, granulowany żużel wielkopiecowy, mączka wapienna czy też tzw. domielacze do cementu, woda, ale również procesy produkcyjne, warunki otoczenia oraz praktyka budowlana.

O ile w warunkach laboratoryjnych utrzymanie stałych warunków wytworzenia mieszanki nie jest kłopotliwe, to w przypadku betonu towarowego, może stwarzać trudności. Przy jednoczesnym stosowaniu różnego rodzaju domieszek np. redukujących ilość wody zarobowej, napowietrzających i opóźniających wiązanie, każda zmiana jakości składników betonu może wpływać na strukturę napowietrzenia mieszanki betonowej i charakterystykę porowatości stwardniałego betonu. Ponadto, zachowanie jednakowych warunków wytwarzania mieszanki betonowej (temperatura w trakcie produkcji mieszanki, czas mieszania składników, zawilgocenie kruszywa, konsystencja mieszanki, czas i warunki transportu mieszanki betonowej, sposób układania i zagęszczania) jest często niemożliwe, co rzutuje na napowietrzenie mieszanki betonowej, w tym zawartość mikroporów o średnicy poniżej 300 µm, czy też wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie

#### **– wpływ napowietrzania na wytrzymałość**

Napowietrzanie obniża wytrzymałość betonu. Zwiększenie zawartości powietrza o 1% może osłabić wytrzymałość betonu na ściskanie od 3 do 5%. W związku z tym w celu skompensowania spadku wytrzymałości w porównaniu do betonu nienapowietrzonego konieczne jest skorygowanie proporcji mieszanki poprzez zwiększenie zawartości cementu lub zmniejszenie współczynnika wodno-cementowego.

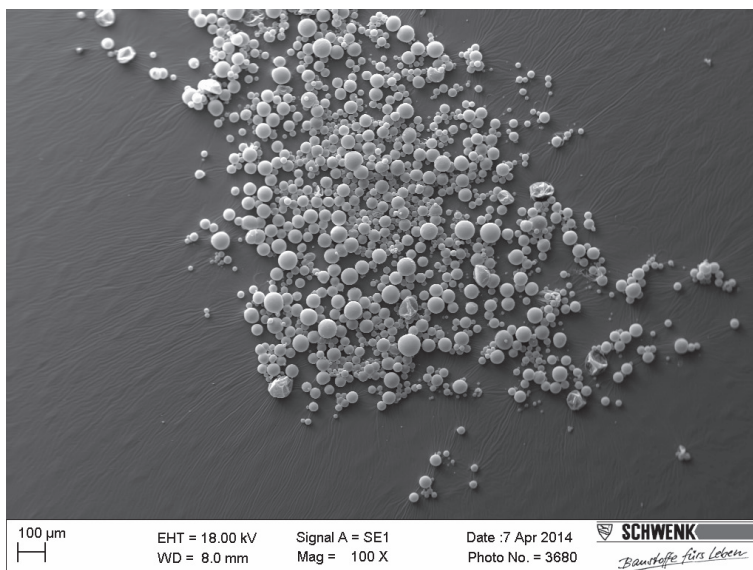
#### **– rzeczywisty koszt napowietrzania**

Domieszki i środki napowietrzające są zazwyczaj stosowane w bardzo niewielkich dozach w celu uzyskania pożądanej zawartości powietrza i zazwyczaj ich udział kosztowy w cenie metra sześciennego betonu jest znikomy. Niemniej rzeczywisty koszt napowietrzania dla producenta betonu obejmuje również wydatki związane z kontrolą jakości w celu zapewnienia powtarzalności parametrów wytrzymałościowych, jak również zmianą receptury mieszanki w celu skompensowania potencjalnego spadku wytrzymałości na skutek zawartości powietrza wyższej niż projektowa, a także wydatki ponoszone wówczas, gdy beton nie spełnia wymogów specyfikacji dotyczących zawartości powietrza (partie dostaw odrzucone przez klienta, czy też wymiana betonu w konstrukcji uznanego za niezgodny ze specyfikacją). Szczegółowa analiza może wykazać, że faktyczny koszt napowietrzania ponoszony przez producenta betonu jest o ponad rząd wielkości wyższy niż początkowy koszt domieszek i środków napowietrzających.

Niektóre z wymienionych czynników można wyeliminować stosując nowe rozwiązanie w postaci domieszki, która zapewnia odporność betonu na cykliczne zamarzanie i rozmarzanie poprzez niekonwencjonalne napowietrzenie. Inaczej niż środki napowietrzające, które stabilizują pory powietrzne wytwarzane podczas procesu mieszania, płynna domieszka ( lub w postaci syplkiej) zawiera puste w środku mikrosfery. Mikrosfery posiadają odporną i wytrzymałą, elastyczną powłokę i podobnie do porów powietrznych uzyskiwanych metodą napowietrzania, zapewniają pustki redukujące naprężenia, jakie powstają na skutek zwiększania objętości zamarzającej wody w betonie. Otoczone są cienką warstwą polimeru zapewniającą niezbędną mechaniczną wytrzymałość podczas mieszania betonu (fot. 1).

Główna różnica między technologią opartą na mikrosferach a konwencjonalną technologią napowietrzania (przy użyciu domieszek i środków napowietrzających) dotyczy wymogów objętościowych oraz właściwej dla tych mikrosfer stabilności. Zawartość

powietrza dla mieszanek betonowych, które będą narażone na cykle zamarzania i rozmrażania, zwykle określa się na poziomie  $4,5 \div 6,5\%$ . Natomiast zalecana zawartość mikrosfer zapewniająca porównywalne parametry odporności mrozowej wynosi około 1% objętości betonu. Jednak mikrosfery polimerowe w postaci sypkiej, ze względu na ich małą gęstość objętościową, stwarzają kłopoty z dozowaniem, ponieważ mają one tendencję do pylenia [5]. W celu skutecznego wymieszania składników konieczne jest stosowanie ich w postaci płynnej, ale istnieją już opracowane technologie/systemy przygotowania w punkcie użycia. Systemy takie umożliwiają produkcję płynnej domieszki mikrosferycznej na miejscu produkcji mieszanki betonowej (w betoniarni) [4].



Fot. 1. Mikrosfery polimerowe, (źródło: Archiwum BASF)

Zastosowanie polimerowych cząstek o stałej średnicy w mieszance betonowej pozwala wyeliminować, bądź znacznie zredukować, wpływ zmiennego oddziaływania warunków otoczenia podczas produkcji i wbudowania betonu. Czas oraz metoda transportu, długość mieszania nie ma jakiegokolwiek wpływu na całkowitą ilość napowietrzenia w mieszance betonowej. Zastosowanie mikrosfer ma pozytywny wpływ na powtarzalność uzyskania planowanej struktury napowietrzenia betonu [4].

W porównaniu do konwencjonalnego napowietrzania, technologia domieszki mikrosferycznej jest bardziej stabilna (ponieważ mikrosfery nie napowietrzają mieszanki betonowej) i wolna od wpływu rozmaitych czynników powodujących niepożądane wahania zawartości powietrza w napowietrzonej mieszance betonowej. W rezultacie wyeliminowane zostały wahania parametrów oraz dodatkowe wpływy czynników towarzyszące konwencjonalnemu napowietrzaniu betonu. Domieszka umożliwia także wyższe poziomy zastąpienia cementu portlandzkiego dodatkami mineralnymi [4], co w dobie zrównoważonego rozwoju i poszukiwania alternatywnych składników betonu nie jest obojętne.

### 3. Koncepcja realizacji programu badań

#### 3.1. Przedmiot i zakres badań własnych

Celem badań było sprawdzenie możliwości uzyskania mrozoodpornego betonu przy użyciu mikrosfer polimerowych, a także ocena przydatności tego typu betonu do górnej warstwy nawierzchni betonowej dróg kategorii KR5÷KR7, według KTKNS [3] i wymagań Ogólnej Specyfikacji Technicznej D-05.03.04 [1]. W tym celu zaprojektowano beton napowietrzony (o całkowitej zawartości powietrza w mieszance równej 5÷6%; o odpowiedniej strukturze tzn. właściwym rozmiarze oraz rozmieszczeniu porów), spełniający wymagania dla klasy wytrzymałości na ściskanie C35/45 według PN-EN 206:2014 [6], klasy ekspozycji XF3 i kategorii mrozoodporności FT1 wg PKN-CEN/TS EN 12390-9 [7]. Beton wykonano z kruszywem łamanym o maksymalnym wymiarze  $D_{max}$  8 mm. W celu uzyskania założonej klasy konsystencji zastosowano domieszkę upłynniającą.

Przyjęty zakres badań obejmował sprawdzenie właściwości mieszanki betonowej w tym: konsystencji, gęstości objętościowej, całkowitej zawartości powietrza oraz badania właściwości stwardniałego betonu w tym: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałości na zginanie, skurczu jak i cech związanych typowo z trwałością betonu w tym: nasiąkliwości, głębokości penetracji wody i mrozoodporności F150.

#### 3.2. Materiały stosowane do badań i ich charakterystyka

Do wykonania mieszanek betonowych, jako spoiwo zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R. Przed przystąpieniem do betonowań, cement przebadano zgodnie z wymogami normy PN-EN 197-1: 2012E. We wszystkich mieszankach betonowych kruszywo drobne stanowił piasek wiślany, a grube – grys bazaltowy frakcji 2/8 i 5/8 mm. Do przygotowania mieszanek betonowych użyto wody wodociągowej, spełniającej wymagania normy PN-EN 1008:2004P. W celu uzyskania zakładanego poziomu konsystencji mieszanki betonowej, stosowano superplastyfikator (na bazie lignosulfonianu magnezowego) zgodny z PN-EN 934-2. Napowietrzenie mieszanki betonowej na poziomie 5÷6% uzyskano za pomocą domieszki napowietrzającej (na bazie tensydów syntetycznych) zgodnej z PN-EN 934-2. Zamiennie dla domieszki napowietrzającej stosowano mikrosfery – pory powietrzne zamknięte przez polimer (akrylonitryl), którego średni wymiar cząsteczek wynosi około 300  $\mu$ m.

#### 3.3. Założenia projektowe

Skład betonu ustalono opierając się o następujące założenia:

- Beton do górnej warstwy nawierzchni – wymagania odnośnie napowietrzenia mieszanki betonowej oraz właściwości stwardniałego betonu wg Ogólnej Specyfikacji Technicznej dotyczącej wykonania i odbioru robót związanych z wykonywaniem nawierzchni z betonu cementowego D-05.03.04 [1];
- Klasa wytrzymałości betonu C35/45 według PN-EN 206:2014 [6];
- Klasa ekspozycji XF3 i wynikająca z tego kategoria mrozoodporności FT1 wg PKN-CEN/TS EN 12390-9 [7];
- Kategoria ruchu KR5÷KR7;
- Kruszywo o maksymalnym wymiarze  $D_{max}$  8 mm;

- Ilości domieszek napowietrzających, upłynniających i mikrosfer zastosowanych w składzie betonu według zaleceń producenta w karcie materiałowej dla uzyskania wymaganych parametrów według OST [1]

Zaprojektowane składy mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 1. W recepturach zachowano ten sam współczynnik wodno-cementowy ( $w/c = 0,35$ ) oraz stałą procentową zawartość cementu, kruszywa drobnego i grubego, wody oraz domieszki upłynniającej. Recepty różnią się jedynie rodzajem i ilością domieszki gwarantującej wprowadzenie w strukturę betonu pustek powietrznych.

Tabela 1. Składy mieszanek betonowych w  $\text{kg}/\text{m}^3$ 

Składniki	NAP 6,5%	NAP 5%	MIK 2	MIK 4
Cement CEM I 42,5R, [kg]	446	446	446	446
Woda, [kg]	135	135	135	135
Piasek 0/2, [kg]	503	503	503	503
Kruszywo łamane 2/5, 5/8 [kg]	1394	1394	1394	1394
Superplastyfikator, [% m.c.]	1,4	1,4	1,4	1,4
Domieszka napowietrzająca, [% m.c.]	<b>0,12</b>	<b>0,10</b>	0	0
Mikrosfery, [kg]	0	0	<b>2</b>	<b>4</b>

### 3.4. Metodyka badawcza

Przeprowadzono następujące badania mieszanki betonowej:

- konsystencji metodą Ve-Be wg PN-EN 12350- 3 [8],
- napowietrzenia metodą ciśnieniową wg PN-EN 12350-7 [9],  
Zbadano takie cechy betonu jak:
  - wytrzymałość na ściskanie próbek po 2 i 28 dniach dojrzewania wg PN-EN 12390-3 [10];
  - wytrzymałość betonu na zginanie po 28 dniach dojrzewania wg PN-EN 12390-5 [11];
  - wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 12390-6 [12];
  - mrozoodporność wewnętrznej betonu wg PN-88/B-06250 [13]- stopień mrozoodporności F150;
  - mrozoodporność powierzchniowej betonu w obecności soli wg PKN-CEN/TS EN 12390-9 [7];
  - nasiąkliwość betonu wg PN-88/B-06250 [13];
  - głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8 [14];
  - skurcz betonu wg PN-B-06714-23:1984 [15].

## 4. Wpływ modyfikacji składu mikrosferami na właściwości mieszanki betonowej i betonu do nawierzchni

### 4.1. Właściwości mieszanki betonowej

#### *Konsystencja mieszanki betonowej oznaczona metodą Ve-Be*

Badanie konsystencji metodą Ve-Be [8] jest odpowiednią metodą do badania mieszanek betonowych o gęstej, zwartej konsystencji, odpowiednich do układania nawierzchni za pomocą rozścielacza.

Tabela 2. Właściwości mieszanek betonowych

Cecha mieszanki betonowej	NAP 6,5%	NAP 5%	MIK 2	MIK 4
Czas Ve-Be, [s]	2,2	2,3	3	3,5
Klasa konsystencji	-	-	<b>V0</b>	<b>V0</b>
Zawartość powietrza w mieszance betonowej, [%]	6,5	5,0	0,7	1,2

Uzyskano mieszanki, które charakteryzują się zbyt dużą ciekłością (szczególnie te napowietrzane – tabela 2) i powinny być badane inną metodą (stopnia zagęszczalności wg PN-EN 12350-4), gdyż wykraczają poza dopuszczalny zakres konsystencji w przypadku tej metody (minimum 3 sekundy). Wyniki mogą być niemiarodajne i należy je interpretować jako porównawcze w stosunku do składów MIK 2 i MIK 4. Próbkę mieszanki z dodatkiem mikrosfer osiągnęły nieznacznie wyższe wyniki w badaniu konsystencji metodą Ve-Be. Świadczy to o niewielkim pogorszeniu urabialności betonu z dodatkiem mikrosfer i zwiększeniu ciekłości w wyniku dodania domieszki napowietrzającej.

#### *Zawartość powietrza w mieszance betonowej oznaczona metodą ciśnieniową*

Badanie całkowitej zawartości powietrza metodą ciśnieniową nie są miarodajne dla mieszanki betonowej z dodatkiem mikrosfer. Jak można zauważyć wyniki próbek z domieszką napowietrzającą i mikrosferami znacząco się różnią.

### 4.2. Właściwości betonu

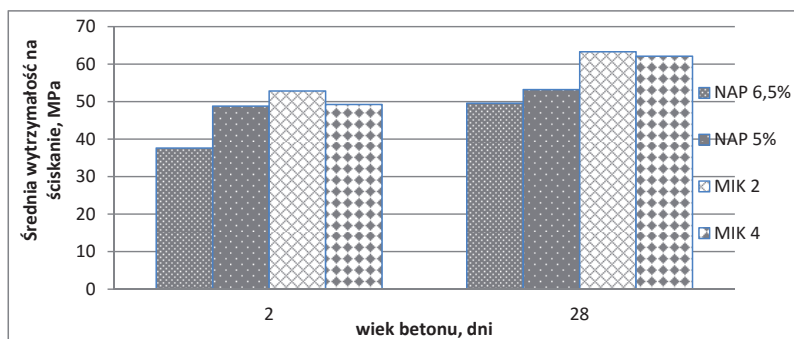
#### *Wytrzymałość na ścislenie betonu*

Betony napowietrzane uzyskały najniższe wyniki wytrzymałości na ścislenie (rys. 1) jednak spełniające wymagania podwójnego kryterium zgodności wg normy PN-EN 206:2014 [6] dla założonej klasy wytrzymałości na ścislenie C35/45. W przypadku próbek betonów, w których użyto mikrosfer uzyskano wytrzymałości znacznie przewyższające wymagania dla klasy – powietrze wprowadzane w postaci mikrosfer nie obniża wytrzymałości betonu w takim stopniu jak ma to miejsce w przypadku napowietrzania. Jednocześnie można stwierdzić, iż wprowadzenie do mieszanki większej zawartości mikrosfer (o 2 kg/m<sup>3</sup> więcej) spowodowało niewielki spadek wytrzymałości, który w przypadku wytrzymałości po dwóch dniach wynosił 7%, a po 28 dniach już tylko 2%.



Tabela 3. Cechy wytrzymałościowe betonów

Badana cecha	Skład betonu			
	NAP 6,5% A1	NAP 5% A2	MIK 2 B1	MIK 4 B2
Wytrzymałość na ściskanie, $f_{cm2'}$ [MPa]	37,62	48,81	52,86	49,25
odchylenie standardowe, [MPa]	0,06	0,12	1,02	5,01
Wytrzymałość na ściskanie, $f_{cm28'}$ [MPa]	49,59	53,21	63,33	62,13
odchylenie standardowe	1,13	0,21	4,98	1,47
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, $f_{tm28'}$ [MPa]	3,30	4,12	3,94	3,92
odchylenie standardowe, [MPa]	0,34	0,10	0,24	0,16
Wytrzymałość na zginanie, $f_{fm28'}$ [MPa]	5,89	<i>nie badano</i>	7,51	7,37
odchylenie standardowe, [MPa]	0,09	-	0,32	0,13



Rys. 1. Wytrzymałości na ściskanie betonów do nawierzchni po 2 i 28 dniach dojrzewania

Rozwój wytrzymałości na ściskanie  $r$ , określany jako stosunek wytrzymałości na ściskanie próbki po 2 dniach dojrzewania do wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania (tabela 4) wszystkich badanych betonów był szybki według PN-EN 206:2014 [6].

Tabela 4. Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu do nawierzchni

Badana cecha	Skład betonu			
	NAP 6,5%	NAP 5%	MIK 2	MIK 4
Rozwój wytrzymałości na ściskanie $r = \frac{f_{cm,2}}{f_{cm,28}}$	0,76	0,91	0,83	0,79
Ocena rozwoju wytrzymałości na ściskanie według PN-EN 206:2014	szybki	szybki	szybki	szybki

**Wytrzymałość betonu na rozciąganie w próbie zginania**

Według Ogólnej Specyfikacji Technicznej [1] wytrzymałość betonu na zginanie w 28 dniu twardnienia, obliczona jako średnia z trzech próbek, nie powinna być niższa niż 5,5 MPa (KR5÷KR7). Wytrzymałości betonów z mikrosferami spełniają te wymagania z nadmiarem (tabela 3). Najwyższe wartości wytrzymałości na zginanie uzyskały próbki betonowe z domieszką mikrosfer, których wytrzymałości były około 25% wyższe o wytrzymałości betonu napowietrzonego ze zbadaną 6,5% zawartością powietrza w mieszance betonowej. Napowietrzenie tradycyjne znacznie osłabiło wytrzymałość na zginanie betonu, a wyjątkowo korzystny wpływ na tę cechę miało alternatywne dla napowietrzenia – wprowadzenie mikrosfer mających zapewnić mrozoodporność.

**Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu**

Betony z 6,5% zawartością powietrza w mieszance nie spełniły wymagań stawianych betonom do nawierzchni o kategorii ruchu KR5÷KR7 (wynik średni z 3 prób równy co najmniej 3,7 MPa). W przypadku pozostałych betonów wyniki średnie są zbliżone i spełniają wymagania stawiane betonom nawierzchniowym.

**Mrozoodporność betonu F150 według PN-88/B-06250**

Zaprojektowane betony z mikrosferami i beton napowietrzony (NAP 6,5%) poddano sprawdzeniu odporności na działanie 150 cykli zamrażania i rozmrażania. Badanie mrozoodporności przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania próbek w komorze klimatycznej (temperatura powietrza  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ , wilgotność względna  $> 95\%$ ).

Porównując tę cechę z wymaganiami w Ogólnej Specyfikacji Technicznej [1] procentowy spadek masy próbek betonu poddawanych cykлом zamrażania i rozmrażania w stosunku do masy przed badaniem nie powinien przekraczać 5%. Wszystkie badane betony spełniły to wymaganie. Najmniejszą utratę masy (0,75%) stwierdzono w przypadku próbek z  $4\text{ kg/m}^3$  domieszką mikrosfer, a największą 2,8% też betonu z mikrosferami, tylko z ich mniejszą zawartością (tabela 5).

Tabela 5. Wyniki oznaczeń mrozoodporności betonu F150

Badana cecha	Skład betonu			
	NAP 6,5%	NAP 5%	MIK 2	MIK 4
Średnia utrata masy, [%]	-	1,3	2,77	0,75
Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania, [MPa]	-	51,44	54,27	67,54
odchylenie standardowe, [MPa]	-	0,82	4,39	1,41
Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek świadków, [MPa]	-	53,44	71,96	68,26
odchylenie standardowe, [MPa]	-	1,99	0,52	1,94
Średni spadek wytrzymałości na ściskanie, [%]	-	3,74	24,0	1,06

Również w przypadku spadku wytrzymałości betonu po zamrażaniu i rozmrażaniu, beton z największą zawartością mikrosfer uzyskał najkorzystniejszy wynik – najniższy

spadek wytrzymałości równy 1%. Dziwnym jednak okazał się wynik oznaczeń betonu z 2 kg mikrosfer w składzie, gdyż nie spełnił on progowego wymagania maksymalnie 20% różnicy wytrzymałości po mrożeniu. Wytrzymałość tego betonu, dojrzewającego dalej jako próbki świadki, znacznie wzrosła w czasie badania mrozoodporności F150, aż do 72 MPa, co w efekcie dało 24% spadek wytrzymałości próbek „maltretowanych” mrozem w porównaniu ze świadkami.

Betony sporządzone według receptur NPA 6,5% i MIK 4 spełniły wymagania stawiane stopniowi mrozoodporności F150.

### *Mrozoodporność betonu w obecności soli*

Próbki do badania mrozoodporności betonu w obecności soli przygotowano zgodnie zaleceniami metody „slab test” zamieszczonymi w normie PKN-CEN/TS EN 12390-9 [7].

Po 28 dniach dojrzewania próbki umieszczono w komorze zamrażającej na 58 cykli zamrażania i rozmrażania; dokonano również pomiarów pośrednich po 14 i 28 cyklach zamrażania i rozmrażania (tabela 6).

Podobnie jak w przypadku mrozoodporności wewnętrznej F150, tak i przy mrozoodporności powierzchniowej najgorszą odporność miał beton z mniejszą zawartością – 2 kg mikrosfer w składzie. W każdym terminie badania miał największe złuszczenia – jednak wszystkie w zakresie mieszczącym się w granicznym dopuszczalnym dla kategorii FT1 odporności na zamrażanie i rozmrażanie z udziałem soli odladzających (wartość średnia ubytku masy  $m_{28} < 1,0 \text{ kg/m}^2$  i każdy pojedynczy wynik poniżej  $1,5 \text{ kg/m}^2$ ), a nawet FT2 – dla (wymagane poniżej  $0,5 \text{ kg/m}^2$ ), średni ubytek masy  $m_{58}$  poniżej  $1,0 \text{ kg/m}^2$  i stopień ubytku  $m_{56/m_{28}}$  wymagane poniżej 2). Wyniki oznaczeń próbek z betonu napowietrzonego (NAP 5%) i z 4 kg mikrosfer w składzie (MIK 4) są zbliżone i około 15 razy mniejsze niż betonu z 2 kg mikrosfer polimerowych (MIK 2).

Tabela 6. Wyniki oznaczeń mrozoodporności powierzchniowej/zewnętrznej betonu wg PKN-CEN/TS EN 12390-9:2009










Widok złuszczonego materiału	Skład	m cykli	Masa złuszczonego materiału [g]	Masa złuszczonego materiału na $\text{m}^2$ powierzchni [ $\text{kg/m}^2$ ]	Średnia masa złuszczonego materiału – [ $\text{kg/m}^2$ ]
	NAP 5%	$m_{14}$	0,06	0,003	0,005
	NAP 5%	$m_{14}$	0,16	0,007	
	NAP 5%	$m_{14}$	0,11	0,005	
	MIK 2	$m_{14}$	3,37	0,150	0,111
	MIK 2	$m_{14}$	1,38	0,061	
	MIK 2	$m_{14}$	2,71	0,120	

Tabela 6. Cd. Wyniki oznaczeń mrozoodporności powierzchniowej/zewnętrznej betonu wg PKN-CEN/TS EN 12390-9:2009

Widok złuszczonego materiału	Skład	m cykli	Masa złuszczonego materiału [g]	Masa złuszczonego materiału na m <sup>2</sup> powierzchni [kg/m <sup>2</sup> ]	Średnia masa złuszczonego materiału – [kg/m <sup>2</sup> ]
	MIK 4	m <sub>14</sub>	0,20	0,009	0,006
	MIK 4	m <sub>14</sub>	0,05	0,002	
	MIK 4	m <sub>14</sub>	0,13	0,006	
	NAP 5%	m <sub>28</sub>	0,11	0,005	0,006
	NAP 5%	m <sub>28</sub>	0,19	0,008	
	NAP 5%	m <sub>28</sub>	0,13	0,006	
	MIK 2	m <sub>28</sub>	3,92	0,174	0,133
	MIK 2	m <sub>28</sub>	2,58	0,115	
	MIK 2	m <sub>28</sub>	2,48	0,110	
	MIK 4	m <sub>28</sub>	0,25	0,011	0,008
	MIK 4	m <sub>28</sub>	0,09	0,004	
	MIK 4	m <sub>28</sub>	0,21	0,009	
	NAP 5%	m <sub>56</sub>	0,13	0,006	0,008
	NAP 5%	m <sub>56</sub>	0,22	0,010	
	NAP 5%	m <sub>56</sub>	0,17	0,008	
	MIK 2	m <sub>56</sub>	4,33	0,192	0,155
	MIK 2	m <sub>56</sub>	2,72	0,121	
	MIK 2	m <sub>56</sub>	3,41	0,152	
	MIK 4	m <sub>56</sub>	0,27	0,012	0,009
	MIK 4	m <sub>56</sub>	0,11	0,005	
	MIK 4	m <sub>56</sub>	0,22	0,008	



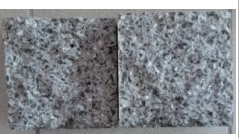
Wszystkie badane betony – napowietrzony i z mikrosferami wykazały mrozoodpornością powierzchniową w obecności środków odladzających wymaganą w przypadku betonów do górnej warstwy nawierzchni [1].

Tym samym, potwierdzono, że ilość użytej domieszki w postaci mikrosfer ma istotny wpływ na odporność mrozową betonu.

### **Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem**

Po 28 dniach sezonowania w komorze wilgotnościowej próbki betonowe wysuszone do stałej masy i poddano badaniu. Wyniki oznaczeń zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki oznaczeń głębokości penetracji wody pod ciśnieniem

Badana cecha	Skład betonu		
	NAP 6,5%	MIK 2	MIK 4
Maksymalne głębokości penetracji wody pod ciśnieniem w próbki, [mm]	 19,21,19	 9, 14, 14	 11,12,16
Średnia głębokość penetracji wody, [mm]	20	14	13

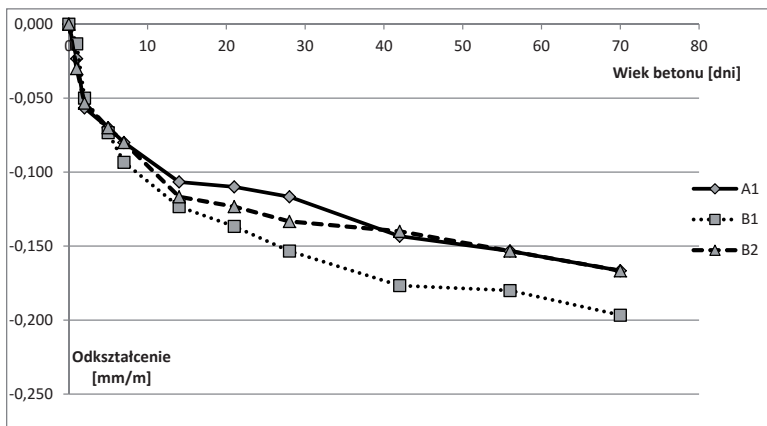
Betony nawierzchniowe z mikrosferami wykazały większą odporność na działanie wody po stałym ciśnieniu 0,5 MPa od betonu napowietrzonego – jednak różnice i ostateczne głębokości wniknięcia wody w próbki podczas badania nie były zbyt wielkie i nie przekroczyły 2 cm. Tym samym spełniły warunek stawiany betonom nawierzchniowym.

Struktura betonu z wprowadzonymi porami powietrznymi w otoczce polimeru – mikrosferami stanowiła większą barierę dla wody pod ciśnieniem niż struktura betonu napowietrzonego.

### **Skurcz betonu**

Przeprowadzone badania skurczu betonu w okresie do 70 dni potwierdziły podobny charakter odkształceń skurczowych zarówno betonu napowietrzonego w sposób tradycyjny, jak i betonów z mikrosferami – głównie w okresie do 14 dni dojrzewania betonu. Po tym terminie wystąpiły niewielkie różnice w odkształceniach badanych betonów, a największy skurcz miał beton z 2 kg mikrosfer w składzie. Do końca badania żaden z betonów nie przekroczył wartości odkształceń równej 0,2 mm/m.

Z danych literaturowych jest znany orientacyjny przebieg skurczu betonu w konstrukcji, gdzie szacuje się, że po 10 dniach osiąga on 33%, po 28 dniach 50%, a po 1 roku 90% skurczu końcowego. Przeprowadzone oznaczenie skurczu na beleczkach Amslera prognozuje, iż zaprojektowane betonu nie charakteryzują się małym skurczem (skład betonu mógłby sugerować inaczej).



Rys. 2. Odkształcenia skurczowe betonów w czasie do 70 dni dojrzewania

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Mikrosfery mogą być z powodzeniem stosowane jako zamiennik tradycyjnie używanej domieszki napowietrzającej w betonach do górnej warstwy nawierzchni o kategorii obciążenia ruchem KR5÷KR7. Minimalna zawartość mikrosfer w składzie betonu, którą zastosowano ( $2 \text{ kg/m}^3$ ) nie jest jednak wystarczająca do uzyskania betonu mrozoodpornego, gdyż spadek wytrzymałości betonu po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania w badaniu mrozoodporności wewnętrznej betonu z minimalną zawartością mikrosfer przekroczył wartość dopuszczalną 20% (27,76%). W przypadku betonu z maksymalną zalecaną zawartością mikrosfer otrzymano znacznie lepsze wyniki w badaniu mrozoodporności wewnętrznej i powierzchniowej. Chcąc uzyskać beton spełniający wymagania stawiane betonom do górnej warstwy nawierzchni w Ogólnej Specyfikacji Technicznej [1] należy dodać domieszkę w postaci mikrosfer w ilości większej niż  $2 \text{ kg na m}^3$  betonu. Optymalizacja zawartości domieszki mikrosfer do betonu do nawierzchni wymaga przeprowadzenia szerszego programu badań, a przeprowadzone analizy miały na celu jedynie wskazanie możliwości uwzględniania tego rodzaju domieszki jako składnika trwałych betonów nawierzchniowych.

Oprócz pozytywnego wpływu mikrosfer na szczelność betonu z nimi wykonanego potwierdzono korzystny wpływ na właściwości wytrzymałościowe betonu, w tym szczególnie istotną z punktu widzenia pracy nawierzchni – wytrzymałość na rozciąganie. Zarówno w próbie zginania, jak i rozciągania przy rozłupywaniu – beton z domieszką mikrosfer polimerowych osiągnął znacznie lepsze wartości wytrzymałości niż beton napowietrzony. Przykładowo beton, którego mieszanka miała 6,5% powietrza wprowadzonego za pomocą domieszki napowietrzającej miała wytrzymałość na ściskanie o 26% mniejszą niż beton o takim samym składzie, ale napowietrzony mikrosferami, o 18% mniejszy wynik wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i ponad 25% mniejszą wytrzymałość na zginanie. Napowietrzenie tradycyjne wiąże się z dużym spadkiem wytrzymałości betonu wraz z każdym procentem wprowadzanych pustek w strukturę betonu. Przy stosowaniu mikrosfer polimerowych jako źródła „dobrego powietrza” w betonie – tego zjawiska nie obserwuje się. W sferze dalszych badań powinno znaleźć

się potwierdzenie skuteczności działania tego rodzaju porowatości w betonie w dłuższym okresie eksploatacji – jest to tematem kontynuacji podjętych badań; podobnie jak ustalenie odpowiedniej metodyki badawczej służącej ocenie jakości mieszanek i betonów z mikrosferami polimerowymi, gdyż niektóre narzędzia stosowane do mieszanek napowietrzanych za pomocą domieszek napowietrzających nie są użyteczne do mieszanek z domieszką mikrosfer (np. ocena całkowitej zawartości powietrza metodą ciśnieniową czy też struktury napowietrzenia AVA). Poza zakresem analiz przedstawionych w pracy pozostało również ujęcie ekonomiczne.

## **Literatura**

- [1] Ogólne Specyfikacje Techniczne, D-05.03.04, Nawierzchnia betonowa, GDDKiA, Warszawa, 2014;
- [2] S. Höller, Federal Highway Research Institute, BASt Germany, 2012;
- [3] Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, Politechnika Wroclawska 2014,
- [4] M. A. Bury, F. Ong, E. Attiogbe, Ch. Nmai, J. Smith, Microsphere-Based Admixture for Durable Concrete, A replacement for conventional air entrainment, Concrete international, March 2014;
- [5] A. Molendowska, J. Wawrzeńczyk, Zastosowanie mikrosfer jako alternatywna metoda napowietrzania betonu, Budownictwo Technologie Architektura, październik-grudzień 2011;
- [6] PN-EN 206:2014, Beton- wymagania, właściwości, produkcja i zgodność;
- [7] PKN-CEN/TS EN 12390-9:2009, Testing hardened concrete. Part 9: Freeze- thaw resistance. Scaling (oryg.);
- [8] PN-EN 12350-3:2011, Badania mieszanki betonowej -- Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe;
- [9] PN-EN 12350-7, Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe;
- [10] PN-EN 12390-3 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań,
- [11] PN-EN 12390-5 Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań,
- [12] PN-EN 12390-6 Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.
- [13] PN-88/B-06250, Beton zwykły;
- [14] PN-EN 12390-8, Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem;
- [15] PN-B-06714-23:1984, Oznaczanie zmian objętościowych metodą Amslera.