

## Wpływ domieszek chemicznych na trwałość warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej

THE INFLUENCE OF CHEMICAL ADMIXTURES ON THE DURABILITY OF THE CONSTRUCTION LAYER OF PAVING BLOKS

### Streszczenie

Zastosowanie betonu wibroprasowanego w konstrukcjach infrastruktury drogowej o dużej istotności społecznej wymaga zapewnienia trwałości na cały przewidziany okres eksploatacyjny. W konsekwencji, w dokumentach technicznych, stawiane są rygorystyczne wymagania w odniesieniu do ścieralności, nasiąkliwości, a szczególnie mrozoodporności. W przypadku dokumentów normalizacyjnych dotyczących drobnowymiarowych elementów dwuwarstwowych czynniki niszczące odnoszą się głównie do warstwy fakturowej. W praktyce jednak wnikanie wilgoci oraz środków odladzających przez pozostałe powierzchnie elementów wibroprasowanych wymuszają zapewnienie odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie także warstwy konstrukcyjnej gotowych wyrobów.

Program badań zakładał zastosowanie szeregu domieszek chemicznych mających za zadanie poprawę odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej z niskoemisyjnym cementem CEM II/B-S i popiołem lotnym krzemionkowym. Modyfikacje domieszkami obejmowały poprawę upakowania matrycy cementowej, hydrofobizację porów kapilarnych, stosowanie dodatków żywicznych i wprowadzenie sferycznych mikroporów. Kostki brukowe do badań wykonano w skali przemysłowej w zakładzie produkcyjnym wraz z zachowaniem warunków i czasu dojrzewania przez okres 56 dni. Wpływ modyfikacji domieszkami chemicznymi określono badając nasiąkliwość, porowatość otwartą dla wody, szybkość absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego, charakterystykę porów powietrznych metodą analizy obrazu i mrozoodporność zwykłą (F150) warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej. Otrzymane wyniki wykazały problemy z jednorodnością betonu kostki brukowej w przypadku stosowania domieszek napo-

---

*mgr. inż. Arkadiusz Ignierowicz – Atlas Sp. z o.o.*

*mgr. inż. Michał Oleksik – Atlas Sp. z o.o.*

*mgr. inż. Damian Zawót – PBI Beton Sp. z o.o.*

*mgr. inż. Łukasz Osuch – PBI Beton Sp. z o.o.*

*dr inż. Mariusz Dąbrowski – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk*

wietrzających. Zadawalające wyniki mrozoodporności uzyskano stosując domieszki zapewniające lepsze zagęszczenie betonu podczas wibroprasowania.

## **Abstract**

Increasing durability requirements for paving stones by technical specification documents resulted in the search for more effective material solutions, especially in chemical admixture issue. Currently, freeze and thaw resistance applies to the textured surface and also to the structural part of the paving stone. Therefore, the research program includes the use of chemical admixtures that increase the resistance to cyclical freezing and thawing of the structural layer of paving stones made of concrete with low-emission cement type CEM II/B-S and silica fly ash. The influence of proposed chemical admixtures on the concrete properties was done by improving a compaction degree of cement matrix, hydrophobization of the capillary pores and the introduction of spherical micropores. The paving stones were produced on an industrial scale in a concrete block making plant and was tested after the 56 days of curing. The splitting strength, water absorption, open porosity, capillary suction, air voids characteristic and freeze-thaw resistance (F150) measurements of structural layer of paving stones were carried out. The results revealed problems with the homogeneity of paving stone concrete when air-entraining admixture was used. Satisfactory results of frost resistance were obtained by using admixtures ensuring better compaction of concrete during vibropressing.

## 1. Wprowadzenie

Od czasu uruchomienia pierwszej linii produkcji elementów wibroprasowanych w Przedsiębiorstwie „Kombet” w Gdyni minęło ponad 40 lat. W tym okresie Polska stała się ich czołowym producentem na skalę europejską i światową. Już w roku 2010 wielkość produkcji kostki brukowej przekroczyła 60 mln m<sup>2</sup> [1]. Z raportu firmy badawczej Spectis na temat rynku wyrobów betonowych w Polsce wynika iż w ujęciu ilościowym głównym segmentem tego rynku pozostaje segment kostki brukowej wraz z płytami chodnikowymi, krawężnikami czy obrzeżami. W ujęciu wartościowym jest natomiast na drugim miejscu i stanowi 30,2% (ok.3,5mld zł) całego rynku wyrobów betonowych. [2] Na ten sukces złożyło się kilka czynników, w tym: niski koszt produkcji, dostępność, bogate wzornictwo, prostota i szybkość montażu.

Ze względu na specyfikę procesu produkcyjnego betonu wibroprasowanego, w tym natychmiastowe rozszalowanie, osiągnięcie wysokiej wytrzymałości wczesnej (16h) do składowania i transportu gotowych elementów preferowane jest stosowanie cementów wysokoklinkierowych. Dziś ze względu na próbę uzyskania neutralności klimatycznej w roku 2050, transformację energetyczną oraz ochronę nieodnawialnych surowców naturalnych przed producentami kostki brukowej jest wiele wyzwań technologicznych, w tym zastosowanie cementów wieloskładnikowych CEM II-CEM VI.

Dynamiczne zapotrzebowanie instytucji publicznych na elementy wibroprasowane jest związane z budową dróg, autostrad, chodników, parkingów czy ścieżek rowerowych. A zatem obiektów od których wymagana jest gwarantowana trwałość w całym okresie eksploatacji czyli minimum 50 lat. W Polsce panuje specyficzny klimat charakteryzujący się bardzo dużą ilością tzw. przejść przez zero w okresie zimowym i wczesnowiosennym. Uśredniona dla całego kraju wartość to ponad 60 dni [3]. Dodatkowo utrzymanie bezpieczeństwa ruchu na nawierzchniach drogowych wymaga stosowania środków odladzających, najczęściej chlorku sodu lub wapnia czyniąc ekstremalne warunki pracy wbudowanych elementów. Kryteria jakościowe oraz opis badania odporności na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie przy udziale środków odladzających dla drobnowymiarowych elementów wibroprasowanych zawarte są w grupie trzech norm zharmonizowanych PN-EN 1338 [4], PN-EN 1339 [5] oraz PN-EN 1340 [6]. Ocena jakościowa dotyczy jednak tylko warstwy wierzchniej dwuwarstwowego elementu wibroprasowanego.

W praktyce taki sposób oceny nie zawsze się sprawdza. W punkcie 5.3.2.2 powyższych norm zawarta jest informacja iż dla zapewnienia trwałości wyrobu w danym kraju, w którym wyrób jest wprowadzany na rynek, zalecenia co do odporności na warunki atmosferyczne mogą być określone na poziomie krajowym. W Polsce elementy wibroprasowane zamawiane w ramach przetargów publicznych muszą również spełniać kryteria określone w branżowych specyfikacjach technicznych, czy warunkach wykonania i odbioru robót budowlanych opracowanych przez GDDKiA. W zaktualizowanych OST dla nawierzchni z bruku betonowego przyjęto łączne stosowanie zastrzonych kryteriów nasiąkliwości i mrozoodporności. W przypadku kostki brukowej oprócz badania mrozoodporności warstwy licowej wprowadzono również badanie całych elementów zgodnie z załącznikiem N normy PN-B-06265:2022-8 [7]. Przy czym jako kryterium jakościowe przyjęto graniczną wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 150 cyklach zamrażania/rozmarzania w wodzie lub 30 cyklach zamrażania/rozmarzania w 3% roztworze NaCl, nie mniejszą niż 2,9 MPa dla każdej kostki.

Wymagania dotyczące ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, wprowadzenie nowych rodzajów cementów wieloskładnikowych, zmiany w kryteriach oceny zgodności skłoniły autorów

niniejszej pracy do realizacji programu badawczego mającego na celu określenie wpływu współczesnych domieszek do betonu na trwałość warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej z cementem niskoemisyjnym.

## 2. Materiały i program badań

### 2.1. Opis linii technologicznej

Próby przeprowadzono dzięki uprzejmości firmy PBI Beton. Zakład produkcyjny zlokalizowany w Wymysłowie posiada nowoczesną i niezawodną linię technologiczną zaprojektowaną przez niemieckiego producenta maszyn OMAG z Emden. Wibroprasa stacjonarna OMAG Tronic 140/120 pozwala produkować elementy o wysokości od 18mm do 400mm. Zastosowany w maszynie silny, dynamiczny i stabilny system vibracji ma kluczowy wpływ na produkcję wibroprasowanych elementów betonowych, zapewniając powtarzalność ich produkcji. Bardzo ważną cechą linii jest posiadanie możliwości ciągłej regulacji jej głównych parametrów. Pozwala to na odpowiednie dopasowanie vibracji, nie tylko do rodzaju produkowanego elementu, ale także do rodzaju i wilgotności dostarczonej mieszanki betonowej. Zastosowanie techniki serwonapędowej pozwala precyzyjnie ustawić parametry pracy wibroprasy i skrócić czas formowania wyrobów. Wykonanie badań na jednej z najnowocześniejszych obecnie linii produkcyjnych kostki brukowej jest niewątpliwie wyznacznikiem aplikacyjnego charakteru uzyskanych wyników.

### 2.2. Program badań

Plan badań zakładał zastosowanie szeregu domieszek chemicznych mających za zadanie poprawę odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie warstwy konstrukcyjnej dwuwarstwowej kostki brukowej. Dokładny opis domieszek przedstawiono w Tabeli 1. Oprócz konwencjonalnej domieszki uplastyczniającej (Próba 0) zastosowano domieszki bądź mieszaniny domieszek o różnorodnych mechanizmach działania, w tym:

- wprowadzające porowatość kulistą o rozmiarach mikrometrycznych,
- uszczelnienie chemiczne poprzez hydrofobizację porów kapilarnych,

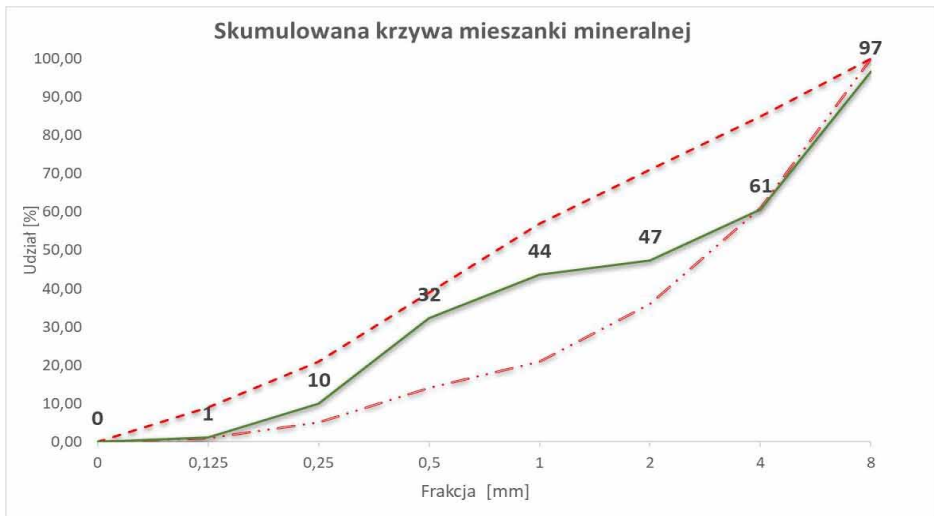
Tablica 1. Opis zastosowanych domieszek chemicznych

Numer próby	Rodzaj domieszki chemicznej	Baza chemiczna	Dozowanie [%]
P0	Uplastyczniająca (zwilżająca)	Niejonowy środek powierzchniowy	0,3
P1	Napowietrzająca	Anionowy środek powierzchniowy	0,4
P2	Napowietrzająca	Anionowy środek powierzchniowy	0,6
P3	Upłynniająco-hydrofobizująca	Mieszanina silanów /siloksanów i eteru polikarboksylowego	0,5
P4	Upłynniająca	Mieszanina żywicy akrylowej i eteru polikarboksylowego	1
P5	Uplastyczniająca	Żywica akrylowa	1

- uszczelnienie mechaniczne poprzez zwiększenie stopnia zagęszczenia i jednocześnie zmniejszenie porowatości całkowitej betonu.

### 2.3. Receptura betonu

Koncepcja badań zakładała wyprodukowanie mieszanki betonowej na warstwę konstrukcyjną dwuwarstwowej kostki brukowej z niskoemisyjnym cementem CEM II B-S i popiołem lotnym kat. A. Recepturę betonu (Tablica 2) opracowano na podstawie wieloletnich doświadczeń producenta kostki brukowej uwzględniając parametry mechaniczne wibroprasy, rodzaj blatów roboczych, szybkość i jednorodność zasypu formy, maksymalną gęstość oraz estetykę gotowego wyrobu. Wykorzystano mieszankę o max. uziarnieniu do 8 mm stosując płukany piasek kwarcowy 0-2 mm i grys wapienny 2-8 mm. Skumulowana krzywa uziarnienia mieściła się w przyjętych krzywych granicznych charakterystycznych dla technologii wibroprasowania (Rys. 1). Mieszankę zaprojektowano w klasie konsystencji V0 i projektowanej gęstości  $2350 \text{ kg/m}^3$ . Poszczególne próby różniły się rodzajem zastosowanych domieszek chemicznych i nieznacznymi korektami w ilości wody zarobowej wynikającej z charakterystyki stosowanej domieszki. Skład mieszanki, w sposób uproszczony, przedstawiono w Tablicy 2.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia mieszanki przeznaczony na warstwę konstrukcyjną – krzywe graniczne [7]

Każdy zarób produkcyjny miał objętość  $1,6 \text{ m}^3$ . Składniki dodawano w następującej kolejności: kruszywo grube, kruszywo drobne, cement, wodę zarobową oraz domieszki chemiczne. Całkowity czas homogenizacji mieszanki wyniósł 2 minuty.

Tablica 2. Skład betonu dla warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej.

Składniki	Ilość [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM II/B-S + popiół lotny	370
Piasek 0/2mm	900
Grys wapienny 2/8mm	1000
Domieszka	Zgodnie z opisem w Tablicy 1
Stosunek wodno-cementowy	Ok. 0,36±0,01 (do otrzymania optymalnej konsystencji)

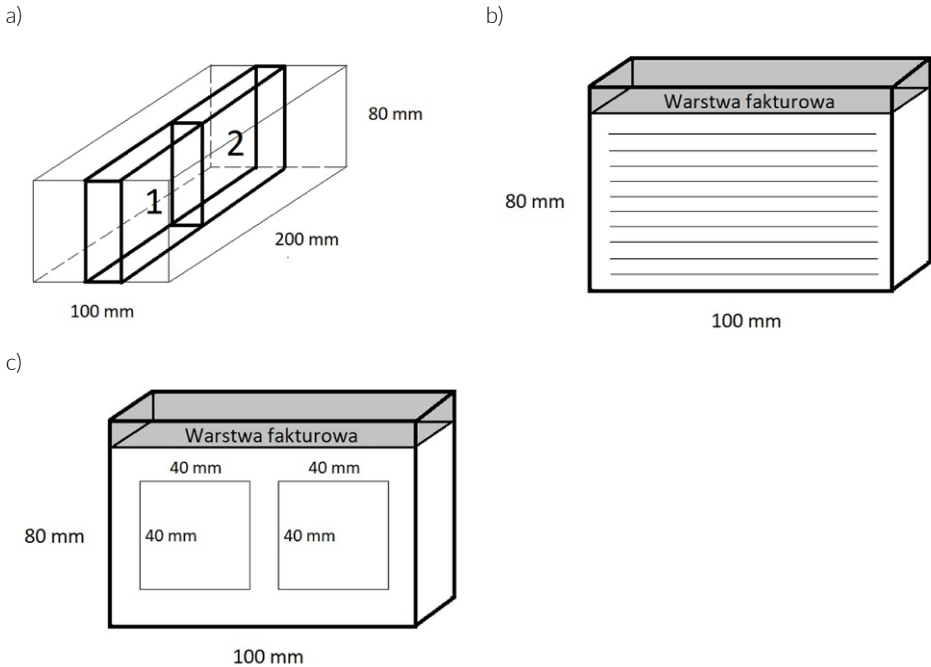
## 2.4. Metody badawcze i pobieranie próbek

Modyfikacje materiałowe badano za pomocą następujących metod badawczych:

- wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu na ośmiu kostkach po 28 dniach dojrzewania zgodnie z PN-EN 1338:2005 zał. F. (maszyna wytrzymałościowa FORM+TEST model APLHA 3-3000S z zakresem do 3000kN)
- nasiąkliwości na trzech kostkach po 28 dniach dojrzewania zgodnie z PN-EN 1338:2005 zał. E
- charakterystyki porów w stwardniałym betonie – na 2 kostkach metodą trawersową bazującą na wymaganiach normy PN-EN 480-11:2008 [8]. Z racji odmiennego kształtu i dwuwarstwowej budowy kostki brukowej wycięto po dwie próbki z każdej kostki brukowej zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 2a. Pomiary cięciw porów powietrznych wykonano za pomocą komputerowego systemu automatycznej analizy obrazu. Użyto mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ800, kamery cyfrowej QI-CAM Fast 1394 (1 pixel - 1,54 μm); stolika skaningowego Marzhäuser SCAN 150x150; oprogramowania Image Pro Plus 7.0. Zebrano obrazy na dwa sposoby. Po pierwsze, do analizy charakterystyki porów metodą trawersową. Długość linii trawersowej jednej próbki badawczej wynosiła 850 mm (Rys. 2b) z racji ograniczonej powierzchni warstwy konstrukcyjnej w przekroju. Łączna długość linii trawersowej z dwóch kostek wynosiła 3400 mm – po 1700 mm dla każdej kostki brukowej. Wyznaczono całkowitą zawartość powietrza ( $A$ ), powierzchnię właściwą porów ( $\alpha$ ), wskaźnik rozmieszczenia porów ( $L$ ) i zawartość mikroporów ( $A_{300}$ ). Po drugie, zebrano złożone obrazy mikroskopowe z powierzchni o wymiarach około 40x40 mm – po dwa z każdej powierzchni badawczej (Rys 2c). Z obrazów wyznaczono całkowitą procentową zawartość pustek powietrznych na badanej powierzchni ( $A_{2D}$ ) oraz odległości pomiędzy najbliższymi sąsiadującymi porami zgodnie ze wzorem (1):

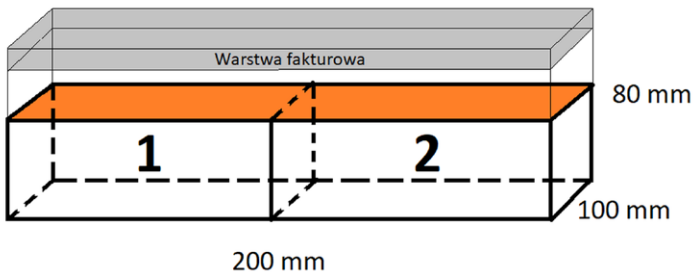
$$L = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} - (r_1 + r_2) \quad (1)$$

gdzie:  $(X_i, Y_i)$  – pozycja środka pustki  $i$  na powierzchni obrazu  
 $r_i$  – promień pustki  $i$



Rys. 2. Schemat cięcia kostki brukowej do badań charakterystyki porów (a), prowadzenia linii trawersowej zgodny z PN-EN 480-11 (b), fragmentów zglądu wybranych do analizy powierzchniowej (c) warstwy konstrukcyjnej przekroju próbki badawczej

- współczynnika absorpcji wody I w stwardniałym betonie przeprowadzono metodą bazującą na metodzie zaczerpniętej z normy ASTM C1585-1 [9]. Po cztery próbki badawcze o wymiarach 100x100x50 mm wycięto z dwóch kostek brukowych po 56 dniach dojrzewania zgodnie ze schematem na Rys. 3. Wycięte próbki wysuszono do stałej masy (zmiana nie większa niż 0,1% między pomiarami odbywającymi się co 24h) w temperaturze 60°C. Na podstawie zmiany masy próbek w funkcji czasu wywołanej zanurzeniem badanej powierzchni próbki w wodzie wyznaczono współczynnik początkowej szybkości absorpcji ( $S_i$ ) oraz wtórnej szybkości absorpcji wody ( $S_s$ ).



Rys. 3. Schemat cięcia kostki brukowej do badań podciągania kapilarnego (wyróżnienie – powierzchnia badawcza wyciętych próbek 1 i 2)

- porowatości dostępnej dla wody *E* wykonano zgodnie z normą francuską NF P18-459:2010 [10]. Próbkki zostały nasycone próżniowo wodą, a następnie ważone w trzech stanach nasycenia wodą: całkowicie nasycone ważone wagą hydrostatyczną, całkowicie nasycone ważone wagą analityczną, oraz wysuszone do stałej masy w 105°C. Na podstawie różnic między pomiarami wyznaczono wartość porowatości dostępnej dla wody. Badanie przeprowadzono na 4 próbkach 100x100x50 mm wyciętych z dwóch kostek brukowych zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 4.
- mrozoodporności zwykłej (stopień F150) – na 6 kostkach po 56 dniach dojrzewania zgodnie z PN-B-06265 zał. N

Kostki brukowe pobrano według ściśle określonego schematu (Rys. 4) odwzorowującego ułożenie kostek na blacie roboczym wibroprasy, gdzie:

- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu to: 2,11,15,30,33,41,44,53
- nasiąkliwość kostki: N1,N2,N3
- mrozoodporność zwykła: od 1-F150 do 6-F150
- charakterystyka porów: 1CH, 2CH, 3CH
- podciąganie kapilarne: 1PK i 2PK

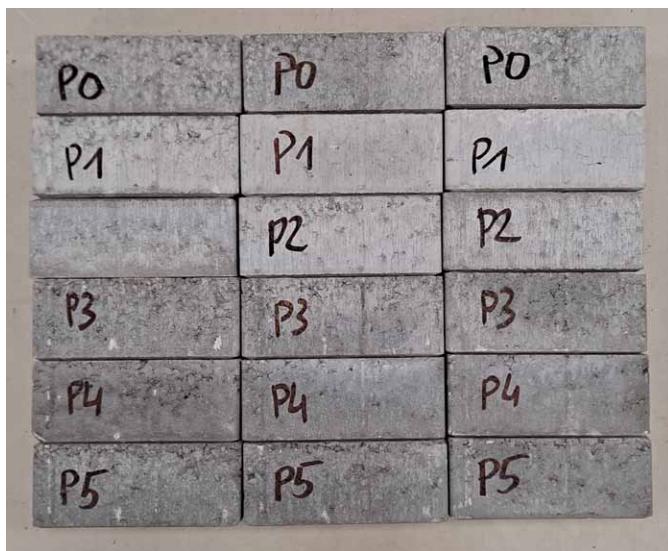
	2	N1			
1-F150			1CH	11	1PK
		15	2-F150		
					3-F150
	2CH	2PK		N2	30
		33			
	4-F150			41	3CH
	44			5-F150	N3
		6-F150		53	

Rys. 4. Schemat pobrania kostek do badań.

### 3. Wyniki i dyskusja

Jednym z etapów oceny jakości wyprodukowanych kostek w ramach poszczególnych serii była ocena wizualna (Rys. 5). Największy wpływ na zmianę wyglądu powierzchni bocznych miała domieszka napowietrzająca (Próba 1 i Próba 2). W trakcie procesu zagęszczania wprowadzone powietrze zostało wyciśnięte wraz z częścią zaczynu z wnętrza kostki co w trakcie rozformowywania i unoszenia formy nadało charakterystyczny zaciąg.





Rys. 5. Wygląd powierzchni bocznych kostek brukowych z poszczególnych prób.

Podstawowe właściwości trwałościowe kostki brukowej (wytrzymałość, nasiąkliwość i porowatość dostępna dla wody) badano po 28 dniach dojrzewania, a wyniki zebrano w Tabelicy 3.

Tabelica 3. Wyniki i kryteria oceny zgodności wytrzymałości, nasiąkliwości i porowatości dostępnej dla wody kostki brukowej.

Numer próby	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]		Nasiąkliwość [%]		Porowatość dostępna dla wody [%]
	Min.	Średnia	Max.	Średnia	
-	Min.	Średnia	Max.	Średnia	-
P0	3,3	3,8 ± 0,3	5,3	5,0 ± 0,3	14,0 ± 0,7
P1	3,7	4,2 ± 0,3	4,7	4,5 ± 0,1	11,0 ± 1,3
P2	3,7	4,2 ± 0,3	5,3	4,9 ± 0,5	11,4 ± 2,1
P3	4,4	4,7 ± 0,2	4,2	4,1 ± 0,1	12,6 ± 0,7
P4	3,8	4,3 ± 0,3	4,6	4,5 ± 0,2	12,3 ± 0,3
P5	3,9	4,4 ± 0,3	5,2	4,9 ± 0,3	11,6 ± 0,3
Wymagania PN-EN 1338	2,9	3,6	6,0	-	-
Wymagania GDDKIA*	3,6	-	5,5	5,0	-

\*OST D-05.03.23 Nawierzchnia z betonowej kostki brukowej

Kryteria oceny zgodności (Tabelica 3) kostki brukowej pod względem wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz nasiąkliwości różnią się w zależności od dokumentu odniesienia tj. normy PN-EN 1338:2005 i Ogólnej Specyfikacji Technicznej GDDKIA.

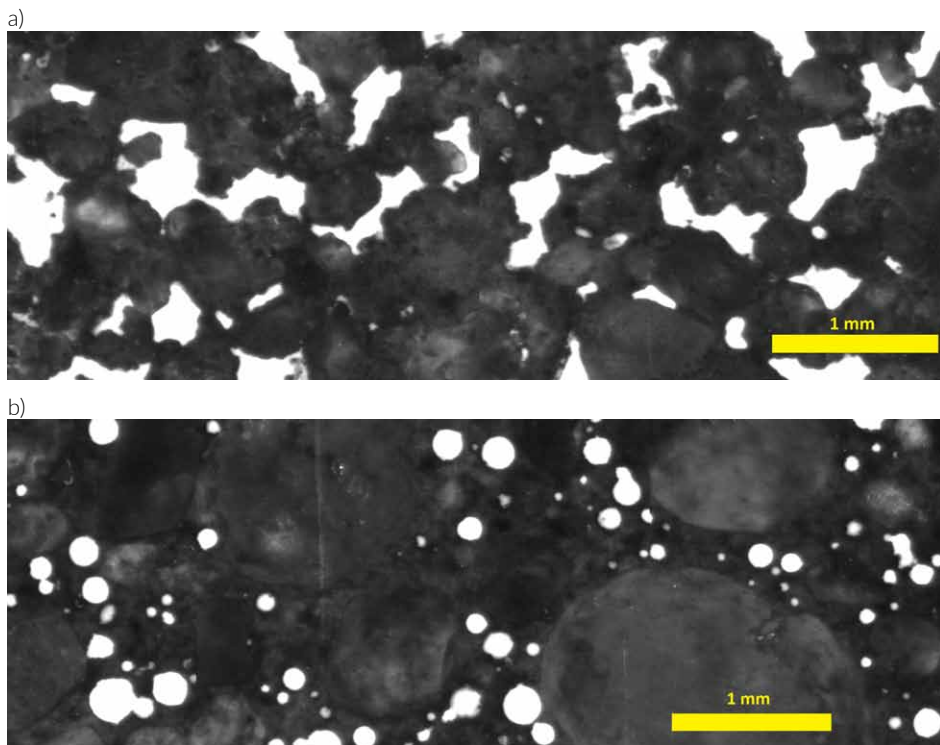
Biorąc pod uwagę wymagania normowe (wytrzymałość i nasiąkliwość) wynik pozytywny osiągnięto dla każdej badanej próby. Zgodnie z treścią OST dla nawierzchni z betonowej kostki brukowej żadna kostka nie powinna mieć wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu mniejszej niż 3,6 MPa. Zatem negatywny wynik uzyskano jedynie dla Próby 1. Wytyczne OST dla nasiąkliwości dotyczą wartości średniej, która nie może być większa niż 5,0%, ale dodatkowo żaden pojedynczy wynik nie może przekroczyć wartości 5,5%. Oba te parametry zostały osiągnięte we wszystkich próbach. Najkorzystniejszą wytrzymałość i nasiąkliwość wykazała próba P3 ( $R_{sr}=4,7\text{MPa}$  i  $N_{sr}=4,1\%$ ) i wynikała najprawdopodobniej z synergii mechanizmów hydrofobizacji porów kapilarnych i skutecznego upłynnienia mieszanki betonowej podczas zagęszczania w wibroprasie.

Wyniki badania porowatości dostępnej dla wody (Tablica 3) określającej porowatość otwartą betonu warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej są tożsame z badaniami nasiąkliwości. Widoczne jest zmniejszenie porowatości otwartej po modyfikacji betonu zaproponowanymi domieszkami. Napowietrzanie mieszanki betonowej spowodowało znaczące zwiększenie rozrzutu w wynikach porowatości dostępnej dla porów, co świadczy o niejednorodności betonu w warstwie konstrukcyjnej.

Tablica 4. Uśrednione badania charakterystyki porów i porowatości całkowitej na analizowanej powierzchni ( $A_{2D}$  – udział procentowy pustek powietrznych na powierzchni zglądu) warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej

Numer próby	$A_{2D}$ [%]	Charakterystyka porów PN-EN 480-11			
		A [%]	$\alpha$ [ $\text{mm}^{-1}$ ]	$\bar{L}$ [mm]	$A_{300}$ [%]
P0	7,1	10,4	17,1	0,17	3,1
P1	5,1	5,1	36,9	0,14	3,0
P2	5,9	8,2	27,7	0,13	3,9
P3	6,7	9,8	13,8	0,22	1,9
P4	6,8	7,3	25,0	0,16	4,0
P5	4,3	5,2	22,9	0,22	2,2

Wyniki badania charakterystyki porów dwoma metodami przedstawia Tablica 4. Charakterystyczną cechą mikrostruktury porów powietrznych warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej, odróżniającą ją od betonu zwykłego, jest różnorodność kształtów porów uwieczonych w betonie (Rys. 6). Uniemożliwia to dokładną analizę charakterystyki porów zgodnie z modelem Powersa stosowanym w normie PN-EN 480-11, gdyż brak jest wyraźnie kulistych obrazów porów na płaszczyźnie zglądu, a dominują pustaki o nieregularnych kształtach. Nieregularne pustki powietrzne powstają najprawdopodobniej w wyniku zamknięcia ich w zaczynie cementowym między ziarnami kruszywa, które zbliżyły się do siebie w wyniku prasowania betonu. Stąd pojawiają się pory o charakterystycznym dendrytycznym kształcie.



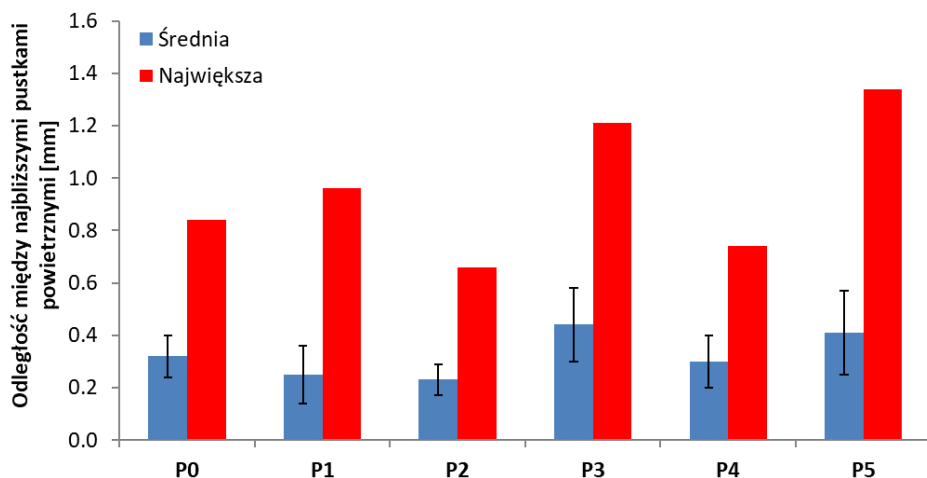
Rys. 6. Przykładowy obraz mikrostruktury porów warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej (a) i napowietrzonego betonu zwykłego (b) – porowatość na zglądzie odzwierciedla barwa biała

Całkowity udział powietrza w próbie referencyjnej P0 jest zdecydowanie większy niż w betonie zwykłym i charakteryzują dużym udziałem pustek o rozmiarach mniejszych od  $300\ \mu\text{m}$  charakteryzujących beton napowietrzony (Tablica 5). Porównując udział procentowy porów zmierzony metodą powierzchniową ( $A_{2D}$ ), obliczony jako stosunek pola pustek powietrznych do wielkości analizowanego obrazu, z całkowitą zawartością powietrza ( $A$ ) widoczna jest zdecydowanie większa zawartość pustek powietrznych obliczana metodą normową. Uzyskana rozbieżność potwierdza problemy metodyczne metody normowej w określaniu charakterystyki porów warstwy konstrukcyjnej w dwuwarstwowej kostce brukowej.

Stosowanie domieszki napowietrzającej zmniejszyło całkowitą zawartość powietrza w porównaniu z domieszką referencyjną, a przyczyną było zmniejszenie udziału porów powietrznych charakteryzujących się znacznymi rozmiarami i nieregularnym kształtem. Podobne proporcje całkowitego powietrza  $A$  do  $A_{300}$  obserwowano także w połączeniu żywicy akrylowej i eteru polikarboksyłanowego (P4). W przypadku mieszaniny polikarboksyłanów i silanów/siloksanów w betonie (P3) charakterystykę porów wyróżnia mniejsza zawartością mikroporów  $A_{300}$  oraz dodatkowo mniejsza całkowita zawartość powietrza w przypadku domieszki uplastyczniającej na bazie żywicy akrylowej (P5).

Odniesienie uzyskanych wyników charakterystyki porów do mrozoodporności kostki brukowej nie jest tożsame z wymaganiami stawianymi dla betonu zwykłego, gdyż występują istotne różnice we właściwościach mechanicznych zaczynu cementowy

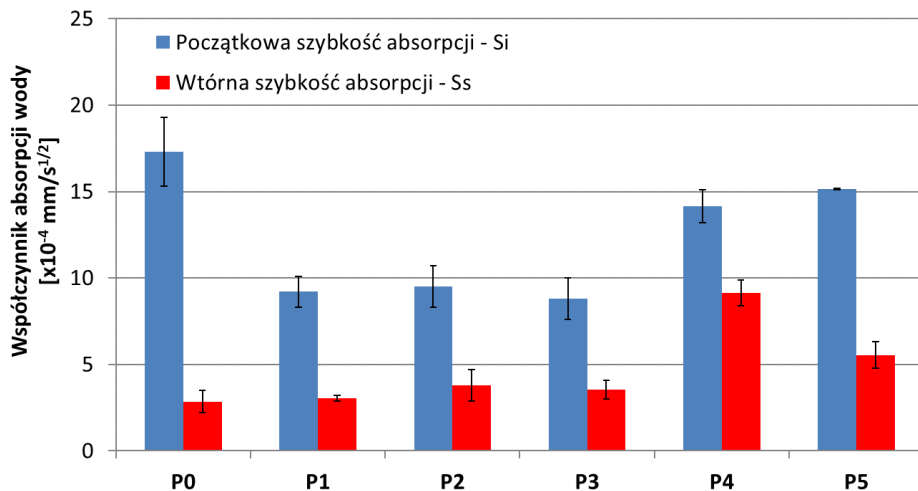
kostki brukowej, jak i jednorodności dystrybucji porów w całej objętości kostki. Różnice w jakości matrycy cementowej objawiają się dużą trudnością w przygotowaniu zglądu polerowanego z wyraźnie ostro zakończonymi krawędziami porów. Brak jednorodności betonu wykazano analizując odległości między sąsiadującymi pustkami powietrznymi (Rys. 7). Wyniki obliczeń średniej odległości między najbliższymi pustkami powietrznymi charakteryzowały się znacznym rozrzutem wyników. Odchylenie standardowe populacji zawierało się od 25 do 44% wielkości średniej i było tym większe, im większą maksymalną odległość między porami zarejestrowano dla serii betonu.



Rys. 7. Średnia i największa odległość między najbliższymi porami wyznaczona metodą analizy obrazu powierzchni zglądu warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej

Wyniki badania podciągania kapilarnego przedstawiono na Rys. 8. Szybkość absorpcji wody jest miarą pośrednio świadczącą o mikrostrukturze połączonych porów w betonie podczas podciągania wody przez naturalnie występujące siły kapilarne. Zmniejszenie początkowej szybkości absorpcji ( $S_1$ ) betonu warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej po zastosowaniu zaproponowanych domieszek chemicznych świadczy o zmniejszeniu udziału połączonych porów kapilarnych o małych średnicach odpowiadających za podciąganie kapilarne w pierwszym okresie badania. W porównaniu od próby referencyjnej (P0) współczynnik absorpcji zmniejszył się w przypadku użycia domieszki napowietrzającej (P2 i P3) i upłynniająco-hydrofobizującej (P3) o około połowę. Z racji odmiennego wpływu domieszek na mieszankę betonową wyjaśnienie przyczyn zmian szybkości podciągania kapilarnego nie było możliwe. W powyższych przypadkach zmniejszenie szybkości podciągania kapilarnego betonu niekoniecznie jest związane z zagęszczeniem matrycy cementowej, a jedynie ograniczeniem generowanego ciśnienia kapilarnego. W przypadku hydrofobizacji mechanizmem ograniczającym podciąganie kapilarne może być uniemożliwienie absorpcji wody przez najmniejsze pory kapilarne w betonie, a w przypadku domieszki napowietrzającej przecinanie porów kapilarnych przez pęcherzyki powietrza ze zmniejszeniem ciśnienia kapilarnego. Wtórna szybkość absorpcji ( $S_2$ ) jest miarą szybkości absorpcji wody przez duże pory kapilarne generujące małe ciśnienie kapilarne. Jedynie

w przypadku betonu z domieszką upłynniającą (P4) występuje trzykrotnie większy współczynnik absorpcji, a pozostałe betony nie różnią się istotnie  $S_s$ .



Rys. 8. Szybkość absorpcji wody warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej

Z przeprowadzonych badań mrozoodporności wynika (Tablica 5) iż kryterium zawarte go w OST GDDKiA nie spełniono w próbach P0, P1 i P2. Próba referencyjna P0 potwierdziła problemy ze spełnieniem kryteriów stawianych w OST, pomimo, że 5 z 6 próbek spełniło wymagania. W odróżnieniu od prób P1 i P2, ze środkami powierzchniowo czynnymi jed-

Tablica 5. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu kostek poddanych 150 cyklom zamrażania/rozmarzania (wyróżnienie – nie spełnia kryterium)

Numer próby/numer próbki	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu kostek poddanych przemiennemu zamrażaniu/rozmarzaniu [MPa]						Odchylenie standardowe
	1 F150	2 F150	3 F150	4 F150	5 F150	6 F150	
P0	3,2	3,7	3,4	<b>2,4</b>	4,0	3,3	0,54
P1	<b>0,5</b>	5,7	<b>1,5</b>	4,2	<b>1,9</b>	<b>0,1</b>	2,19
P2	<b>0,3</b>	5,1	<b>1,9</b>	4,3	<b>2,5</b>	<b>0,3</b>	2,00
P3	4,3	4,9	4,9	3,7	5,6	4,1	0,68
P4	5,3	4,5	4,7	4,0	5,9	4,5	0,68
P5	4,0	3,7	3,9	4,5	4,1	5,0	0,47
Wymagania PN-EN 1338	brak						-
Wymagania OST GDDKiA*	Żadna kostka nie powinna mieć wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu mniejszej niż 2,9 MPa.						-

\*OST D-05.03.23 Nawierzchnia z betonowej kostki brukowej

norodność mieszanki betonowej była zadowalająca. Zróżnicowanie wyników w przypadku prób P1 i P2 jest nieakceptowalne, co świadczy o dużej niejednorodności betonu i jest bezpośrednią przyczyną niespełnienia kryterium. Przyczyny niejednorodności mogą wynikać z niewłaściwych parametrów technologicznych przy produkcji kostki dla domieszki napowietrzającej, tj. zbyt krótka homogenizacja, niewłaściwy czas zagęszczania, problemy z właściwym zasypem gniazd formy, itp. Odporność na cykliczne zamrażanie/rozmrzanie otrzymano stosując mieszaniny domieszek (P3 i P4) oraz P5 (żywica akrylowa). Minimalna wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu przewyższała w tych przypadkach kryterium od 28 do 103%, a rozrzut wyników na akceptowalnym poziomie.

## 4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że stosowanie domieszek napowietrzających w betonie wibroprasowanym nie jest efektywnym rozwiązaniem technologicznym, gdyż obserwuje się skutek odwrotny do zamierzonego, tzn. następuje zmniejszenie udziału powietrza w kostce brukowej. Dotyczy to przede wszystkim zmniejszenia udziału porów o największych średnicach i nie ma znaczącego wpływu na poprawę mrozoodporności betonu. Jednocześnie badania wskazują, że napowietrzanie betonu wibroprasowanego powoduje problemy z jednorodnością kostki brukowej. Zaproponowane domieszki upłynniające i uplastyczniające z dodatkami hydrofobizującymi wykazują skuteczność w poprawie mrozoodporności warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej. Dodatkowo zmniejszają nasiąkliwość, udział porowatości otwartej, szybkość absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego betonu poprzez lepsze zagęszczenie matrycy cementowej i hydrofobizacji porowatości otwartej warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej.

Przeprowadzone badania wykazały, że stosowanie domieszek chemicznych charakteryzujących się większą efektywnością zagęszczania mieszanki betonowej podczas wibroprasowania pozwala na powodzeniem stosować cementy niskoemisyjne (wieloskładnikowe) bez negatywnego wpływu na mrozoodporność warstwy konstrukcyjnej dwuwarstwowej kostki brukowej.

## Literatura

- [1] M. Doering, Ł. Mrozik, J. Gajewski, „Stan aktualny i tendencje rozwoju rynku betonowej kostki brukowej” *Materiały Budowlane*, 9'2014
- [2] Spectis, raport „Rynek wyrobów betonowych w Polsce 2022-2027”.
- [3] strona internetowa <https://klimada2.ios.gov.pl>
- [4] PN-EN 1338:2005 Betonowe kostki brukowe -- Wymagania i metody badań
- [5] PN-EN 1339:2005 Betonowe płyty brukowe -- Wymagania i metody badań
- [6] PN-EN 1340:2004 Krawężniki betonowe -- Wymagania i metody badań
- [7] PN-B-06265:2022-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność -- Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- [8] M. Dąbrowski, Wpływ dodatku popiołów lotnych wapiennych na mikrostrukturę i mrozoodporność kompozytów o matrycach cementowych, Praca doktorska, IPPT PAN 2016
- [9] ASTM C1585-13 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes
- [10] NF P18-459:2010 Concrete. Testing hardened concrete. Testing porosity and density