

Wpływ rodzaju kruszywa grubego na nasiąkliwość i mrozoodporność betonu cementowego przeznaczanego na nawierzchnie lotniskowe

Stos okruchowy mieszanki betonowej przekłada się na budowę wewnętrzną kompozytu i uzyskiwane przez beton parametry. Dobór odpowiedniej jakości kruszywa ma więc nadrzędne znaczenie w kształtowaniu jakości i trwałości betonu. W referacie przedstawiono analizę wpływu rodzaju kruszywa zastosowanego w mieszance przeznaczonej na nawierzchnie lotniskowe na zmiany budowy wewnętrznej i parametrów stwardniałego betonu (nasiąkliwość i mrozoodporność). Analizy obejmowały pięć serii badawczych zróżnicowanych rodzajem kruszywa grubego. W celu oceny przydatności wytypowanych kruszyw do mieszanek betonowych przeznaczonych na nawierzchnie lotniskowe określono ich gęstość objętościową, nasiąkliwość, odporność na polerowanie i ścieranie. Określono wpływ rodzaju kruszywa na budowę wewnętrzną matrycy cementowej oraz charakterystykę porowatości. Na podstawie uzyskanych wyników z badań laboratoryjnych nie stwierdzono istotnego wpływu rodzaju zastosowanego kruszywa w mieszance na nasiąkliwość i mrozoodporność stwardniałego betonu w kontekście zastosowania go do nawierzchni lotniskowych.

1. Mrozoodporność betonu w nawierzchniach lotniskowych

Ocena odporności betonu na oddziaływanie zróżnicowanych czynników zewnętrznych w kontekście betonów nawierzchniowych utożsamiana jest z trwałością kompozytu betonowego narażonego na oddziaływanie skrajnych temperatur i zróżnicowanych warunków środowiska. Wpływ zróżnicowanych czynników najczęściej odnosi się do zmian temperatur oscylujących w okolicach 0°C, które niekorzystnie wpływają na strukturę stwardniałego betonu. Mrozoodporność betonu cementowego uzależniona jest od składu mieszanki betonowej i kształtującej się, w konsekwencji doboru materiałów i ich wzajemnych proporcji, struktury wewnętrznej stwardniałego betonu [1 i 6]. Wpływ czynników zewnętrznych powinien być rozpatrywany wielo-

kryterialnie w warunkach naturalnych z uwzględnieniem działania przemiennego lub równoczesnego. Należy rozpatrywać oddziaływanie obniżonej i podwyższonej temperatury oraz naprzemienne oddziaływanie tych temperatur. Obecnie zagadnienie trwałości formułowane jest w odniesieniu do lotniskowych betonów nawierzchniowych głównie w oparciu o klasy ekspozycji, w których nawierzchnia będzie pracowała. Podstawowym wyznacznikiem trwałości konstrukcji lotniskowej jest więc mrozoodporność betonu w nawierzchni. Istotnym czynnikiem wpływającym na trwałość betonu jest sposób i intensywność działania czynników zewnętrznych, a szczególnie prędkość zachodzących zmian temperatury, wypełnienie porów wodą czy intensywność procesu wysychania porów. W przypadku działania obniżonej temperatury na świeży kompozyt cementowy w nawierzchniach zamarzająca woda, potrzebna do prawidłowego i pełnego przebiegu procesu wiązania, może uniemożliwić prawidłowy przebieg reakcji chemicznych. Tworzy ona wówczas kryształy i zwiększa swoją objętość, co przyczynia się do powstawania spękań i rys obniżających ciąłość stwardniałego betonu. Tego typu uszkodzenia powodują wewnętrzną destrukcję tworzywa betonowego. Jeżeli jednak zamarzająca woda zawiera związki soli, np. pochodzące ze środków służących do zwalczania oblodzeń nawierzchni lotniskowych, wówczas konstrukcja narażona jest na powierzchniowe łuszczenie zewnętrznych - przypowierzchniowych warstw tworzywa betonowego. Istotny wpływ na wartość naprężeń będą miały również wahania temperatury, które są skutkiem zmian w cyklach dobowych i rocznych.

2. Cel i zakres badań

Celem badań laboratoryjnych była ocena wpływu rodzaju zastosowanego kruszywa grubego w mieszance betonowej, przeznaczonej do budowy nawierzchni lotniskowych, na zmiany nasiąkliwości betonu i jego mrozoodporności.

Zakres badań materiałów kamiennych obejmował ocenę:

- gęstości (ρ_a) wg [14]
- nasiąkliwości (W) wg [13]
- odporności na ścieranie (MDE) wg [11]
- odporności na rozdrabnianie (LA) wg [12].

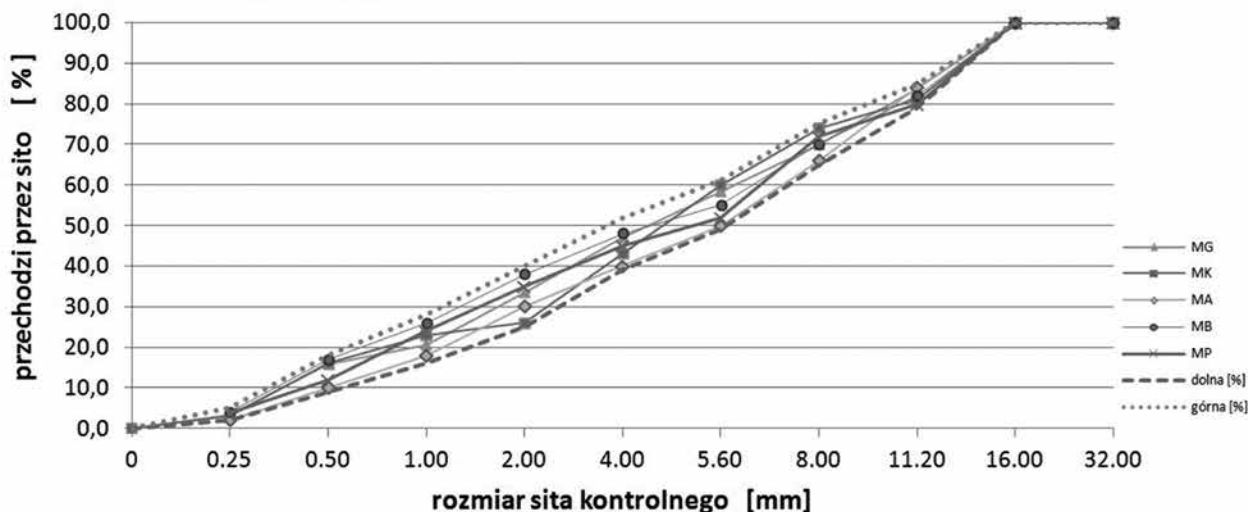
Zakres badań laboratoryjnych dla mieszanek betonowych obejmował ocenę następujących parametrów:

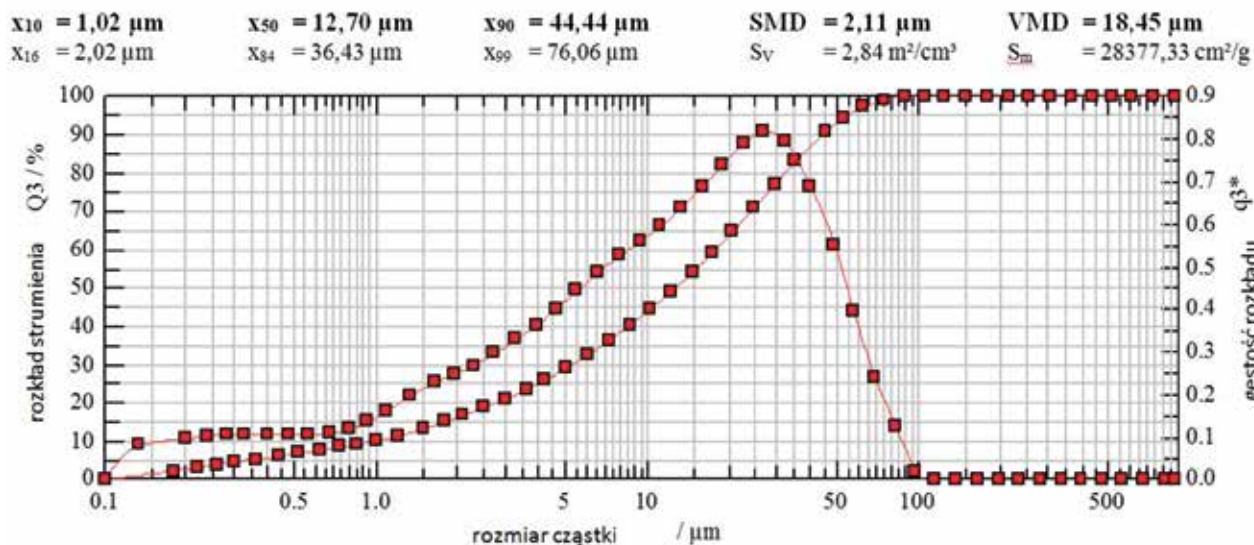
- gęstość objętościowa (ρ) określana wg wytycznych normy [16]
- zawartość powietrza (p) określana wg wytycznych normy [15]
- klasa konsystencji (V) określana wg wytycznych normy [17].

W ramach oceny stwardniałych betonów analizie poddano:

- gęstość objętościową (ρ_0) oznaczoną wg założeń [22]

Rys. 1. Zaprojektowane krzywe mieszanek betonowych serii MG, MA, MB, MK i MP





Rys. 2. Analiza laserowa cementu CEM I 42,5N MSR/NA

- nasiąkliwość (nW) określaną wg założeń normy [8], która dla projektowanej klasy betonu nie powinna przekraczać 5,0%
- wytrzymałość na ściskanie określoną wg wytycznych normy [20], która dla klasy 30/37 nie powinna być niższa niż 30 MPa w przypadku próbek walcowych (150x300 mm) i 37MPa w przypadku próbek sześciennych (150x150x150 mm)
- stopień mrozoodporności betonu wg [8], który powinien wynosić dla nawierzchni lotniskowych F200 (po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania ubytek masy i ubytek wytrzymałości dla projektowanej klasy betonu C30/37 nie powinien być wyższy niż odpowiednio 5,0% i 20%
- odporność na powierzchniowe tłuszczanie betonu wg [8], w badaniu tym masa tłuszczzonego materiału nie powinna być wyższa niż 0,01 kg/m²
- budowę wewnętrzną kompozytów betonowych - w tym celu wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy. Z próbek betonu wykonano świeże przełamy, których powierzchnia wynosiła więcej niż 1,0 cm². Zakres stosowanych powiększeń przyjęto w zakresie od 200x do 200000x. [2] Procedura badawcza była zgodna z omówioną w pracy [1, 2, 7]

3. Materiały badawcze

Badaniami laboratoryjnymi objęte zostały betony o projektowanej klasie C30/37 przeznaczone na nawierzchnie lotniskowe.

W składzie mieszanek betonowych zastosowano zamienniki normowo zalecanego wg [8] kruszywa grubego – grysu granitowego (G) w postaci kruszywa amfibolitowego (A), bazaltowego (B), kwarcytowego (K) oraz porfirowego (P).

Analizy obejmowały pięć serii badawczych zróżnicowanych rodzajem kruszywa grubego. Pierwszą serię stanowiła mieszanka referencyjna, której skład był zgodny z wymaganiami normy [8 i 9]. Wyniki uzyskane dla tej mieszanki (MG) traktowane były, jako wartości porównawcze do oceny pozostałych serii badawczych. Analizowano mieszanki z uwzględnieniem kruszywa amfibolitowego (MA), bazaltowego (MB), kwarcytowego (MK) oraz porfirowego (MP). W mieszankach mineralnych przyjęto grysy (zgodne z wymaganiami [8]) frakcji 2/8 mm i 8/16 mm oraz kruszywo drobne frakcji 0/2 mm zgodne z wymaganiami [8]. Stosy okruchowe wszystkich zaprojektowanych mieszanek (rys. 1) wpisywały się w pole optymalnego uziarnienia dla nawierzchni lotniskowych. W mieszankach uwzględniono cement CEM I 42,5N MSR/NA spełniający wymagania [11], którego analizę laserową względem wzorca przedstawiono na rys. 2.

W mieszankach stosowano wodę wodociągową zgodną z [10], środek napowietrzający i domieszkę plastyfikującą. Szczegółowe składy materiałowe analizowanych mieszanek zestawiono w tabeli 1.

W odniesieniu do badań stwardniałego betonu plan eksperymentu zakładał wykonanie oznaczeń dla pięciu serii badawczych. Pierwszą stanowił beton referencyjny (BG) wykonany z kruszywem granitowym. Cztery kolejne serie obejmowały betony z zamiennikiem kruszywa granitowego w postaci kruszywa amfibolitowego (seria BA), bazaltowego (seria BB), kwarcytowego (seria BK) i porfirowego (seria BP). Liczbę potrzebnych próbek w badaniach doświadczalnych ustalono przy wykorzystaniu rozkładu T-Studenta przy założeniu poziomu istotności na poziomie 0,05. Minimalna niezbędna liczba próbek wahała się pomiędzy 4 a 5, w zależności od rodzaju wykonywanego badania. Dla tak przyjętych założeń dobrano po 6 próbek, które każdorazowo przeznaczano do badań laboratoryjnych.

4. Metody badań

Próbki sześciennie zgodne z wymaganiami normy [18] dojrzewały w warunkach normowych wg [19]. W trakcie pielęgnacji zapewniono leżakowanie ciał próbnych przez pierwszych 28 dni w wodzie o stałej temperaturze 20°C, a następnie przeznaczono je do badań niszczących. Określono wytrzymałość na ściskanie, utożsamiając ją z maksymalnym obciążeniem, jakie może przenieść próbka przed zniszczeniem. Badanie to wykonywano w prasie spełniającej wymagania normy [21] przy stałym przyroście obciążenia na poziomie 0,5MPa/s działającym na centrycznie umieszczoną próbkę. Do określenia badanego parametru uwzględniano wyniki uzyskane na próbkach, które cechowały prawidłowy charakter zniszczenia, oceniany wg [21]. Wytrzymałość na ściskanie obliczono wg zależności (1), w której F to maksymalne obciążenie działające na próbkę, a A_c to pole przekroju próbki, na które działało obciążenie.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Próbki o wymiarach 150x150x150 mm, zgodne z wymaganiami [18], przeznaczone do badania nasiąkliwości dojrzewały w warunkach normowych wg [19] – w wodzie o temperaturze

Tab. 1. Składy analizowanych mieszanek serii MG, MA, MB, MK i MP

Składnik	j.m.	Rodzaj mieszanki betonowej				
		MG	MA	MB	MK	MP
Cement CEM I 42,5N MSR/NA	kg/m ³	375	375	375	375	375
Piasek 0/2 mm	kg/m ³	540	555	580	516	511
Grysy 2/8 mm	kg/m ³	860	905	860	841	834
Grysy 8/16 mm	kg/m ³	600	596	750	555	550
Woda	kg/m ³	150	150	150	150	150
Plastyfikator BASF	kg/m ³	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Środek napowietrzający BASF	kg/m ³	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

20°C przez pierwszych 28 dni. Po zakończonym procesie pielęgnacji przeznaczone zostały do określenia nasiąkliwości zgodnie z wytycznymi normy [8]. Nasiąkliwość wyznaczono na podstawie różnicy pomiędzy masą próbki suchej (G_1) i masą próbki nasyconej wodą (G_2) wg zależności (2).

$$n_w = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Próbki o wymiarach 150x150x150 mm przeznaczono do określenia mrozoodporności. W badaniu tym wykorzystano tzw. metodę zwykłą. Polegała ona na zamrażaniu i rozmrażaniu serii 12 próbek betonu, które uprzednio dojrzewały przez 28 dni w wodzie o temperaturze 20°C wg [8]. Na cele badawcze założono 200 cykli zamrażania ↔ odmrażania. Próbki były zamrażane w powietrzu przez 4 godziny w temperaturze -18°C i rozmrażane 3 godziny w wodzie o temperaturze +18°C. Ocena mrozoodporności odnosiła się do określenia dwóch parametrów. Pierwszym miernikiem była zmiana wytrzymałości na ściskanie (ΔR) próbek poddanych cyklem zamrażania i rozmrażania wg (3). Badanie to wykonywane było zgodnie z wytycznymi normy [8] i polegało na określeniu największego obciążenia, które może przenieść próbka przed zniszczeniem. Drugim parametrem była zmiana masy próbek po badaniu mrozoodporności wyznaczona z zależności (4). Przyjęte oznaczenia we wzorze (3): ΔR – zmiana wytrzymałości na ściskanie; f_{cm1} – wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych; f_{cm2} – wytrzymałość na ściskanie próbek poddanych 200 cyklem mrozoodporności.

$$\Delta R = \frac{f_{cm1} - f_{cm2}}{f_{cm1}} \cdot 100 \quad (3)$$

Przyjęte oznaczenia we wzorze (4): ΔG – zmiana masy próbek po badaniu mrozoodporności; G_1 – masa próbki przed pierwszym zamrożeniem w stanie nasycenia wodą; G_2 – masa próbki przed ostatnim odmrożeniem w stanie nasycenia wodą.

$$\Delta G = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100 \quad (4)$$

Tab. 2. Podstawowe parametry analizowanych kruszyw

Parametr	j. m.	Rodzaj kruszywa				
		G	A	B	K	P
ρ_a	Mg/m ³	2,65	2,95	3,16	2,64	2,60
W		WA ₂₄ 0,6	WA ₂₄ 0,60	WA ₂₄ 0,60	WA ₂₄ 0,9	WA ₂₄ 2,70
MDE	[kg]	457,7	474,2	463,1	474,8	455,2
		8,46	5,16	7,38	5,04	8,96
LA	[kg]	3209,4	4245,8	4432,6	4349,5	4525,6
		35,8	15,08	11,35	13,01	9,49

Tab. 3. Podstawowe parametry analizowanych mieszanek serii MG, MA, MB, MK i MP

Parametr	j. m.	Rodzaj mieszanki betonowej				
		MG	MA	MB	MK	MP
gęstość	Mg/m ³	2392	2460	2493	2637	2280
opad stożka	mm	11	10	20	10	10
zawartość powietrza	%	4,5	5,5	5,5	4,5	5,5

Tab. 4. Podstawowe parametry analizowanych betonów serii BG, BA, BB, BK i BP (\bar{X} oznacza wartość średnią z 6 pomiarów, σ – oznacza odchylenie standardowe)

Parametr	j. m.	Rodzaj betonu				
		BG	BA	BB	BK	BP
gęstość	\bar{X}	2308,38	2446,93	2535,05	2310,70	2330,12
	σ	5,033	3,572	12	12,886	11,214
nasiąkliwość	\bar{X}	4,2	3,2	3,0	3,7	3,4
	σ	0,100	0,096	0,100	0,059	0,168
wytrzymałość na ściskanie	\bar{X}	50,1	40,6	46,9	45,6	59,2
	σ	1,522	1,464	1,500	1,326	1,281

Badanie odporności betonów na powierzchniowe łuszczenie polegało na działaniu 56 cykli zamrażania i odmrażania. Pojedynczy cykl obejmował 4 h obniżania temperatury od 20°C do 0°C, 8 h obniżania temperatury od 0°C do -20°C, 4 h zamrażania w temperaturze -20°C i 8 h rozmrażania w temperaturze wzrastającej od -20°C do 20°C. Badanie wykonywano w wodzie. Z próbek sześciennych o wymiarach 150x150x150 mm przygotowanych i pielęgnowanych przez pierwszych 28 dni zgodnie z wymaganiami norm [18 i 19] przygotowano plastry o grubości 50 mm. Plastry wycinano z próbek prostopadle do powierzchni zacieranej tak, aby powierzchnia narażona na działanie mrozu i środków odladzających znajdowała się w wewnętrznej części kostki. Miarą odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie było określenie ubytku masy ΔM po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania zgodnie z zależnością (5), w której M oznaczało masę złuszczonego materiału, a A powierzchnię badanej próbki.

$$\Delta M = \frac{M}{A} \quad (5)$$

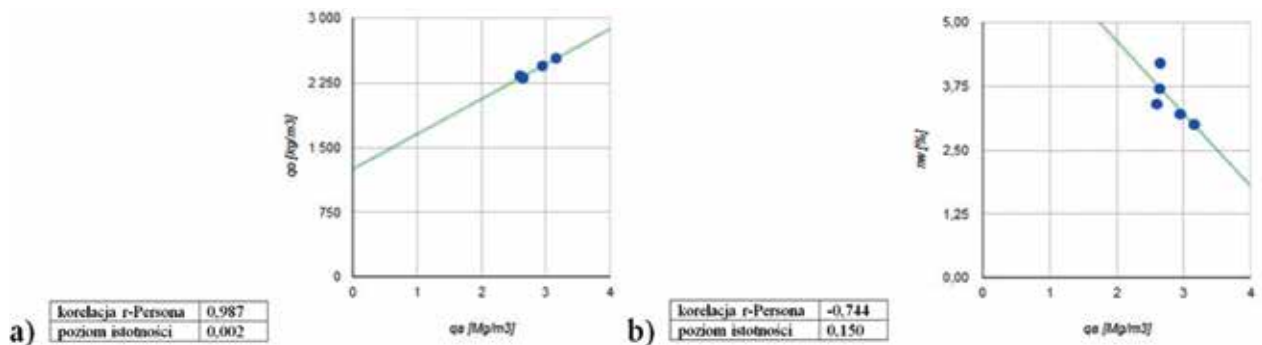
5. Wyniki badań i ich analiza

Analiza podstawowych parametrów kruszyw (tab. 2) wykorzystywanych w badaniach wykazała, że największą gęstością charakteryzuje się grys bazaltowy, sklasyfikowany pod względem gęstości jako kruszywo ciężkie. Pozostałe z analizowanych kruszyw pod względem gęstości, nieprzekraczającej 3000 Mg/m³, sklasyfikowane zostały jako kruszywa zwykłe. Nasiąkliwość kruszyw serii G, A, B oraz K nie przekracza dopuszczalnej wartości 1%. W przypadku serii P nasiąkliwość jest wyraźnie wyższa. Kruszywo serii P osiąga najwyższą kategorię odporności na rozdrabnianie (LA₁₀). Nieco niższe parametry charakteryzują kruszywa serii K i A (LA₁₅). Najniższą odpornością na rozdrabnianie charakteryzuje się kruszywo serii G, dla którego współczynnik LA wynosi 35. Wszystkie z analizowanych kruszyw uzyskały najwyższą kategorię odporności na ścieranie – M_{DE 10}.

Na podstawie wykonanych badań (tab. 3) stwierdzono, że rodzaj zastosowanego kruszywa grubego nie wpływa na istotną zmianę zawartości powietrza w mieszankach betonowych. Wszystkie z analizowanych serii pod względem zawartości powietrza spełniają wymagania normy [8] dla betonów przeznaczonych do budowy nawierzchni lotniskowych. Wszystkim analizowanym mieszankom, zgodnie z metodą opadu stożka, przypisano klasę konsystencji S1. Mieszanki serii MA, MK, MP i MB charakteryzowała konsystencja plastyczna. Rodzaj wykorzystanego kruszywa wpływa na zmianę gęstości mieszanki, najwyższą wartość analizowanej cechy uzyskano dla serii MK, a najniższą dla serii MP. Analiza uzyskanych wyników badań stwardniałych betonów serii BG, BA, BB, BK i BP – tab. 4 wykazała wpływ zastosowanego kruszywa na zmianę gęstości objętościowej i nasiąkliwości betonu – rys. 3. Wszystkie z analizowanych betonów spełniają wymagania dla betonu przeznaczanego do budowy nawierzchni lotniskowych pod względem nasiąkliwości. Dla projektowanej klasy betonu C40/50 wartość nasiąkliwości nie powinna bowiem wg [8] przekraczać 4,9%. Zastosowanie kruszywa amfibolitowego i bazaltowego istotnie wpływa na zwiększenie gęstości betonu przy jednoczesnym obniżeniu jego nasiąkliwości.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań stwierdzono, że beton serii BP charakteryzują najkorzystniejsze parametry mechaniczne. W stosunku do zalecanego zgodnie z normą [8] betonu serii BG beton serii BP uzyskuje wyższą średnią wytrzymałość na ściskanie po założonym okresie 28 dniowej pielęgnacji o blisko 18%. Pozostałe serie betonu charakteryzuje niższa średnia wytrzymałość względem betonu serii BG o 19% w przypadku betonu serii BA, o 9% dla betonu serii BK i 6% dla betonu serii BB. Ponadto beton serii BP charakteryzuje niższa nasiąkliwość niż beton serii BG.

Na podstawie obserwacji przełamów betonów w SEM stwierdzono, że rodzaj wykorzystanego kruszywa wpływa istotnie na zmiany w budowie wewnętrznej kompozytu betonowego. Wykazano, że matryca cementowa, w przypadku betonu serii BG, jest zwarta, a krystalizacja uwodnionego krzemianu wapnia zachodzi



Rys. 3. Wpływ kruszywa na wyniki gęstości betonu (a) i nasiąkliwości betonu (b)

w postaci drobnoziarnistej (rys. 4a). Wewnątrz porów powietrznych występuje krystalizacja ettringitu o długości pojedynczych kryształów do 3 μm i pęknięte ściany wnętrza pustki powietrznej (rys. 4b). Strefy kontaktowe pomiędzy ziarnami kruszywa a matrycą cementową ulegają pojedynczym spękanom (rys. 4c).

Obserwacje wewnętrznej struktury betonu serii BA wykazały, że matryca cementowa ulega spękanom o szerokości do 6-7 μm , uwodnione krzemiany wapnia występują w postaci drobnoziarnistej (rys. 5a). Ściany wewnętrzne pustek powietrznych ulegają spękanom o szerokości do 2-3 μm (rys. 5b). Stwierdzono także nieciągłości w strefie kontaktu między ziarnami kruszywa amfibolitowego a matrycą cementową o szerokości do 8 μm (rys. 5c). [4]

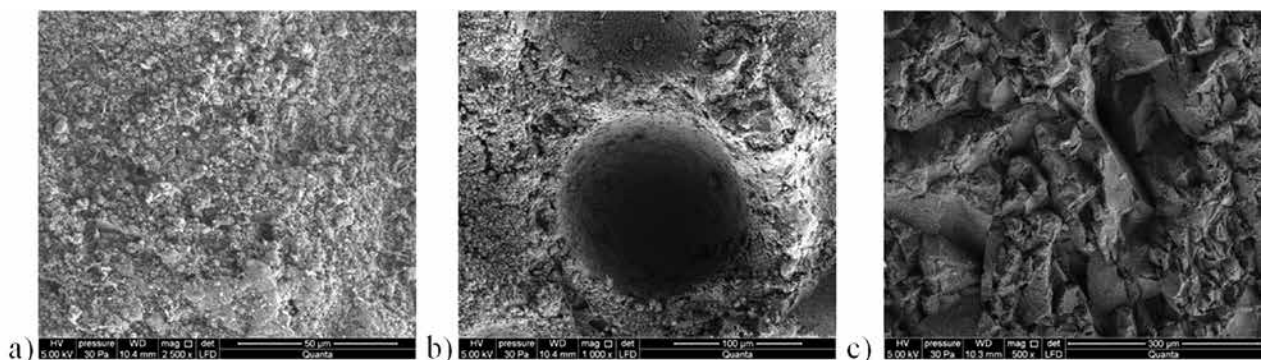
W przypadku betonu serii BB występuje krystalizacja w postaci ziarnisto-włóknistej (rys. 6a). Matryca cementowa jest spójna, a średnice pustek powietrznych sięgają 240 μm (rys. 6b). Wewnętrzne ściany pustek powietrznych ulegają pękaniu o szerokości do 6-9 μm . Wewnętrzna struktura betonu serii BB wyróżnia się nieciągłymi strefami kontaktu pomiędzy ziarnami kruszywa bazaltowego a matrycą cementową (rys. 6c). [3]

Z obserwacji w SEM betonów serii BK wynika, że w strefie kontaktowej, pomiędzy ziarnem kruszywa kwarcytowego a matrycą cementową, występują mikrospeknięcia o rozwarości rządu kilku mikrometrów (rys. 7c). W matrycy występuje rozbudowana krystalizacja w postaci ettringitu o długości pojedynczego kryształu do 5-7 μm (rys. 7a). Wnętrze porów powietrznych jest ciągłe (rys. 7b). [5] Matryca cementowa, w przypadku betonu serii BP, jest zrwata,

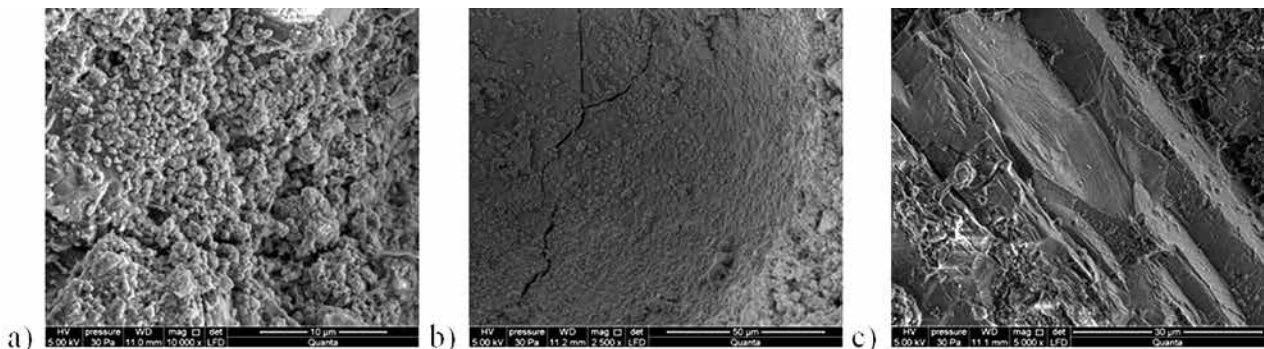
a krystalizacja uwodnionego krzemianu wapnia występuje w postaci drobnoziarnistej (rys. 8a). Krystalizacja ettringitu o długości pojedynczych kryształów wynosząca do 3 μm występuje w matrycy cementowej. Powierzchnie styku między ziarnami kruszywa a matrycą cementową ulegają pękaniu o szerokości do 3 μm (rys. 8c). Wykazano krystalizację ettringitu (długość do 1 μm) i spękanie ściany wnętrza pustki powietrznej (rys. 8b). [4] Dla analizowanych betonów serii BG, BA, BB, BK i BP poddanych 200 cyklom mrozoodporności stwierdzono, że rodzaj zastosowanego kruszywa nie wpływa istotnie na zmianę badanej cechy. Dla projektowanej klasy C40/50 spadek wytrzymałości nie powinien przekraczać 18%, a spadek masy powinien być mniejszy niż 4,8%. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wszystkie analizowane betony wymagania te spełniły. Najniższy spadek wytrzymałości zarejestrowano dla betonu serii BA. Średnia zmiana wytrzymałości po założonym procesie badawczym dla betonu referencyjnego utrzymuje się na poziomie 1,54%. Natomiast dla pozostałych betonów spadek wytrzymałości jest istotnie wyższy. Dla serii BB i BP utrzymuje się na średnim poziomie ok. 2,1%, natomiast dla betonu serii BK ponad 5,4%. Jednocześnie betony te charakteryzują się zróżnicowanymi zmianami masy próbek od 0,05% dla betonu serii BB do ponad 0,34% dla betonu serii BA.

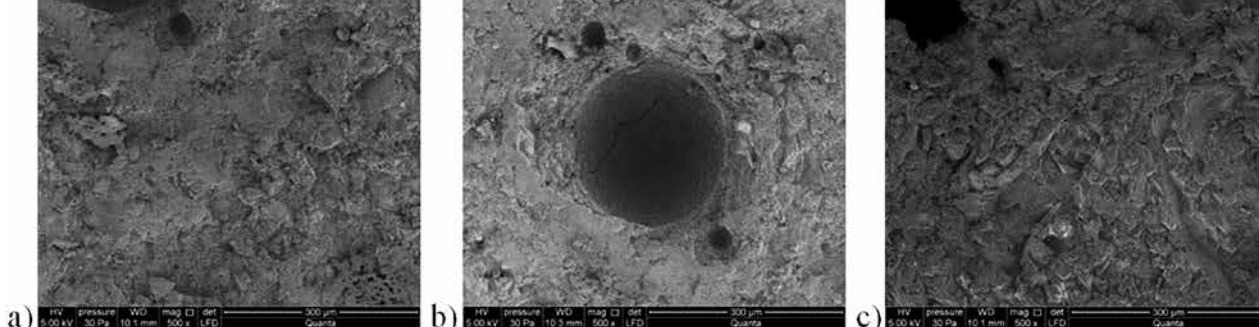
W przypadku analizy odporności betonów na powierzchniowe łuszczenie stwierdzono, że rodzaj zastosowanego kruszywa nie wpływa na zmianę badanego parametru. Na podstawie uzyskanych wyników nie stwierdzono złuszczeń warstwy powierzchniowej

Rys. 4. Budowa wewnętrzna betonu serii BG w obrębie: a) matrycy cementowej, b) pora powietrznego, c) strefy kontaktowej pomiędzy ziarnem kruszywa granitowego a matrycą



Rys. 5. Budowa wewnętrzna betonu serii BA w obrębie: a) matrycy cementowej, b) pora powietrznego, c) strefy kontaktowej pomiędzy ziarnem kruszywa amfibolitowego a matrycą





Rys. 6. Budowa wewnętrzna betonu serii BB w obrębie: a) matrycy cementowej, b) pora powietrznego, c) strefy kontaktowej pomiędzy ziarnem kruszywa bazaltowego a matrycą

wej badanych betonów. Wszystkie analizowane betony spełniły więc wymagania normowe nieprzekraczające granicznej masy 0,01 kg/m² złuszczeń. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że najkorzystniejszymi parametrami pod względem mrozoodporności charakteryzuje się beton serii BG. Na podstawie uzyskanych wyników z badań mechanicznych betonów poddanych cyklom mrozoodporności stwierdzono, że wszystkie z analizowanych betonów wykazują bardzo dobrą jakość i są trwałe w warunkach cyklicznego oddziaływania zamrażania i rozmrażania. Dla założonej liczby cykli badawczych w obecności wody oraz środków odładzających betony nie wykazują uszkodzeń, co potwierdza ich odporność na działanie czynników destrukcyjnych. Nie wykazano istotnego wpływu rodzaju kruszywa grubego na analizowane parametry. Zawartość powietrza w mieszance ma istotny wpływ ($p = 0,015$) na spadek wytrzymałości betonów poddanych cyklom mrozoodporności. Na podstawie analizy porównawczej budowy wewnętrznej betonów po 28-dniowym okresie pielęgnacji i betonów narażonych na działanie cykli zamrażanie-odmrażanie oraz środków odładzających stwierdzono wyraźne zróżnicowanie w matrycy cementowej, charakterystyce porowatości i budowie stref kontaktowych pomiędzy ziarnami kruszyw a matrycą cementową. Najmniej istotne zróżnicowanie stwierdzono dla betonów serii BG. Przykładowe zestawienie charakterystyk budowy wewnętrznej dla betonów tej serii badawczej przedstawiono na rysunku 8 po mrozoodporności w mrówczanie i na rys. 9 po mrozoodporności w moczniku. Wykazano (rys. 9b), że w stosunku do betonu po 28 dniach pielęgnacji w porach powietrznych rozbudowana jest krystalizacja ettryngitu o długości pojedynczych kryształów do 80-90 μm . Wyraźnie więcej pojawia się mikrospeką, których rozwarości osiągnęły 5-8 μm w matrycy cementowej i do 10 μm w strefach kontaktowych z ziarnami (rys. 9c).

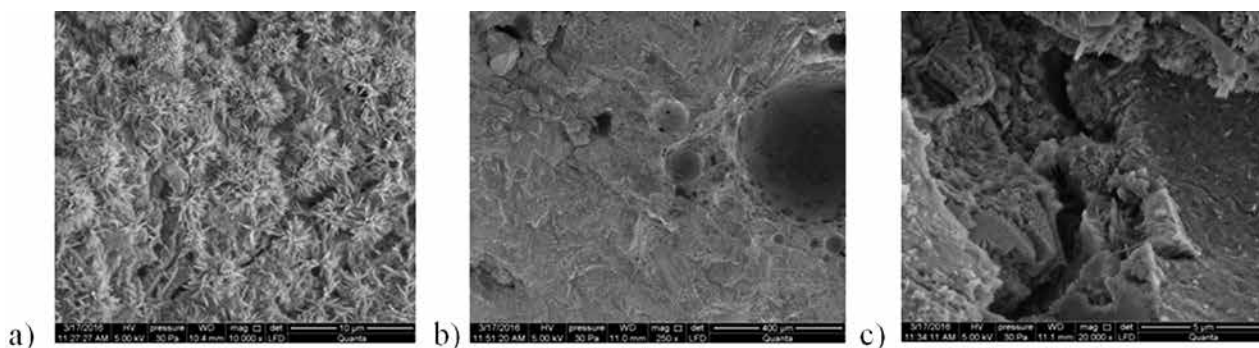
Wykazano (rys. 10b), że w stosunku do betonu po 28 dniach pielęgnacji w porach powietrznych występuje rozbudowana krystalizacja karbonatyzowanego ettryngitu, a ponadto pojawiają się mikrospeką o szerokości do 4-6 μm . Mikrospeką o rozwarościach do 8-10 μm występują liczniej w matrycy cementowej. W strefach kontaktowych z ziarnami kruszyw mikrospeką osiągają szerokość 8 μm (rys. 10c).

6. Wnioski

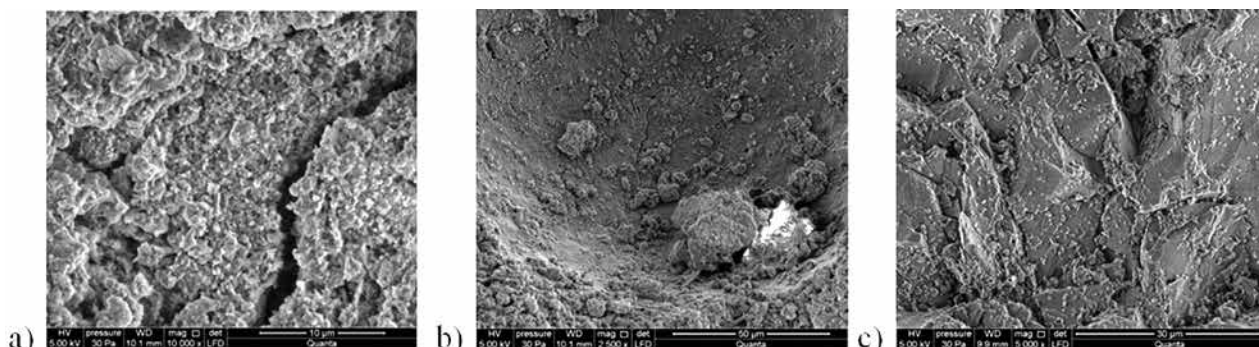
Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że:

- dobór kruszywa grubego do składu mieszanki betonowej powinien być poprzedzony badaniami materiałowymi, jednakże nie mogą one być traktowane jako jedyne kryterium stosowania takiego materiału. W przypadku kruszywa porfirowego, które charakteryzuje znaczną nasiąkliwość (2,7%), wykazano, że przy odpowiednio skomponowanym składzie mieszanki betonowej możliwe jest uzyskanie betonu spełniającego kryterium obniżonej granicznej nasiąkliwości i wysokiej mrozoodporności.
- wybór kruszywa grubego, spośród analizowanych, istotnie wpływa na zmianę mikrostruktury wewnętrznej kompozytów betonowych, a w konsekwencji na zmianę parametrów fizycznych i mechanicznych stwardniałego betonu. Najkorzystniej wykształconą mikrostrukturą wewnętrzną (zwartą matrycą cementową, nielicznymi spekami w strefie kontaktu pomiędzy ziarnami kruszyw a matrycą cementową oraz korzystną charakterystyką porowatości) charakteryzuje się beton serii BP. Dla betonu tego zarejestrowano niską nasiąkliwość (3,4%) i wysoką wytrzymałość na ścislenie (59,2MPa) w odniesieniu do pozostałych serii badawczych.
- wybór kruszywa grubego, spośród analizowanych, nie wpływa na istotną zmianę mrozoodporności betonu. Wszystkie serie badawcze są trwałe w warunkach oddziaływania cyklicznego zamrażania i rozmrażania, niezależnie od stosowanej metody badawczej.

Rys. 7. Budowa wewnętrzna betonu serii BK w obrębie: a) matrycy cementowej, b) pora powietrznego, c) strefy kontaktowej pomiędzy ziarnem kruszywa kwarcytowego a matrycą



Rys. 8. Budowa wewnętrzna betonu serii BP w obrębie: a) matrycy cementowej, b) pora powietrznego, c) strefy kontaktowej pomiędzy ziarnem kruszywa porfirowego a matrycą



Najkorzystniejszymi parametrami pod względem mrozoodporności charakteryzuje się beton serii BG, dla którego zarejestrowano najniższe spadki badanych cech (masy i wytrzymałości).

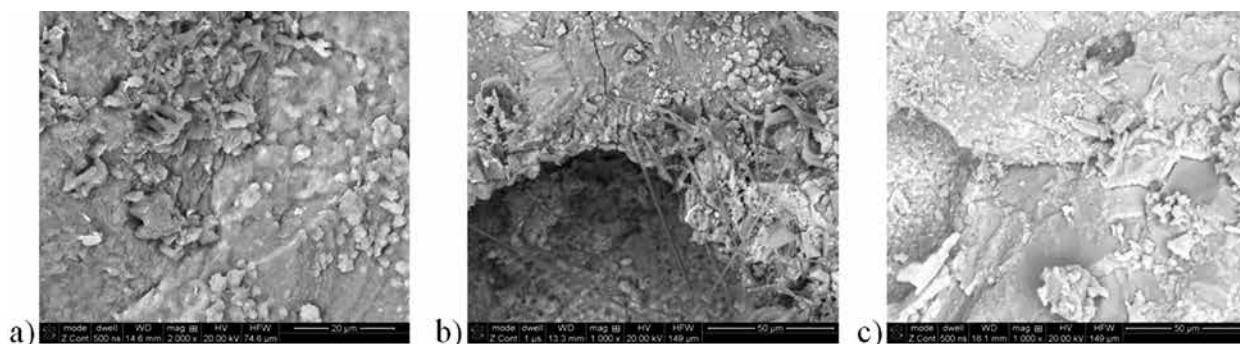
- wyбір kruszywa grubego, spośród analizowanych, istotnie wpływa na zmianę mikrostruktury wewnętrznej kompozytów betonowych poddanych cyklom mrozoodporności. Najkorzystniej wykształconą mikrostrukturą wewnętrzną po badaniach mrozoodporności charakteryzuje się beton serii BG. Wykazano ścisłą zależność zróżnicowania struktury wewnętrznej betonu od medium stosowanego w cyklach mrozoodporności.
- najkorzystniejsza budowa struktury wewnętrznej kompozytu serii BG, uzyskiwane przez niego parametry fizyczne i mechaniczne oraz jego odporność na warunki środowiskowe (utożsamiana z mrozoodpornością betonu i oddziaływaniem środków odładzających) gwarantuje trwałość betonu w nawierzchni lotniskowej.

dr inż. Małgorzata Linek, Politechnika Świętokrzyska
prof. dr hab. inż. Piotr Nita, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
mgr inż. Paweł Wolka, Politechnika Świętokrzyska
mgr inż. Wojciech Żebrowski, Politechnika Świętokrzyska

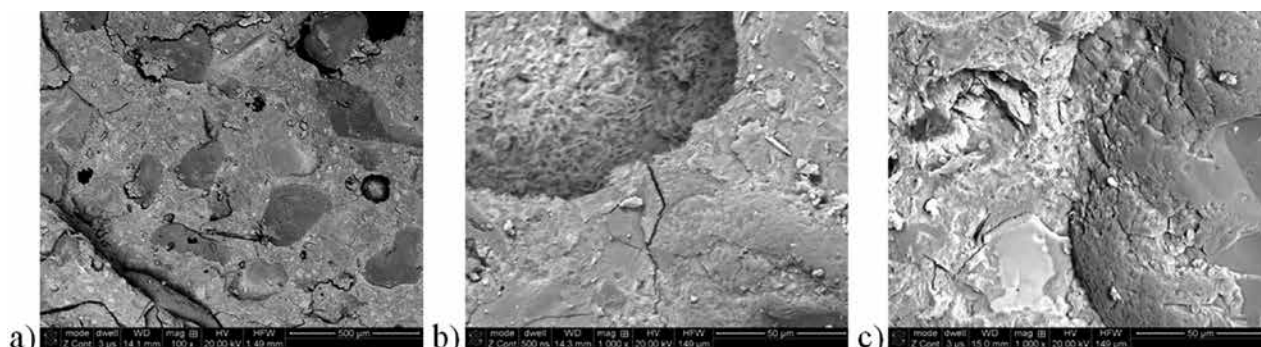
Literatura

- M. A. Glinicki, *Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2011.*
- M. Linek, P. Nita, *Wpływ ceramicznego modyfikatora na wybrane charakterystyki fizyko-mechaniczne lotniskowego betonu nawierzchniowego, VII Konferencja Dni Betonu, Wisła, str. 83-92, 2012.*
- M. Linek, P. Nita, P. Wolka, W. Żebrowski, *Application of Natural Mineral Additives in Construction, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 95, 022006, 2017, doi:10.1088/1755-1315/95/2/022006.*
- M. Linek, P. Nita, P. Wolka, W. Żebrowski, *Usefulness of porphyry and amphibolites as a component of concrete for airfield pavements, MATEC Web of Conferences 163, 07002, 2018, doi.org/10.1051/mateconf/201816307002.*
- M. Linek, P. Wolka, W. Żebrowski, *Wpływ dodatku zeolitu na wybrane parametry fizyko-mechaniczne lotniskowego betonu nawierzchniowego, IX Konferencja Dni Betonu, Wisła, str. 143-156, 2016.*
- P. Nita, *Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2008.*
- Praca zbiorowa: *Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 2003.*

Rys. 9. Budowa wewnętrzna betonu serii BG po badaniu mrozoodporności w mrówczanie w obrębie: a) matrycy cementowej, b) pora powietrznego, c) strefy kontaktowej pomiędzy ziarnem kruszywa a matrycą



Rys. 10. Budowa wewnętrzna betonu serii BG po badaniu mrozoodporności w moczniku technicznym w obrębie: a) matrycy cementowej, b) pora powietrznego, c) strefy kontaktowej pomiędzy ziarnem kruszywa a matrycą



Tab. 5. Podstawowe parametry analizowanych betonów serii BG, BA, BB, BK i BP poddanych 200 cyklom mrozoodporności (\bar{X} oznacza wartość średnią z 6 pomiarów, σ – oznacza odchylenie standardowe)

Parametr	j. m.	Rodzaj betonu				
		BG	BA	BB	BK	BP
ΔG	\bar{X}	0,190	0,337	0,050	0,179	0,308
	σ	0,004	0,060	0,004	0,042	0,042
ΔR	\bar{X}	1,540	1,016	2,150	5,448	2,109
ΔM	\bar{X}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	σ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

- NO 17-A204: 2015 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.
- PN-EN 206-1 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN 1008: 2004 Woda zarobowa do betonu – Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu,
- PN-EN 1097-2: 2010 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie.
- PN-EN 1097-6: 2013-11 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.
- PN-EN 1097-7: 2008 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza - Metoda piknometryczna.
- PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- PN-EN 12350-2: 2011 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- PN-EN 12350-6: 2011 Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość.
- PN-EN 12350-7: 2011 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe.
- PN-EN 12390-1:2013 Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form
- PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- PN-EN 12390-3: 2011/AC: 2012 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań.
- PN-EN 12390-4:2001 Badania betonu – Część 4: Wytrzymałość na ścislenie – Wymagania dla maszyn wytrzymałościowych.
- PN-EN 12390-7: 2011 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.