

mgr inż. Paweł Mofina

Cemex Polska Sp. z o.o.

dr inż. Piotr Górak

Cemex Polska Sp. z o.o.

dr inż. Krzysztof Blacha

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

mgr inż. Danuta Kowalska

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Ocena wybranych właściwości betonu z cementem CEM II/B-S 42,5 N-NA pod kątem możliwości zastosowania na nawierzchnie lotniskowe – analiza porównawcza

Assessment of selected properties of concrete with CEM II/B-S 42,5 N-NA cement in terms of its potential use on airport pavements – comparative analysis

Streszczenie

Zastosowanie cementów portlandzkich żużlowych do produkcji betonu nawierzchniowego w przypadku realizacji dróg i autostrad o kategorii natężenia ruchu KR5-KR7 jest faktem i mamy już w Polsce szereg udanych realizacji nawierzchni betonowych o obniżonym śladzie węglowym dzięki użyciu tego typu cementów.

Jednakże, betonowe nawierzchnie to nie tylko drogi lokalne, krajowe, ekspresowe czy autostrady, ale również nawierzchnie elementów funkcjonalnych na lotniskach cywilnych i wojskowych. W takich obszarach realizacji, rozwiązania materiałowe reguluje norma *NO-17-A204:2025 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań* [1]. Zgodnie z ww. normą do betonu nawierzchniowego (warstwa jezdna) preferowane jest stosowanie cementu z grupy CEM I, których dostępność staje się coraz bardziej ograniczona. W połączeniu z niezwykle istotnymi aspektami wpływu na środowisko, naturalną konsekwencją wydaje się poszukiwanie innego rozwiązania materiałowego dla tego typu nawierzchni. Autorzy niniejszego referatu zaplanowali i wykonali program badawczy w bardzo szerokim zakresie w oparciu o wymagania stawiane dla betonu przeznaczonego do zastosowania w lotniskowych nawierzchniach betonowych. Przeprowadzone badania skupiały się przede wszystkim na porównaniu trwałości mrozowej ocenianej w różnych wariantach oddziaływania zależnych od rodzaju zastosowanych środków odladzających. Jako beton referencyjny przyjęto beton wykonany z użyciem cementu CEM I 42,5 R-NA, którego właściwości porównano z betonem wykonanym przy użyciu cementu o obniżonej zawartości klinkieru czyli CEM II/B-S 42,5 N-NA. Uzyskane wyniki badań potwierdziły niewykluczoną perspektywę uwzględnienia cementu portlandzkiego żużlowego w budownictwie lotniskowych nawierzchni betonowych, jako przyszłej materiałowej alternatywy o obniżonej emisyjności.

Abstract

The use of Portland slag cements for the production of pavement concrete in the case of construction of roads and motorways with traffic intensity category KR5-KR7 is a fact and we already have a number of successful constructions of concrete pavements with a reduced carbon footprint in Poland thanks to the use of this type of cement. However, concrete surfaces are not only local roads, national roads, expressways or motorways, but also the surfaces of functional elements at civil and military airports. In such areas of implementation, material solutions are regulated by the standard *NO-17-A204:2025 Airport pavements. Cement concrete pavements*.

Requirements and test methods [1]. According to the above standard, the use of cement from the CEM I group is preferred for pavement concrete (surface layer), the availability of which is becoming increasingly limited. In combination with the extremely important aspects of the impact on the environment, the natural consequence seems to be the search for another material solution for this type of pavement. The authors of this paper have planned and carried out a research program in a very wide scope based on the requirements for concrete intended for use in airport concrete pavements. The conducted studies focused primarily on the comparison of frost durability assessed in different variants of impact depending on the type of de-icing agents used. The reference concrete was concrete made using CEM I 42,5 R-NA cement, the properties of which were compared with concrete made using cement with reduced clinker content, that is CEM II/B-S 42,5 N-NA. The results obtained confirmed the not inconceivable prospect of Portland slag cement being included in the construction of airfield concrete pavements as a future material alternative with reduced emissions.

1. Wprowadzenie

Betonowe nawierzchnie to nie tylko drogi lokalne, krajowe, ekspresowe czy autostrady, ale również nawierzchnie lotnisk cywilnych i wojskowych, w tym: drogi kołowania i płyty postojowe stanowiące elementy będące istotną częścią trwałej infrastruktury krytycznej, od której zależy bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. W tym obszarze do projektowania i wykonawstwa tego typu nawierzchni stosowana jest obecnie norma obronna NO-17-A204:2025 [1], zastępująca obowiązującą wcześniej normę PN-V-83002:1999 [2], która dostosowana została do obecnie posiadanej wiedzy, nowych technologii oraz przede wszystkim wymagań stawianych przez nową technikę lotniczą (zaktualizowana w trakcie realizacji projektu badawczego).

Aktualizacja dokumentów technicznych w infrastrukturze drogowej (WWiORB) etapowo się zmienia, uwzględniając możliwość stosowania innych materiałów oraz technologii pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej trwałości. Pojawiają się także bardzo nieśmiało zapisy dotyczące oceny cyklu życia (LCA) oraz wpływu środowiskowego wyrażonego za pomocą śladu węglowego inwestycji, [3,4]. Postanowienia ww. normy obronnej również uwzględniają powyższe, lecz ze względu na specyfikę eksploatacji nawierzchni lotniskowych uwzględnić wszystkiego nie mogą. Stąd między innymi aktualnie brak możliwości stosowania do warstwy jezdnej nawierzchni lotniskowych cementów innych niż CEM I. Dotyczy to również nawierzchni drogowych odcinków lotniskowych [5,6]. Należy tu jednak wspomnieć, że proces zmian wywołany obniżoną emisyjnością spowodował ograniczoną dostępność tych cementów. Niemniej jednak szukanie nowych, alternatywnych rozwiązań jest jak najbardziej uzasadnione. Porównanie cementów CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II B-L z cementem CEM I w betonach opisał np. J. Szczerba [7]. W praktyce jednak brak jest wystarczających doświadczeń, mogących umożliwić opracowanie alternatywnego rozwiązania opartego na cementach innych niż CEM I, które spełniłoby wszystkie wymagania współczesnego, szeroko rozumianego w tym przypadku budownictwa komunikacyjnego.

Proces wprowadzenia ewentualnych zmian wymaga przeprowadzenia szeregu badań, pozwalających na zdobycie większych doświadczeń, popartych oczywiście wynikami badań. Dopiero wtedy będzie możliwe ich proponowanie z pełną świadomością. Zastosowanie cementów innych niż CEM I w budownictwie lotniskowym jest o tyle trudne, że obecnie nie mamy wystarczających doświadczeń i potwierdzeń pozwalających na taką realizację. Przekłada się to na ryzyko, które na chwilę obecną jest nieakceptowalne w odniesieniu do bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Dlatego też powstał pomysł, aby zrealizować program badawczy, którego wyniki mogłyby potwierdzić (lub też nie) słuszność podążania w nowym kierunku dla przyszłych realizacji z użyciem cementów o niższej zawartości klinkieru. Cel programu badawczego wychodzi naprzeciw dzisiejszym wyzwaniom. Jeżeli zmierzmy się

z nimi, to być może będziemy dysponować potwierdzonym i bezpiecznym, ale co równie istotne niż emisyjnym pod względem emisji CO₂ rozwiązaniem alternatywnym.

Dlatego też autorzy podjęli próbę mającą na celu dokonanie oceny przydatności zastosowania cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA do produkcji mieszanki betonowej z przeznaczeniem na nawierzchnie lotniskowe. Badania właściwości użytkowych cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA były częścią bardzo obszernego programu badań, w ramach którego oceniono przydatność opracowanych rozwiązań materiałowych do budowy nawierzchni lotniskowych.

2. Program i realizacja badań

2.1 Informacje ogólne

Program badań został podzielony na etapy: laboratoryjny oraz technologiczny, podczas których zostały ocenione kluczowe właściwości mieszanki betonowej i betonu (nawierzchni), które następnie porównano i oceniono zgodnie z wymaganiami normy NO-17-A204:2025.

Zgodnie z wcześniej wspomnianą normą obronną, do budowy warstwy jezdni nawierzchni lotniskowych wymaga się betonu klasy C30/37, C35/45, C40/50 lub C45/55.

Do produkcji mieszanki betonowej (wymagany stosunek wodno-cementowy $\leq 0,40$) należy stosować sprawdzone materiały, odpowiedniej jakości, w tym:

- cement portlandzki o klasie wytrzymałości CEM I 32,5R(N) lub CEM I 42,5R(N), o zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,60 \%$ (po potwierdzeniu pozytywnymi wynikami badań dopuszcza się stosowanie cementu o zawartości alkaliów powyżej 0,60 %, ale nie wyższej niż 0,80 %),
- kruszywo grube - zalecane stosowanie kruszywa łamanego granitowego o wielkości ziaren nie przekraczającej 31,5 mm. Możliwe jest zastosowanie innego kruszywa ze skał głębinowych oraz ze skał metamorficznych.

Beton do budowy nawierzchni lotniskowych powinien być napowietrzony, zawartość powietrza w mieszance betonowej powinna się mieścić w przedziale od 4,5 % do 5,5 %.

Poszczególnym klasom betonu przyporządkowano odpowiednie wymagania dotyczące właściwości fizycznych i mechanicznych:

- średnia wartość nasiąkliwości w wodzie oraz w środkach odladzających nie powinna być większa niż 5 % dla betonu klasy C30/37 (4,8 % dla betonu klasy C45/55),
- wytrzymałość na zginanie po 28 dniach twardnienia betonu klasy C30/37, określona na belkach 70 cm x 15 cm x 15 cm, (obciążanie dwupunktowe, rozstaw podpór dolnych: 60 cm; belka obrocona o 90° w stosunku do kierunku, w którym była formowana), nie niższa niż 5 MPa (dla pojedynczego wyniku). W przypadku betonu klasy C45/55 wartość ta wynosi 5,7 MPa.
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach twardnienia betonu klasy C30/37, określona zgodnie z PN-EN 12390-6:2024-04 na odwiertach o średnicy 15,0 cm pobranych z nawierzchni lub na kostkach 15 cm x 15 cm x 15 cm, nie powinna być niższa niż 3,3 MPa (dla pojedynczego wyniku). W przypadku betonu klasy C45/55 wartość ta wynosi 3,8 MPa.

Wymagania dotyczące trwałości mrozowej lotniskowego betonu nawierzchniowego są następujące:

- mrozoodporność w wodzie: po 200 cyklach zamrażania w powietrzu i rozmrażania w wodzie
- w przypadku betonu klasy C30/37: ubytek masy $\leq 5,0 \%$, spadek wytrzymałości $\leq 20 \%$, natomiast w przypadku betonu klasy C45/55: ubytek masy $\leq 4,7 \%$, spadek wytrzymałości $\leq 17 \%$; na powierzchniach próbek nie powinny występować mikrorysy.
- odporność na środki odladzające, określona metodą A, B lub C - po 200 cyklach zamrażania
- rozmrażania – wymagania jak w przypadku badania mrozoodporności w wodzie.

- odporność na powierzchniowe złuszczenie - po 56 cyklach zamrażania-odmrażania masa materiału złuszczonego nie powinna przekraczać 0,05 kg/m².

2.2 Etap wstępny

Etap wstępny (laboratoryjny) miał na celu wstępne zaprojektowanie receptury, sprawdzenie i potwierdzenie właściwości wykonanego betonu z wymaganiami zawartymi w normie obronnej ze szczególnym uwzględnieniem aspektów trwałościowych, w tym odporności betonu na oddziaływanie środowiska mrozowego w obecności różnych środków odladzających wykorzystywanych na lotniskach. Dodatkowo, wybrane badania wykonano przy narażeniu na roztwór NaCl, pomimo faktu, że ze względów bezpieczeństwa na lotniskach nie stosuje się środków odladzających na bazie chlorków z uwagi na możliwość uszkodzeń korozyjnych elementów konstrukcji samolotów oraz wyposażenia lotniskowego. Zakres badań (dla zaprojektowanej receptury betonu o klasie wytrzymałości C35/45, klasach ekspozycji XC4, XF3, XF4, XD3, XS3 na kruszywie granitowym do 22 mm) obejmował:

- weryfikację konsystencji betonu metodą Ve-Be wg PN-EN 12350-3 [8],
- weryfikację gęstości mieszanki betonowej wg PN-EN 12350-6 [9],
- weryfikację zawartości powietrza wg PN-EN 12350-7 [10],
- analizę struktury napowietrzenia wg PN-EN 480-11 [11],
- ocenę wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 12390-3 [12],
- ocenę wytrzymałości na zginanie wg PN-EN 12390-5 [11] i NO-17-A204 [13],
- ocenę wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 12390-6 [14],
- ocenę nasiąkliwości w wodzie wg NO-17-A204 – Załącznik B
- oznaczenie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8 [15],
- ocenę mrozoodporności wewnętrznej F200 według zmodyfikowanych metod przechowywania próbek (3 środowiska)
 - próbki nasączone w środkach odladzających (nasączenie co 25 cykli w mrówczanie potasu oraz mrówczanie sodu)
 - próbki badane według PN-B 06265:2022-08 – Załącznik N [16].
- ocenę odporności na powierzchniowe złuszczenie betonu - cykliczne zamrażanie i odmrażanie w obecności różnych środowisk :
 - 3% NaCl – według procedury badawczej NO-17-A204 – Załącznik B
 - 3% NaCl – według PN-B 06265:2022-08 – Załącznik O
 - roztwory mrówczanu potasu (3 stężenia) – według procedury badawczej NO-17-A204 – Załącznik B
 - roztwór (15% m/m) mrówczanu sodu – według procedury badawczej NO-17-A204 – Załącznik B
 - woda – według procedury badawczej NO-17-A204 – Załącznik B

W niniejszym artykule przedstawiono tylko niektóre wyniki ww. badań.

2.3 Etap technologiczny

Etap technologiczny (próba terenowa) polegał na wytworzeniu w warunkach przemysłowych betonu na cemencie odniesienia (przyjęto CEM I 42,5 R-NA) oraz na cemencie badanym (CEM II/B-S 42,5 N-NA) według ustalonej laboratoryjnie receptury. Następnym etapem był transport mieszanki betonowej samochodem samowyladowczym oraz jej wbudowanie w pola testowe z zachowaniem projektowanej konsystencji i pozostałych parametrów. Próbki do oceny betonu zostały pobrane w trakcie betonowania oraz po 7 dniach dojrzewania betonu w konstrukcji wykonano odwierty Ø150 mm, które następnie podano badaniom laboratoryjnym zgodnie z przyjętym planem badań. Beton w konstrukcji dojrzewał w warunkach, które monitorowano w

sposób ciągły. Monitoring dotyczył pomiarów temperatury zewnętrznej oraz temperatury powierzchni betonu.

Plan poboru próbek i planowanych badań przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie próbek pobranych w etapie technologicznym

Próbki pobierane w trakcie betonowania Rodzaje badań	Próbki rdzeniowe pobrane z konstrukcji Rodzaje badań
Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na ściskanie
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu
Wytrzymałość na zginanie	-
Mrozoodporność F200	Mrozoodporność F200
Struktura napowietrzenia	Struktura napowietrzenia
Mrozoodporność powierzchniowa	Mrozoodporność powierzchniowa

3. Analiza wyników badań

3.1 Etap badań wstępnych

Do zaprojektowania betonu nawierzchniowego wykorzystano cement CEM II/B-S 42,5 N-NA o podstawowych właściwościach fizyko-chemicznych przedstawionych w tablicy 2.

Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5 N -NA jest cementem powszechnego użytku wg PN-EN 197-1[17] i spełnia dodatkowo wymagania normy PN-B 19707 [16] jako cement niskoalkaliczny (NA). Zastosowanie w projekcie tego cementu nie było przypadkowe, ponieważ cement CEM II/B-S to jeden z nielicznych cementów akceptowanych do realizacji nawierzchni betonowych na drogach ekspresowych i autostradach w najwyższych kategoriach natężenia ruchu według wytycznych wzorcowych warunków wykonania i odbioru robót budowlanych D-05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego V03 z 01.2025 [19].

Tablica 2. Podstawowe właściwości cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA Rudniki

Właściwość	Jednostka	Wynik
Początek wiązania	min	172
Koniec wiązania	min	218
Woda do konsystencji normowej	%	29,7
Powierzchnia właściwa	cm ² /g	4464
Wytrzymałość na ściskanie:		
po 2 dniach	MPa	18,3
po 28 dniach		57,5
Analiza chemiczna:		
SO ₃	%	2,55
Cl		0,07
Na ₂ O _{eq}		0,60

Bardzo ważnym aspektem prób laboratoryjnych był właściwy dobór zestawu domieszek – plastyfikatora i domieszki napowietrzającej. Przeprowadzono wiele testów podstawowych właściwości reologicznych mieszanki betonowej, by w końcu ocenić prawidłowość rozwiązania na podstawie badań struktury napowietrzenia w stwardniałym betonie. Osiągnięcie odpowiednich parametrów napowietrzenia betonu wyrażonych za pomocą wskaźników opisujących rozmieszczenie porów (spacing factor) $L < 0,200$ mm, zawartości mikroporów A_{300}

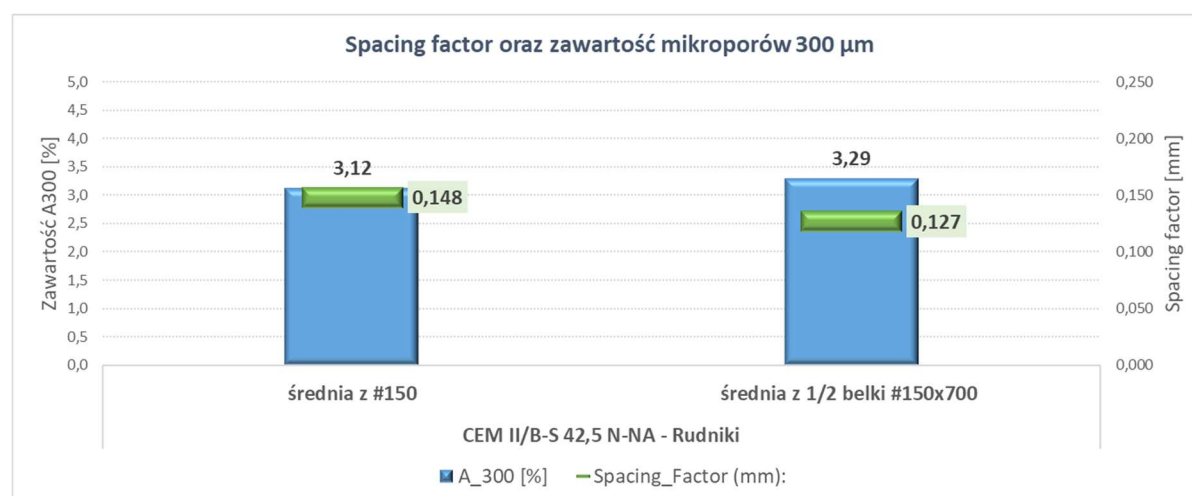
> 1,5% były kluczowe dla akceptacji rozwiązania materiałowego opartego na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA i stosie okruszowym składającym się z gryszy granitowego o $d_{\max} = 22$ mm z krzywą uziarnienia gwarantującą odpowiednie właściwości mieszanki przewidzianej do układania maszynowego.

Uzyskane w trakcie prób laboratoryjnych wyniki badań mieszanki betonowej oraz betonu zestawiono z wymaganiami normy NO-17-A204 w tablicy 3, wraz z ich oceną. W przypadku mieszanki betonowej z cementem CEM II/B-S 42,5 N-NA ustalono odrębne kryteria akceptacji dotyczące konsystencji i zawartości powietrza.

Tablica 3. Ocena uzyskanych wyników dla mieszanki betonowej i betonu z cementem CEM II/B-S 42,5 N-NA Rudniki

Mieszanka betonowa - właściwość	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena
Konsystencja Ve-Be	11-16 [s]	11-16 [s]	Akceptacja
Gęstość mieszanki	+/- 2% w stosunku do teoretycznej	2260-2270 kg/m ³	Akceptacja
Zawartość powietrza	5,5 – 6,5 %	6,0 – 6,5 [%]	Akceptacja
Beton – właściwości mechaniczne	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena
Wytrzymałość na ściskanie f_{ck} 2d 7d 28d	- ≥ 34 MPa $\geq 45 + 4$ MPa	22,2 MPa 38,9 MPa 57,1 MPa	Akceptacja
Wytrzymałość na zginanie f_{cf} 7d 28d	- $\geq 5,5$ MPa	4,9 MPa 6,8 MPa	Akceptacja
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu $f_{ctm,sp}$ 28 d	$\geq 3,6$ MPa	4,1 MPa	Akceptacja

Określenie struktury napowietrzenia w betonie na wytypowanym rozwiązaniu domieszkowym wykonano na próbkach sześciennych oraz fragmentach belek pozostałych po badaniach wytrzymałości na zginanie. Wyniki zostały zaprezentowane graficznie na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura napowietrzenia betonu z etapu laboratoryjnego

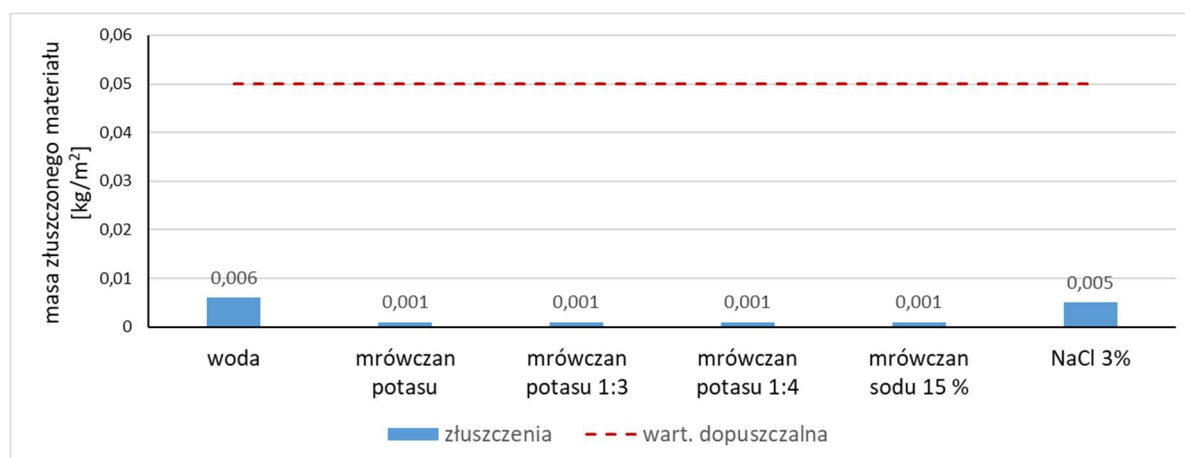
Analizując rozkład porów powietrznych i ich średnicę potwierdzono zasadność właściwego doboru układu domieszek chemicznych do zastosowanego cementu oraz do przyjętych wewnętrznie założonych wartości napowietrzenia mieszanki.

Trwałość w środowisku mrozowym określoną za pomocą mrozoodporności wewnętrznej wykonano na próbkach poddanych 200 cyklom zamrażania i odmrażania w zaplanowanych środowiskach. Wyniki badań zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Zestawienie wyników badań mrozoodporności wewnętrznej

Środowisko	Wymagania wg NO-17-A204 dla klasy betonu C 35/45	
	Spadek wytrzymałości < 19,0 %	Ubytek masy < 4,9 %
	Wyniki badań	
Woda metoda wg NO-17-A204 Załącznik B	11,0	0,16
Mrówczan potasu metoda B według NO-17-A204 (próbki wyjmowane z komory i nasączone co 25 cykli)	1,1	-0,04
Mrówczan sodu (15% roztwór) metoda B według NO-17-A204 (próbki wyjmowane z komory i nasączone co 25 cykli)	0,71	-1,87

Do określenia odporności betonu nawierzchniowego na powierzchniowe złuszczenie w obecności różnych środków odladzających stosowanych najczęściej na lotniskach, [20], wykorzystano metodą badawczą polegającą na poddaniu próbek 56 cyklom zamrażania i odmrażania przy zachowaniu odpowiednich warunków temperaturowych opisanych w załączniku B.5 normy obronnej. Zgodnie z wymaganiami tej normy wynik badania uznaje się za pozytywny, jeżeli ubytek masy po wymienionej liczbie cykli jest mniejszy niż $0,05 \text{ kg/m}^2$. Wyniki badań zostały przedstawione w formie graficznej na rysunku 2. Badania w różnych środowiskach generowanych przez różne środki odladzające zostały uzupełnione o środowisko 3% NaCl oraz wody destylowanej.



Rysunek 2. Wielkość powierzchniowego złuszczenia próbek betonu nawierzchniowego w różnych środowiskach

Masa złuszczonego materiału po 56 cyklach zamrażania i odmrażania w różnych środowiskach, nie przekroczyła poziomu dopuszczalnego $0,05 \text{ kg/m}^2$. Oceniając uzyskane wyniki można taki beton zakwalifikować dla klasy odporności FT2 według PN-B-06265 [16], zgodnie z którą maksymalne dopuszczalne złuszczenie jest 50 razy większe ($< 0,5 \text{ kg/m}^2$) lub do klasy odporności na powierzchniowe złuszczenie w obecności soli odladzającej najwyższej - bardzo dobrej według NT Build 492 ($< 0,1 \text{ kg/m}^2$).

Z punktu widzenia użyteczności, takie rygorystyczne wymaganie odnośnie do trwałości betonu dla nawierzchni lotniskowych jest kluczowe ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji, ponieważ odpryski złuszczonego betonu mogą być przyczyną poważnych awarii użytkowanych statków powietrznych.

Na bazie uzyskanych wyników dla mieszanki betonowej wykonanej na bazie cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA, potwierdzono zasadność kontynuacji dalszych prac mających na celu określenie przydatności takiego rozwiązania do wykonywania betonowych nawierzchni lotniskowych.

3.2 Etap technologiczny

Finalnym etapem programu badawczego było wykonanie w warunkach polowych odcinka doświadczalnego nawierzchni z betonu wyprodukowanego przemysłowo przy wykorzystaniu dwóch rodzajów cementów, tj. CEM I 42,5 R-NA – jako referencyjnego [17] oraz CEM II/B-S 42,5 N-NA – jako ocenianego.

Mieszanki betonowe produkowane były na wytwórni betonu, zlokalizowanej w odległości 18 km od miejsca wbudowania, a czas transportu mieszanki samochodem samowyladowczym trwał około 30 minut. Ważną kwestią jest fakt, że beton układany był w drugiej połowie listopada a dojrzewanie przypadło na okres niskich temperatur otoczenia (rys. 3), bliskich 0°C . Pola testowe zabezpieczone zostały płytami styropianowymi o grubości 10 cm oraz folią. Pomimo zabezpieczenia termicznego, warunki dojrzewania wpłynęły na wytrzymałości 7 dniowe betonu. Niebieskim polem na wykresie zaznaczono przedział czasowy od momentu ułożenia betonu do momentu przystąpienia do wykonywania odwiertów rdzeniowych.



Rys. 3. Temperatura otoczenia w czasie dojrzewania betonu z prób technologicznych

Zmierzona temperatura wierzchniej warstwy betonu, pod izolacją termiczną, w żadnym momencie nie spadła poniżej 10°C bez względu na rodzaj cementu w mieszance betonowej.

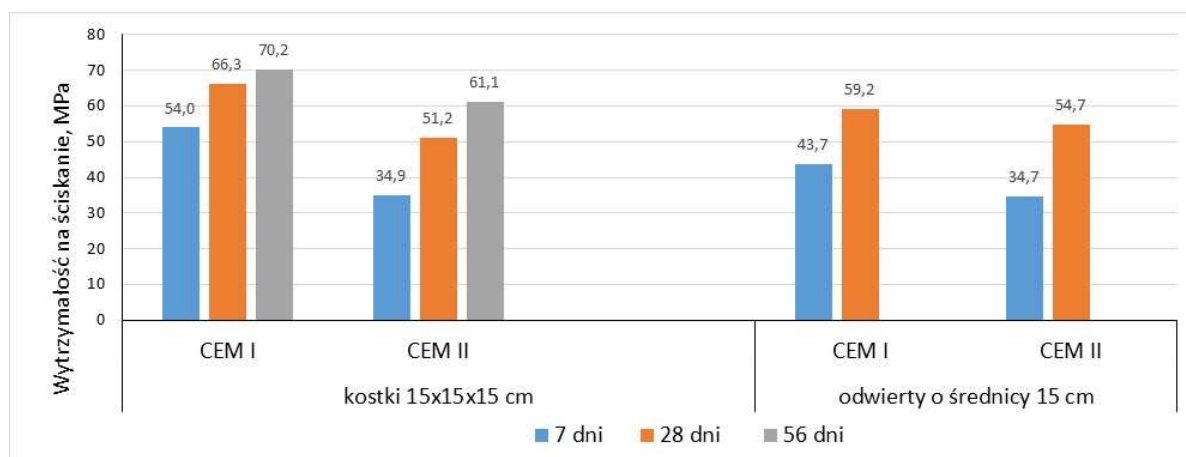
W czasie etapu technologicznego sprawdzono właściwości mieszanki betonowej zarówno w miejscu wytworzenia, jak i w miejscu wbudowania. W przypadku mieszanki betonowej z cementem CEM II/B-S 42,5 N-NA przyjęto ustalone w etapie wstępnym kryteria akceptacji dotyczące konsystencji i zawartości powietrza.

W trakcie betonowania zostały pobrane próbki kontrolne do oceny rozwoju wytrzymałości na ściskanie w czasie. Po upływie 7 dni od momentu wbudowania mieszanek przystąpiono do pobrania odwiertów rdzeniowych Ø150 mm. Zakres badań mieszanek, próbek sześciennych i odwiertów był identyczny jak w etapie I. Wyniki badań zestawiono w tablicy 5 i zobrazowano graficznie na rys. 4 (wytrzymałość na ściskanie) i rys. 5 (wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu).

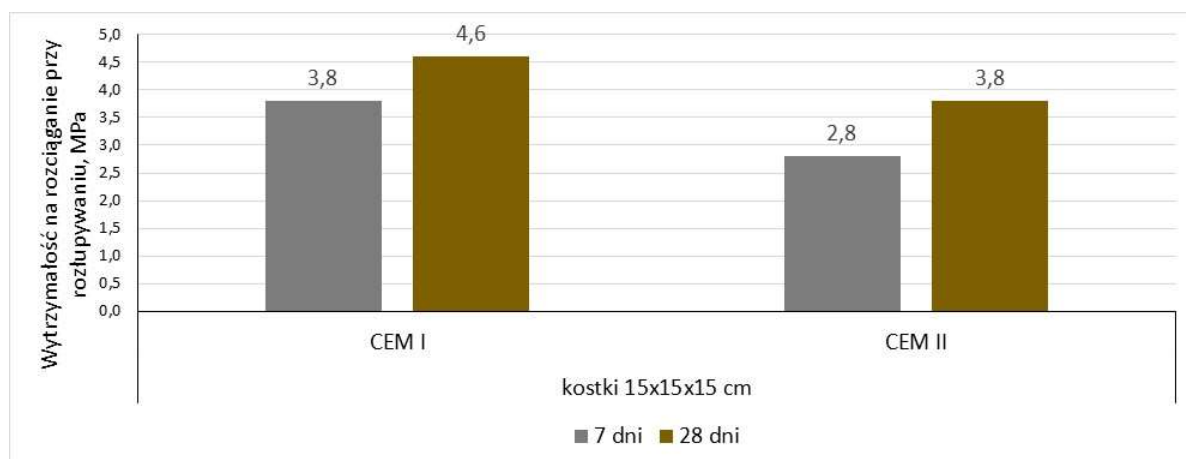
Tablica 5. Ocena uzyskanych wyników badań mieszanki betonowej i próbek betonu w postaci kostek o wymiarach 150x150x150 mm i odwiertów rdzeniowych Ø150 mm (beton do wykonania odcinków doświadczalnych)

	CEM I 42,5 R-NA			CEM II/B-S 42,5 N-NA		
Mieszanka betonowa - właściwość	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena
Konsystencja Ve-Be [s]	11-16	11-16	Akceptacja	11-16	11-16	Akceptacja
Gęstość mieszanki	+/- 2% w stosunku do teoretycznej		Akceptacja	+/- 2% w stosunku do teoretycznej		Akceptacja
Zawartość powietrza [%]	4,5 – 5,5	4,8 – 5,3	Akceptacja	5,5 – 6,5	5,7 – 6,4	Akceptacja
Beton – właściwości mechaniczne	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena
Wytrzymałość na ściskanie - kostki 15x15x15 cm wykonane podczas układania odcinków doświadczalnych						
Wytrzymałość na ściskanie f_{ck} / f_{cm} [MPa]						
7d	>34	54,0	Akceptacja	> 34	34,9	Akceptacja
28d	≥ 45 + 4	66,3		≥ 45 + 4	51,2	
56 dni	-	70,2		≥ 45 + 4	61,1	
Wytrzymałość na ściskanie - odwierty rdzeniowe						
f_{ck} / f_{cm} [MPa]						
7d	>34	43,7	Akceptacja	>34	34,7	Akceptacja
28d	≥ 45 + 4	59,2		≥ 45 + 4	54,7	
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu – kostki 15x15x15 cm						
$f_{ctm,sp}$ [MPa]						
7 dni	-	3,8	Akceptacja	-	2,8	Akceptacja
28 d	≥ 3,6	4,6		≥ 3,6	3,8	
Mrozoodporność w wodzie F200 - kostki 15x15x15 cm						
Spadek wytrzymałości [%]			Akceptacja			Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 19,0 < 4,9	-2,2 0,13		< 19,0 < 4,9	6,9 0,19	
Mrozoodporność w wodzie F200 - odwierty rdzeniowe						
Spadek wytrzymałości [%]	< 19,0	6,1	Akceptacja	< 19,0	10,1	Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 4,9	0,04		< 4,9	0,14	
Mrozoodporność F200 przy narażeniu na środek odladzający na bazie mrówczanu potasu – kostki 15x15x15 cm						
Spadek wytrzymałości [%]	< 19,0	6,5	Akceptacja	< 19,0	3,5	Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 4,9	-0,03		< 4,9	-0,05	
Mrozoodporność F200 przy narażeniu na środek odladzający na bazie mrówczanu potasu –						

odwierty rdzeniowe						
Spadek wytrzymałości [%]	< 19,0	5,7	Akceptacja	< 19,0	6,2	Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 4,9	-0,01		< 4,9	0,01	
Mrozoodporność F200 przy narażeniu na środek odladzający na bazie mrówczanu sodu – kostki 15x15x15 cm						
Spadek wytrzymałości [%]	< 19,0	-5,3 wzrost	Akceptacja	< 19,0	0,16	Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 4,9	0,02		< 4,9	0,00	

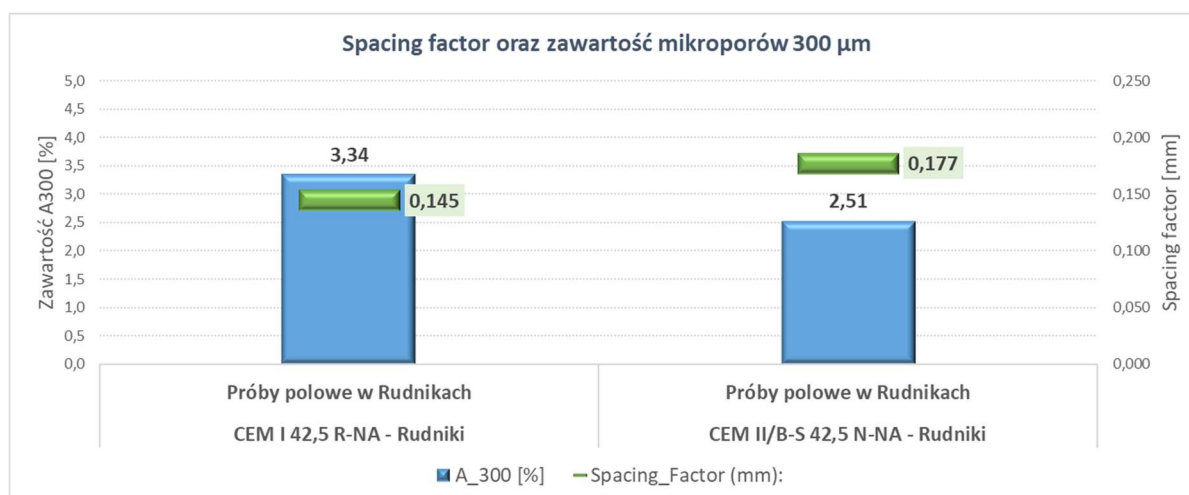


Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek betonu z cementem CEM I i próbek z cementem CEM II (próbki w postaci kostek o wymiarach 15x15x15 cm oraz odwiertów rdzeniowych o średnicy 15 cm pobranych z odcinków doświadczalnych)



Rys. 5. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek betonu z cementem CEM I i próbek z cementem CEM II (próbki w postaci kostek o wymiarach 15x15x15 cm pobranych z odcinków doświadczalnych)

Potwierdzenie struktury napowietrzenia w stwardniałym betonie wykonano na walcach wyciętych w konstrukcji płyt. Wyniki zostały zaprezentowane graficznie na rysunku 6.



Rys. 6. Struktura napowietrzenia betonu z etapu technologicznego

Do napowietrzenia betonu wykonanego na cemencie referencyjnym CEM I 42,5 R-NA oraz na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA w trakcie produkcji mieszanki przyjęto ten sam zestaw domieszek (plastyfikator + napowietrzacz). Zgodnie z wcześniejszymi doświadczeniami osiągnięcie zakładanej zawartości powietrza dla mieszanki wykonanej na cemencie żużlowym CEM II/B-S wymagało zwiększenia dozowania domieszki napowietrzającej o około 50% w stosunku do mieszanki wykonanej na cemencie referencyjnym. Wyniki badania struktury napowietrzenia w stwardniałym betonie pobranym z konstrukcji nawierzchni odcinka testowego pokazały, że do osiągnięcia pozytywnej oceny jakości takiej struktury przy zastosowanym układzie domieszek dla cementu CEM II/B-S potrzebne jest zwiększenie napowietrzenia o około 1% wartości bezwzględnej w stosunku do betonu wykonanego na cemencie CEM I.

Kluczową oceną trwałości rozwiązania materiałowego w przypadku betonów do zastosowania w nawierzchniach lotniskowych, jak już wspomniano wcześniej jest odporność na powierzchniowe złuszczenie w wyniku zamrażania / odmrażania w obecności różnych preparatów odladzających. Wyniki badań odporności na powierzchniowe złuszczenie betonów wykonanych na cemencie CEM I 42,5 R-NA oraz cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA zestawiono w tablicy 6.

Tablica 6. Wielkość powierzchniowego złuszczenia dla próbek betonu nawierzchniowego wykonanego na różnych cementach w różnych środowiskach ekspozycji (kostki 15x15x15 pobrane podczas układania odcinków doświadczalnych)

Środowisko – stosowany środek odladzający	Dopuszczalny ubytek masy [kg/m²]	Rodzaj użytego cementu	
		CEM I 42,5 R-NA	CEM II/B-S 42,5 N-NA
		Wyniki badań [kg/m²]	
kostki 15x15x15 cm			
Mrówczan potasu	0,05	brak złuszczeń	brak złuszczeń
Mrówczan sodu (15 % roztwór)		brak złuszczeń	brak złuszczeń
Woda		0,004	0,018
odwierty rdzeniowe			

Mrówczan potasu	0,05	brak złuszczeń	brak złuszczeń
Woda		0,015	0,019

Po badaniach odporności na powierzchniowe złuszczenie próbki poddano badaniom wytrzymałości na odrywanie zgodnie z normą PN-EN 1542:2000, [20]. Wyniki badań wytrzymałości na odrywanie betonu po narażeniu na mróz i środki odladzające przedstawiono w tablicy 7. We wszystkich przypadkach zniszczenie miało charakter kohezyjny w betonie.

Tabela 7. Wyniki badań wytrzymałości na odrywanie próbek po badaniach odporności na powierzchniowe złuszczenie w wodzie i w środkach odladzających.

Środowisko – stosowany środek odladzający	Wymagana wytrzymałość na odrywanie, MPa	Rodzaj użytego cementu	
		CEM I 42,5 R-NA	CEM II/B-S 42,5 N-NA
		Wyniki badań [kg/m²]	
Kostki			
Mrówczan potasu	1,8	4,39	4,04
Mrówczan sodu (15% roztwór)		4,54	3,73
Woda		3,89	4,05
Odwierthy rdzeniowe			
Mrówczan potasu	1,8	3,33	3,82
Woda		4,20	3,56

4. Wnioski

Podjęcie przedmiotowego tematu wg autorów bez wątpienia było działaniem właściwym. Spowodowane po części chęcią poznawczą, ale także pewnym wymuszeniem zachodzących zmian ukierunkowanych na obniżanie emisyjności stosowanych rozwiązań materiałowych.

Należy sobie jasno powiedzieć, że budownictwo drogowe znacznie wcześniej otworzyło się na możliwość stosowania cementów innych niż CEM I. Natomiast budownictwo lotniskowe podchodzi to tematu z dużo większym dystansem. Podejście to nie jest spowodowane brakiem chęci i otwartości na nowe rozwiązania materiałowe, lecz jak już wspomniano szczególnym charakterem procesu eksploatacji nawierzchni lotniskowych. Powoduje to konieczność innego spojrzenia na nawierzchnie lotniskowe niż na nawierzchnie drogowe.

Niemniej jednak, jak przedstawiono w pracy budownictwo lotniskowe podejmuje pewne próby, wychodząc naprzeciw pojawiającym się wyzwaniom.

Przeprowadzenie przedstawionego w pracy programu badawczego wpisuje się idealnie w aktualne strategie dekarbonizacji przemysłu cementowego, a mianowicie ograniczenia stosowania cementów o wysokim wskaźniku emisji eqCO₂ na rzecz cementów niskoemisyjnych.

Autorzy mają świadomość, że w dobie zmian wynikających z ograniczenia emisji CO₂ w produkcji cementu, kreowanie nowych rozwiązań materiałowych przy zastosowaniu cementów o zredukowanym śladzie węglowym takich jak np. CEM II/B-S 42,5 N-NA jest wyzwaniem. Musi jednak być spełniony warunek, tzn. odbywać się to powinno w sposób przemyślany przy spełnieniu wszystkich niezbędnych wymagań określonych dla betonu. Zakłada się, że redukcja emisji eqCO₂ przy zastosowaniu receptury na beton wynikająca z zamiany cementu CEM I na CEM II/B-S wynosi około 32 %. To wartość znacząca w

perspektywie świadomej gospodarki emisjami. Należy jednak zaznaczyć, że zmiana ta może powodować w pewnym stopniu obniżenie niektórych cech fizycznych i mechanicznych betonu (np. rozwój wytrzymałości wczesnych w porównaniu do CEM I przy tej samej klasie betonu). W tym miejscu kluczowym wydaje się być postawienie pytania, co jest ważniejsze? Czy ograniczenie emisyjności za wszelką cenę bez pozytywnych doświadczeń z okresu eksploatacji? Jak zmiany materiałowe w rozwiązaniach recepturowych mogą wpłynąć na bezpieczeństwo operacji lotniczych? Zagadnienie owo zależne jest od trzech ogólnie ujmując składowych, tj. człowiek, statek powietrzny oraz otoczenie (w tym nawierzchnie lotniskowe) i wymaga pogłębionej analizy popartej zdobyciem kolejnych doświadczeń.

Wnioski jakie można sformułować na podstawie wyników uzyskanych w ramach przeprowadzonego programu badawczego, potwierdzają możliwość zastosowania cementu CEM II/B-S do produkcji betonu z przeznaczeniem na nawierzchnie lotniskowe. Należy wspomnieć, że przywołana w pracy norma obronna dopuszcza przecież stosowanie cementów innych niż CEM I, ale z wyłączeniem warstwy jezdnej. Ograniczenie to, wprowadzone zostało ze względu na konieczność uzyskania jak najwyższej jakości nawierzchni, jaka bez wątpienia niezbędna jest do zapewnienia bezpieczeństwa przy wykonywaniu operacji lotniczych. Patrząc na wyniki zrealizowanego programu badawczego ograniczenie to nadal pozostanie, gdyż ryzyko jakie przyniosłoby jego zdjęcie w dalszym ciągu jest na razie nieakceptowalne ze względu na brak długoterminowych doświadczeń polowych. Uzyskane w projekcie wyniki wskazują, że kierunek poszukiwań jest obiecujący.

Reasumując, nie można jednoznacznie wykluczyć, że w przyszłości stosowanie cementów z grupy CEM II będzie również dopuszczone w przypadku warstwy jezdnej nawierzchni lotniskowych wykonywanych w technologii betonu cementowego. W dalszym ciągu zasadne jest kontynuowanie prac w tym kierunku, np. poprzez badania sprawdzające parametry wytrzymałościowe i trwałościowe nawierzchni po dłuższym okresie eksploatacji w rzeczywistych warunkach ich użytkowania (wykonanej na elemencie funkcjonalnym lotniska mniej istotnym z punktu widzenia bezpieczeństwa operacji lotniczych, takim jak np. płyta postojowa przeznaczona do dla statków powietrznych o napędzie turbośmigłowym) oraz innych części nawierzchni infrastruktury lotniskowej.

Literatura

- [1] NO-17-A204:2025 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.
- [2] PN-V-83002:1999 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań.
- [3] Rudnicki T., Stałowski, P.: Performance research of cement concrete pavements with a lower carbon footprint. *Materials*, 2024, vol. 17(13), 3162. DOI: 10.3390/ma17133162 (mdpi.com/1996-1944/17/13/3162)
- [4] Rudnicki T.: The impact of the aggregate used on the possibility of reducing the carbon footprint in pavement concrete. *Sustainability* 2022, 14, 16478
- [5] NO-17-A207:2022 Nawierzchnie lotniskowe – Drogowe odcinki lotniskowe – Wymagania i badania.
- [6] Wesołowski M., Blacha K., Poświata A., (2023). Drogowe odcinki lotniskowe jako element infrastruktury krytycznej i obronnej państwa.
- [7] Szczerba J., Garbacik A., Mróz H.: Właściwości betonów z nowych rodzajów cementów portlandzkich z dodatkami według PN-B-19701. *Cement Wapno Beton*, 2000, t. 5/67, nr 4, s. 149-153

- [8] PN-EN 12350-3:2019-07 Badanie mieszanki betonowej – Część 3. Badanie konsystencji metodą Vebe.
- [9] PN-EN 12350-6: 2019-08 – Część 6. Gęstość.
- [10] PN-EN 12350-7:2019-08 - Część 7. Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- [11] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11 Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [12] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3 Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
- [13] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu - Część 5 Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [14] PN-EN 12390-6:2024-04 Badania betonu – Część 6 Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania
- [15] PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu – Część 8. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
- [16] PN-B-06265:2022-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- [17] PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [18] PN-B-19707:2023-05 Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności
- [19] D-05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego V03 z 01.2025 -źródło www.gov.pl/web/gddkia/nawierzchnie
- [20] Kowalska D., Wesołowski M., Rumak A., Poświata A., Zimowe utrzymanie nawierzchni lotniskowych z betonu cementowego w świetle wymagań normy NO-17-A205:2017, Konferencja Dni Betonu 2018.
- [21] Grabowski P. i in.: Protokół z pracy (z Orzeczeniem nr 19/24/2005): Określenie przydatności cementu CEM I 42,5 R z cementowni Rudniki do produkcji betonu na nawierzchnie lotniskowe, ITWL 2005
- [22] PN-EN 1542:2000 wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań - Pomiar przyczepności przez odrywanie