





dr inż. Daria Józwiak-Niedźwiedzka
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN



mgr inż. Danuta Kowalska
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

BETONOWE NAWIERZCHNIE LOTNISKOWE

– ocena jakości napowietrzenia betonu

Nawierzchnie lotniskowe narażone są na szkodliwe działanie różnych czynników, takich jak zamarzanie i odmarzanie, wpływ środków odladzających czy oddziaływania termiczne pochodzące od silników lotniczych. Aby zapewnić odporność betonu na te i inne czynniki, stosuje się wyłącznie betony napowietrzone.

W okresie użytkowania nawierzchnie lotniskowe oprócz obciążeń mechanicznych narażone są na szkodliwe działanie czynników zewnętrznych środowiska: zamarzanie i odmarzanie, działanie mediów występujących w procesie eksploatacyjnym, w tym głównie środków odladzających nawierzchnie, oddziaływanie termiczne pochodzące od silników lotniczych, wpływ wód opadowych i in. [1]. Dodatkowy destrukcyjny czynnik stanowią środki stosowane do odladzania samolotów.

Występujące w Polsce warunki klimatyczne, charakteryzujące się ok. 130 przejściami temperatury przez 0°C, kilkunastoma dniami z zamarzającą mżawką i dużą liczbą dni dżdżystych, są wyjątkowo niekorzystne dla trwałości nawierzchni, [2]. Aby zapewnić odporność betonu nawierzchni lotniskowych na działanie cyklicznego zamarzania i odmarzania w obecności środków odladzających stosuje się wyłącznie betony napowietrzone, zgodnie z normą PN-V-83002:1999 „Lotniskowenawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań”, [3]. Napowietrzanie mieszanki betonowej jest powszechnie przyjętym sposobem przeciwdziałania niszczeniu betonu na skutek naprężeń spowodowanych zwiększeniem się objętości

wody zamarzającej w kapilarach. Rozmiary porów w betonie zmieniają się w szerokim zakresie i wielkość porów jest dostępna dla wody. Jednak to nie łączna porowatość (objętość wolnych przestrzeni), ale rozkład porów, ich rozmiary i ciągłość wpływają na trwałość zaczynu cementowego i betonu. Związek między mrozoodpornością a strukturą porowatości stwardniałego zaczynu cementowego przyjęto określać wskaźnikiem rozmieszczenia porów powietrznych $\bar{L}$ (spacing factor), interpretowanym jako parametr powiązany z maksymalną odległością średniego punktu w zaczynie cementowym od brzegu najbliższego pora [4]. Innymi parametrami charakteryzującymi strukturę porów w betonie oprócz całkowitej porowatości i wskaźnika $\bar{L}$ są: powierzchnia właściwa układu porów powietrznych α oraz zawartość mikroporów mniejszych od 300 μm A300. Powierzchnię właściwą oblicza się jako iloraz całkowitej powierzchni porów powietrznych oraz ich objętości i jest ona wyrażona w $\text{mm}^2/\text{mm}^3 = \text{mm}^{-1}$. Parametr A300 określa zawartość powietrza w porach powietrznych o średnicy do 0,3 mm (300 μm) traktując je jako najbardziej skuteczną ochronę przed uszkodzeniem betonu podczas cykli zamrażania i odmrażania [5].

Ryc. 1
Zdjęcie przykładowego
odwiertu pobranego
z nawierzchni:
a) po dostarczeniu do
laboratorium,
b) po przecięciu



Piśmiennictwo:

1. Wang K., Nelsen D.E., Nixon W.A.: Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials. Cement and Concrete Composites, Vol. 28, 2, February, 2006, p. 173-188
2. Kowalska D., Grabowski P.: Środki odładzające stosowane na lotniskach z uwzględnieniem ich wpływu na środowisko, IV Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”, Wisła, 9-11 października 2006.
3. PN-V-83002:1999 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań.
4. Powers T.C.: The air requirement of frost-resistant concrete. Highway Research Board, Proceedings of the Annual Meeting 29, 1949, 184-211.
5. Józwiak-Niedzwiedzka D., Zapobieganie łuszczeniu powierzchni betonowych przy użyciu nawilżonego kruszywa lekkiego. Cz. I – stan wiedzy, Drogi i Mosty, 2/2006, p.37-54.
6. Ogólne Specyfikacje Techniczne. D-05.03.04, Nawierzchnia betonowa. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2003.
7. PN-EN 934-2:2002 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczyny. Domieszki do betonu. Definicje i wymagania.
8. ZTV Beton-StB 93, Uzupełniające techniczne warunki kontraktów i wytyczne w zakresie budowy betonowych nawierzchni dróg, Federalne Ministerstwo Komunikacji RFN, 1993.

W przypadku betonów narażonych na cykliczne zamarzanie i odmarzanie wymagania dotyczące parametrów struktury napowietrzenia są następujące:

- wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych $\bar{L} \leq 0,20\text{mm}$, [6], [7], [8];
- powierzchnia właściwa porów powietrznych $\alpha 16 - 24 \text{ mm}^{-1}$ (dop. 32 mm^{-1}) [9];
- zawartość powietrza w stwardniałym betonie – tu brak jest formalnych wymagań; proponuje się przyjąć wymagania dotyczące zawartości powietrza w mieszance betonowej na podstawie Katalogu GDDP [6]: średnio zawartość ta powinna wynosić 5,5%, przy minimum 5,0%; wg [8] wymaganie to można osłabić przyjmując jako min. 4,5% zawartości powietrza, pod warunkiem spełnienia podanych powyżej wymagań;
- zawartość mikroporów $A_{300} \geq 1,5\%$, [8].

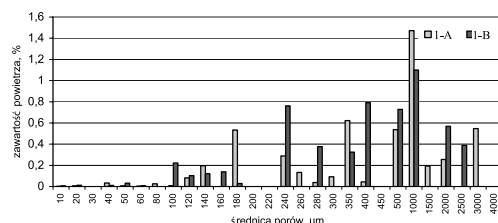
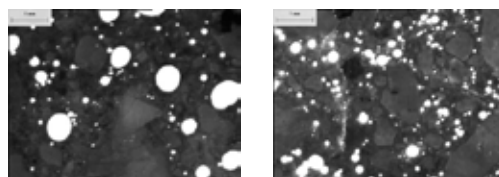
W artykule przedstawiono wyniki badań mikrostruktury czterech napowietrzonych betonów istniejących nawierzchni lotniskowych. Zaprojektowanie i wykonanie betonu zgodnie z przyjętą normą [12] nie jest wystarczającym warunkiem do otrzymania takich parametrów mikrostruktury betonu, które zapewniałyby jego odporność mrozową (zarówno zewnętrzną – odporność na powierzchniowe łuszczenie przy jednoczesnym działaniu środków odładzających, jak i wewnętrzną – odporność na wewnętrzne spękania lub zniszczenia). Koniecznym warunkiem jest sprawowanie ciągłego nadzoru technologicznego, od kontroli parametrów mieszanki, poprzez układanie aż do pobrania próbek z miejsca wbudowania betonu.

Wymagania dotyczące napowietrzenia betonu

Betonowa nawierzchnia lotniskowa to część pola wzlotów przeznaczona do ruchu, postoju i obsługi statków powietrznych, którą wykonano z betonu [11]. Nawierzchnie lotniskowe wykonywane są głównie z betonu cementowego klasy wytrzymałości C 30/37 lub C35/45 (B35 lub B45), ale również z betonu asfaltowego, który jednak wykazuje niską odporność wobec destrukcyjnego działania strumieni gorących gazów spalinowych. Trwałość, wytrzymałość oraz niezawodność i zapewnienie bezpieczeństwa startów i lądowań statków powietrznych wymagane są w przewidywanym okresie eksploatacji, czyli przez ok. 30 lat.

Podstawowe wymagania dotyczące stosowanych składników oraz wbudowywanej mieszanki betonowej a także metod badań nawierzchni lotniskowych z betonu cementowego określone są w normie woj-

Ryc. 2
Przykład rozmieszczenia i wielkości porów powietrznych w badanych betonach (beton nr1 – lewa fotografia, beton nr 2 – prawa fotografia)



Ryc. 3
Wykres procentowej zawartości powietrza w poszczególnych klasach średnic porów w betonie nr 1, próbka 1-A i próbka 1-B

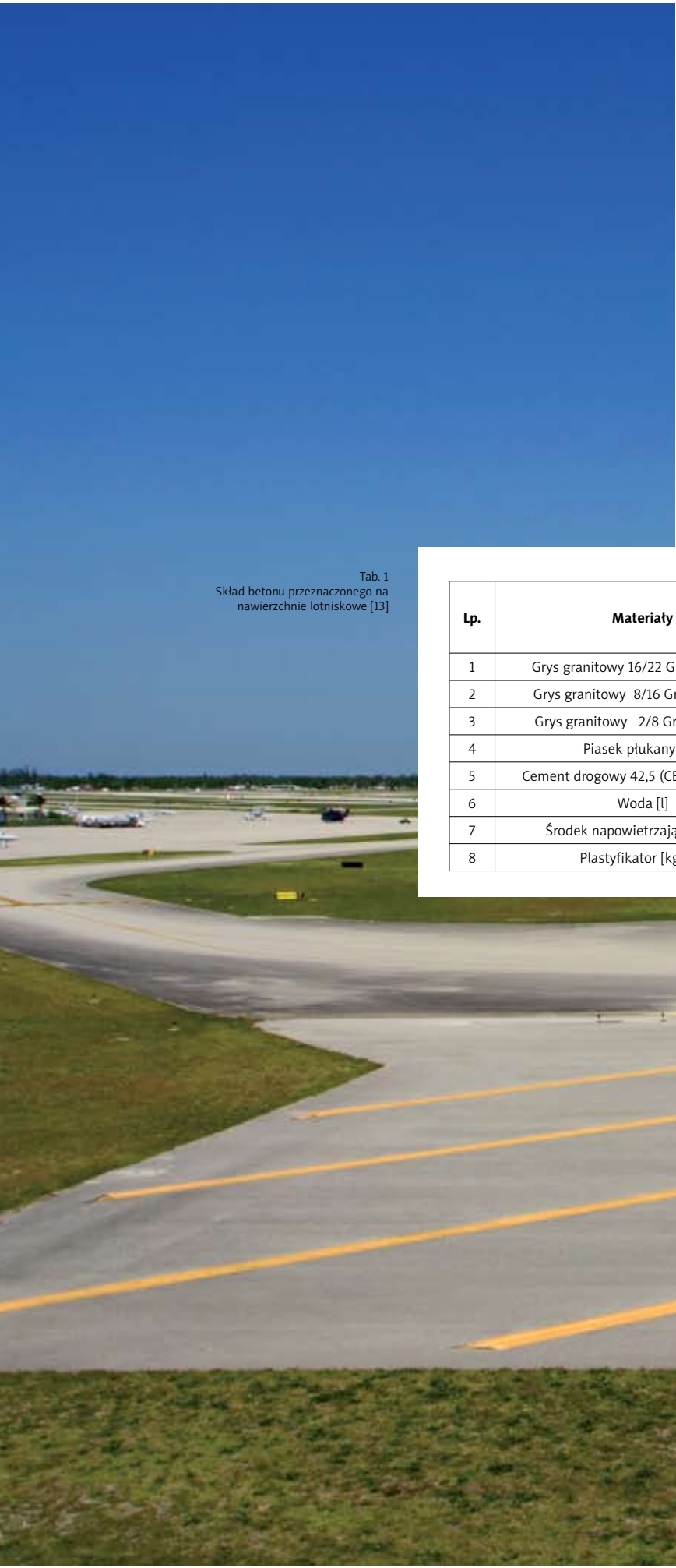
skowej PN-V-83002:1999 [12]. Do wytwarzania mieszanki betonowej stosuje się [13] kruszywo łamane o odpowiednim uziarnieniu zgodnym z krzywymi dobrego uziarnienia) oraz cement portlandzki CEM I 42,5 o oznaczonej zawartości alkaliów (max. 0,6 % w przeliczeniu na Na₂O). Ponieważ napowietrzenie betonu ma bardzo istotne znaczenie dla ochrony matrycy betonowej przed skutkami spowodowanymi zamarzaniem/rozmarzaniem, stosuje się środki napowietrzające.

Przykład składu betonów do nawierzchni lotniskowych [13] przedstawiono w tab. 1. Pozostałe wymagania to:

- wskaźnik $w/c \leq 0,40$,
- zawartość powietrza w mieszance betonowej $4,5 \div 5,5 \%$,
- stopień wodoprzepuszczalności W8, wg PN-88/B-06250,
- konsystencja od K2 do K4, w zależności od sposobu wbudowywania, wg PN-88/B-06250
- stopień mrozoodporności F200, wg PN-88/B-06250
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $R_{zg} \geq 5,5 \text{ MPa}$ określona na belkach $70 \times 15 \times 15 \text{ cm}$.

Wymaganie mrozoodporności betonu odnosi się tylko do mrozoodporności wewnętrznej beto-





Tab. 1
Skład betonu przeznaczonego na
nawierzchnie lotniskowe [13]

Lp.	Materiały	Ilość	
		Klasa B-40 C35/45	Klasa B35 C30/C37
1	Grys granitowy 16/22 Graniczna [kg]	430 - 450	620 – 660
2	Grys granitowy 8/16 Graniczna [kg]	320 - 360	150 - 230
3	Grys granitowy 2/8 Graniczna [kg]	410 - 460	360 - 430
4	Piasek płukany [kg]	550 - 595	550 - 570
5	Cement drogowy 42,5 (CEM I 42,5) [kg]	395	385
6	Woda [l]	152 - 155	146
7	Środek napowietrzający [kg/m³]	0,4 – 1,4	0,23
8	Plastyfikator [kg/m³]	0,60 – 0,85	3,0 – 3,5

nu oznaczanej zgodnie z normą PN-88/B-06250, [14]. Specyfikacje techniczne prac prowadzonych podczas budowy lub modernizacji lotnisk opracowywane są z uwzględnieniem postanowień normy PN- EN 206-1 [10], gdzie bierze się również pod uwagę odporność na powierzchniowe złuszczenie (dotyczy to np. obiektu 2, z którego pobrano próbki do badań). Ze względu na agresywne oddziaływanie zamarzania/rozmarzania ze środkami odladzającymi betony nawierzchniowe zalicza się do klasy ekspozycji XF4. Zalecane wartości graniczne dotyczące składu oraz właściwości betonu podane w normie PN-EN 206-1 [10] są następujące: minimalna zawartość cementu 340 kg/m3, w/c max. 0,45, minimalna zawartość powietrza w mieszance betonowej 4,0 %. Wartości te nie spełniają dotychczasowych wymagań [12] dla betonu stosowanego do budowy lotnisk wojskowych, które przewidują, że łączna zawartość cementu i kruszywa drobnego (od 0 do 0,25 mm) nie powinna przekraczać 450 kg w 1 m3 [3], maksymalne w/c = 0,4; zawartość powietrza w mieszance betonowej p = 4,5 – 5,5 %. Specyfikacje techniczne, oprócz obowiązku kontroli zawartości powietrza w mieszance betonowej, zawierają czasem zalecenie wykonania dodatkowo

badania równomierności rozmieszczenia pęcherzyków powietrza w betonie metodą mikroskopową.

Zalecaną zawartość powietrza w mieszance betonowej według Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztucznych [15] oraz wymagań dla lotnisk wojskowych w USA [18] przedstawiono w tab. 2.

Zgodnie z wymaganiami Federal Aviation Administration (FAA) [16] na beton na nawierzchnie lotniskowe maksymalna wartość w/c wynosi 0,45, przy czym w przypadku nawierzchni narażonych na zamarzanie/rozmarzanie i wpływ środków odladzających ustala się tę wartość na poziomie niższym. Zalecaną zawartość powietrza dla różnych warunków klimatycznych (określoną zgodnie z normą ASTM C231, [17]) podano w tab. 2.

Zgodnie z wymaganiami dla lotnisk wojskowych w USA [18], podobnie jak w przypadku lotnisk wojskowych w Polsce, tylko w wyjątkowych wypadkach wykonuje się nawierzchnie z betonu cementowego zbrojonego. W USA powszechnie stosuje się beton z dodatkiem popiołów lotnych i mielonego żużla wielkopiecowego. Dla lotnisk wojskowych, podobnie jak dla lotnisk cywilnych, zalecana wartość stosunku w/c w przypadku narażenia na agresję mrozową wynosi maksymalnie 0,45, a w przypadku narażenia na agresję siarczanową – maksymalnie 0,40 [19].

Beton, który będzie narażony na cykliczne zamarzanie i rozmarzanie w stanie nasycenia wodą, musi zawierać system odpowiednio rozmieszczonych porów powietrznych. Charakterystykę porów

powietrznych w stwardniałym betonie określa się wg normy PN-EN 480-11:2000 [21], w USA wg ASTM C457, [22]. Wymagany w USA wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie nawierzchniowym wynosi max. 0,20 mm [19], tyle samo co w [6].

Celem badań, których wyniki przedstawiono w artykule, było zdiagnozowanie mikrostruktury porów powietrznych w betonach pobranych z czterech istniejących nawierzchni lotniskowych.

Opis przeprowadzonych badań Badane betony

Betony wszystkich czterech nawierzchni charakteryzował taki sam wskaźnik wodno-cementowy równy 0,39. Jako kruszywo grube użyto gysu granitowego frakcji 2 – 8 mm, 8 – 16 mm oraz 16 – 22 mm, oraz piasek frakcji 0 – 2 mm. Betony były wykonane na cemencie CEM I 42,5R (zawartość cementu od 370 do 397 kg/m³). Betony zostały napowietrzone przy użyciu różnych środków, podanych w tab. 3. Z uwagi na sposób układania mieszanki betonowej, zróżnicowano konsystencję mieszanek. W tab. 3 pokazano również wyniki badania zawartości powietrza w mieszankach betonowych.

Opis badań struktury napowietrzenia

Badania zostały przeprowadzone na próbkach stwardniałego betonu pobranego w wieku bliskim wykonania badania wytrzymałości na ściskanie, tj. po ok. 28 dniach dojrzewania, z czterech wyko-

Piśmiennictwo:

9. Neville A. M.: Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
10. PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
11. Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. Wyd. Komunikacji i łączności Warszawa 1999.
12. PN-V-83002:1999 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.
13. Poświata A.: Własności fizykomechaniczne betonowych nawierzchni lotniskowych. Drogi nr 5-6/2008.
14. PN-88/B-06250 Beton zwykły.
15. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztucznych, GDDP, Opr. IBDiM, Warszawa 2001.
16. Advisory Circular: Standards for specifying construction of airports: AC 150/5370-10B Federal Aviation Administration. U.S., 2005 http://www.faa.gov/airports_airtraffic/airports/resources/draft_advisory_circulars/.

Tab. 2
Zalecana zawartość powietrza w mieszance betonowej, [15, 18]

Wg [15]		Maksymalny wymiar ziaren kruszywa (mm)	Zawartość powietrza w mieszance betonowej (% obj.)			
			Bez domieszki uplastyczniającej lub upłynniającej		Z domieszką uplastyczniającą lub upłynniającą	
			Średnia dzienna	Minimalna	Średnia dzienna	Minimalna
		32	4,0	3,5	5,0	4,5
Wg FAA [18]	Poziom narażenia	Zawartość powietrza [%]				
		Maksymalny wymiar ziaren kruszywa [mm]				
		51	38	25	19	13
	łagodny	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
	umiarkowany	4,0	4,5	4,5	5,0	5,5
	surowy	5,0	5,5	6,0	6,0	7,0

Poziom narażenia:

łagodny – brak narażenia na zamarzanie/rozmarzanie i środki odladzające. Poprawa urabialności przeważa nad względami trwałości,

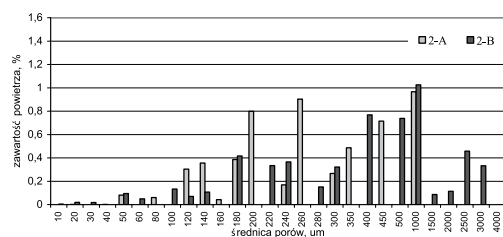
umiarkowany – występuje narażenie na zamarzanie/rozmarzanie, ale beton nie jest wcześniej poddany działaniu wilgoci

lub wody w długim okresie czasu, brak oddziaływania środków odladzających.

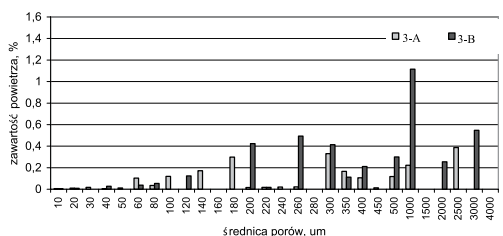
surowy – beton narażony na działanie środków odladzających i innych czynników agresywnych lub występuje ciągłe oddziaływanie wilgoci lub wody przed zamarzaniem.



Ryc. 4
Wykres procentowej zawartości powietrza w poszczególnych klasach średnic porów w betonie nr 2, próbka 2-A i próbka 2-B



Ryc. 5
Wykres procentowej zawartości powietrza w poszczególnych klasach średnic porów w betonie nr 3, próbka 3-A i próbka 3-B



nanych nawierzchni lotniskowych, płaszczyzny postępu samolotu lub drogi startowej. W tab. 4 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie (wartości średnie). Badania przeprowadzono na kostkach sześciennych o boku 150 mm, z wyjątkiem jednego betonu (nr 1 – odwiarty walco- we o średnicy 150 mm).

Przygotowanie próbek do badania parametrów charakteryzujących układ porów w stwardniałym zaczynie wymagało specjalnie opracowanej procedury, zastosowanej systematycznie do wszystkich próbek. W omawianych badaniach stosowa- no próbki o wymiarach 100×100×25 mm, wycięte z rdzeni pobranych z konstrukcji (ryc. 2).

Po oczyszczeniu i wysuszeniu próbki poddawane były wielokrotnemu szlifowaniu coraz drobniejszy- mi proszkami szlifierskimi (SiC). Po zakończeniu etapu szlifowania próbki podlegały kontroli jakości wykonania polegającej na precyzyjnym sprawdze- niu przygotowanego zglądu (np. brak pozostałości po środkach szlifierskich w porach, równe, okrągłe brzo- gi porów). Kolejnym etapem obróbki było kontrastowanie powierzchni zglądu w celu wyodręb- nienia porów z badanej powierzchni tak, aby mogły być łatwo rozpoznane przez system analizy obrazu. Po tej operacji zgląd betonowy z porami wypełnio- nymi kontrastującym z pozostałą częścią próbki bia- łym pigmentem był badany przy pomocy systemu automatycznej analizy obrazu. W celu zachowania jednakowych warunków przeprowadzanych testów, pomiary wykonywano w czasie nieprzekraczającym 2 godzin od zakończenia opisanej wyżej obróbki.

System automatycznej analizy obrazu (opisa- ny szczegółowo w [23]) posłużył do oznaczenia parametrów, charakteryzujących układ porów w stwardniałym betonie. W skład systemu wcho- dziły analizator obrazu Image Pro Plus 4.1 z dodatkowym modułem Scope Pro, mikroskop stereosko- powy Nikon SMZ800, kamera Sony DXC950P oraz stół skaningowy Marzhäuser SCAN 150x150.

Parametry charakteryzujące układ porów w stwardniałym betonach są następujące:

- całkowita zawartość powietrza A [%];
- wskaźnik rozmieszczenia porów $\bar{L}$ [mm];
- powierzchnia właściwa porów α [mm²/mm³];
- zawartość mikroporów $\leq 300 \mu\text{m}$ A300 [%],

Wyznaczono je wg zaleceń normy PN-EN 480- 11:2000, [21]. Badanie struktury porów przepro- wadzono za pomocą tzw. metody trawersowej (stosowanej również w normie ASTM C457 [22]).

Całkowita długość linii trawersowej na jednej prób- ce betonu wynosiła co najmniej 1200 mm. W celu określenia rozkładu wielkości porów analizowa- no rozkłady długości przecięcia linii trawersowej z porami powietrznymi. Na tej podstawie poszcze- gólne cięciwy zaklasyfikowane zostały do odpow- iednich klas długości.

Wyniki badań

W tabeli 5 zestawiono wartości parametrów struktury porów powietrznych w badanych beto- nach, wyniki z poszczególnych próbek (A i B) oraz średnie wartości. Otrzymano zróżnicowane wyniki całkowitej zawartości powietrza wszystkich beto- nów, w odróżnieniu od bardzo podobnych wyników badania porowatości w mieszankach betonowych metodą ciśnieniową (tab. 3).

Na ryc. 3 przedstawiono przykład próbek przygo- towanych do badania mikrostruktury porów powietrz- nych. Widać, że w betonie nawierzchni betonowej oznaczonej jako nr 1 znajduje się o wiele więcej, niż w betonie nr 2, porów powietrznych, których obecność nie jest wynikiem celowego zabiegu napo- wietrzenia mieszanki, (ang. air entrainment), lecz są pęcherzykami powietrza schwytanymi przypadko- wo, (ang. entrapped air). Są to duże pustki powietrzne o nieregularnym kształcie, o średnicy powyżej 2 mm.

Na ryc. 4 widać szczegółowe różnice w sposo- bie rozmieszczenia oraz wielkości i ilości wpro- wadzonych pęcherzyków powietrza w betonach nawierzchni nr 1 oraz nawierzchni nr 2. Choć beton nawierzchni nr 1 zawierał 4,30 % powietrza,



Piśmiennictwo:

- ASTM C231-08, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.
- Unified Facilities Criteria: Pavement design for airfields. UFC 3-260-02. U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, Department for the Army, 2001, <http://www.tpub.com/content/UFGScriteria/ufc3-260-2/ufc3-260-20002.htm>.
- Report IPRF-01-G-002-1: Best practices for airport portland cement concrete pavement construction (rigid airport pavement). Innovative Pavement Research Foundation, 2003, <http://ntlsearch.bts.gov/tris/record/tris/00960830.html>.
- Nita P.: Budowa lotniskowych nawierzchni betonowych oraz system ich technicznej oceny. Konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB Krynica 2006.
- PN-EN 480-11:2000, Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, PKN, Warszawa 2000.
- ASTM C457, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, 1991, 229-241.
- Brandt A.M. et al.: Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych, IPPT PAN, NATO Scientific Affairs Division, Warszawa 2003, p.218.

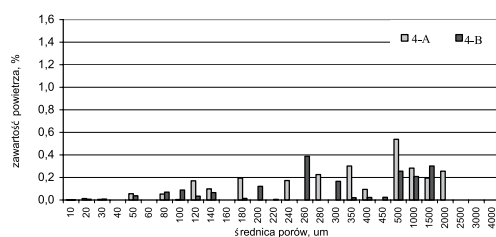
Oznaczenie nawierzchni	Baza domieszki upłynniającej	Baza domieszki napowietrzającej	Konsystencja	Porowatość
				V _v [%]
1	naftaleno-sulfoniany	żywice naturalne	plastyczna	5,0
2	naftaleno-lignosulfoniany	syntetyczne tensydy	gęstoplastyczna	4,9
3	sulfonowane polikondensaty naftalenowe i melaminowe	syntetyczne tensydy	gęstoplastyczna	4,6
4	-	wodny roztwór soli amin alifatycznych i detergentów*	gęstoplastyczna	4,6

*domieszka kompleksowa

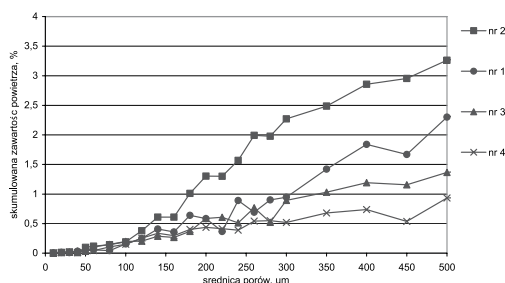
Tab. 3
Zastosowane domieszki oraz porowatość mieszanek badana metodą ciśnieniową



Ryc. 6
Wykres procentowej zawartości powietrza w poszczególnych klasach średnic porów w betonie nr 4, próbka 4-A i próbka 4-B



Ryc. 7
Skumulowana zawartość powietrza w betonach w funkcji średnicy porów w zakresie do 500 µm



to jednak pozostałe parametry odbiegały od ogól- nie przyjętych za właściwe z uwagi na trwałość mrozową. Najlepsze wyniki pod względem ilości, wielkości oraz sposobu rozmieszczenia pęcherzy- ków powietrza wykazał beton nawierzchni nr 2, tj. $A > 5\%$, $\bar{L} < 0,20$, $\alpha > 20$ and $A300 > 1,5$.

Na ryc. 5 zaprezentowano przykład rozmiesz- czenia i wielkości porów powietrznych w dwóch próbkach A i B pochodzących z jednego odwiertu (beton nawierzchni nr 2). Wyraźnie widać, że choć całkowita zawartość powietrza w obu próbkach jest niemal identyczna, ok. 5%, to jednak duże różnice występują w zawartości mikroporów (A300) oraz we współczynniku rozmieszczenia porów (α). Próbka 2-A, pobrana z górnej części nawierzchni (odwier- tu), mająca kontakt ze szkodliwym działaniem czynników zewnętrznych środowiska wykazuje lep- sze parametry mikrostruktury porów powietrznych.

Największą wartość współczynnika rozstawu porów oraz najmniejszą zawartość mikroporów wyka- zał beton pobrany z nawierzchni nr 4, wykonany bez dodatku domieszki upłynniającej, jedynie z domiesz- ką napowietrzającą. Beton nawierzchni nr 3 wykazał dwukrotnie mniejszą zawartość powietrza, niż wyka- zało badanie porowatości mieszanki betonowej.

Przeprowadzono również analizę rozkładu wiel- kości porów na podstawie zmierzonych wielkości cięciw, ryc. 7 – 10. Na wykresach przedstawiono procentową zawartość powietrza w poszczę- gólnych klasach średnic zarówno w próbkach A (gór- na część nawierzchni), jak i B (dolna część nawierzch- ni) w poszczególnych betonach. Wykresy na ryc. 8 i 10 pokazują tendencje zmian rozkładu wielko- ści porów w betonie o najlepszych parametrach napowietrzenia (beton nawierzchni nr 2), oraz naj- gorszych (beton nawierzchni nr 4). Jak pokazano na wykresie (ryc. 10), przeważająca część porów w stwardniałym betonie nawierzchni nr 4 ma śred- nice w granicach od 0,50 mm do 1,5 mm. W betonie nawierzchni nr 2 większość porów również mieści się w przedziale ok. 1 mm, jednak zawartość powie- trza jest znacząco większa, ok. 1%, w odróżnieniu od 0,4% w betonie nr 4.

Na ryc. 11 przedstawiono skumulowaną zawar- tość powietrza w betonach wszystkich czterech nawierzchni w funkcji średnicy porów w zakresie do 500 µm. Zauważalne różnice w wielkości śred- nic porów powietrznych zaczynają się od średnic rzędu 150 µm, przy czym rozróżnienie między beto- nami nawierzchni nr 1, 3 oraz 4 następuje dopie- ro przy średnicach 350 µm, natomiast dla betonu nawierzchni nr 4 już przy 180 µm.

Wnioski

Zastosowanie metody automatycznej analizy obrazu pozwoliło na ocenę mikrostruktury napo- wietrzenia wybranych nawierzchniowych betonów lotniskowych. Z przeprowadzonych badań diagno- stycznych czterech nawierzchni lotniskowych wyni- ka, że wskaźnik rozmieszczenia porów powietrz- nych w betonie zawierał się w granicach 0,18 – 0,31 mm, natomiast ich powierzchnia właściwa wyno- siła od 16,07 mm² do 35,52 mm². Nie wszystkie parametry struktury porów powietrznych spełniły wymagania specyfikacji [6]. Uzyskanie żądanych parametrów mikrostruktury porów powietrznych w betonach nawierzchniowych z uwagi na ich trwałość mrozową nie jest łatwe do wykonania. Pomimo zastosowania środków napowietrzających i spełnienia wymagań normowych co do łącznej objętości porów, w betonach nawierzchni 1, 3 i 4 nie uzyskano właściwej struktury porów. Jedynie beton

Oznaczenie nawierzchni	1	2	3	4
Wytrzymałość na ściskanie badana po 28 dniach, MPa	41,2*	57,7	54,9	50,5

Tab. 4
Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie

* f_c mierzona na walcach wyciętych z konstrukcji

nawierzchni oznaczonej numerem 2 spełnił wymaganie wg [6], [24] $\bar{L} \leq 0,20$ mm. Porównanie rozkładu wielkości porów w betonie pozwala jednoznacznie odróżnić struktury porów powietrznych, ryc. 8 i 10. Można przewidywać, że 3 z 4 nawierzchni nie wykażą odporności na cykliczne zamrażanie przy zastosowaniu środków do odladzania, co w konsekwencji spowoduje konieczność szybkiej naprawy badanej części nawierzchni lotniskowej z uwagi na względy bezpieczeństwa.

Norma dotycząca wykonywania lotniskowych nawierzchni z betonu cementowego, [3] ogranicza dobór składników mieszanki betonowej do rodzaju cementu CEM I 42,5 (lub cement drogowy klasy nie niższej niż 42,5) oraz do jednego rodzaju kruszywa grubego – grys granitowego o maksymalnym wymiarze ziarna 32 mm. Dlatego też należy wziąć pod uwagę zagadnienie kompatybilności domieszek upłynniających oraz napowietrzających z cementem sprawdzane na składach roboczych podczas próby technologicznej. Także z uwagi na klasę środowiska XF4, badanie odporności betonu nawierzchniowego na powierzchniowe łuszczenie jest zalecane z uwagi na określenie jego trwałości mrozowej w obecności środków stosowanych do zimowego utrzymania lotnisk w postaci stałej lub w postaci roztworów takich jak np. octan sodu, mrówczan sodu czy mocznik.

Artykuł stanowi rozszerzoną wersję referatu przedstawionego na konferencji „Dni Betonu. Tradycja i Nowoczesność”, Wista 2008, s. 719 – 727

Tab. 5
Badane parametry mikrostruktury porów powietrznych

Oznaczenie nawierzchni		Zawartość powietrza	Wskaźnik rozstawu porów	Powierzchnia właściwa	Zawartość mikroporów
		A, [%]	$\bar{L}$ [mm]	α [mm ⁻¹]	A ₃₀₀ [%]
1	1-A	4,09	0,30	16,07	0,89
	1-B	4,51	0,25	18,75	1,01
	Wartość średnia	4,30	0,28	17,4	0,95
2	2-A	5,13	0,18	24,21	2,81
	2-B	5,11	0,22	19,49	1,73
	Wartość średnia	5,12	0,20	21,8	2,27
3	3-A	1,74	0,20	35,52	0,95
	3-B	2,78	0,31	18,61	0,83
	Wartość średnia	2,26	0,26	27,1	0,89
4	4-A	1,34	0,29	27,37	0,54
	4-B	1,68	0,28	26,40	0,50
	Wartość średnia	1,51	0,29	26,8	0,52

