BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-B/2012
ZESZYT 20
ROK 109
ISSUE 20
YEAR 109

ANDRZEJ SERUGA, TERESA SERUGA*

PRZYDATNOŚĆ UŻYTKOWA BETONOWYCH NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH

SERVICE LIVES OF AIRPORT CONCRETE PAVEMENTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy związane z projektowaniem i wykonawstwem betonowych nawierzchni lotniskowych. W szczególności przeanalizowano takie czynniki jak rodzaj cementu, uziarnienie kruszywa, skład mieszanki betonowej oraz takie właściwości mechaniczne jak wytrzymałość betonu na ściskanie i zginanie, które mają wpływ na trwałość betonu. W oparciu o wyniki otrzymane z badań doświadczalnych prowadzonych w Polsce i w USA stwierdzono, że zastosowanie cementu z udziałem żużla wielkopiecowego zwiększa wytrzymałość betonu na zginanie i obniża przepuszczalność betonu. Biorąc pod uwagę wnioski wynikające z analizy, uznano, że do wykonywania betonowych nawierzchni lotniskowych w Polsce powinien być stosowany cement typu CEM II/B-S 42,5 N.

Słowa kluczowe: *nawierzchnie lotniskowe*, *betonowe nawierzchnie dyblowane*

Abstract

In the paper there are presented the problems dealing with the design and execution of airport concrete pavements. Such factors as type of cement, aggregate gradation, compressive strength, flexural strength influenced on concrete durability were particularly analyzed. Based on the results of experimental investigation conducted in Poland and USA it can be concluded that slag cement increases the flexural strength and decreases the permeability of the concrete. Taking into consideration this findings the slag cement type CEM II/B-S42,5 N should be used in concrete mix, to construction of airport concrete pavement in Poland.

Keywords: *airport concrete pavements*, *dowel jointed concrete pavements*

* Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK, dr inż. Teresa Seruga, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Przydatność użytkowa nawierzchni lotniskowych ma istotny wpływ na funkcjonowanie portów lotniczych i we wszystkich krajach jest ważnym problemem. Obserwowany w ostatnich latach, szczególnie w Polsce, intensywny wzrost ruchu lotniczego z jednoczesnym wzrostem masy samolotów jest przyczyną częstych napraw istniejących nawierzchni. Zakres napraw, łącznie z koniecznością położenia nowych nawierzchni przy zapewnieniu ciągłości lotów, bez zamykania lotniska, uzależniony jest od rodzaju nawierzchni i zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Nawierzchnie asfaltowo-betonowe wymagają częstszych napraw i mimo iż można je wykonać w krótszym czasie niż nawierzchnie betonowe na cemencie portlandzkim, obserwuje się powszechną tendencję do wykonywania nawierzchni betonowych. Okazuje się, iż opłacalne jest poniesienie większych kosztów początkowych związanych z wykonaniem nawierzchni betonowych przy zapewnieniu maksymalnego okresu przydatności użytkowej i obniżeniu kosztów utrzymania nawierzchni.

Nawierzchnie betonowe mogą być wykonywane jako łączone dyblowane, zbrojone w sposób ciągły lub z betonu sprężonego. Nie analizując efektywności zastosowania poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych, należałoby się w pierwszej kolejności skupić na mieszance betonowej i właściwościach mechanicznych betonu stwardniałego.

2. Beton do nawierzchni – wybrane wymagania normowe

W 2007 roku Polski Komitet Normalizacyjny zatwierdził normy [1–3] dotyczące nawierzchni betonowych. Zgodnie z normą [1] nawierzchnia betonowa jest to warstwa betonowa przeznaczona do przenoszenia obciążeń od ruchu pojazdów i odporna na warunki środowiskowe. Wśród wymienionych rodzajów nawierzchni podana jest nawierzchnia betonowa łączona niezbrojona, łączona zbrojona i betonowa zbrojona w sposób ciągły. Do tej grupy nawierzchni należy dodać nawierzchnie z betonu sprężonego, które często stosowane są na lotniskach.

Przytoczone normy są tak skonstruowane, że sformułowanie wytycznych dla projektanta mieszanki betonowej wymaga dodatkowo przestudiowania kilku innych norm związanych. Ponadto w wielu przypadkach podawane są ogólne wymagania, jakim powinien odpowiadać beton, a bardziej szczegółowe dane, dotyczące np. kruszywa [4] i cementu winny być sprecyzowane dla projektantów w formie wymagań krajowych. Podstawowym parametrem betonu dla nawierzchni jest wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu, często określana jako wytrzymałość na zginanie. W normie [1] w tabeli 2 podano błędną definicję wytrzymałości na zginanie: „…badana na kostkach sześciennych o przekroju…” (winno być: na belkach o przekroju poprzecznym 150 × 150 mm).

W normie [2] dotyczącej wymagań funkcjonalnych dla nawierzchni betonowych nie ma żadnej wzmianki o sposobie kontrolowania wytrzymałości na zginanie, a przecież ta wielkość decyduje o grubości nawierzchni betonowej.

Jeśli chodzi o składniki betonu, to należy stosować tylko materiały dopuszczone przez normę [5] i dobierać je w taki sposób, aby spełnione zostały wymagania podane w normie [5] zarówno dla niezwiązanego jak i związanego betonu. Gdy w beton wbudowane są ele-

menty stalowe niezabezpieczone przed korozją (kotwy, dyble i pręty zbrojeniowe), całkowita zawartość jonów chlorkowych nie powinna przekroczyć 0,40% masy cementu, zgodnie z normą [5].

Oddziaływanie środowiska sklasyfikowane jest w postaci klas ekspozycji. Jezdnie dróg i mostów, narażone na zamrażanie/odmrażanie bez środków odladzających albo ze środkami odladzającymi, należy zaliczyć zgodnie z normą [5] do klasy XF4. W załączniku F do normy [5] podane są zalecenia dotyczące granicznych wartości parametrów betonu. Do wykonywania konstrukcji betonowych w klasie ekspozycji XF4 zaleca się stosować beton o następujących wymaganiach:

– minimalna klasa wytrzymałości na ściskanie C30/37,
– maksymalny stosunek w/c = 0,45,
– minimalna zawartość cementu 340 kg/m^3,
– kruszywo o odpowiedniej mrozoodporności zgodnie z normą [4].

Rodzaje i klasy kruszywa dopuszczone do stosowania powinny być określone w odpowiednich normach krajowych lub specyfikacjach. Maksymalny wymiar ziaren kruszywa nie powinien przekraczać jednej czwartej (1/4) grubości warstwy. Do wykonywania nawierzchni betonowych łączonych zbrojonych oraz nawierzchni betonowych zbrojonych w sposób ciągły, maksymalny wymiar kruszywa nie powinien przekraczać jednej trzeciej (1/3) odległości w świetle między podłużnymi prętami zbrojeniowymi.

Rodzaj cementu powinien być dobrany zgodnie z EN 206-1 [5] dla określonej klasy betonu. Dodatkowe wymagania mogą być określone przez odpowiednie normy krajowe lub też przez specyfikacje dotyczące miejsca zastosowania.

Mechaniczna wytrzymałość betonu powinna być określona w zakresie następujących właściwości mechanicznych:

– wytrzymałość na ściskanie zgodnie z normą EN 12390 – 3 [6],
– wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu wg EN 12390 – 6 [7],
– wytrzymałość na zginanie wg EN 12390 – 5 [8].

Pobrane do badań próbki betonowe powinny być pielęgnowane zgodnie z normą [9].

Klasę wytrzymałości betonu na ściskanie należy określić zgodnie z normą [5], natomiast klasę wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu i klasę wytrzymałości betonu na zginanie zgodnie z tabelami odpowiednio 1 i 2 [1].

Tabela 1

Klasy wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu, f_{sk}

Klasa wytrzymałości	f_{sk} [N/mm^2]	Klasa wytrzymałości	f_{sk} [N/mm^2]
S 1,3	1,3	S 3,3	3,3
S 1,7	1,7	S 4,0	4,0
S 2,0	2,0	S 5,0	5,0
S 2,4	2,4	S 5,5	5,5
S 2,7	2,7	S 6,0	6,0
S 3,0	3,0		

f_{sk} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach dojrzewania betonu, określona na próbkach cylindrycznych $\phi 150 \times 300$ mm.

Tabela 2

Klasy wytrzymałości betonu na zginanie, f_{fk}

Klasa wytrzymałości	f_{fk} [N/mm^2]	Klasa wytrzymałości	f_{fk} [N/mm^2]
F 2	2,0	F 5,5	5,5
F 3	3,0	F 6,5	6,5
F 3,5	3,5	F 8,5	8,5
F 4	4,0	F 9	9,0
F 4,5	4,5	F 10	10,0

f_{fk} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na zginanie po 28 dniach dojrzewania betonu, określona na belkach o przekroju poprzecznym 150 × 150 mm.

Obowiązująca do niedawna norma [10] nakazywała stosować do produkcji betonów nawierzchniowych kruszywo łamane, a w szczególności granitowe. Maksymalna wielkość ziaren kruszywa grubego nie powinna przekraczać 32 mm. W przypadku wykonywania niewielkich fragmentów robót powierzchniowych, norma ta dopuszczała stosowanie kruszywa do 16 mm.

Do budowy nawierzchni lotniskowych z betonu cementowego należało stosować czysty klinkierowy cement portlandzki CEM I 42,5 lub cement drogowy, klasy nie niższej niż 42,5. Cement miał mieć oznaczoną alkaliczność. Graniczna jej wartość nie powinna była przekraczać 0,6% w przeliczeniu na Na_2O. Skład mieszanki betonowej można było projektować dowolną metodą, zapewniając stosunek wodno-cementowy w/c poniżej 0,40. W świetle wytycznych normowych łączna zawartość cementu i kruszywa drobnego (od 0 do 0,25 mm) nie powinna była przekraczać 450 kg na 1 m^3 betonu. W tabeli 4 normy [10] zamieszczono właściwości fizykomechaniczne, którym powinien odpowiadać beton cementowy B35 stosowany do budowy lotniskowych nawierzchni z betonu cementowego. Poniżej podano niektóre z nich:

- wytrzymałość gwarantowana na ściskanie ≥ 35 MPa,
- wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, określona na kostkach 150 × 150 × 150 mm ≥ 45 MPa,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach, określona na belkach 150 × 150 × 700 mm ≥ 5,5 MPa,
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu ≥ 4,0 MPa,
- po 7 dniach dojrzewania w warunkach naturalnych, wytrzymałość betonu na ściskanie powinna odpowiadać klasie B30 (wg [10]).

Z ostatnio publikowanych prac dotyczących realizacji nawierzchni betonowych o grubości 0,2–0,3 m wynika, iż do produkcji mieszanki betonowej stosowany jest cement portlandzki CEM I 42,5 i kruszywo o uziarnieniu do 16 mm. Ponadto zakłada się między innymi następujące parametry betonu nawierzchniowego:

- klasa betonu C35/45,
- klasa ekspozycji XF4,
- stosunek w/c < 0,45,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach dojrzewania betonu, określona na belkach o przekroju poprzecznym 150 × 150 mm ≥ 5,5 MPa,
- zawartość powietrza 3,5–6,0%.

W podawanych wynikach badań doświadczalnych przytaczana jest wytrzymałość na ściskanie, zawartość powietrza, mrozoodporność, natomiast nie ma żadnych informacji na temat wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (wytrzymałości na zginanie). Nasuwa się zatem pytanie, czy jest ona kontrolowana, zarówno na etapie projektowania składu mieszanki betonowej przez właściwe laboratoria, jak i w chwili układania nawierzchni betonowej na danym odcinku. Jeśli jest kontrolowana, to jaka jest jej wartość w stosunku do wartości projektowanej?

Należy zauważyć, że nie ma jednoznacznie określonej zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, a wytrzymałością na rozciąganie betonu przy zginaniu. Relacje podawane w normach są bardzo przybliżone. Wytrzymałość betonu na zginanie zależy w dużym stopniu od rodzaju zastosowanego kruszywa, wielkości uziarnienia, od warunków pielęgnacji betonu oraz od stopnia napowietrzenia. Z nielicznych danych wynika, że zależy ona również od rodzaju zastosowanego cementu.

3. Własne badania doświadczalne

W 2010 roku na jednym z krajowych lotnisk budowano drogę kołowania. Jako rozwiązanie konstrukcyjne przyjęto nawierzchnię łączoną niezbrojoną dyblowaną, która była betonowana pasami o szerokości 10,0 m. W kierunku podłużnym zastosowano kotwy stalowe, natomiast w kierunku poprzecznym dyble stalowe powlekane. Ogólny widok nawierzchni podczas osadzania kotew w pasmach już zabetonowanych przedstawiono na rys. 1. Na rysunkach 2 i 3 pokazano proces układania mieszanki betonowej. Zabetonowane pasma nacinano w obu kierunkach, w wyniku czego rozstaw szczelin utrzymany był w układzie 5,0 × 5,0 m. Widok krzyżujących się nacięć przedstawiono na rys. 4.



Rys. 1. Ogólny widok nawierzchni podczas osadzania kotew

Fig. 1. General view of concrete pavement during mounting of dowels



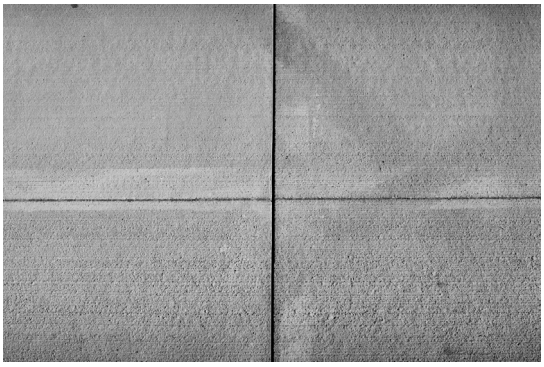
Rys. 2. Betonowanie pasa płyty kołowania

Fig. 2. Taxi-way under construction



Rys. 3. Betonowanie pasa płyty kołowania

Fig. 3. Taxi-way under construction



Rys. 4. Krzyżujące się nacięcia podłużne i poprzeczne nawierzchni

Fig. 4. Cross saw cuting of concrete pavement

Tabela 3

Rozwój wytrzymałości betonu na ściskanie

Wiek [dni]	WYTRZYMAŁOŚĆ BETONU NA ŚCISKANIE			
	kostki 150 × 150 × 150 mm		walce Ø150 × 300 mm	
	f_c	$f_{c,śred}$, ν	f_c	$f_{c,śred}$, ν
	[MPa]	[MPa], [%]	[MPa]	[MPa], [%]
2			20,94 21,39 19,31	20,55 5,33
3	26,67 28,00 28,00	27,56 2,79		
4			24,98 26,60 25,47 26,88	25,98 3,47
7	39,11 35,55 37,33	37,33 4,77	30,56 35,14 28,80	31,50 10,39
28	45,56 46,44 48,89	46,96 3,67	42,78 38,52 36,65 38,48	39,11 6,65
90	51,78 50,67 54,22 53,33	52,50 3,01	47,78 44,14 43,01	44,98 5,54

Do wykonania betonu o projektowanej klasie B 40 zastosowano kruszywo granitowe o uziarnieniu do 16 mm i cement portlandzki CEM I 42,5 HSR. Podczas betonowania jednego z odcinków nawierzchni pobrano próbki walcowe ϕ 150 × 300 mm, kostki 150 × 150 × × 150 mm, belki o wymiarach 150 × 150 × 600 mm oraz belki o wymiarach 100 × 100 × × 500 mm. Badania doświadczalne przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej:

– wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu została określona na próbkach 150 × 150 × 150 mm [7],
– wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe została określona na próbkach ϕ 150 × × 300 mm [11].

Otrzymane wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie zestawiono w tabelach 3 i 4. W tabelach tych podano również wartości współczynników zmienności ν. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono odpowiednio rozwój wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie w okresie do 90 dni dojrzewania.

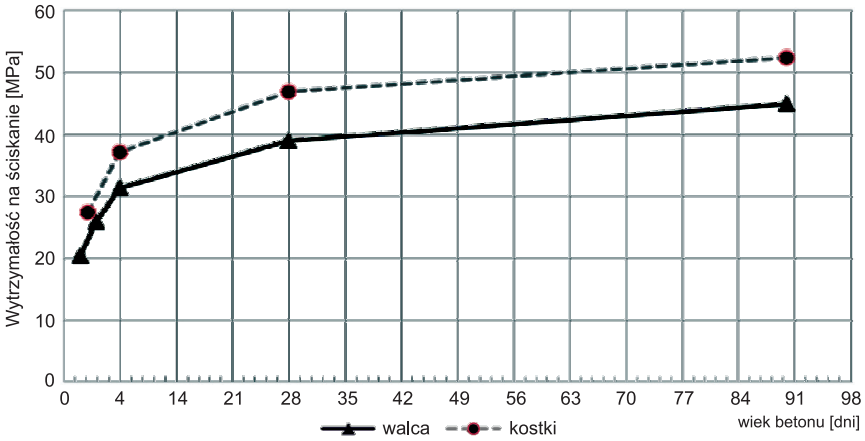
Tabela 4

Rozwój wytrzymałości betonu na rozciąganie

Wiek [dni]	WYTRZYMAŁOŚĆ BETONU NA ROZCIĄGANIE					
	przy rozłupywaniu		osiowe		przy zginaniu	
	$f_{ct,spl}$	$f_{ct,spl,śred}$, ν	$f_{ct,d}$	$f_{ct,d,śred}$, ν	$f_{ct,b}$	$f_{ct,b,śred}$, ν
	[MPa]	[MPa], [%]	[MPa]	[MPa], [%]	[MPa]	[MPa], [%]
3					3,57 3,37 3,47	3,47 2,88
7	2,83 2,68 2,94	2,82 4,63	1,82 1,90 1,74	1,82 4,40	3,73 4,00 4,13	3,95 5,16
28	3,31 3,28 3,54	3,38 4,21	2,11 2,16 2,00	2,09 3,92	4,60 4,80 4,53	4,64 3,02
90	3,54 3,62 3,51 3,71 3,55	3,59 2,24	2,32 2,40 2,24	2,32 3,45	5,25 5,07 4,93	5,08 3,16

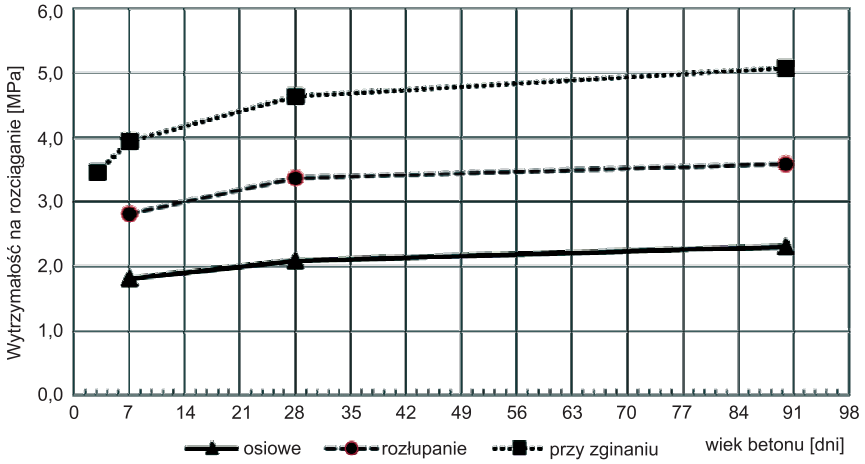
W oparciu o przedstawione wyniki otrzymane z badań doświadczalnych można wysnuć następujące wnioski:

– wytrzymałość betonu na ściskanie określona na kostkach 150 × 150 × 150 mm oraz na walcach ϕ 150 × 300 mm [6] po 28 dniach dojrzewania betonu spełnia założone wymagania projektowe,
– wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu określona na belkach 150 × 150 × × 600 cm [8] po 28 dniach dojrzewania betonu wynosi 4,64 MPa i jest niższa od 28 dniowej wytrzymałości, projektowanej na poziomie 5,5 MPa.



Rys. 5. Rozkład wytrzymałości betonu na ściskanie

Fig. 5. Concrete compressive strength distribution



Rys. 6. Rozkład wytrzymałości betonu na rozciąganie

Fig. 6. Concrete tensile strength distribution

4. Doświadczenia z realizacji nawierzchni lotniskowych w Nowym Jorku

Z problemem polepszenia zdolności użytkowej nawierzchni lotniskowych musiały się zmierzyć również władze trzech portów lotniczych (John F. Kennedy International, Newark Liberty International i La Guardia) obsługujących New York City w U.S.A. W celu zwiększenia trwałości nawierzchni Zarząd Portu Lotniczego zatwierdził receptury mieszanek betonowych i zaakceptował do realizacji niezbędny program badawczy dotyczący opracowania składu mieszanki betonowej i zaprojektowania nawierzchni łączonej dyblowanej [12].

4.1. Mieszanki betonowe

- nominalne maksymalne ziarno kruszywa, 50 mm,
- całkowita objętość kruszywa ma stanowić co najmniej 70% mieszanki betonowej, ograniczając tym samym zawartość zaczynu, minimalizując zarysowanie skurczowe i wywinięcie nawierzchni,
- stosunek w/s ≤ 0,45,
- zawartość powietrza w mieszance betonowej 5% ± 1,5%,
- minimalna 28 dniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu 4,8 MPa (wg ASTM C78),
- w celu obniżenia potencjalnego zagrożenia ze strony siarczanów lub reaktywności alkaliczno-krzemionkowej oraz aby zmniejszyć przepuszczalność betonu, zezwolono na zastąpienie cementu portlandzkiego popiołem lotnym lub żużlem wielkopiecowym odpowiednio w ilości 30% i 40%.

4.2. Nawierzchnia łączona dyblowana

W stosunku do obowiązujących zaleceń Federal Aviation Administration (FAA), w myśl których rozstaw nacięć należy przyjmować co 6 m dla nawierzchni o grubości większej lub równej 406 mm, zezwolono na zwiększenie rozstawu do 8 m. Daje to oszczędności rzędu 20%, w wyniku redukcji liczby dybli poprzecznych, nacięć betonu i ich wypełnienia.

W 1998 roku przedłużono pas startowy w Międzynarodowym Porcie Lotniczym Newark Liberty, spełniając wymagania stawiane projektowanej nawierzchni betonowej. Dwu wykonawców układało 115 000 m^3 betonu. Jeden z nich do układania betonu zastosował metodę ślizgową, a drugi użył stałych deskowań bocznych. Składy mieszanek betonowych były identyczne, przy czym drugi wykonawca zastosował domieszkę w dużym stopniu redukującą wodę w celu zwiększenia opadu stożka.

Aby zapewnić wykonanie mieszanki betonowej o wymaganym uziarnieniu bez segregacji kruszywa, zastosowano cztery przedziały uziarnienia; trzy przedziały dla kruszywa grubego: 50 do 25 mm, 25 do 4,75 mm i 9,5 do 2,36 mm oraz piasek. Producent betonu zmieszał dostępne na rynku trzy rodzaje kruszywa z piaskiem. Mieszanka była urabialna i nie ulegała segregacji. Zastosowanie kruszywa o większym uziarnieniu skutkowało powstaniem bardzo drobnych rys w wyniku skurczu betonu pomimo zwiększenia rozstawu nacięć do 8 m.

Skład mieszanki betonowej ułożonej metodą ślizgową i wyniki badań przeprowadzonych w warunkach polowych podano w tabeli 5. Jako uzupełnienie normowo prowadzonych badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (belki o wymiarach 150 × 150 × 510 mm),

przeprowadzono badania wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Po 12 latach użytkowania nawierzchnia przedłużonego pasa startowego jest w bardzo dobrym stanie. Autorzy pracy [12] stwierdzają, że duża objętość betonu została ułożona przez niedopatrzenie bez dodatku napowietrzającego. Pomimo tego, nie ma widocznych śladów zniszczenia w wyniku zamarzania i rozmrażania betonu. Podkreśla się również niską przepuszczalność betonu.

4.3. Wpływ udziału żużla wielkopiecowego w składzie betonu na jego cechy użytkowe

Wprowadzenie granulowanego żużla wielkopiecowego do cementu portlandzkiego wpływa na strukturę i mikrostrukturę stwardniałego zaczynu cementowego. Podstawowym składnikiem fazowym stwardniałego zaczynu cementu żużlowego jest faza CSH. Charakteryzuje się ona niskim stosunkiem C/S (1–1,5), skutkiem czego mogą się wbudowywać w jej strukturę obce jony takie jak Na^{+}, MG^{2+}. Faza CSH występuje w zaczynie w postaci formy żelowej i submikrokrystalicznej. W zaczynie cementu żużlowego są mniejsze ilości portlandytu i uwodnionych glinianów wapniowych (które nie są odporne na korozję chemiczną), niż w zaczynie cementu portlandzkiego. Powstaje nowa faza – hydrogelenit ($C2ASH_8$) o większej odporności na korozję chemiczną. W wyniku zachodzącego procesu hydratacji wzrasta ilość porów żelowych, a maleje ilość porów kapilarnych. W miarę upływu czasu zmniejsza się porowatość kapilarna zaczynów z cementów żużlowych, co powoduje, że betony wykonane z tych cementów wykazują małą przepuszczalność dla agresywnych roztworów soli i gazów.

Warstwa przejściowa kruszywo–zaczyn o grubości 2–3 μm, bezpośrednio związana z kruszywem jest bardziej zwarta i posiada mniej wodorotlenku wapniowego niż warstwa przejściowa w betonie wykonanym na czystym cemencie portlandzkim. Czynnik ten znacząco wpływa na wzrost trwałości betonów wykonanych na cemencie portlandzkim z dodatkiem żużla. Wprowadzenie granulowanego żużla wielkopiecowego do cementu portlandzkiego powoduje obniżenie szybkości i ilości wydzielanego ciepła. Jednocześnie skutkuje to nieznacznym wydłużeniem czasu wiązania w stosunku do betonu na cemencie portlandzkim. Wolniejszy przyrost wytrzymałości w okresie pierwszych 7 dni dojrzewania betonu jest rekompensowany dużym przyrostem wytrzymałości w okresie 28 do 90 dni. Przyrostowi wytrzymałości betonu sprzyja większe rozdrobnienie żużla [13].

W większości nawierzchni betonowych z cementu portlandzkiego, obecnie realizowanych na terenie portów lotniczych w USA, 40% cementu portlandzkiego zastępuje się żużlem wielkopiecowym klasy 100 lub 120. Jak wynika z prowadzonych badań doświadczalnych, cement żużlowy zwiększa wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu i obniża przepuszczalność betonu. Przez zastąpienie cementu portlandzkiego popiołem lotnym typu F w ilości 30%, nie uzyskuje się tak wysokiej wytrzymałości betonu na zginanie jak w przypadku zastosowania cementu żużlowego. W tabeli 6 podano wyniki badań betonu pochodzącego od tego samego producenta (jak w tabeli 5). Podobne rezultaty uzyskano również w przypadku innych producentów betonu.

Badania wytrzymałości betonu na zginanie są bardziej pracochłonne i uciążliwe niż badania wytrzymałości betonu na ściskanie. Powszechnie uznaje się, że wyniki uzyskane z badań wytrzymałości na zginanie charakteryzują się większą zmiennością niż ma to miejsce w przypadku wyników z badań wytrzymałości na ściskanie. W pracy [12] przedstawiono

Tabela 5

Skład mieszanki betonowej i wyniki badań doświadczalnych [12]

Rodzaj materiału	Zawartość [kg/m^3]	Rodzaj badań	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Cement portlandzki (typ 1)	297	28 dniowa wytrzymałość na ściskanie [MPa]	41,3	3,5
Cement żużlowy	59,3	28 dniowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]	6,3	0,6
Kruszywo drobne	593	w/s	0,42	0,04
Kruszywo grube	1305	Opad stożka [mm]	31,75	–
Woda	150	Gęstość pozorna betonu [kg/m^3]	2412	–
Dodatek napowietrzający [ml]	177 do 591	Zawartość powietrza [%]	4,2	
Domieszka redukująca wodę [ml]	444	Liczba badań	279	–

Tabela 6

Skład badanych mieszanek betonowych i otrzymane wyniki [12]

Rodzaj materiału i przeprowadzonych badań	Dodatek popiołu lotnego [kg/m^3]	Dodatek cementu żużlowego [kg/m^3]
Cement portlandzki	208	208
Cement żużlowy	–	89
Popiół lotny	89	–
Kruszywo drobne (piasek)	682	682
Kruszywo grube (25do 50mm; 4,75 do 25mm)	860	860
Kruszywo grube (2,36 do 9,5mm)	427	427
Woda	145	142
Zawartość powietrza [%]	5,5	5,5
Opad stożka [mm]	63,5	38,1
28-dniowa wytrzymałość na ściskanie [MPa]	36,3	51,2
28-dniowa wytrzymałość na zginanie [MPa]	–	6,6
56-dniowa wytrzymałość na zginanie [MPa]	4,3	–

program podjętych badań doświadczalnych, których celem było rozważenie możliwości zastąpienia obowiązującej w USA metody kontroli nawierzchni, czyli badania wytrzymałości na zginanie (ASTM C78), badaniem wytrzymałości na ściskanie (wg ASTM C39). Ponadto dążono również do ustalenia korelacji pomiędzy obiema metodami badawczymi. W pod-

jętym programie badawczym przeanalizowano 6 mieszanek betonowych, które zastosowano do wykonania 76 500 m^3 betonu. Zawartość cementu w badanych mieszankach podano w tabeli 7. Maksymalny wymiar ziarna wynosił 50 mm. Ponieważ mieszanki betonowe zawierały pewien procent nadziarna do 63 mm, zdecydowano się na przesianie mokrej mieszanki przez sito o oczku 50 mm i odrzucenie kruszywa o uziarnieniu powyżej 50 mm, co stanowiło ok. 3% kruszywa, w celu obniżenia zmienności wyników badań doświadczalnych. Przesiewanie mokrej mieszanki betonowej nie jest uregulowane przepisami normalizacyjnymi. Specyfikacje projektowe przyjęte przez władze portów lotniczych wymagają stosowania kruszywa o większym uziarnieniu niż w typowo stosowanych nawierzchniach. Specyfikacje typowych betonów do nawierzchni w USA obejmują kruszywa grube od 4,75 do 25mm i od 4,75 do 37,5 mm wg normy ASTM C33, która dopuszcza pozostałość 5% ziarna na sicie o największym oczku dla obu krzywych.

Tabela 7

Udział cementu żużlowego w badanych mieszankach betonowych [12]

Symbol mieszanki betonowej	cement portlandzki [kg/m^3]	cement żużlowy [kg/m^3]	ciężar objętościowy [kg/m^3]
1999	255	83	2433
2024	267	89	2409
2079	267	89	2403
2177	227	122	2395
2185	227	122	2395
2357	203	135	2406

W tabeli 8 zestawiono otrzymane wyniki wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie betonów badanych po 28 dniach dojrzewania. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie wynosi 49,3 MPa. Średnia wytrzymałość betonu na zginanie wynosi 6,6 MPa i znacznie przekracza wartość projektowaną równą 4,8 MPa.

Tabela 8

Właściwości mechaniczne badanych mieszanek betonowych po 28 dniach dojrzewania betonu [12]

Symbol mieszanki betonowej	Liczba badanych próbek (łącznie 637)	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				Wytrzymałość na zginanie [MPa]			
		Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności, [%]		Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności [%]	
				ogólny	wewnętrzny			ogólny	wewnętrzny
1999	66	48,6	5,6	11,6	3,2	6,3	0,6	9,7	3,6
2024	91	51,4	6,2	12,1	3,5	6,3	0,5	8,6	5,0
2079	122	49,5	3,8	7,6	2,9	6,4	0,6	9,0	4,2
2177	153	50,1	5,8	11,6	3,1	6,7	0,7	11,0	4,6
2185	64	47,6	4,5	9,5	3,2	7,0	0,9	12,4	6,4
2357	141	48,0	5,4	11,2	3,9	6,5	0,5	8,3	3,8
Średnia ważona		49,3	5,2	10,6	3,3	6,6	0,6	9,7	4,5

Podany w tabeli 8 średni współczynnik zmienności dla wszystkich badanych próbek na ściskanie wynosi 10,6 %, natomiast w danej serii 3,3 %. W przypadku wytrzymałości na zginanie, średni współczynnik zmienności dla wszystkich próbek wynosi 9,7%, natomiast w danej serii 4,5%. W świetle otrzymanych wyników można zakwalifikować jakość badanego betonu jako dobrą. Ponadto widać, że ogólny współczynnik zmienności dla wyników wytrzymałości na zginanie jest niższy niż analogiczny współczynnik dla wytrzymałości na ściskanie.

Mając do dyspozycji znaczną liczbę wyników wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na zginanie, otrzymaną z badań doświadczalnych, przeprowadzonych na sześciu mieszankach betonowych, autorzy pracy [12] przetestowali dwie zależności używane do korelacji wytrzymałości na ściskanie i zginanie:

wg autorów [12] (Walker i Bloem) $$f_r = 9\sqrt{f_c'} \quad (1)$$

wg ACI 330 R-08 $$f_r = 10\sqrt{f_c'} \quad (2)$$

gdzie:

f_r – wytrzymałość betonu na zginanie (psi) określona dla 3-punktowego obciążenia belki

f_c' – wytrzymałość betonu na ściskanie (psi) na walcach ϕ 150 × 300mm (1 MPa = = 145 psi)

Wytrzymałości betonu na zginanie obliczone wg obu zależności zestawiono w tabeli 9. Widać wyraźnie, że proponowane zależności nie doszacowują rzeczywistej wytrzymałości betonu na zginanie.

Tabela 9

Wytrzymałość betonu na zginanie rzeczywista i obliczona wg zależności (1) i (2) [12]

Symbol mieszanki betonowej	Liczba badanych próbek	Średnia rzeczywista wytrzymałość [MPa]		Obliczona wytrzymałość na zginanie [MPa]	
		Na ściskanie	Na zginanie	Zal. (1)	Zal. (2)
1999	66	48,6	6,3	5,2	5,8
2024	91	51,4	6,3	5,3	6,0
2079	122	49,5	6,4	5,2	5,9
2177	153	50,1	6,7	5,3	5,9
2185	64	47,6	7,0	5,1	5,7
2357	141	48,0	6,5	5,2	5,8

W trosce o zapewnienie lepszej trwałości betonowych nawierzchni lotniskowych Federalna Administracja Lotnictwa (FAA) przyznaje wykonawcom premie aż do 6 % tylko w przypadku, gdy wytrzymałość betonu na zginanie przekroczy wartość projektowaną. Władze Portów Lotniczych (PA) płacą premie wówczas, gdy wytrzymałość na zginanie przekroczy 4,8 MPa oraz gdy spełnione są następujące kryteria:

– stosunek w/s ≤ 0,45,
– zawartość powietrza w mieszance betonowej zawiera się w przedziale 3,5 do 6%.

Ponadto władze PA wymagają stosowania połączeń w nawierzchni betonowej co 9,0 m, podczas gdy FAA wymaga utrzymania rozstawu połączeń co 6,0 m.

Pomimo tych istotnych rozbieżności władze PA otrzymały zgodę władz FAA na realizację przebudowy pasa startowego na międzynarodowym lotnisku im. J.F. Kennedy w Nowym Jorku wg swoich wymagań. W 2010 roku w ciągu trzech miesięcy ułożono około 153 000 m^3 betonu, przy całkowitym zamknięciu pasa startowego.

W tabeli 10 podano skład i parametry mieszanki betonowej oraz wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych. Otrzymane wartości potwierdziły możliwość uzyskania nawierzchni betonowych o wysokich parametrach. Należy podkreślić, że na 6000 płyt tylko 35 sztuk zostało wymienionych z uwagi na powstałe zarysowania.

Tabela 10

Skład mieszanki betonowej dla pasa startowego JFK 13R-31L i wyniki badań [12]

Rodzaj materiału	Ilość materiału [kg/m^3]	Rodzaj badania	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Cement typu IS (58% cement portlandzki 42% cement żużlowy)	326	28-dniowa wytrzymałość na ściskanie [MPa]	53,3	6,2
Kruszywo drobne	706	28-dniowa wytrzymałość na zginanie [MPa]	7,5	0,6
Kruszywo grube	1354	w/s	0,4	0,03
Woda	131	Opad stożka [mm]	48,3	–
Dodatek napowietrzający [ml]	59	Gęstość pozorna [kg/m^3]	2504	40
Domieszka redukująca wodę [ml]	887	Badanie przepuszczalności chlorków	694	131
w/s	0,4	Zawartość powietrza [%]	5	1

5. Wnioski

Znaczący wpływ obecności granulowanego żużla wielkopiecowego na właściwości cementów i betonów powoduje, że cementy portlandzkie z dodatkiem żużla odgrywają istotną rolę w technologii betonów. Cementy tego typu są powszechnie stosowane w takich krajach, jak Holandia, Belgia, Niemcy, Japonia [13]. Ostatnio zauważa się większe zastosowanie cementów portlandzkich z dodatkiem żużla również w USA.

Udział granulowanego żużla wielkopiecowego w cemencie portlandzkim wpływa na strukturę i mikrostrukturę stwardniałego zaczynu cementowego.

Betony wykonane z tych cementów wykazują małą przepuszczalność dla agresywnych roztworów soli i gazów. Wolniejszy przyrost wytrzymałości w okresie pierwszych 7 dni dojrzewania betonu jest rekompensowany dużym przyrostem wytrzymałości w okresie 28 do 90 dni.

Istotne korzyści uzyskane podczas realizacji betonowych nawierzchni lotniskowych w USA w sposób jednoznaczny wskazują na konieczność podjęcia zdecydowanych działań w tym kierunku również w Polsce. Stosowne badania doświadczalne, których celem jest ocena zachowania się betonowych nawierzchni wykonywanych na cemencie CEM II/B-S 42,5 N, zostały podjęte przez Zakład Konstrukcji Sprężonych Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej.

Literatura

[1] PN-EN 13877-1: lipiec 2007. Nawierzchnie betonowe. Część 1. Materiały.
[2] PN-EN 13877-2: luty 2007. Nawierzchnie betonowe. Część 2. Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych.
[3] PN-EN 13877-3: marzec 2007. Nawierzchnie betonowe. Część 3. Wymagania dla dybli stosowanych w nawierzchniach betonowych.
[4] PN-EN 12620: styczeń 2004. Kruszywa do betonu.
[5] PN-EN 206-1: czerwiec 2003. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
[6] PN-EN 12390-3: październik 2011. Badania betonu. Część 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
[7] PN-EN 12390 -6: październik 2011. Badania betonu. Część 6. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.
[8] PN-EN 12390 -5: listopad 2011. Badania betonu. Część 5. Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
[9] PN-EN 12390-2: 2011. Badania betonu. Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
[10] PN-V-83002: lipiec 1999. Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań.
[11] Rilem Report 39. 2007: Experimental Determination of the Stress – Crack Opening Curve for Concrete in Tension.
[12] Bognacki C.J., Pirozzi M., Marsano J., Scriffiano A., *Increasing the service lives of airport pavements*, Concrete International, No. 1, 2012, 27-33.
[13] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*, Górażdże Cement, Opole 2002.