

Nowatorska metoda konstrukcyjno-techniczna wykorzystania prefabrykowanej, dyblowanej płyty żelbetowej do prowadzenia skutecznych napraw nawierzchni lotniskowych

An innovative constructional and technical method of using a prefabricated, dowelled reinforced concrete slab for effective repairs of airport pavements



Bartosz Świerzewski

Dr inż.

Profi Partner Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k.

bartosz.swierzewski@profipartner.pl



Mariusz Wesołowski

Dr hab. inż.

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

mariusz.wesolowski@itwl.pl

Streszczenie: Nawierzchnie lotniskowe stanowiące naziemną część pola manewrowego przeznaczonego do ruchu, postojów i obsługi statków powietrznych są niezwykle istotnym elementem infrastruktury lotniska. Głównym zadaniem nawierzchni jest przenoszenie obciążeń użytkowych od poruszających się lub stojących na nich statków powietrznych. Stan techniczny nawierzchni lotniskowych, który nie powinien budzić żadnych wątpliwości, jest elementem kluczowym dla zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Metoda naprawcza polegająca na zastosowaniu prefabrykowanej płyty lotniskowej w miejscu nadmiernej degradacji płyt istniejących wprowadza pionierski sposób połączenia płyt z płytami sąsiednimi stwarzający nową jakość konstrukcyjną zwiększającą przestrzenną sztywność całego elementu funkcjonalnego nawierzchni. Przeprowadzone wymiarowanie oraz analiza statyczno-wytrzymałościowa prefabrykowanej płyty lotniskowej metodą elementów skończonych w aspekcie globalnego stanu wyężenia konstrukcji potwierdziły, że zastosowane rozwiązanie techniczne z wykorzystaniem połączenia dyblowanego zostało właściwie zaprojektowane, ponieważ korzystnie wpływa na redystrybucję obciążeń między współpracującymi płytami prefabrykowanymi. Przeprowadzone badania laboratoryjne i poligonowe w zakresie cech materiałowych oraz eksploatacyjnych dały jednoznacznie pozytywne wyniki, które przesądzały o celowości zastosowania i upowszechnienia przedmiotowej metody naprawczej. Doświadczenia wykonawcze zebrane w toku prowadzonej pracy pozwalają na stwierdzenie całkowitej sprawności technicznej zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Biorąc pod uwagę stosunkowo szybką i łatwą wymianę płyt bez konieczności wprowadzania dłuższych przerw w ruchu lotniczym, technologia ta może być z powodzeniem wykorzystywana zarówno w lotnictwie cywilnym, jak i wojskowym, a potencjał zastosowania tego rozwiązania technicznego może być również wykorzystany w naprawach betonowych nawierzchni drogowych.

Słowa kluczowe: Płyta prefabrykowana; Lotnisko; Nawierzchnie lotniskowe; Nośność; Uszkodzenia nawierzchni betonowych; Dyble; Bezpieczeństwo

Abstract: Airport pavements, constituting the ground part of the maneuvering area intended for the movement, parking and servicing of aircraft, are an extremely important element of the airport infrastructure. The main task of the pavement is to transfer utility loads from moving or standing aircraft. The technical condition of airport pavements, which should not raise any doubts, is a key element for ensuring the safety of air operations. The repair method consisting in the use of a prefabricated airport slab in the place of excessive degradation of existing slabs introduces a pioneering method of connecting slabs with adjacent slabs, creating a new construction quality that increases the spatial stiffness of the entire functional element of the pavement. The performed dimensioning and static - strength analysis of the prefabricated airport slab using the finite element method in the aspect of the global state of effort of the structure confirmed that the technical solution with the use of a dowel joint was properly designed, because it has a positive effect on the redistribution of loads transfer between cooperating prefabricated slabs. The conducted laboratory and field tests and operational features gave clearly positive results, which determine the purposefulness of the application and popularization of this repair method. The implementation experience gathered in the course of the work carried out allows to state the complete technical efficiency of the proposed design solution. Considering the relatively quick and easy replacement of the slabs without the need to introduce longer breaks in air traffic, this technology can be successfully used in both civil and military aviation. The potential of this technical solution can also be used in the repair of concrete road surfaces.

Keywords: Prefabricated slab; Airport; Airport pavements; Carrying capacity; Damage to concrete pavements; Dowels; Security

Wstęp

W efekcie postępującej globalizacji transport lotniczy, zarówno w ruchu pasażerskim jak i cargo, jest obecnie najbardziej dynamicznie rozwijającą się gałęzią transportu na świecie. Korzyści, jakie płyną z tego rodzaju komunikacji polegają przede wszystkim na pokonywaniu bardzo dużych odległości w możliwie najkrótszym czasie w porównaniu do transportu drogą lądową czy też morską [5]. Konsekwentny i bardzo dynamiczny

wzrost operacji lotniczych to zwiększone obciążenie lotnisk, a precyzyjnie rzecz ujmując – zwiększone oddziaływanie statków powietrznych na nawierzchnie lotniskowe, które wchodzi w skład złożonego systemu transportu lotniczego.

Nawierzchnie lotniskowe dzięki swoim charakterystycznym właściwościom mają głównie za zadanie przejęcie obciążeń użytkowych od poruszających się po nich statków powietrznych, a następnie przekazanie tych obciążeń na warstwy kon-

strukcyjne niżej położone oraz ich redystrybucję w tych warstwach. Właściwie zaprojektowana nawierzchnia lotniskowa powinna zapewniać odpowiednie przenoszenie obciążeń w taki sposób, aby oddziaływanie podwozia statku powietrznego na nawierzchnię nie powodowało destrukcji tej nawierzchni, która mogłaby stanowić zagrożenie dla operujących statków powietrznych.

Nawierzchnia lotniskowa tak jak każda inna budowla inżynierska wyróżnia się charakterystyczną specyfiką

pracy [8]. Czynniki, które wyróżniają nawierzchnię lotniskową to przede wszystkim zależność od warunków meteorologicznych i klimatycznych, szczególny charakter obciążeń (statycznych i dynamicznych) czy też zmienny rozkład obciążeń i prędkości w czasie rozbiegu i dobiegu samolotu [10]. Specyfika i odmienność nawierzchni lotniskowych różniącą ją od innych nawierzchni np. nawierzchni drogowych polega również na stosunkowo dużym obciążeniu kontaktowym, które przyłożone jest na niewielką powierzchnię. Dodatkowo charakteryzuje ją duża powtarzalność obciążeń na niewielkim obszarze funkcjonalnym lotniska. W rezultacie mamy do czynienia z sytuacją, gdzie na lotnisku występują obszary o znacznej intensywności obciążeń oraz te, w których generowane obciążenie jest sporadyczne [16].

Nawierzchnie wykonane w technologii betonu cementowego, w tym nawierzchnie z betonowych płyt prefabrykowanych, stanowią jedną z najbardziej popularnych i stosowanych metod budowy nawierzchni lotniskowych w Polsce [19, 20]. Pomimo wielu bezspornych zalet kompozytu betonowego, doświadczenia towarzyszące eksploatacji nawierzchni lotniskowych wykazują jednak liczne zjawiska uszkodzeń tych nawierzchni [9]. W efekcie statycznych i dynamicznych obciążeń zmiennych generowanych przez ruch statków powietrznych, ale także na skutek warunków atmosferycznych, stosowania środków odłudzających oraz mediów eksploatacyjnych wynikających z obsługi statków powietrznych [4], na nawierzchniach tych można zidentyfikować powstawanie uszkodzeń. Biorąc pod uwagę nawierzchnie zbudowane z płyt prefabrykowanych możemy w tym przypadku wskazać uszkodzenia zmęczeniowe pochodzące od wielokrotnych obciążeń eksploatacyjnych (statycznych i dynamicznych) oraz zmiany we własnościach fizycznych podłoża, na którym została posadowiona płyta.

Uszkodzenia tego typu prowadzą do obniżenia nośności nawierzchni, powstawania pęknięć, „klawiszowania” płyt, wykruszeń, a także deformacji niwelety w zakresie spadków podłużnych i poprzecznych [12]. Najbardziej niebezpieczne awarie nawierzchni betonowych, w których skala uszkodzeń pojedynczej płyty lotniskowej uniemożliwia wykonanie napraw doraźnych (miejscowa naprawa odprysków, wykruszeń), stanowią realne zagrożenie bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych przez statki powietrzne. W konsekwencji koniecznym jest poszukiwanie nowych, skutecznych i szybkich technologii do napraw zniszczonych, pojedynczych płyt lotniskowych. Jedną z takich metod jest możliwość wykorzystania betonowej płyty prefabrykowanej, która może stanowić skuteczną, lokalną naprawę nawierzchni lotniskowej, zapewniającą równorzędne parametry eksploatacyjne porównywalne z istniejącymi płytami sąsiednimi. Ponadto, jak wskazują zebrane dotychczas doświadczenia [3, 17, 18], betonowa płyta prefabrykowana może nawet spowodować zwiększenie nośności danej nawierzchni. Zjawisko to zostało również potwierdzone na podstawie przeprowadzonych badań własnych.

Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję konstrukcyjno – techniczną związaną ze stosowaniem nowatorskiej naprawy nawierzchni polegającej na wbudowywaniu prefabrykowanej płyty lotniskowej w miejscu nadmiernej degradacji nawierzchni płyt istniejących. Wprowadzony nowatorski sposób połączenia płyty z płytami sąsiednimi stwarza nową jakość konstrukcyjną zwiększającą przestrzenną sztywność całego elementu funkcjonalnego [16].

Opracowanie projektu żelbetowej płyty prefabrykowanej

Przedmiotem opracowania było stworzenie projektu i założeń dla

prefabrykowanej, żelbetowej płyty lotniskowej uwzględniającej element współpracy płyt w postaci połączenia dyblowanego. Samolotem obliczeniowym, który obciążał płytę prefabrykowaną był Boeing 737-800 jako najpopularniejszy na świecie wąskokadłubowy samolot pasażerski średniego zasięgu. Nawierzchnią była płyta betonowa o grubości 24 cm z betonu klasy C35/45 (wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie dla próbek sześciennych równa 45 MPa) i wymiarach 2,5 x 5,0 m.

Do obliczenia wielowarstwowego układu nawierzchni lotniskowych wykorzystano teorię płyt sprężystych spoczywających na odkształcalnym podłożu [16]. Dla potrzeb wymiarowania, uwzględniając interakcję płyty z podłożem, przyjęty został model płyty spoczywającej na podłożu sprężystym w modelu Winklera. Projekt płyt obejmował kilka następujących po sobie etapów. Na początku należało przyjąć odpowiednie parametry wyjściowe związane z wyborem obliczeniowego statku powietrznego, zwłaszcza w aspekcie wartości przekazywanego obciążenia i jego rozkładu na nawierzchni. Następnie należało przeprowadzić obliczenia związane z obciążeniami statycznymi generowanymi na nawierzchnię lotniskową. Wymiarowanie nawierzchni żelbetowych stosowanych przy nawierzchniach lotniskowych wykonane zostało metodą tradycyjną, czyli metodą stanów granicznych (MSG). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń określono, że płyta będzie posiadać zbrojenie górne i zbrojenie dolne w postaci siatek z prętów stalowych klasy A-III (rys. 1). Stal zbrojeniowa to pręty żebrowane o średnicy 12 mm i 16 mm.

Zgodnie z opracowaniami [6, 7, 8], analiza współpracy płyt w betonowej nawierzchni lotniskowej wykazała, że dyblowanie tj. połączenie płyt poprzez stalowe elementy zapewnia współpracę płyt sąsiednich w przenoszeniu obciążeń. Skuteczność obcią-



1. Proces produkcji płyt prefabrykowanych

zeń płyt połączonych dyblami zależy od wielu elementów konstrukcji nawierzchni, w tym: średnicy dybli, ich rozstawu, rodzaju podbudowy, klasy betonu i innych [1, 2]. Skuteczność całego połączenia dyblowanego jest sumą wartości obciążeń przenoszonych przez pojedyncze dyble.

Klasyczne rozwiązanie połączenia dyblowanego polega na tym, że jeden z końców stalowego pręta jest sztywno zamocowany w płycie betonowej, drugi koniec może się przemieszczać w sąsiedniej płycie mając zapewnioną swobodę przemieszczeń na długości płyty [6]. Ten wolny

koniec umieszcza się najczęściej w stalowej tulejce. Dybel – stalowy pręt musi być ułożony prostopadłe do płaszczyzny czołowej łączonych płyt i równoległe do górnej i dolnej ich powierzchni. Utwierdzona część dybla w płycie stanowi element o teoretycznie nieskończonej długości, który w pewnej odległości od ciała płyty przechodzi w ciało elastyczne [7].

Mając na uwadze powyższe, w celu wprowadzenia możliwości współpracy płyt, a tym samym zwiększenia przestrzennej sztywności całego elementu funkcjonalnego, zaprojektowano połączenia płyt za pomocą

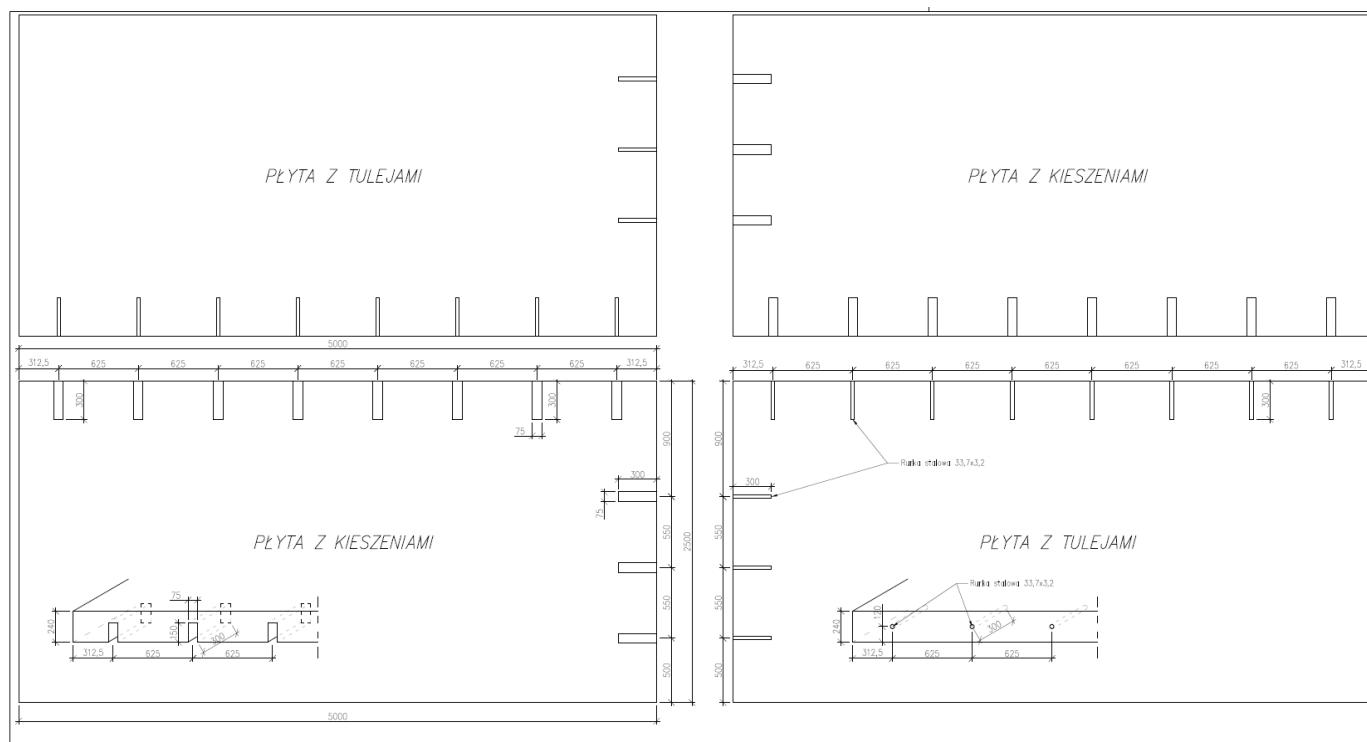
dybli (rys. 2) przyjmując poniższe założenia:

- zadane obciążenie to samolot obliczeniowy Boeing 737-800,
- płyty zostały ze sobą połączone wzdłuż krawędzi dyblami stalowymi o długości 60 cm i przekroju kołowym o średnicy 25 mm,
- rozstaw dybli na dłuższej krawędzi płyty (5,0 m) wynosił 62,5 cm,
- rozstaw dybli na krótszej krawędzi płyty (2,5 m) wynosił 55,0 cm.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz dowiedziono, że warunek wytrzymałości połączeń dyblowanych został spełniony, zatem połączenie dyblowane zostało zaprojektowane poprawnie.

Technologia montażu prefabrykowanej płyty lotniskowej

Wymianę nawierzchni betonowych w technologii prefabrykacji stosuje się, gdy występuje konieczność wymiany fragmentu nawierzchni, a czas przeznaczony na wyłączenie nawierzchni z ruchu nie pozwala na odtworzenie nawierzchni w procesie standardowego betonowania [16].



2. Projektowany układ 4 prefabrykowanych płyt betonowych



3. Montaż płyty z kieszeniami

Przed usunięciem uszkodzonych płyt, które zostały wytypowane do wymiany, należy wcześniej sprawdzić, czy sąsiadujące płyty są dobrze ustabilizowane i czy ich powierzchnie mogą być płaszczyznami odniesienia przy wbudowywaniu nowych płyt. Ponadto przed przystąpieniem do robót należy dokonać pomiaru geometrycznego płyty przeznaczonej do wymiany z uwagi na nieregularne wymiary płyt monolitycznych polegającego na sprawdzeniu jej długości, szerokości oraz grubości. W koniecznych przypadkach należy obciąć istniejącą powierzchnię do pożądanych wymiarów tak, aby szerokość szczelin dylatacyjnych pomiędzy sąsiednimi płytami nie przekraczała 30 mm. Przy procesie wymiany płyt zwracamy szczególną uwagę, aby nie doszło do uszkodzenia betonu sąsiednich płyt, zmiany układu i kierunku istniejących dybli i kotew oraz uszkodzenia podłoża (podbudowy). Dla ułatwienia rozbiórki i dla zabezpieczenia sąsiednich płyt przed uszkodzeniem w trakcie rozbiórki, po całym obwodzie odcina się pasek o szer. 5-10 cm.

Podbudowę betonową uzupełnia się betonem klasy C16/20 w stanie tzw. „półsuchym” do wysokości istniejącej podbudowy i zagęszcza mechanicznie ciężką płytą wibracyjną. Na przygotowane i stabilne podłoże nakłada się w czterech lub sześciu punktach podparcia prefabrykatu podkładki z blachy stalowej o wymiarach

20 x 25 cm do takiej wysokości, żeby krawędzie swobodnie położonej na nich płyty żelbetowej swoją niweletą nie odbiegały od sąsiadujących z nią płyt (z dokładnością ± 2 mm). Taką precyzję wysokości posadowienia zapewniają podkładki o różnych grubościach blachy (0,5 – 4 mm). Podkładki stalowe oprócz funkcji regulującej precyzyjnie niweletę posadowienia prefabrykatu stanowią również tymczasowe podparcie płyty do czasu uzyskania przez zaprawę wymaganej wytrzymałości na ściskanie równą 10 MPa.

Po wykonaniu wstępnego montażu przestrzeń pomiędzy podkładkami wypełnia się bezskurczową zaprawą do wylewania przeznaczoną do wykonywania napraw konstrukcji betonowych i żelbetowych w budownictwie komunikacyjnym. Zaprawa wykazuje samorozlewność i wystarczy rozgarnąć ją listwą wyrównującą, ewentualnie dogładzić powierzchnię za pomocą pacy stalowej lub kielni. Świeżo zarobiona zaprawa zachowuje swoje właściwości przez ok. 30 min. Zaprawę wylewa się z lekkim nadładkiem, żeby uniknąć powstawania wolnych przestrzeni pod płytą żelbetową. Nadmiar zaprawy jest wyciskany w momencie montażu płyty. Dzięki temu dochodzi do wypełnienia ubytków i wolnych przestrzeni pod sąsiednimi płytami monolitycznymi.

Po dokładnym rozprowadzeniu zaprawy bezskurczowej przystępuje się

do instalacji prefabrykowanej płyty żelbetowej za pomocą dźwigu. Płyty prefabrykowane opuszcza się po ustabilizowaniu ich poziomego położenia i szerokości przewidywanych szczelin nawierzchniowych. Równość nawierzchni sprawdza się łąką o długości 4 m, tak ustawioną, aby jej środek znajdował się nad złączem płyt. Prześwit między łąką, a powierzchnią nawierzchni sąsiadującej nie powinien przekraczać 5 mm, przy czym krawędzie płyt nie powinny wystawać przy szczelinach więcej niż 2 mm. W przypadkach skrajnych dopuszcza się sfrezowanie warstwy górnej płyty w celu dostosowania jej rzędnych do rzędnych płyt sąsiednich.

Układ płyt zastosowany w niniejszym rozwiązaniu technicznym, zgodnie z wcześniej przygotowanym projektem, składał się z 4 płyt, tj.: dwóch płyt z kieszeniami i dwóch płyt z tulejami (rys. 2). W płytach prefabrykowanych, w których zaprojektowane zostały tuleje, umieszcza się dyble. Dyble umieszczane są w ścianie czołowej pasa technologicznego w zaprojektowanych i wykonanych wcześniej otworach, zgodnie z zaprojektowanym rozstawem, prostopadle do płaszczyzny ściany i w połowie grubości dyblowanej płyty. Głębokość zaprojektowanych otworów wynosi $\frac{1}{2}$ długości dybla, natomiast średnica otworu jest o około 2 mm większa od średnicy dybla. Na tak przygotowane płyty z zainstalowanymi dyblami nakłada się za pomocą dźwigu płyty z zaprojektowanymi kieszeniami (rys. 3) i wykonuje się ich wzajemne wyregulowanie wysokościowe.

Po ostatecznym wyregulowaniu wysokościowym płyt prefabrykowanych wykonuje się iniekcję przez specjalnie, wcześniej przygotowane otwory wyposażone w aplikatory, przez które wtłacza się substancję uszczelniającą pod płytę pod odpowiednim ciśnieniem (dla stabilizacji). Konieczne jest uprzednio uszczelnienie styku płyty z podłożem i sąsiedni-

mi elementami, aby zapobiec niekontrolowanemu wypłynięciu substancji wtłaczanej pod płytę. Iniekcja wykonywana jest bezpośrednio po wbudowaniu płyt prefabrykowanych. Materiał użyty do iniekcji w omawianym doświadczeniu to jednokomponentowy, bezskurczowy, wysokowytrzymały zaczyn cementowy. Jest to materiał o bardzo drobnym uziarnieniu, niskiej lepkości i płynnej konsystencji, przeznaczony do wykonywania iniekcji w gruncie, skałach, konstrukcjach betonowych, żelbetowych i murowanych oraz łączenia elementów betonowych, kamiennych i ceramicznych.

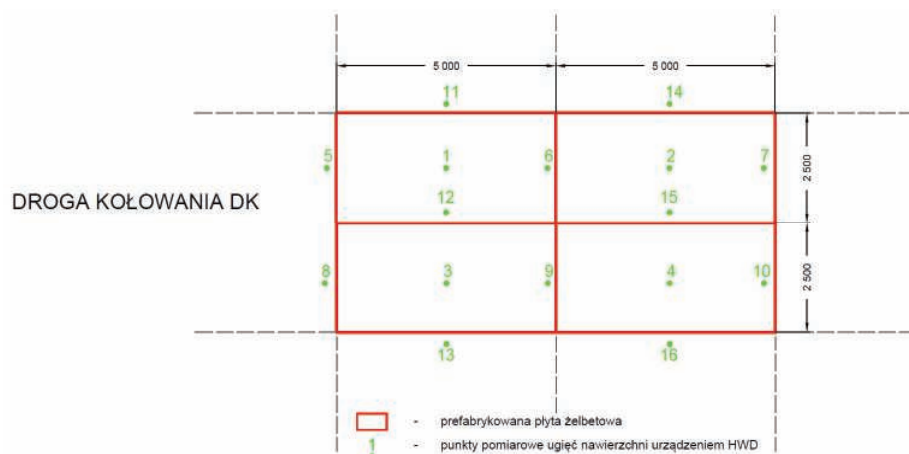
Badania prefabrykowanej płyty lotniskowej we współpracy z płytami sąsiednimi

Badania laboratoryjne

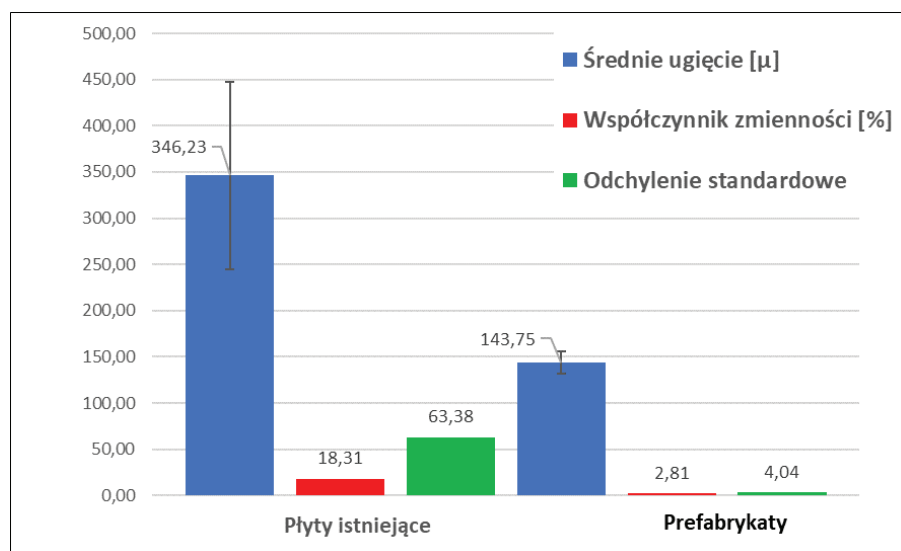
W celu weryfikacji proponowanego rozwiązania konstrukcyjnego wykonane zostały badania laboratoryjne właściwości materiałowych płyty w zakresie jej trwałości, które obejmowały zarówno badania cech mechanicznych, jak i cech fizycznych betonu. W zakresie analizy cech mechanicznych betonu wykonano badania wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie. W zakresie analizy cech fizycznych betonu wykonano badania nasiąkliwości wagowej oraz odporności na działanie mrozu. Badania zostały przeprowadzone na podstawie norm [11, 13, 14, 15].

Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono, że:

- beton cementowy, z którego wykonano płytę prefabrykowaną spełnił wymagania normowe dla betonu klasy C35/45 w zakresie wytrzymałości na ściskanie, osiągając wartość średnią równą $f_{ci} 95 = (50,23 \pm 2,31)$ MPa,
- beton cementowy, z którego wykonano płytę prefabrykowaną spełnił wymagania normowe dla betonu klasy C35/45 w zakresie



4. Plan pomiarów ugięć na ocenianej płycie żelbetowej (po wymianie) oraz na płytach sąsiadujących



5. Porównanie wartości ugięć dla płyt istniejących i prefabrykatów (płyty wymienione) wraz ze słupkami błędów

wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, osiągając wartość średnią równą $f_{ct} 95 = (7,35 \pm 1,54)$ MPa,

- beton cementowy, z którego wykonano płytę prefabrykowaną spełnił wymagania normowe dla betonu klasy C35/45 w zakresie nasiąkliwości wagowej, gdyż jego nasiąkliwość wyniosła $N_w 95 = (3,90 \pm 0,31)$ % i nie przekroczyła dopuszczalnej wartości 5%,
- beton cementowy, z którego wykonano płytę prefabrykowaną spełnił wymagania dla stopnia mrozoodporności F200, ponieważ średnia wartość wytrzymałości na ściskanie próbek porównawczych wyniosła $\Delta m F 95 = (54,05 \pm 3,70)$ MPa, ubytek masy próbek po badaniu był mniejszy

niż 5% ($0,22 \pm 0,31$) %, a średni spadek wytrzymałości na ściskanie nie przekroczył 20%.

Badania poligonowe

Kolejnym etapem było przeprowadzenie badań poligonowych płyty lotniskowej w celu określenia nośności naprawianej w ten sposób nawierzchni i porównanie z nośnością otaczającej nawierzchni. Badania zostały przeprowadzone na lotniskowej drodze kołowania. Badania nośności nawierzchni zostały wykonane za pomocą ciężkiego ugięciomierza lotniskowego typu HWD. Pierwsza sesja pomiarowa dotyczyła badań płyt istniejących (tzw. układ porównawczy). Kolejne badania nośności dotyczyły płyt nowo wbudowanych z

Tab. 1. Wyniki oceny nośności nawierzchni dla wskaźnika PCN 52

Element Funkcyjno- nalny Lotniska	Wskaźnik nośno- ści PCN	Całkowita liczba operacji lotniczych
Płyty istniejące	52/R/B/W/T	145 000
Nowe prefabrykaty	52/R/B/W/T	255 000

opcją współpracy z płytami sąsiednimi (rys. 4). Przeprowadzone badania polowe wykazały, że podłoże gruntowe występujące pod konstrukcją badanej nawierzchni, w momencie jej badania, można ocenić jako grunty o kategorii nośności B (średnia nośność), przy współczynniku reakcji podłoża $k=100 \text{ MN/m}^3$. Informacja ta została następnie wykorzystana do obliczenia liczby klasyfikacyjnej PCN nawierzchni.

Uzyskane wyniki badań nośności potwierdzają, że nowo zastosowany układ z płytą prefabrykowaną posiada wyższą nośność względem układu porównawczego (istniejącego). Średnia wartość ugięć zmierzonych na płytach prefabrykowanych $d_{95} = (143,75 \pm 11,82) \mu\text{m}$ jest o 59% niższa od średniej wartości ugięć pomierzonych na płytach porównawczych $d_{95} = (346,23 \pm 101,34) \mu\text{m}$. Ponadto wskazano średnią wartość obliczonego modułu zastępczego konstrukcji nawierzchni z płytami prefabrykowanymi $E_{z_{95}} = (3\,900,58 \pm 182,64) \text{ MPa}$, która jest o 135% większa od modułu zastępczego wyznaczonego dla konstrukcji porównawczej $E_{z_{95}} = (1\,661,32 \pm 472,22) \text{ MPa}$ (rys. 5).

Na podstawie powyższego stwierdzono, że zastosowana technologia z wykorzystaniem prefabrykowanej płyty lotniskowej przyczyniła się do znacznej poprawy nośności badanych fragmentów nawierzchni lotniskowych. Zgodnie z metodyką ACN-PCN określoną przez ICAO, obliczona została liczba dopuszczalnych operacji lotniczych na płytach istniejących w stosunku do liczby operacji na nowo wbudowanych płytach prefabrykowanych. Przeprowadzona analiza dowodzi, iż miarodajny dla ocenianej konstrukcji nawierzchni

jest wskaźnik PCN równy 52/R/B/W/T, zaś liczba dopuszczalnych operacji lotniczych wynosi 255 000 (przy obliczeniach dla samolotu referencyjnego Boeing 737-800). W konsekwencji liczba dopuszczalnych operacji lotniczych wzrosła o 76% w stosunku do układu z płytami istniejącymi (tab. 1).

Badania współpracy płyt

Biorąc pod uwagę aspekt zastosowania połączenia płyt za pomocą technologii dyblowania, analizie i obliczeniom poddana została współpraca płyt, zarówno z płytami istniejącymi, jak i między sobą. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że istnieje prawidłowa współpraca pomiędzy nowo wbudowanymi płytami prefabrykowanymi, a istniejącymi płytami lotniskowymi drogi kołowania, ponieważ wartość średnia współczynnika przenoszenia obciążeń wyniosła $J_{95} = (81,28 \pm 8,03) \%$. Jednocześnie wartość średnia współczynnika przenoszenia obciążeń tyl-

ko dla współpracy nowych płyt prefabrykowanych z zastosowaniem opcji dyblowania wyniosła $J_{95} = (90,38 \pm 3,77) \%$ (tab. 2).

Przedstawione powyżej wyniki jednoznacznie potwierdzają, że istnieje prawidłowa współpraca pomiędzy płytami prefabrykowanymi, a przenoszenie obciążeń pomiędzy płytami jest na bardzo wysokim poziomie. To w konsekwencji znacząco wpływa na zmniejszenie naprężeń i ugięć w płycie, a tym samym na zmniejszenie uszkodzeń nawierzchni, co jest zjawiskiem bardzo pożądanym.

Badania cech eksploatacyjnych

W dalszym etapie badań sprawdzeniu poddane zostały parametry eksploatacyjne zaproponowanej w doświadczeniu badawczym prefabrykowanej płyty lotniskowej tj.: szorstkość, tekstura oraz równość. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- średnia wartość współczynnika

Tab. 2. Wyniki współpracy płyt prefabrykowanych

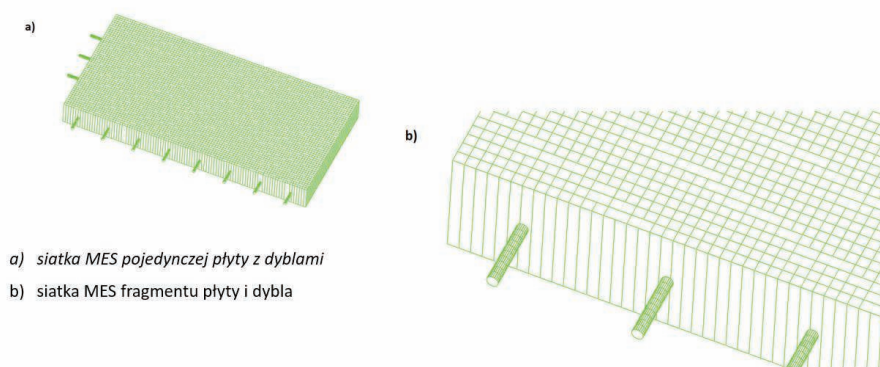
Punkt pomiarowy	Naprężenie pod płytą [kPa]	Siła zrzutu [kN]	Ugięcie czujnika nr 2 [μm]	Ugięcie czujnika nr 3 [μm]	J [%]	J [%] tylko prefabrykaty
5	1241,00	197,42	177,40	143,80	81,10	
6 (tylko prefabrykat)	1241,00	197,34	159,60	145,20	91,00	91,00
7	1244,00	197,85	225,00	155,50	69,10	
8	1243,00	197,61	143,90	128,90	89,60	
9 (tylko prefabrykat)	1240,00	197,21	155,30	136,30	87,80	87,80
10	1245,00	197,98	259,20	127,90	49,30	
11	1246,00	198,22	162,40	142,30	87,60	
12 (tylko prefabrykat)	1243,00	197,69	122,50	112,80	92,10	92,10
13	1246,00	198,17	185,40	144,30	77,80	
14	1244,00	197,90	162,70	137,10	84,30	
15 (tylko prefabrykat)	1243,00	197,61	118,60	107,40	90,60	90,60
16	1245,00	198,06	186,90	140,30	75,10	
Wartość średnia	1243,42	197,76	171,58	135,15	81,28	90,38
Odchylenie standardowe s	1,98	0,33	39,94	13,87	12,36	1,83
Odchylenie standardowe średniej	1,14	0,19	23,06	8,01	7,14	1,06
Współczynnik k dla rozkładu t-Studenta	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	3,18
Przedział ufności średniej arytmetycznej	2,51	0,42	50,75	17,63	15,71	3,36
Niepewność wzorcowania $u_d(x)$	4,40	0,30	5,40	5,40	1,30	1,30
Niepewność eksperymentatora $u_e(x)$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Niepewność standardowa złożona $u_c(x)$	2,60	0,20	11,94	5,08	3,65	1,18
Niepewność rozszerzona $U(x)$	5,73	0,43	26,29	11,17	8,03	3,77
Współczynnik zmienności %	0,16	0,17	23,28	10,27	15,21	2,02

tarcia na ocenianych nawierzchniach lotniskowych wyniosła $\mu_{95} = (0,62 \pm 0,04)$. Nawierzchnia ocenianego elementu funkcjonalnego lotniska uzyskała średnie wartości współczynnika tarcia wyższe od wartości normatywnej dla nawierzchni lotniskowych „będących w eksploatacji”, która wynosi 0,50,

- badana nawierzchnia lotniskowa zbudowana z płyt prefabrykowanych charakteryzowała się średnią głębokością tekstury na bardzo wysokim poziomie równym $ETD_{95} = 0,71 \pm 0,11$, przy wymaganym minimum normowym 0,25,
- stan równości w kierunku podłużnym oceniany zgodnie z przyjętymi kryteriami był na poziomie bardzo dobrym (średnia wadliwość wynosi $W_{95} = (2,80 \pm 1,02) \%$),
- stan równości w kierunku poprzecznym oceniany zgodnie z przyjętymi kryteriami był także na poziomie bardzo dobrym (średnia wadliwość wynosi $W_{95} = (0,00 \pm 0,04) \%$).

Analiza statyczno-wytrzymałościowa prefabrykowanej płyty lotniskowej Metodą Elementów Skończonych (MES)

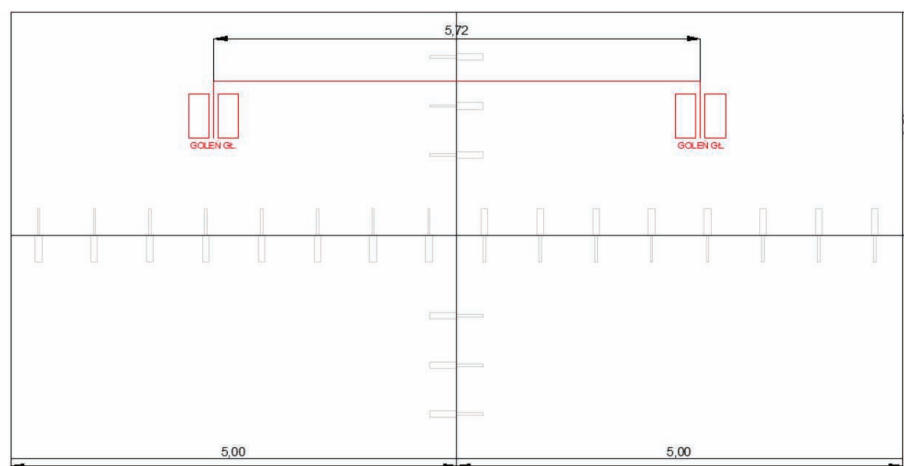
Kolejnym etapem prowadzonych badań była analiza statyczno-wytrzymałościowa prefabrykowanej płyty lotniskowej Metodą Elementów Skończonych. Dla potrzeb wymiarowania i analizy płyt przyjęto, że nawierzchnia będzie obciążona ruchem poruszających się po niej statków powietrznych, zaś samolotem obliczeniowym wybranym do analizy był również Boeing 737-800. Zakres badań obejmował analizę obciążonych, prefabrykowanych płyt betonowych połączonych ze sobą poprzez dyblowanie w aspekcie globalnego stanu wyężenia konstrukcji (naprężenia, odkształcenia). W analizie uwzględ-



a) siatka MES pojedynczej płyty z dyblami

b) siatka MES fragmentu płyty i dybla

6. Model powłokowo - belkowy analizowanej konstrukcji



7. Obciążenie płyty lotniskowej w jej środku – wariant I

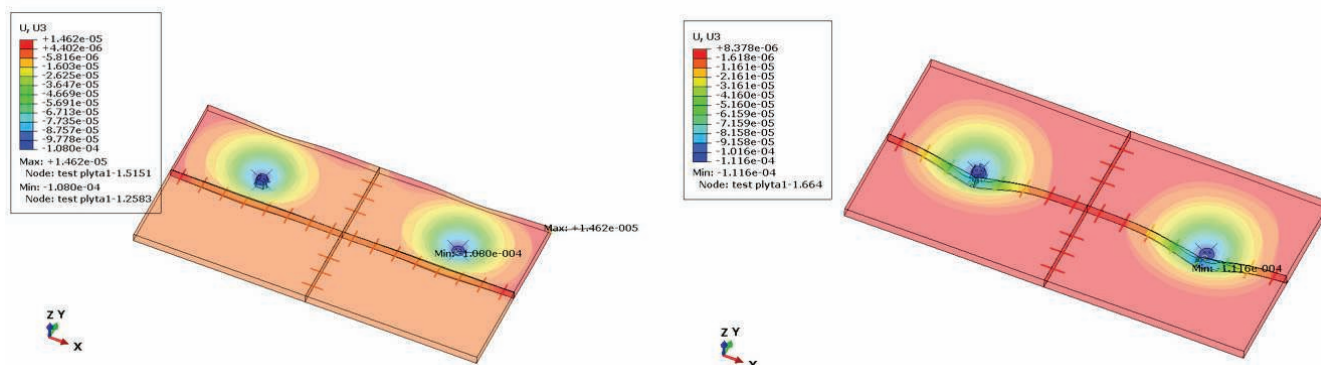
nione zostały stany wyężenia w dyblach łączących płyty sąsiednie. Model MES konstrukcji wykonano jako układ powłokowo-belkowy, ponieważ pojedyncza płyta składała się z elementów powłokowych, natomiast pojedynczy dybel składał się z elementów belkowych (rys. 6). Biorąc pod uwagę fakt, że do symulacji MES zastosowano układ powłokowo-belkowy, najkorzystniejszą wartością naprężeń były zredukowane naprężenia Misesa. Hipoteza ta pozwala na określenie momentu, w którym materiał poddany złożonemu stanowi naprężeń utraci swoje własności sprężyste. Z technicznego punktu widzenia daje to 99% pewności zastosowania właśnie tej hipotezy.

Na potrzeby niniejszej pracy badawczej, w celu odzwierciedlenia rzeczywistego ruchu statków powietrznych na drodze kołowania, analiza metodą MES została przeprowadzona w dwóch różnych wariantach obciążenia płyty lotniskowej [16]. Wariant pierwszy dotyczył analizy obciążenia

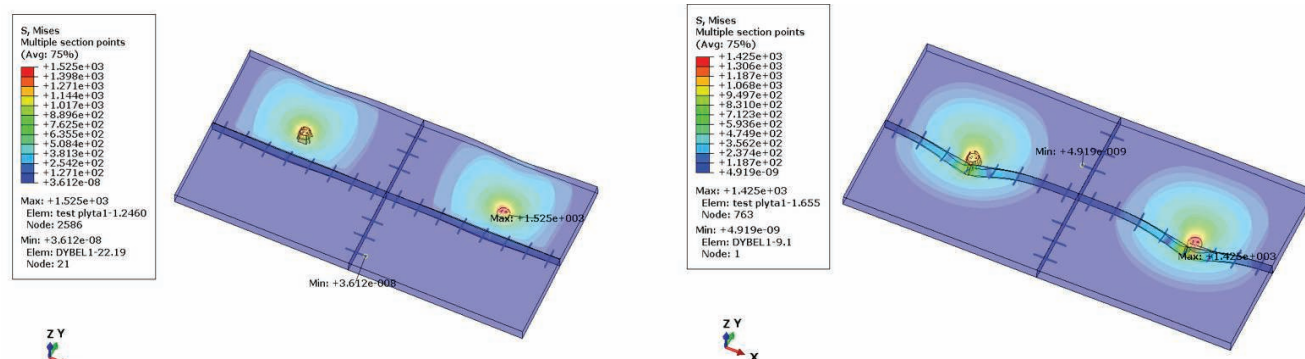
płyty golenią główną samolotu w środkowej jej części (rys. 7). W drugim wariantcie obciążenie zostało zadane przy krawędzi płyty lotniskowej, w odległości 375 mm od jej krawędzi. W obu przypadkach zachowany został rozstaw obciążenia na płytach zgodny z rozstawem kół goleni głównej dla samolotu Boeing 737-800.

Na podstawie przeprowadzonych analiz MES stwierdzono, że:

- w badanych płytach nie wystąpił stan zarysowania, ponieważ maksymalne naprężenie główne jest dużo mniejsze niż wytrzymałość betonu na rozciąganie, wariant I ($1\,591\text{ kPa} < 5\,790\text{ kPa}$), wariant II ($1\,505\text{ kPa} < 5\,790\text{ kPa}$),
- wartość maksymalna odkształcenia głównego (rozciągającego) wynosi 0,00004 i występuje w centralnym punkcie przyłożenia obciążenia. Należy podkreślić, że zgodnie z wartością przyjmowaną w praktyce inżynierskiej, odkształcenie zarysowania przy rozciąganiu betonu jest na po-



8. Mapa warstwowa przemieszczeń pionowych U3 w płycie lotniskowej w modelu powłokowo-belkowym



9. Mapa warstwowa z wizualizacją globalnego stanu naprężeń i odkształceń

ziomie 0,00035. Zarysowanie w płycie betonowej nie powinno więc wystąpić, ponieważ dopuszczalne wartości odkształceń nie zostały przekroczone ($0,00004 < 0,00035$),

- pomimo symetrycznie przyłożonego obciążenia na płyty, stan naprężenia nie jest w pełni symetryczny - prawa płyta jest nieco bardziej wyętzona. Wynika to z występowania zjawisk kontaktowych połączeń dybli,
- maksymalne przemieszczenie pionowe płyt dla wariantu I wynosi 0,01 mm i występuje w centralnym punkcie przyłożenia obciążenia; maksymalne przemieszczenie pionowe płyt dla wariantu II wynosi 0,008 mm i występuje w centralnym punkcie przyłożenia obciążenia (rys. 8),
- maksymalne naprężenie w dyblach dla wariantu I osiąga wartość 56,08 kPa, dla wariantu II to 123,40 kPa. Maksymalne naprężenia styczne (ścinające) występują w środku długości dybli (na styku dwóch płyt), w przestrzeni szczeliny dylatacyjnej,

- wizualizacja globalnego stanu naprężeń i odkształceń pokazuje jak zdeformowane są dyble oraz krawędzie płyt sąsiadujących (rys. 9).

Analiza statyczno-wytrzymałościowa konstrukcji oraz analizy porównawcze potwierdzają, że zastosowany w symulacji model powłokowo-belkowy pozwolił na ocenę globalnego stanu wyętzienia konstrukcji z uwzględnieniem stanu zgięciowego.

Podsumowanie

Nawierzchnie lotniskowe stanowiące naziemną część pola manewrowego przeznaczonego do ruchu, postoju i obsługi statków powietrznych są niezwykle istotnym elementem infrastruktury lotniska. Głównym zadaniem nawierzchni jest przenoszenie obciążeń użytkowych od poruszających się lub stojących na nich statków powietrznych. Stan techniczny nawierzchni, który nie powinien budzić żadnych wątpliwości, jest elementem kluczowym dla zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych.

Biorąc pod uwagę porty lotnicze, gdzie konieczne jest przeprowadzenie prac naprawczych na nawierzchniach lotniskowych, a jednocześnie nie ma możliwości przeniesienia ruchu na zapasową drogę startową lub inne drogi kołowania, czynnikiem najważniejszym z ekonomicznego punktu widzenia jest jak najkrótszy czas realizacji działań naprawczych i oddanie naprawianego obiektu w takim stanie technicznym, który będzie zapewniał bezpieczne wykonywanie operacji lotniczych. W konsekwencji powyższego, koniecznym jest poszukiwanie nowych, skutecznych i szybkich technologii do napraw zniszczonych płyt lotniskowych, które muszą być wykonane w określonym reżimie czasowym.

Jedną z takich metod zaproponowaną przez autorów niniejszego artykułu jest możliwość wykorzystania betonowej płyty prefabrykowanej współpracującej z płytami sąsiednimi. Co istotne, czas przeprowadzenia wszystkich działań naprawczych przy wykorzystaniu przedmiotowej metody nie przekracza 5 godzin i mogą być one wykonywane zarówno w

dzień, jak i w nocy, w różnych porach roku i warunkach atmosferycznych. Zaproponowana metoda w porównaniu do innych metod prowadzenia napraw przy użyciu prefabrykatów stosowanych zarówno w Polsce, jak i na świecie stanowi rozwiązanie pionierskie z uwagi na wprowadzenie elementu współpracy pomiędzy płytami oraz całkowity czas potrzebny na wykonanie zadania naprawczego, co w przypadku lotnisk stanowi niezwykle ważny argument.

Przedstawione w niniejszym artykule walory lotniskowej płyty prefabrykowanej oraz przeprowadzone badania laboratoryjne i poligonowe, które dały jednoznacznie pozytywne wyniki, przesądzają o celowości jej zastosowania i upowszechnienia. Doświadczenia wykonawcze zebrane w toku prowadzonej pracy oraz zastosowanie technologii napraw z użyciem prefabrykowanej płyty na lotnisku pozwalają na stwierdzenie całkowitej sprawności technicznej tego rozwiązania konstrukcyjnego. Biorąc pod uwagę stosunkowo szybką i łatwą wymianę płyt bez konieczności wprowadzania dłuższych przerw w ruchu lotniczym, technologia ta może być z powodzeniem wykorzystywana zarówno w lotnictwie cywilnym, jak i wojskowym. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Brown V.L., Bartholomew C.L.: FRP Dowel Bars in Reinforced Concrete Pavements, Proceedings of the International Symposium on Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-1, Vancouver, Canada; Ed. by A. Nanni and C.W. Dolan; American Concrete Institute, Detroit, MI, ACI SP 138, p. 813-829, 1993.
- [2] Graczyk M., Gajewski M., Szczerba R.: Analiza statyczna dyblowanej betonowej nawierzchni lotniskowej z uwzględnieniem zjawiska curlingu płyt. *Drogi i Mosty* 15 (2016), 137-155.
- [3] Heinrich P.: Wymiana nawierzchniowych płyt betonowych z wykorzystaniem elementów prefabrykowanych OAT. Prezentacja podczas Konferencji Polskiego Kongresu Drogowego „Beton w drogownictwie”. Suwałki, 10-12.04.2019.
- [4] Linek M., Nita P., Żebrowski W., Wolka P.: Wpływ mediów eksploatacyjnych na parametry betonu cementowego przeznaczonego na nawierzchnie lotniskowe. *Czasopismo Journal of KONBiN*, Tom 49, Zeszyt 4, Strony 103-115, 2019 r.
- [5] Linka A., Galant M., Wróblewska A.: Przegląd stanu bezpieczeństwa w lotnictwie cywilnym w Polsce. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*. 2018, tom z. 123, strony 85-93.
- [6] Młodożeniec W.: Analiza pracy dyblowanych połączeń płyt nawierzchni lotniskowych. *Rozprawa doktorska. Wojskowa Akademia Techniczna*, Warszawa 1994.
- [7] Nejman T. J.: Badanie stanu naprężeń w betonowej drodze startowej obciążonej gołonią samolotu na środku górnej powierzchni płyty. *Towarzystwo Naukowe Ekspertów Budownictwa*, Warszawa 1962.
- [8] Nita P., Poświata A.: Współczesne betonowe nawierzchnie lotniskowe w Polsce. *Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Dni Betonu* 2002.
- [9] Nita P.: Betonowe nawierzchnie lotniskowe, Teoria i wymiarowanie konstrukcyjne, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2005.
- [10] Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [11] NO-17-A204:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.
- [12] Papagiannakis A.T., Masad E.A.: *Pavement Design and Materials*, Wiley, 2008.
- [13] PN-85/B-04500 Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.
- [14] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [15] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
- [16] Świerzewski B., Dysertacja: Betonowa płyta prefabrykowana przeznaczona do odtwarzania uszkodzonych, lokalnych nawierzchni lotniskowych. *Politechnika Świętokrzyska*, 2021.
- [17] Świerzewski B., Wesołowski M.: Reconstruction of the Technical Condition of Concrete Airfield Pavements with the Use of Prefabricated Slab Technology, WMCAUS 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 960 (2020) 022054.
- [18] Tayabji S.: Precast Concrete Pavement Innovations, Performance and Best Practices, Conference Paper, September 2014.
- [19] Wesołowski M., Barszcz P., Zieja M., Blacha K.: The evaluation method of degradation degree of runway pavement surfaces constructed from cement concrete. *Safety and Reliability – Theory and Applications*, Čepin, Briš (eds). Taylor & Francis Group, London 2017.
- [20] Wesołowski M., Iwanowski P.: APCI Evaluation Method for Cement Concrete Airport Pavements in the Scope of Air Operation Safety and Air Transport Participants Life, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(5), 1663, 2020.