

Małgorzata LINEK¹
Piotr NITA²

WYMIAROWANIE LOTNISKOWYCH NAWIERZCHNI ŻELBETOWYCH

W dotychczasowej praktyce budownictwa lotniskowego żelbetowe nawierzchnie stosowane były niezwykle rzadko. Jednakże potrzeba stosowania takich układów konstrukcyjnych w sytuacjach szczególnie uzasadnionych stała się podstawą przedstawienia tej problematyki w niniejszej publikacji. W referacie omówiono problematykę wymiarowania żelbetowych nawierzchni lotniskowych. Celem pracy była ocena wybranych metod wymiarowania płyt żelbetowych przeznaczonych na nawierzchnie lotniskowe. Wykonano analizę wymiarowania płyt wg klasycznej metody stanów granicznych i porównano z wynikami uzyskanymi dla metody zgodnej z wytycznymi Eurokodu 2. Podstawę analizy stanowiła płyta z betonu klasy C35/45 ze zbrojeniem umieszczonym w strefie rozciąganej. Jako zbrojenie przyjęto pręty o średnicy 16,0 mm. Na podstawie porównawczej analizy uzyskanych wyników sformułowano wnioski dotyczące zasadności stosowania omawianych metod i ich walorów projektowych.

Słowa kluczowe: beton zbrojony, beton cementowy, nawierzchnie lotniskowe, zbrojone nawierzchnie lotniskowe

1. Wprowadzenie

Konstrukcja nawierzchni lotniskowej składa się ze zróżnicowanego układu warstw, w których warstwa jezdna wykonana jest z betonu cementowego, a cały układ ma za zadanie przejąć obciążenia od poruszającego się statku powietrznego i bezpiecznie przekazać je na podłoże gruntowe. Jednym z rodzajów konstrukcji są nawierzchnie żelbetowe. Powstają poprzez wprowadzenie do betonu zbrojenia. Zbrojenie zastosowane w konstrukcji nawierzchni umieszcza się zwykle w postaci siatek prętów ułożonych w kierunku poprzecznym i podłużnym. Pręty zbrojeniowe lokalizowane są dołem i górą przekroju betonowego w odległościach średnio 15-35cm [1].

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Małgorzata Linek, Politechnika Świętokrzyska, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, 41 / 34-24-844, e-mail: linekm@tu.kielce.pl

² Piotr Nita, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, 22 / 836-45-43, e-mail: piotr.nita@itwl.pl

W zależności od potrzeb zaleca się, aby w przypadku odcinków bardziej intensywnie obciążonych (końcowe odcinki dróg startowych, skrzyżowania dróg startowych oraz dróg startowych i dróg kołowania, płyt technicznych) odstęp pomiędzy prętami zbrojeniowymi wynosił max 20cm. Zbrojenie zapobiegające występowaniu naprężeń skurczowych na powierzchni płyty zaleca się stosować w rozstawie co 25-30cm [3]. Średnice prętów zbrojeniowych powinny wynosić 12-16mm. Podstawowym zadaniem, jakie spełnia zbrojenie w konstrukcji lotniskowej jest wyrównanie rozkładu sił wewnętrznych w nawierzchni w przypadku zmian nośności podłoża, dzięki czemu ograniczana jest możliwość powstawania przypadkowych pęknięć płyt na skutek gwałtownych zmian termicznych, czy przeciążenia konstrukcji. Zastosowanie tego typu rozwiązania konstrukcyjnego pozwala zmniejszyć przekrój nawierzchni i liczbę szczelin dylatacyjnych, zapewnia poprawę stanu technicznego konstrukcji i wysoki poziom bezpieczeństwa ruchu. Wprowadzenie stali do płyty betonowej zmienia strukturę płyty betonowej i wpływa bezpośrednio na wydłużenie okresu eksploatacji nawet w warunkach intensywnego ruchu i obciążeń powtarzalnych. Podstawowym kryterium uzasadniającym konieczność stosowania nawierzchni żelbetowych jest obciążenie podwozia samolotu przekraczające 1,40 MPa [3].

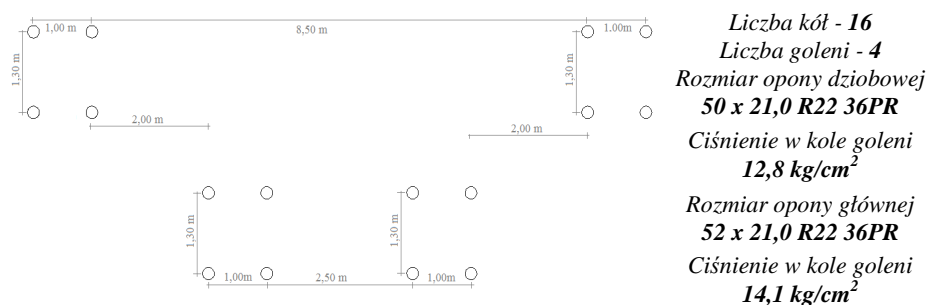
2. Obliczanie nawierzchni żelbetowych

Nawierzchnie żelbetowe w określonych sytuacjach dają szansę na przeniesienie zwiększonych obciążeń bez konieczności zmiany geometrii nawierzchni.

2.1. Założenia projektowe

Przy obliczaniu układu wielowarstwowego nawierzchni lotniskowych posłużono się teorią płyt sprężystych spoczywających na odkształcalnym podłożu. W procesie projektowania uwzględniono interakcję płyty z podłożem zakładając najpowszechniejszy model: płytę na podłożu sprężystym w modelu Winklera. Projekt nawierzchni lotniskowych traktowany jako rozwiązanie indywidualne obejmuje kilka etapów. Etap początkowy stanowi dobór zagadnień wstępnych związanych z wyborem samolotu obliczeniowego oraz jego parametrów charakterystycznych, do których należy zaliczyć natężenie ruchu, wartość przekazywanego obciążenia i sposób jego rozłożenia na nawierzchni (liczba kół w goleni i ich wzajemna konfiguracja, ciśnienie w oponach i powierzchnia styku opony z nawierzchnią). Obciążenie nawierzchni lotniskowych stanowią bowiem zróżnicowane gabarytowo i ciężarowo statki powietrzne. Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienia związane z obciążeniami statycznymi generowanymi na nawierzchnię lotniskową ciężarem wybranego „obliczeniowego” statku powietrznego. Samolot obliczeniowy to ten, który przyjęty jest jako podstawowy środek transportu powietrznego dla danego lotniska. Obciążenie zewnętrzne uwzględniane przy wymiarowaniu płyt stanowił samolot obliczeniowy, Boeing 747-400, o całkowitej masie do startu wynoszącej 394625kg. Obciążenie samolotu prze-

kazywane jest na warstwę jezdnią nawierzchni lotniskowej przez koła goleni. Przyjęty w analizach rozstaw kół, w goleni dziobowej i goleni głównej samolotu obliczeniowego oraz podstawowe parametry samolotu obliczeniowego przyjęte w procesie wymiarowania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Układ kół w goleni głównej samolotu obliczeniowego Boeing 747-400 [2] oraz przyjęte podstawowe parametry samolotu obliczeniowego

Fig. 1. Wheel plan in main hydraulic springs of the subject Boeing 747-400 [2] aircraft and assumed basic aircraft parameters

2.2. Tradycyjne wymiarowanie żelbetowych nawierzchni lotniskowych metodą stanów granicznych

Obciążenie obliczeniowe wyznaczono, przy założeniu 90% obciążenia przypadającego na goleń główną samolotu obliczeniowego. Zgodnie z wytycznymi ICAO procent przenoszonego obciążenia przez goleń główną zawiera się w granicach 85-90%, a przez goleń nosową 10-15%. Dla analizowanego samolotu obliczeniowego o masie równej 394625kg i czterech goleni w podwoziu głównym wartość obciążenia obliczeniowego goleni głównej wynosi 88790,63kg. Przypadające obciążenie na jedno koło w goleni wyznaczono przy założeniu współczynnika dynamicznego odpowiadającego ciśnieniu w oponie samolotu obliczeniowego na poziomie 1,25 oraz współczynnika przeciążenia równego 1,00. Wartość obciążenia dla analizowanego samolotu wynosi więc 27747,07kg. Dla wyznaczonej teoretycznej powierzchni styku koła z nawierzchnią równej 1967,88cm² ($\frac{27747,07}{14,10} = 1967,88$) wyznaczono podstawowe parametry w zależności od przyjętego kształtu. Obliczenia przeprowadzono dla czterech wariantów różniących kształt styku opony z nawierzchnią na kołowy, kwadratowy, elipsy i elipsy z zaokrągleniami. Dla założonego kształtu kwadratowego styku opony z nawierzchnią długość boku wynosi $a = 44,36\text{cm}$, dla kształtu kołowego promień $r = 25,03\text{cm}$, dla elipsy $a_1 = 35,40\text{cm}$ i $b_1 = 17,70\text{cm}$, a dla elipsy z zaokrągleniami $a_2 = 35,07\text{cm}$ i $b_2 = 21,04\text{cm}$.

Przyjęto, iż odkształcenie podłoża gruntowego równe jest co do wartości ugięciu płyty, przy założeniu, że płyta całą dolną powierzchnią znajduje się

w kontakcie z powierzchnią podłoża.[3] Maksymalny moment zginający w oparciu o hipotezę współczynnika reakcji podłoża wyznaczono przy wykorzystaniu metody Koroniewa [3], biorąc pod uwagę reakcję podłoża i ugięcie płyty leżącej na podłożu scharakteryzowanym modelem Winklera. Obliczenia wykonano dla płyty w stanie granicznej nośności. Etapem wstępnym było obliczenie sztywności, wg wzoru (1), płyty o grubości 38cm wykonanej z betonu cementowego klasy C35/45, która wynosi 748576300,10 [kgcm] oraz wyznaczenie promienia względnej sztywności płyty, który wynosi 152,72 [cm].

$$B = \frac{E_z}{\psi} F_z h_0^2 c \quad (1)$$

We wzorze (1) [3] E_z oznacza współczynnik sprężystości zbrojenia, ψ - współczynnik uwzględniający pracę rozciąganego betonu, F_z - przekrój zbrojenia, h_0 - użytkowa wysokość przekroju, c - współczynnik wyznaczony w zależności od współczynnika α . Moment zginający w przekroju pionowym pod środkiem powierzchni styku opony najbardziej obciążonego koła, usytuowanego nad przekrojem obliczeniowym wyznaczono ze wzoru (2) dla $\frac{a}{S} \in < 0,3; 1,0$,

$$M_0 = S q (0,096a - 0,012S) \quad (2)$$

ze wzoru (3) dla $\frac{r}{S} \in < 0,17; 0,56$,

$$M_0 = S q (0,17r - 0,012S) \quad (3)$$

ze wzoru (4) dla $\eta = 1,41 \frac{r}{S}$ a wartości liczbowe zestawiono w tabeli 1-przypadek a.

$$M_0 = -0,558 (1 + \nu) q S r U \quad (4)$$

Tabela 1. Wyznaczone wartości momentów zginających dla koła K_1

Table 1. Determined values of bending moments in case of wheel K_1

Warunek brzegowy	Wartość liczbową		Moment zginający - M_0	M_0 [kNcm]	
	a	b		a	b
$\frac{a}{S}$	0,290	0,317	$M_0 = S q (0,096a - 0,012S)$	52,25	50,90
$\frac{r}{S}$	0,164	0,179	$M_0 = S q (0,17r - 0,012S)$	52,18	50,83
$\eta = 1,41 \frac{r}{S}$	0,23	0,25	$M_0 = -0,558 (1 + \nu) q S r U$	52,92	50,63

Po przyjęciu maksymalnej wartości obliczonego momentu zginającego w środku płyty dla najbardziej wyężonego koła - K_1 wyznaczono sumaryczne momenty zginające dla pozostałych kół K_2 , K_3 i K_4 . W tabeli 2, opierając się na

Tabela 2. Wyznaczone wartości momentów zginających dla kół K₂, K₃ i K₄Table 2. Determined values of bending moments in case of wheel K₂, K₃ and K₄

	Przypadek a			Przypadek b		
Koła	K ₂	K ₃	K ₄	K ₂	K ₃	K ₄
ξ	0,923	1,514	1,200	1,007	1,652	1,309
U	-0,227	-0,187	-0,213	-0,221	-0,174	-0,205
V	-0,219	-0,031	-0,108	-0,154	-0,009	-0,076
M _r [kNcm]	0,099	-0,730	-0,428	-0,320	-0,795	-2,073
M _v [kNcm]	-1,746	-0,993	-1,334	-1,618	-0,873	-1,430
M _x [kNcm]	0,099	-0,862	-1,312	-0,320	-0,834	-1,446
M _v [kNcm]	-1,746	-0,862	-0,450	-1,618	-0,834	-3,503
M _x ^{śr} [kNcm]	50,85			48,30		
M _y ^{śr} [kNcm]	49,86			44,94		
Metoda współrzędnych prostokątnych				Moment statyczny S _b		
ξ	0,923	0,923	0	S _b = $\frac{M_{obl}}{m R_b}$ (9)		15,55 [cm ²]
η	0	1,200	1,200			
M _x [kNcm]	0,009	0,016	0,045	Rozstaw rys l _t		
M _y [kNcm]	0,064	0,032	-0,005	l _t = 0,5 k ₁ n u		48,5 [cm]
M _x [kNcm]	2,386	4,440	12,49			
M _v [kNcm]	17,73	0,888	-1,387	Szerokość rozwarcia rys a _t		
M _x ^{śr} [kNcm]	72,232					
M _y ^{śr} [kNcm]	71,533					
				a _t	0,04 [mm]	

obliczeniach momentów promieniowych M_r - wzór (5) i momentów stycznych M_v - wzór (6) oraz współrzędnych prostokątnych - wzór (7) i (8) zestawiono wyznaczone wartości.

$$M_r = - \frac{P^i}{h} \left(V - \frac{1-\nu}{\xi^i} U \right) \quad (5)$$

$$M_v = - \frac{P^i}{h} \left(\nu V + \frac{1-\nu}{\xi^i} U \right) \quad (6)$$

gdzie: **P** – obciążenie pojedynczego koła w podwoziu,

h – założona grubość płyty,

V, U - funkcje dobrane w zależności od wartości ξ, którą wyznacza się na podstawie $\xi = 1,41 \frac{r'}{S}$ (r' - odległość pomiędzy rozpatrywanym punktem a środkiem styku opony).

$$M_x = P \overline{M_x} \quad (7)$$

$$M_y = P \overline{M_y} \quad (8)$$

gdzie: **P** – obciążenie pojedynczego koła w podwoziu,

$\overline{M}_x, \overline{M}_y$ - momenty zginające dobrane w zależności od punktu przyłożenia siły P oraz wartości ξ , którą wyznacza się na podstawie $\xi = 1,41 \frac{x}{s}$ oraz $\eta = 1,41 \frac{y}{s}$ (x, y - współrzędne przyłożenia siły)

W kolejnym etapie założono procent zbrojenia na poziomie 0,4 stałą o module sprężystości 210GPa i wyznaczono sztywność płyty wg [3] przyjmując bardziej niekorzystną sytuację do wymiarowania konstrukcji, przy sztywności $5,28 \times 10^8 \frac{kN \cdot cm^2}{m}$. Określono sprowadzoną grubość płyty żelbetowej równą 25,11cm, pracującej przy pojawieniu się rysy oraz promień względnej sztywności płyty równy 139,98cm. Wyznaczono momenty zginające dla płyty zbrojonej, które zestawiono w tabeli 3-przypadek b. Przy założeniu współczynnika warunków pracy nawierzchni na poziomie $m=0,9$ i wytrzymałości na ściskanie betonu przy zginaniu na poziomie 34,5MPa wyznaczono moment styczny strefy ściskanej, a następnie przy wysokości ściskanej strefy równej $6,22 \cdot 10^{-3}$ cm wyznaczono przekrój zbrojenia dolnego i rozstaw pomiędzy rysami l_t - tabela 2, przypadek b. Przy założeniu, że $k_1 = 2,8$; stosunek modułów sprężystości stali i betonu $n = 52,50$, a wartość przekroju stali do obwodu wynosi $u=0,66$ cm wyznaczono rozstaw pomiędzy rysami $l_t = 48,5$ cm oraz szerokość rozwarcia rys $a_t = 0,04$ mm.

2.3. Wymiarowanie żelbetowych nawierzchni wg Eurokodu

Na wstępie należy zaznaczyć, iż metoda wymiarowania zgodna z PN-EN [5-7] przeznaczona jest przede wszystkim do projektowania budynków oraz mostów, a także budowli geotechnicznych, z uwagi na fakt iż tok postępowania nie uwzględnia obciążenia dynamicznego, które jest generowane ruchem statków powietrznych. Założenia wstępne do projektowania przyjęto zbieżne z przedstawionymi w pkt. 2.2. W analizach bazowano na stanach granicznych (nośności - SGN i użytkowania - SGU), w których konstrukcja przestaje spełniać wymagania projektowe. W konstrukcji żelbetowej na skutek obciążeń zewnętrznych, skurczu lub czynników termicznych mogą pojawić się rysy, kiedy zostaje przekroczona wytrzymałość na rozciąganie betonu. Zarysowanie powstaje w wyniku zginania, rozkład naprężeń rozciągających jest zmienny na wysokości, a pewna część przekroju jest ściskana. [4]. Obliczenia przeprowadzono dla przekroju w I fazie, tzn. niezarysowanego oraz zarysowanego w fazie II, a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 3, oznaczenia zgodne z [5-7].

3. Wnioski

Przedstawione w referacie zestawienie projektu płyty żelbetowej zaprojektowanej dwoma metodami pozwoliło sformułować następujące wnioski:

Tabela 3. Wyznaczone wartości podstawowych parametrów na kierunku x i y przy wymiarowaniu SGN oraz fazy I i II zarysowania przy wymiarowaniu SGU

Table 3. Determined values of basic parameters at direction x and y during SGN measuring and phases I and II during SGU measuring

Parametry	SGN		SGU	
	Kierunek y	Kierunek x	Faza I	Faza II
μ_{eff}	0,059	0,064	$E_{c,eff}$ [MPa]	x_{II} [m]
ξ_{eff}	0,062	0,067	$13,6 \cdot 10^3$	0,065
$A_{sI} \left[\frac{cm^2}{m} \right]$	7,754	8,06	α	I_{II} [m ⁴]
Sprawdzenie nośności			14,71	$3,25 \cdot 10^{-4}$
$A_{sI}^{min} \left[\frac{cm^2}{m} \right]$	3,611	3,345	x_I [m]	σ_s [kN/m ²]
μ_{eff}	0,061	0,072	0,143	$4,44 \cdot 10^5$
ξ_{eff}	0,062	0,075	I_I [m ⁴]	$A_{sI}^{min} \left[\frac{cm^2}{m} \right]$
ζ_{eff}	0,969	0,963	1,8743	$3,95 \cdot 10^{-4}$
$A_{sI} \left[\frac{cm^2}{m} \right]$	7,90	8,58	M_{cr} [kNm]	w_k [mm]
x_{eff} [m]	0,014	0,015	43,78	0,68
M_{Rd} [kNm]	73,50	72,56	M_{max} [kNm]	$S_{r,max}$ [cm]
M_{Ed} [kNm]	72,23		72,23	41,37

1. Zaprojektowano zbrojenie w strefie rozciąganej wykorzystując pręty o średnicy 16mm rozmieszczone w rozstawie co 20cm i uzyskując wymaganą nośność przekroju przy grubości płyty równej 28cm. Zastosowanie zbrojenia uniemożliwiło wystąpienie przypadkowych pęknięć płyty powstałych na skutek przeciążenia konstrukcji lub gwałtownych zmian termicznych otoczenia. Głównym zadaniem zastosowanych prętów zbrojeniowych było przejęcie sił rozciągających w betonie, poprawa pracy zarysowanego przekroju oraz utrzymanie rozwarcia rys w stałej, nie przekraczającej dopuszczalnej szerokości rys. Dodatkową korzyścią jest ograniczenie wysokości przekroju płyty betonowej.

2. Wykorzystanie w procesie projektowania starszej metody stanów granicznych, z uwagi na fakt, iż przeznaczona jest i przystosowana do wymiarowania lotniskowych nawierzchni żelbetowych dała korzystniejsze wyniki wg przyjętego kryterium rozwarcia rys i rozstawu pomiędzy rysami. Metoda ta bowiem w pełni uwzględnia statykę i charakter podparcia płyty betonowej spoczywającej na podłożu w modelu Winklera.

3. Zastosowanie w procesie projektowania wg metody EC większej grubości otulenia zbrojenia niż wg stanów granicznych wpłynęło bezpośrednio na ramię siły wewnętrznej i w konsekwencji na rozstaw i szerokość rys. Wyliczona wg EC szerokość rysy (0,68mm) jest większa o rząd wielkości, względem tej wyznaczonej wg metody tradycyjnej (0,07mm). Rozstaw pomiędzy rysami różni się o ponad 7cm. Wyliczony wg Eurokodu rozstaw wynosi 41,4cm, natomiast policzony metodą klasyczną wynosi 48,5cm.

Wprowadzenie Eurokodu wymaga synchronizacji z dotychczas obowiązującą w kraju metodą i wyjaśnienia kwestii zróżnicowanych założeń. Na podstawie uzyskanych charakterystyk parametrów żelbetowej nawierzchni lotniskowej stwierdzono, że korzystniejszą, na tym etapie wymiarowania, jest metoda tradycyjna. Wymiarowanie nawierzchni żelbetowych metodą wg Eurokodu wymaga dalszego rozwinięcia i będzie przedmiotem dalszych analiz zespołu autorskiego.

Literatura

- [1] Ajdukiewicz A.: Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych, Wydawnictwo Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2009.
- [2] Linek M., Nita P.: Analiza pracy betonowej konstrukcji nawierzchni lotniskowej, Logistyka nr 6, 2014.
- [3] Nita P.: Betonowe nawierzchnie lotniskowe. Teoria i wymiarowanie konstrukcyjne, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2005.
- [4] Praca zbiorowa pod red. M. Knauffa: Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych wg Eurokodu 2, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006.
- [5] PN-EN 10080:2007 Stal do zbrojenia betonu. Specjalna stal zbrojeniowa. Postanowienia ogólne.
- [6] PN-EN 1990:2004 Eurokod 0. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [7] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

AIRFIELD PAVEMENTS MADE OF REINFORCED CONCRETE

Summary

In the previous airfield construction industry pavements made of reinforced concrete have been used very rarely, however the necessity to use this type of pavements in particular situations justifies the reason why this scientific publication refers to this issue. The work concerns the problem of airfield pavement dimensioning made of reinforced concrete and the evaluation of selected dimensioning methods of reinforced concrete slabs intended for airfield pavements. Analysis of slabs dimensioning, according to classical method of limit states has been performed and it has been compared to results obtained in case of methods complying with Eurocode 2 guidelines. Basis of an analysis was a concrete slab of C35/45 class of reinforcement, located in tension section. Steel bars of 16,0 mm have been used as slab reinforcement. According to comparative analysis of obtained results conclusions were reached regarding application legitimacy of the discussed methods and their design advantages.

Keywords: reinforced concrete, cement concrete, airport pavements

Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.

DOI: 10.7862/rb.2016.82