

MIROSLAW GRACZYK¹⁾ARTUR ZBICIAK²⁾KAZIMIERZ JOZEFIAK³⁾

DESIGN OF AIRPORT PAVEMENTS WITH USE OF ANALYTICAL METHODS AND FEM

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD ANALITYCZNYCH I MES

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono przykładowe rozwiązania konstrukcyjne uzyskane metodami analitycznymi oraz omówiono zastosowane podejścia projektowe. Zaprezentowano również wyniki obliczeń analitycznych konstrukcji nawierzchni lotniskowych: sztywnej i podatnej. Zwrócono uwagę na możliwości zastosowań metody elementów skończonych (MES) i skupiono uwagę na różnych technikach modelowania komputerowego. Wyniki obliczeń MES, dotyczące stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w płytach, zostały porównane z rezultatami otrzymanymi na podstawie klasycznego modelu Westergaarda.

SŁOWA KLUCZOWE: MES, nawierzchnie lotniskowe, projektowanie konstrukcji.

ABSTRACT. The paper presents examples of design solutions obtained with analytical methods and describes the applied design approach. It also includes the outputs of analyses carried out on two types of airport pavement structures: rigid and flexible. Analytical possibilities of Finite Element Method (FEM) are presented with the focus on various computer modelling techniques. The outputs of FEM analyses concerning the stresses, strains and displacements in slabs were compared against the results obtained with the conventional Westergaard model.

KEYWORDS: airport pavements, FEM, structural design.

DOI: 10.7409/rabdim.015.007

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa; mgraczyk@ibdim.edu.pl (✉)

²⁾ Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; a.zbiciak@il.pw.edu.pl

³⁾ Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; k.jozefiak@il.pw.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Nawierzchnie lotniskowe mają swoją specyfikę, przez co proces ich projektowania jest znacznie bardziej skomplikowany w porównaniu z nawierzchniami drogowymi [1-3]. W przypadku tych ostatnich w wielu sytuacjach można zastosować typowe rozwiązania katalogowe [4, 5], podczas gdy nawierzchnie lotniskowe powinny zawsze być projektowane jako rozwiązania indywidualne. Wynika to przede wszystkim z większych obciążeń, jakie spotyka się na nawierzchniach lotniskowych. Konstrukcje te narażone są na dużą liczbę operacji startów i lądowań, przy wzrastających masach nowych samolotów sięgających nawet 650 ton [6]. Biorąc pod uwagę sposób przenoszenia obciążeń, rozróżniamy nawierzchnie lotniskowe o konstrukcji sztywnej – wykonane najczęściej z betonu cementowego, nawierzchnie podatne – w których górne warstwy są zbudowane z mieszanek mineralno-asfaltowych, oraz nawierzchnie o konstrukcji mieszanej.

Zasadniczą kwestią przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni jest dobór odpowiedniego układu warstw, zapewniającego bezpieczne przeniesienie obciążeń zewnętrznych przekazywanych przez koła goleni samolotu. W projekcie konstrukcji należy również uwzględnić obciążenia związane z oddziaływaniem czynników klimatycznych. Na etapie projektowania trzeba ustalić poziom nośności konstrukcji definiowany poprzez graniczną wielkość obciążenia i liczbę jego powtórzeń. Wśród czynników decydujących o nośności nawierzchni należy wymienić przede wszystkim grubości i własności mechaniczne warstw konstrukcyjnych oraz rodzaj i stan podłoża gruntowego. Istotne znaczenie ma również stan połączeń międzywarstwowych, woda infiltrująca w konstrukcję i w grunt oraz temperatura warstw asfaltowych [6].

2. ANALITYCZNE METODY OKREŚLANIA NOŚNOŚCI

W obliczeniach analitycznych konstrukcji nawierzchni lotniskowej wykorzystano głównie metody Westergaarda, FAA, ACN-PCN oraz metodę stanów granicznych. Poniżej skrótowo opisano każde z tych podejść projektowych.

W metodzie Westergaarda wykorzystuje się model płyty półnieskończonej, opartej na sprężystym podłożu [7-9]. We wzorach określających naprężenia brak jest wymiarów konstrukcji. Naprężenia występujące w betonowej płycie nawierzchni określone zostały przy następujących założeniach: płyta jest ciałem jednorodnym i izotropowym; konstrukcja na całej swej dolnej powierzchni opiera się na

1. INTRODUCTION

Airport pavements, due to specific considerations related to their application, require much more complex design process as compared to the road pavements [1-3]. Standard catalogue solutions are often an option in the case of the latter [4, 5]. Conversely, for airport pavements individual designs must be created in all cases. This is primarily due to considerable in-service loads which airport pavements are expected to withstand. These include a huge number of takeoff and landing operations with increasing aircraft weight reaching currently up to 650 tons [6]. Due to load transfer mechanism the airport pavements can be classified as rigid (most often made of Portland cement concrete), flexible – with the upper layers made of asphalt-aggregate mixes, and composite constructions.

The primary task in the design of pavement structure is a selection of the appropriate layered structure in a way ensuring safe transfer of external loads imposed thereon by the landing gear wheels. Moreover, the pavement design should take into account the effect of the environmental factors. At the design stage it is necessary to determine the bearing capacity of the pavement in relation to the maximum load and the number of its repetitions. The primary factors determining the bearing capacity of pavement include the thickness and mechanical properties of the pavement layers, as well as the type and parameters of subgrade. Other relevant factors include: condition of bond between pavement layers, water infiltration of the pavement structure and soil, as well as the in-service temperature of the asphalt layers [6].

2. ANALYTICAL METHODS DETERMINING BEARING CAPACITY

The analytical design calculations of airport pavement are based mainly on the Westergaard, FAA, ACN-PCN and limit states methods. These different approaches are briefly described below.

In the Westergaard method pavement is represented by a semi-infinite slab resting on elastic foundation [7-9]. Therefore, the stress equations do not include structure size data. The following assumptions are undertaken for the purpose of calculating the stresses generated in the concrete slab of pavement: the slab is homogenous and isotropic; the structure underside is fully supported on the base; the forces acting on the slab come from external load and reaction of subgrade, the slab has uniform thickness

podłożu; na płytę działają siły pochodzące od obciążenia zewnętrznego oraz od reakcji podłoża; grubość płyty na całej długości i szerokości jest stała; reakcja podłoża ma kierunek pionowy, a jej wartość jest proporcjonalna do ugięcia płyty. W metodzie tej uwzględnia się trzy najbardziej charakterystyczne położenia obciążenia odwzorowującego nacisk koła pojazdu na nawierzchnię, a mianowicie w narożu, w środku płyty oraz na krawędzi.

W metodzie wymiarowania i oceny nośności FAA (Federalnej Agencji Lotniczej USA) modelem obliczeniowym nawierzchni jest schemat zaproponowany przez Westergarda przy obciążeniu zlokalizowanym w środku i na krawędzi płyty. Projektowanie nawierzchni przeprowadza się na okres 20 lat albo 20 tysięcy obciążeń pojazdem. W metodzie tej wprowadza się pojęcie pojazdu obliczeniowego. Różną strukturę ruchu przelicza się na ten pojazd. Nowszą wersją metody to model obliczeniowy nawierzchni w postaci układu warstwowego. W modelu FAA materiały poszczególnych warstw są opisane modułami sprężystości E_i oraz współczynnikiem Poissona ν_i . Górną warstwę stanowi płyta betonowa położona na podbudowie. Podłoże gruntowe ma grubość 6 m i spoczywa na sztywnej warstwie. Obliczenia naprężeń dokonuje się za pomocą programu BISAR dla samolotu obliczeniowego.

W celu weryfikacji obliczeń klasyczną metodą Westergarda użyty został system klasyfikacji oraz określania nośności nawierzchni lotniskowych ACN-PCN zgodny z zaleceniami ICAO (Międzynarodowej Organizacji Lotnictwa Cywilnego). Liczba klasyfikacyjna statku powietrznego ACN (ang. *Aircraft Classification Number*) opisuje oddziaływanie tego statku na nawierzchnię przy określonych kategoriach podłoża, z uwzględnieniem położenia środka ciężkości odpowiadającego krytycznemu obciążeniu krytycznego podwozia. Liczba klasyfikacyjna nawierzchni PCN (ang. *Pavement Classification Number*) wskazuje na to, że statki powietrzne tych typów, których liczby klasyfikacyjne (ACN) są równe bądź mniejsze niż PCN określony dla konkretnej nawierzchni, mogą poruszać się i pozostawać na tej nawierzchni bez ograniczania ciśnienia w oponach lub całkowitej masy statku powietrznego. Liczba klasyfikacyjna nawierzchni PCN to wartość opisująca nośność nawierzchni odpowiadającą nieograniczonemu użytkowaniu. Dane o nośności nawierzchni określonej metodą PCN-ACN udostępnia się w następującej postaci: $PCN = X_1/X_2/X_3/X_4/X_5$, gdzie: X_1 – liczba PCN, X_2 – określenie rodzaju nawierzchni ($X_2 = R$ – nawierzchnia sztywna, $X_2 = F$ – nawierzchnia podatna), X_3 – określenie nośności podłoża, X_4 – określenie największego dopuszczalnego ciśnienia w oponach, X_5 – określenie metody oceny.

in both longitudinal and transverse directions; the direction of subgrade reaction is vertical and its value is proportional to the slab deflection. Load is placed in three locations which are most representative of the load applied onto the pavement by aircraft wheel, that is at the slab corner, centre and edge.

The method FAA used by the US Federal Aviation Administration, evaluating dimensioning and pavement bearing strength, is based on computational model derived from the Westergaard scheme with the load placed at slab centre and slab edge. The design life expectancy is 20 years or 20,000 coverages. This method uses the design aircraft concept. It is used to represent the loads imposed by mixed traffic. In a more recent version of this method the pavement is represented by a layered model. In the FAA model the materials of the respective layers of pavement are described by the modulus of elasticity E_i and Poisson's ratio ν_i . The upper layer is a concrete slab supported on a base. The soil subgrade is 6 m thick and rests on a rigid layer. The stress calculations are carried out with the computer program BISAR for the design aircraft.

For verification of calculations done with the conventional Westergaard method the ACN-PCN pavement strength determination and rating system was used, as recommended by ICAO (International Civil Aviation Organization). The action of aircraft on the pavement depending on the strength class of subgrade is defined by the Aircraft Classification Number (ACN) for the centre of gravity location corresponding to the critical loading on the critical landing gear. The other parameter, namely Pavement Classification Number (PCN) indicates that aircraft whose ACN is smaller than or equal to the PCN determined for a given pavement is allowed to move and remain on that pavement without tyre pressure limitations or weight restrictions. PCN describes the bearing capacity of pavement in a situation when no restrictions are imposed on traffic. The bearing capacity of pavement determined with PCN-ACN method is presented in the following format: $PCN = X_1/X_2/X_3/X_4/X_5$, where: X_1 – numerical PCN value, X_2 – type of structure (R for rigid and F for flexible), X_3 – subgrade bearing capacity, X_4 – maximum tyre pressure allowable, X_5 – evaluation method. The subgrade bearing capacity categories X_3 are A, B, C, D (A for the highest bearing capacity). The categories of the maximum tyre pressure allowable X_4 are W, X, Y or Z with W representing the highest value (no pressure restrictions). There are two procedures used for rating the bearing capacity of pavement X_5 : one is a technical

Nośność podłoża X_3 jest określana za pomocą grup od A do D, przy czym grupa A oznacza nośność najwyższą. Dopuszczalne ciśnienie w oponach X_4 oznaczane jest grupami W, X, Y, Z, gdzie grupa W oznacza najwyższe ciśnienie (bez ograniczeń). Wyróżnia się dwie metody oceny nośności nawierzchni X_5 : techniczną – na podstawie badań charakterystyki nawierzchni ($X_5 = T$) oraz doświadczalną – na podstawie wiedzy o statkach dotychczas korzystających z nawierzchni ($X_5 = U$).

Metoda stanów granicznych według [10] stosowana w obliczeniach podatnych nawierzchni lotniskowych jest zmodyfikowana w stosunku do stosowanej w wymiarowaniu nawierzchni drogowych. W metodzie stosowanej do nawierzchni lotniskowych dopuszcza się pojawienie pojedynczych rys, ale i wówczas konstrukcja zachowuje swoją nośność. W metodzie tej podłoże gruntowe jest scharakteryzowane współczynnikiem odkształcenia E_0 , który powinien być określony in situ za pomocą próbnego obciążenia w najbardziej niekorzystnych warunkach gruntowo-wodnych, tj. wczesną wiosną. Na podstawie próbnego obciążenia współczynnik odkształcenia podłoża gruntowego wyznacza się ze wzoru:

$$E_0 = \frac{p}{\lambda} \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad (1)$$

gdzie:

$$p \text{ – ciśnienie wywierane na grunt [N/mm}^2\text{]},$$

$$\lambda = \frac{l}{D} \text{ – (} l \text{ oznacza osiadanie gruntu odpowiadające ciśnieniu } p \text{, zaś } D \text{ średnicę płyty naciskowej).}$$

Możliwe jest również określenie współczynnika odkształcenia podłoża gruntowego metodą laboratoryjną. Wszystkie materiały warstw konstrukcyjnych nawierzchni są również charakteryzowane współczynnikami odkształcenia. W metodzie stanów granicznych uwzględnia się: (i) obciążenie na jedno koło samolotu obliczeniowego, liczbę kół w goleni głównej, schemat geometryczny rozstawu kół i odległości między kołami; (ii) ciśnienie w oponach kół samolotu; (iii) charakterystykę podłoża gruntowego; (iv) wartości współczynników odkształcenia materiałów konstrukcyjnych warstw; (v) wartości współczynników obliczeniowych; (vi) minimalną dopuszczalną grubość warstw konstrukcyjnych w zależności od przyjętego materiału.

evaluation on the basis of pavement parameters ($X_5 = T$) and the other is experimental – based on the information on aircraft satisfactorily supported by the pavement ($X_5 = U$).

In the calculations of airport pavements bearing capacity the limit states method according to [10] is modified in relation to the method used for dimensioning of road pavements. The method used for designing aircraft pavements allows isolated cracks to occur without compromising the bearing capacity of the structure. In this method the subgrade is described by the value of the modulus of elasticity of the subgrade soil E_0 , which should be determined in situ in the most adverse water and soil conditions, i.e. during early spring. The elasticity coefficient is calculated on the basis of the measured values and the following equation:

$$E_0 = \frac{p}{\lambda} \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad (1)$$

where:

$$p \text{ – vertical contact pressure [N/mm}^2\text{]},$$

$$\lambda = \frac{l}{D} \text{ – (} l \text{ - corresponding settlement of the surface under pressure } p \text{, } D \text{ - load plate diameter).}$$

The modulus of elasticity of subgrade soil may also be determined in laboratory environment. The materials used for the respective pavement layers are also described by elasticity coefficients. The limit states method is based on the following input data: (i) design aircraft wheel load, number of wheels in main gear, gear wheel spacing (lateral and longitudinal); (ii) tyre pressure; (iii) soil subgrade parameters; (iv) coefficients values of the layers design materials; (v) values of calculation coefficients; (vi) minimum layer thickness depending on the chosen type of material.

3. ANALYTICAL CALCULATIONS OF PAVEMENT STRUCTURE

3.1. EXAMPLE OF RIGID PAVEMENT STRUCTURE

The limit state method was used to design an example of airport pavement of Portland cement concrete (PCC). The design was verified with the Federal Aviation Administration (FAA) method. As the final step of the design process the profile of pavement structure was determined, including bearing capacity expressed by initial PCN value.

3. OBLICZENIA ANALITYCZNE KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI

3.1. PRZYKŁADOWA NAWIERZCHNIA O KONSTRUKCJI SZTYWNEJ

W celu zaprojektowania przykładowej konstrukcji nawierzchni lotniskowej z betonu cementowego dokonano obliczeń według metody stanów granicznych. Obliczenia sprawdzające przeprowadzono według metody Federalnej Administracji Lotnictwa (FAA). Końcowym efektem było określenie układu warstw konstrukcji nawierzchni wraz z jej nośnością wyrażoną wstępnie liczbą PCN.

Przyjęto samolot obliczeniowy BOENING 747-400, który dla najbardziej niekorzystnych warunków ma przypisaną liczbę ACN równą 85. Masa całkowita tego samolotu wynosi od 395987 do 178459 kg. Do obliczeń przyjęto ciężar całkowity odpowiadający wartości PCN = 85. Podwozie samolotu składa się z czterech czterokołowych goleni głównych. Obciążenie jednej goleni głównej wynosi 23,4% (max. 909,004 kN), przy ciśnieniu w oponach 1,41 MPa. Rozstaw kół w goleni głównej przedstawia Rys. 1. W Tabl. 1 zestawiono liczby ACN w zależności od nośności podłoża gruntowego.

Table 1. ACN numbers for the B747-400 aircraft with total mass of 395987 - 178459 kg
Tablica 1. Liczby ACN samolotu B747-400 przy masie całkowitej 395987 - 178459 kg

Subgrade bearing capacity Nośność podłoża k [MN/m ³]	Aircraft classification number ACN Liczba klasyfikacyjna samolotu ACN	
	max.	min.
150	53	19
80	63	21
40	75	25
20	85	29

Do obliczeń przyjęto grunt kategorii D o wytrzymałości $k = 20$ MPa/m. Założono beton klasy C30/37, charakteryzujący się modułem Younga $E_b = 31,0$ GPa, współczynnikiem Poissona $\nu = 0,16$ oraz wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu $R_{zg} = 5,5$ MPa. Obciążenie obliczeniowe na jedno koło wynosi:

BOEING 747-400 was adopted as a design aircraft with ACN value of 85 for the most adverse conditions. Gross weight of this airplane is between 395.987 and 178.459 kg. The weight used as input for design calculations corresponds to the value of PCN = 85. The airplane has double dual tandem gear. Each leg is loaded with 23.4% of the gross weight (909.004 kN max.) at 1.41 MPa tyre pressure. The main gear wheel configuration is presented in Fig. 1. Table 1 presents the ACN values depending on the subgrade bearing capacity.

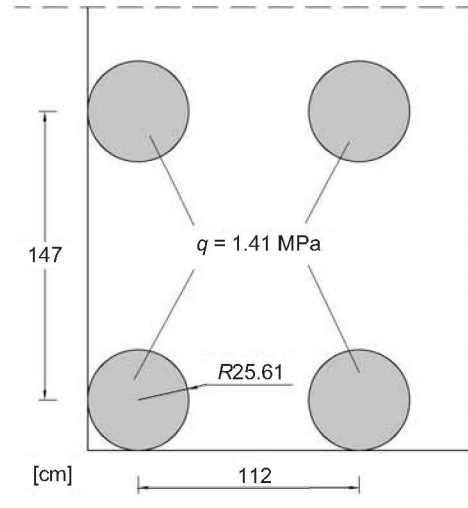


Fig. 1. Loading scheme for concrete plate under the B747-400 aircraft main gear
Rys. 1. Schemat obciążenia płyty betonowej golenią główną samolotu B747-400

As the input for design calculation the bearing capacity category D was taken with $k = 20$ MPa/m. The following concrete parameters were adopted: C30/37, Young's modulus of $E_b = 31.0$ GPa, Poisson's ratio of $\nu = 0.16$ and tensile strength in bending of $R_{zg} = 5.5$ MPa. The design wheel load is calculated as follows:

$$P = n k_d \frac{P_0}{N}, \quad (2)$$

where:

n – overload ratio (here: $n = 1$),

k_d – dynamic coefficient (here: $k_d = 1.15$),

P_0 – load per one main gear (here: $P_0 = 909.0$ kN),

N – number of main gear wheels (here: $N = 4$).

This yields $P = 261.338$ kN. Assuming tyre pressure of $q = 1.41$ MPa yields the contact area of the tyre of $F = P/q = 1.853$ cm².

$$P = n k_d \frac{P_0}{N}, \quad (2)$$

gdzie:

- n – współczynnik przeciążenia (tu: $n = 1$),
- k_d – współczynnik dynamiczności (tu: $k_d = 1,15$),
- P_0 – obciążenie przypadające na jedną goleń główną (tu: $P_0 = 909,0$ kN),
- N – liczba kół goleni głównej (tu: $N = 4$).

Z tego otrzymuje się $P = 261,338$ kN. Przy ciśnieniu w oponach $q = 1,41$ MPa powierzchnia styku koła z nawierzchnią wynosi $F = P/q = 1,853$ cm².

W obliczeniach według metody stanów granicznych założono nawierzchnię betonową jednowarstwową. Uzyskano grubość płyty betonowej równą 51 cm, a po przeliczeniu na konstrukcję dwuwarstwową otrzymano: warstwę górną z betonu C35/45 o grubości $h_g = 33$ cm oraz warstwę dolną z betonu C30/37 o grubości $h_d = 27$ cm. W sumie grubość konstrukcji betonowej wyniosła 60 cm. Przyjęta konstrukcja nawierzchni jest przedstawiona na Rys. 2. Według metody FAA odczytano z wykresu grubość jednowarstwową nawierzchni równą 42,5 cm. Na podstawie tych wyników przyjęto następującą konstrukcję nawierzchni lotniskowej podaną w Tabl. 2.

Table 2. Calculated thickness values of the layers of rigid pavement structure

Tablica 2. Obliczone grubości warstw konstrukcji nawierzchni sztywnej

Thickness Grubość [cm]	Layer / Warstwa
60	C35/45 Portland Cement Concrete (PCC), 5×5 m slabs joined with dowels and anchors Beton cementowy C35/45, płyty 5×5 m, dyblowane i kotwione
20	Mixed sand and gravel stabilised with cement Stabilizacja pospółki cementem
20	Frostproof layer Warstwa mrozoodporna

Następnie dokonano sprawdzenia nośności powyższej konstrukcji nawierzchni lotniskowej metodą ACN-PCN zgodnie z [11]. Założono zastępczą grubość nawierzchni jednowarstwową $h = 42,5$ cm, nośność podłoża $k = 70$ MN/m³, standardowe ciśnienie w oponach wynoszące 1,25 MPa oraz naprężenie robocze równe 2,75 MPa. Wartość ACN według

The calculations based on limit states method are done for a single layer PCC pavement. The thickness of the concrete slab obtained in this way was 51 cm, which was then distributed between the layers of a two-layer pavement structure giving the upper layer of C35/45 concrete with the thickness of $h_g = 33$ cm and the lower layer of C30/37 concrete with the thickness of $h_d = 27$ cm. This gave concrete pavement structure of 60 cm thick. The designed pavement is presented in Fig. 2. FAA method was used to read from the graph the thickness of single-layer pavement (42.5 cm). The structure of airport pavement obtained on the basis of these results is presented in Table 2.

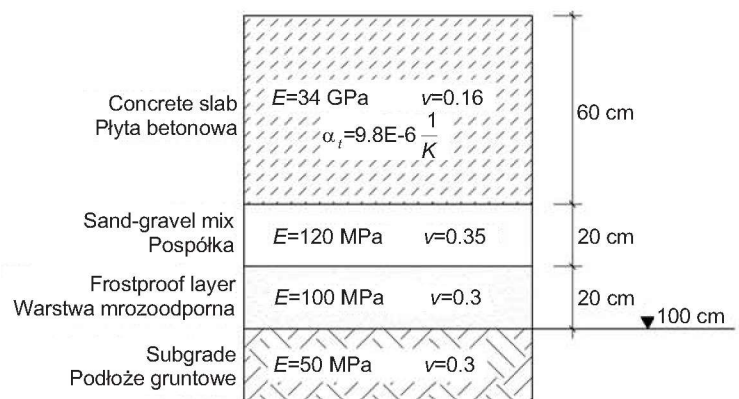


Fig. 2. Layered structure of rigid aircraft pavement

Rys. 2. Układ warstw sztywnej nawierzchni lotniskowej

The next step was to verify the bearing capacity of the designed pavement using the ACN-PCN according to [11]. The following values were applied: equivalent single-layer thickness of $h = 42.5$ cm, bearing capacity of subgrade $k = 70$ MN/m³, 1.25 MPa standard tyre pressure and service stress of 2.75 MPa. For these parameters the ACN value of 88 was obtained, as calculated according to [11]. The pavement classification number PCN = 88/R/D/W/U was finally determined for the designed pavement on the basis of the input data, calculations and analyses, following the guidelines of Section 2.5 of Appendix 14 of [11]. With the PCN value of 88 the pavement satisfies the strength criterion (PCN is greater than or equal to ACN) for aircraft of ACN = 86. A shoulders structure was chosen as a standard design according to the pavement design catalogue [5].

[11] dla powyższych warunków wyniosła $ACN = 88$. Na podstawie danych wyjściowych, obliczeń oraz analizy, zgodnie z zaleceniami zawartymi w punkcie 2.5 aneksu 14 w [11], ustalono następującą liczbę klasyfikacyjną projektowanej konstrukcji nawierzchni lotniskowej: $PCN = 88/R/D/W/U$. Stwierdza się, że zaprojektowana konstrukcja spełniła warunek założonej nośności dla samolotu obliczeniowego o $ACN = 86$: $PCN(88) \geq ACN(86)$. Podatną konstrukcję poboczy przyjęto jako standardową według katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych [5].

3.2. PRZYKŁADOWA NAWIERZCHNIA O KONSTRUKCJI PODATNEJ

Celem obliczeń przeprowadzonych w tym punkcie było zaprojektowanie przykładowej konstrukcji nawierzchni podatnej o liczbie $PCN = 60$. Obliczenia wykonano według metody FAA zawartej w [11]. Dokonano również sprawdzenia metodą stanów granicznych według punktu 3.5 w [10]. Końcowym efektem było określenie układu warstw konstrukcji nawierzchni podatnej wraz z jej nośnością, wyrażoną liczbą PCN . Założono bazowe podłoże gruntowe z glin pylistych o wartości wskaźnika $CBR = 3\%$. Do analizy przyjęto samolot obliczeniowy BOEING - B767-200. Masa całkowita tego samolotu wynosi od 78976 do 143789 kg. Samolot ma podwozie z dwoma czteroślupowymi goleniami głównymi. Obciążenie jednej nogi głównej wynosi 46,2% (max. 667 kN), a ciśnienie w oponie jest na poziomie 1,31 MPa. Rozstaw kół goleni głównej z uwzględnieniem symetrii, przedstawia Rys. 3. W Tabl. 3 przedstawiono liczby ACN samolotu w zależności od nośności podłoża.

Table 3. ACN numbers for the B767-200 aircraft with total mass of 78976 - 143789 kg
Tablica 3. Liczby ACN samolotu B767-200 przy masie całkowitej 78976 - 143789 kg

Subgrade bearing capacity Nośność podłoża CBR [%]	Aircraft classification number ACN Liczba klasyfikacyjna samolotu ACN	
	max.	min.
15	37	18
10	40	19
6	47	21
3	65	26

3.2. EXAMPLE OF FLEXIBLE PAVEMENT STRUCTURE

The purpose of calculations carried out in this point was to design a model of flexible pavement with $PCN = 60$. The calculations were made using the FAA method as defined by [11]. The design was verified with the limit states method in accordance with 3.5 of [10]. Finally, the profile of pavement structure was determined, including bearing capacity expressed by numerical PCN value. The subgrade was assumed to be built of silty clay of $CBR = 3\%$. The design aircraft was BOEING - B767-200. The gross weight of this airplane is between 78.976 and 143.789 kg. The airplane has dual tandem gear. Each leg is loaded with 46.2% of the gross weight (667 kN max.) at 1.31 MPa tyre pressure. For wheel configuration of the main gear see Fig. 3 (to be symmetrically duplicated). The PCN numerical values of the plane, depending on the bearing capacity of subgrade, are given in Table 3.

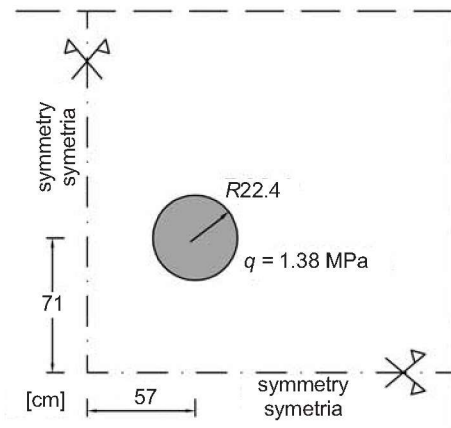


Fig. 3. Loading scheme for flexible pavement structure under the B767-200 aircraft main gear
Rys. 3. Obciążenie podatnej nawierzchni lotniskowej golenią główną samolotu B767-200

According to the FAA method the total thickness of pavement was 68 cm. The pavement thickness obtained with the limit states method was 70.38 cm. This gives 4.2% difference between the results obtained with these two methods. With this level of difference it is allowed to conclude that the design calculations are correct. With additional calculations carried out for the flexible pavement layers with FFA method the pavement structure as presented in Fig. 4 was finally designed. The bearing capacity of the designed airport pavement was then evaluated with the ACN - PCN method according to [11]. The ACN value was

Według metody FAA otrzymano całkowitą grubość nawierzchni równą 68 cm. Stosując metodę stanów granicznych uzyskano rezultat w postaci grubości równej 70,38 cm. Różnica pomiędzy tymi dwoma metodami wyniosła zatem 4,2%. Przy tej różnicy można uznać, że obliczenia zostały wykonane w sposób właściwy. Dodatkowe obliczenia poszczególnych warstw nawierzchni podatnej według metody FFA pozwoliły na przyjęcie konstrukcji nawierzchni pokazanej na Rys. 4. Sprawdzono nośność zaprojektowanego układu warstw konstrukcji nawierzchni lotniskowej metodą ACN-PCN według [11]. Ustalono wartość ACN zakładając sumę grubości warstw nawierzchni $t = 118$ cm, nośność podłoża $CBR = 4\%$ oraz standardowe ciśnienie w oponach równe 1,25 MPa. Stąd:

$$ACN = \frac{t^2}{\frac{1000}{0,878} - 0,01249} = 67,26. \quad (3)$$

Na podstawie danych wyjściowych, obliczeń i analizy, zgodnie z zaleceniami zawartymi w punkcie 2.5 [11], ustalono następującą liczbę klasyfikacyjną projektowanej konstrukcji nawierzchni lotniskowej: PCN = 69/F/C/X/U. Projektowana nawierzchnia o konstrukcji podatnej spełnia warunek nośności w odniesieniu do samolotów o liczbie klasyfikacyjnej ACN = 65 przy wyszczególnionych warunkach: PCN(69) > ACN(65).

determined for total pavement thickness of $t = 118$ cm, subgrade bearing capacity of $CBR = 4\%$ and 1.25 MPa standard tyre pressure. Hence we obtain:

$$ACN = \frac{t^2}{\frac{1000}{0,878} - 0,01249} = 67,26. \quad (3)$$

Finally, on the basis of the input data, calculation and verifications, as per the guidance provided in 2.5 [11], the designed airport pavement obtained PCN = 69/F/C/X/U. The designed flexible pavement satisfies the bearing capacity requirement concerning the aircrafts with ACN = 65 when: PCN(69) > ACN(65).

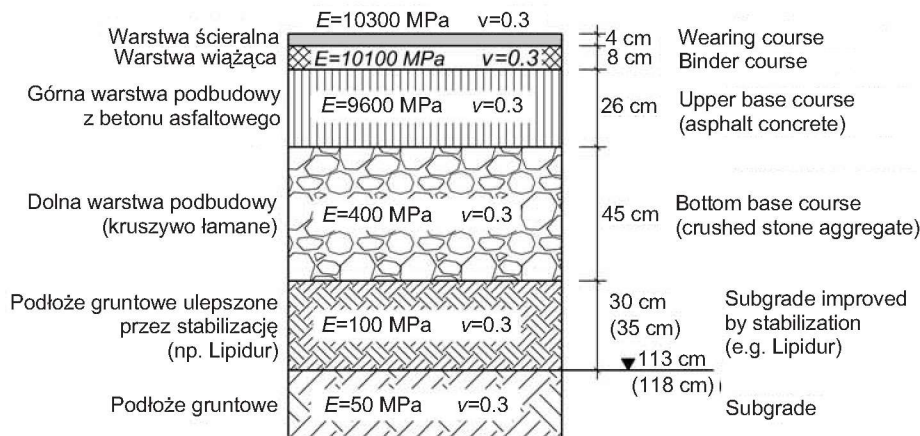


Fig. 4. Layered structure of flexible pavement with two options for stabilized subgrade thickness

Rys. 4. Układ warstw nawierzchni podatnej (dwa warianty grubości podłoża stabilizowanego)

4. WERYFIKACJA ZA POMOCĄ MES

4.1. UWAGI OGÓLNE

Przeprowadzono analizę MES, która miała na celu porównanie otrzymanych rezultatów z metod obliczeniowych stosowanych w poprzednich punktach. Zbadano dwie przykładowe konstrukcje nawierzchni – sztywną oraz podatną. Nawierzchnie poddano obciążeniu eksploatacyjnemu oraz obciążeniu temperaturą. Badano wpływ modelowania kontaktu (możliwości separacji) pomiędzy płytą oraz warstwami podłoża.

4.2. KONSTRUKCJA SZTYWNEJ NAWIERZCHNI LOTNISKOWEJ

Zbudowano model trójwymiarowy, w którym płyta betonowa o wymiarach w planie 5×5 m oparta jest na uwarstwionym podłożu (Rys. 1). Przyjęto grubość płyty obliczeniowej

4. FEM DESIGN VERIFICATION

4.1. GENERAL REMARKS

The purpose of FEM analysis was to compare the values calculated with the methods described in the preceding sections. Two examples of pavement structure types, rigid and flexible, were examined. Both traffic and thermal loads were considered in the analysis. Moreover, the impact of contact modelling assuming the possibility of planes' separation was analysed for the slab/subgrade interface.

odpowiadającej rzeczywistej sumie połączonych warstw – warstwy jezdnej i warstwy podbudowy betonowej. Geometrię konstrukcji, warunki brzegowe oraz sposób przyłożenia obciążenia podano na Rys. 5. Należy podkreślić, że odpowiednie więzy kinematyczne były przykładane jedynie do warstw gruntowych, gdyż płyty oddzielone są dylatacjami. Wysokość warstwy gruntu rodzimego przyjęto równą 5 m. Rys. 6 przedstawia siatkę MES z wyróżnionym szczegółem strefy naroża. Konstrukcja została podzielona na około 76 tysięcy elementów skończonych. Wykorzystano ośmio-węzłowe elementy bryłowe bez całkowania zredukowanego [12] (oznaczone C3D8 w programie Abaqus [13]). Materiał wszystkich warstw modelowano jako linowo-sprężysty o parametrach jak na Rys. 1. Obliczenia statyczne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem solwera typu implicit: Abaqus/Standard. Nie uwzględniano wpływu efektów dynamicznych.

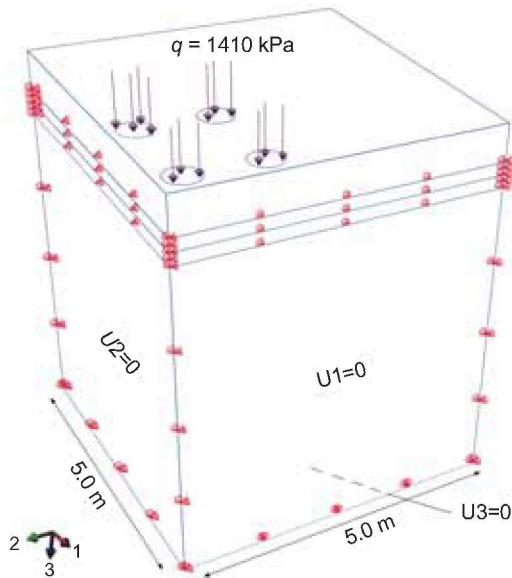


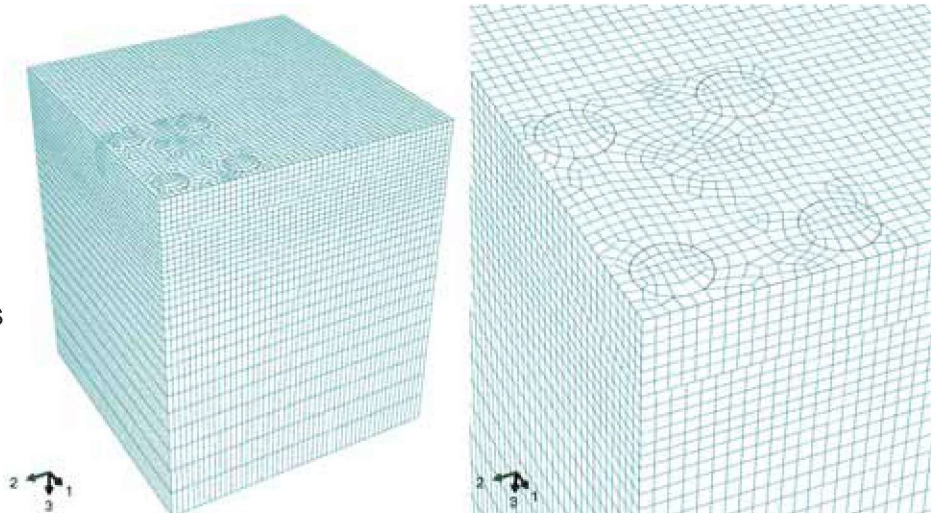
Fig. 5. Geometry of rigid pavement model with boundary conditions and loading scheme

Rys. 5. Geometria modelu nawierzchni sztywnej, warunki brzegowe oraz sposób przyłożenia obciążenia

4.2. RIGID AIRPORT PAVEMENT STRUCTURE

A three-dimensional model was built with concrete slab of 5x5 m dimensions which rests on a layered foundation (Fig. 1). The design thickness corresponded to the actual total thickness of the system comprising the surface and concrete base layers. The structure geometry, boundary conditions and configuration of load application are shown in Fig. 5. It should be emphasized that the required kinematic joints were applied only to subgrade layers because there were settlement joints between slabs. The depth of native soil was taken at 5 m. FEM grid with highlighted corner area is presented in Fig. 6. The structure was divided to ca. 76.000 elements. Hexahedral solid elements were used without reduced integration [12] (designated C3D8 in Abaqus computer program [13]). All the layers were modelled assuming linear-elastic behaviour of their material with the parameters shown in Fig. 1. The calculations were carried out for static load with implicit solver of Abaqus/Standard. The dynamic effect of loading was not considered.

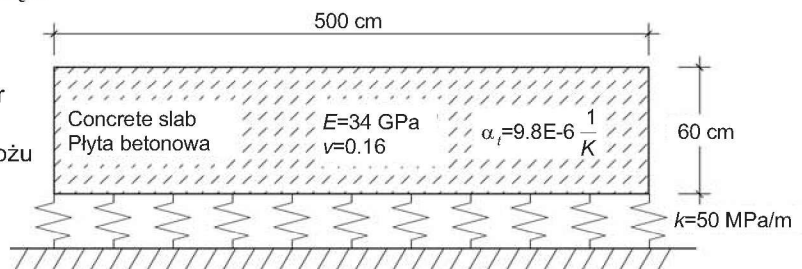
Fig. 6. FEM mesh
Rys. 6. Siatka MES



Każda warstwa konstrukcji nawierzchni stanowiła osobną część modelu MES, dzięki czemu dodanie efektów tarcia oraz kontaktu nie stanowiło problemu. W przypadku pierwszego wariantu (Tabl. 4) warstwy zostały zespolone ze sobą sztywno, wymuszając te same przemieszczenia punktów na płaszczyźnie styku bez możliwości poślizgu ani odrywania. W przypadku podejścia II oraz III (Tabl. 4) stosowano podstawowy model tarcia Coulomba, który zakłada zależność siły tarcia τ_{crit} od ciśnienia pomiędzy ciałami p . Maksymalne naprężenie ścinające pomiędzy ciałami wynosi $\tau_{crit} = \mu \cdot p$, gdzie μ oznacza współczynnik tarcia. Z chwilą osiągnięcia tego naprężenia ciała zaczynają się przesuwać względem siebie. Model ten zakłada, że współczynnik tarcia jest taki sam we wszystkich kierunkach (tarcie izotropowe). W przypadku symulacji trójwymiarowych obiektów występują dwie składowe naprężenia ścinające: τ_1 i τ_2 . Do obliczenia kontaktu program wykorzystuje zastępcze naprężenie ścinające $\bar{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$ [13]. Przyjęto współczynnik tarcia równy 0,8 oraz dopuszczono możliwość odrywania się płaszczyzn po osiągnięciu kontaktu. W ostatnim podejściu do zagadnienia (wariant IV – Tabl. 4) zbadano naprężenia w płycie, która leży na jednoparametrowym sprężystym podłożu Winklera-Zimmermanna (Rys. 7). W przypadku wariantów I i II przyjęto obciążenie w postaci podwójnego tandemu równoległego ustawionego w narożu płyty (Rys. 1), jako że jest to przypadek najbardziej niekorzystny. Ciśnienie przykładano na powierzchnię kół o promieniu $r = 25,61$ cm, tak aby siła na jedno koło wynosiła $P = 1162/4 = 290,5$ kN. W wariantach III i IV zbadano również zachowanie się nawierzchni obciążonej gradientem temperatury o wartości $0,66^\circ\text{C}/\text{cm}$.

Fig. 7. Calculation scheme of concrete plate on Winkler elastic foundation

Rys. 7. Schemat obliczeniowy płyty betonowej na podłożu sprężystym Winklera



With each layer of the pavement modelled as a separate part of FEM model it was possible to consider the effect of friction and contact between them. In the first case (Table 4) layers were rigidly bonded resulting in equal displacement of points in the contact plane without slippage or separation. In approaches II and III (Table 4) the basic Coulomb friction model was applied, which relates the maximum allowable frictional stress τ_{crit} to the contact pressure between the contacting bodies p . The maximum shear stress between these bodies is $\tau_{crit} = \mu \cdot p$, where μ is the coefficient of friction. Upon reaching this level of stress the bodies start to move in relation to each other. This model assumes that the value of friction coefficient is the same in all directions (isotropic friction). In the case of 3D simulations of objects we have two shear stress components: τ_1 and τ_2 . To calculate the contact value the program uses equivalent shear stress calculated as $\bar{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$ [13]. The coefficient of friction was taken at 0.8 and detaching of planes upon reaching the contact was allowed. In the last approach (No. IV – Table 4) the stresses were determined in the slab resting on Winkler-Zimmermann single-parameter subgrade model (Fig. 7). For cases I and II the load configuration was parallel dual tandem gear placed in the corner of slab (Fig. 1) as the worst case situation. The pressure was applied within radius of $r = 25.61$ cm to obtain wheel load of $P = 1.162/4 = 290.5$ kN. Moreover, in cases III and IV temperature gradient of $0.66^\circ\text{C}/\text{cm}$ was applied to check the effect of temperature gradient on the pavement behaviour.

Table 4. Variants of rigid pavement analysis

Tablica 4. Warianty analizy nawierzchni sztywnej

Approach Podejście	Interaction: subgrade - concrete slab Interakcja: podłoże - płyta betonowa	Loading Obciążenie
I	All layers tied together Wszystkie warstwy zespolone sztywno ze sobą	Dual tandem gear Podwójny tandem
II	The plate can separate from foundation; friction Płyta może odrywać się od podłoża; tarcie	Dual tandem gear Podwójny tandem
III	The plate can separate from foundation; friction Płyta może odrywać się od podłoża; tarcie	Temperature Temperatura
IV	The plate lies on Winkler foundation Płyta na podłożu Winklera	Temperature Temperatura

Na Rys. 8-10 przedstawiono wykresy warstwowe przemieszczeń pionowych. W przypadku modelu bez kontaktu maksymalne przemieszczenia górnej krawędzi płyty wyniosły około 12 mm. Wprowadzenie kontaktu oraz możliwości oderwania się płyty od podłoża spowodowało zwiększenie maksymalnych wartości przemieszczeń do około 17 mm. Obciążenie gradientem temperatury wywołało maksymalne przemieszczenia wynoszące około 4 mm. Na Rys. 11-14 pokazano warstwy największych naprężeń głównych w kolejnych wariantach analizy. Wartości naprężeń rozciągających w płycie wahały się od 0,997 MPa do 1,56 MPa. Maksymalne wartości naprężeń rozciągających w płycie leżącej na podłożu Winklera wyniosły około 1,16 MPa i były o kilkanaście procent większe w porównaniu z modelem, w którym podłoże było modelowane elementami bryłowymi. Zestawienie ekstremalnych wartości naprężeń pokazano w Tabl. 5.

Fig. 8-10 present contour diagrams of vertical displacements. In the case of model without contact the maximum displacement of the top edge of slab is ca. 12 mm. Upon introduction of contact and allowing for separation of the slab from subgrade the maximum displacements increased to ca. 17 mm. Loading the model with temperature gradient resulted in maximum displacement of ca. 4 mm. Fig. 11-14 present the contour lines of the greatest principal stresses for the next analytical variants. The tensile stresses generated in the slab were in the range of 0.997 MPa to 1.56 MPa. For the slab resting on Winkler foundation the maximum tensile stresses were ca. 1.16 MPa which is over a dozen percent more than in the model with foundation modelled with solid elements. The worst case stress values are given in Table 5.

Table 5. Extreme values of displacements and tension stresses in concrete plate

Tablica 5. Zestawienie ekstremalnych wartości przemieszczeń oraz naprężeń rozciągających w płycie betonowej

Analysis variant Wariant analizy	Maximum value of horizontal displacement of the plate Maksymalne przemieszczenia pionowe płyty [mm]	The highest value of maximum principal stress in the plate Maksymalna wartość największego głównego naprężenia rozciągającego w płycie [MPa]
I	12.2	1.560
II	17.0	1.000
III	-4	0.997
IV	-	1.160

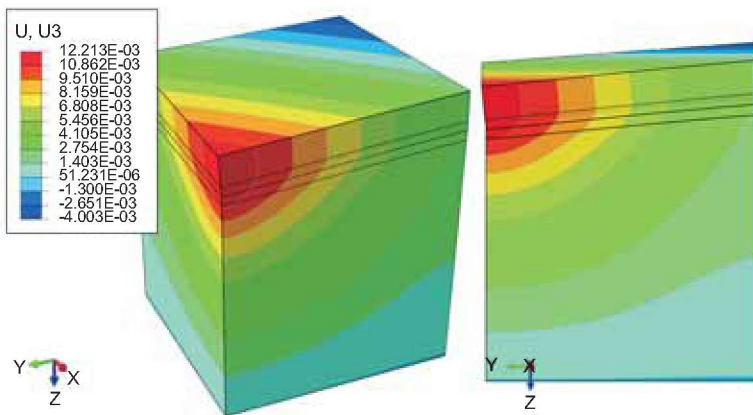


Fig. 8. Contours of rigid pavement vertical displacements - model I (no contact); deformation scale factor 50

Rys. 8. Warstwy przemieszczeń pionowych sztywnej konstrukcji nawierzchni - wariant I (brak kontaktu); przemieszczenia przeskalowane 50-krotnie

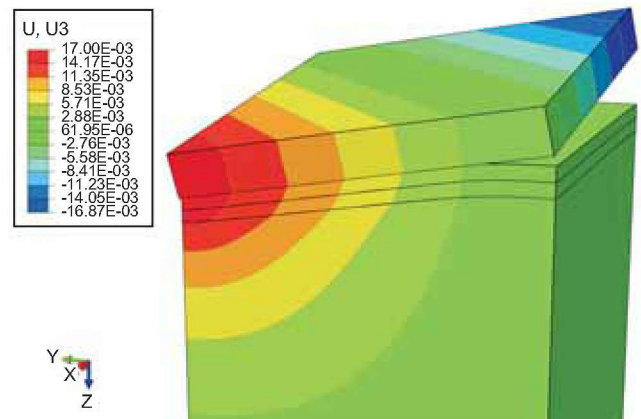


Fig. 9. Contours of rigid pavement vertical displacements - II variant (contact modelling); deformation scale factor 50

Rys. 9. Warstwy przemieszczeń pionowych sztywnej konstrukcji nawierzchni - wariant II (modelowanie kontaktu); przemieszczenia przeskalowane 50-krotnie

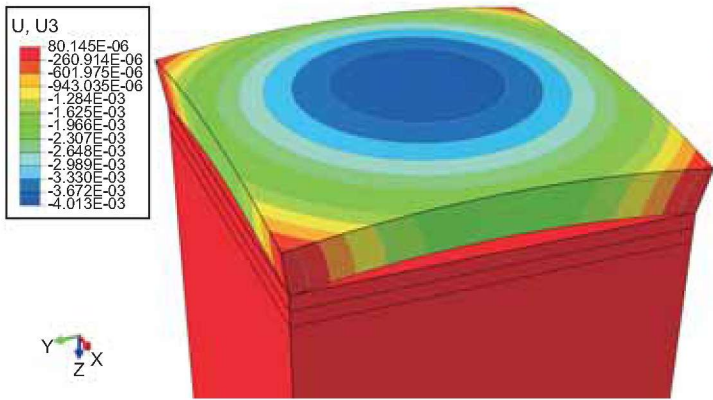


Fig. 10. Contours of vertical displacements for rigid pavement under temperature gradient - III variant (contact modelling); deformation scale factor 100

Rys. 10. Wykres warstwowy przemieszczeń pionowych sztywnej konstrukcji nawierzchni pod obciążeniem gradientem temperatury - wariant III (modelowanie kontaktu); przemieszczenia przeskalowane 100-krotnie

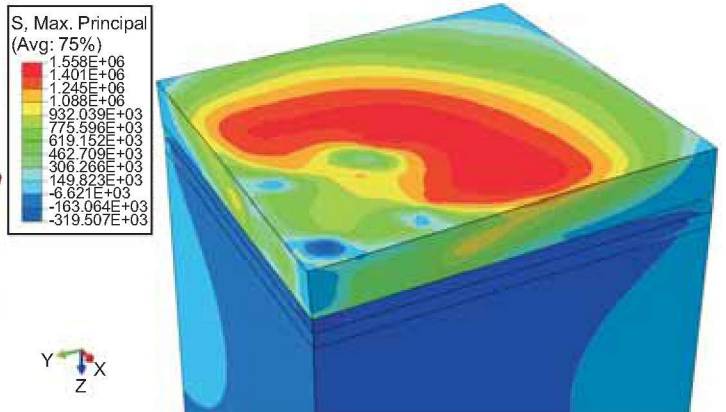


Fig. 11. Contours of maximum principal stresses in concrete plate - I variant (no contact)

Rys. 11. Wykres warstwowy największych naprężeń głównych - wariant I (brak kontaktu)

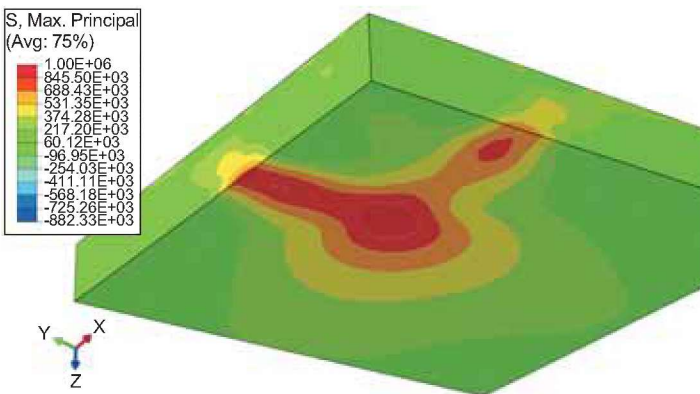


Fig. 12. Contours of maximum principal stresses in concrete plate - II variant (contact modelling)

Rys. 12. Wykres warstwowy największych naprężeń głównych w płycie betonowej - wariant II (modelowanie kontaktu)



Fig. 13. Contours of maximum principal stresses in concrete plate - III variant (temperature loading, contact)

Rys. 13. Wykres warstwowy największych naprężeń głównych w płycie betonowej - wariant III (obciążenie temperaturą, kontakt)

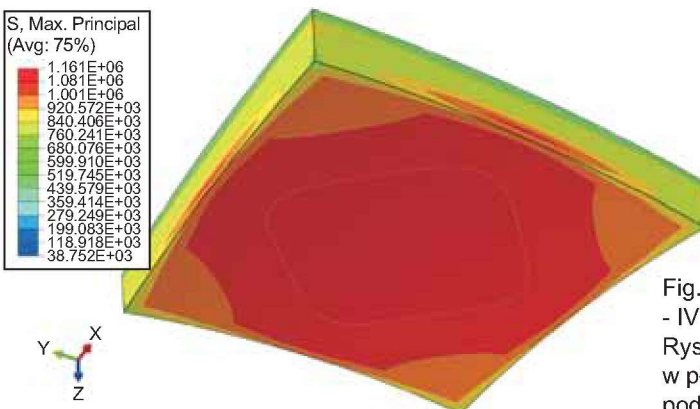


Fig. 14. Contours of maximum principal stresses in concrete plate - IV variant (plate on Winkler foundation under temperature loading)

Rys. 14. Wykres warstwowy największych naprężeń głównych w płycie betonowej - wariant IV (płyta obciążona temperaturą na podłożu Winklera)

4.3. KONSTRUKCJA PODATNEJ NAWIERZCHNI LOTNISKOWEJ

Rozpatrywano dwa warianty układu warstw konstrukcyjnych różniące się grubością warstwy podłoża ulepszanego przez stabilizację (Rys. 4). W pierwszym wariantcie warstwa ta miała wysokość 30 cm, a w drugim została pogrubiona do wartości 35 cm. Model konstrukcyjny stanowi nieograniczona półprzestrzeń sprężysta, obciążona gołenią podwozia czterokołowego. Ze względu na symetrię układu (dwie płaszczyzny symetrii) przyjęto zredukowany schemat pokazany na Rys. 4 i 15. Model stworzono zgodnie z wymogami mechanicznej metody projektowania nawierzchni drogowych. Warstwy zostały ze sobą sztywno połączone (bez możliwości separacji). Materiał przyjęto jako liniowo sprężysty, izotropowy. Badano maksymalne wartości odkształceń pionowych oraz poziomych. Wyniki zestawiono w Tabl. 6. Rys. 16 i 17 przedstawiają wykresy warstwicowe wybranych odkształceń w przypadku obu rozwiązań. Zwiększenie grubości warstwy ulepszanego podłoża umożliwiło redukcję odkształceń pionowych w gruncie z $-805,6 \cdot 10^{-6}$ do $-792,2 \cdot 10^{-6}$.

Table 6. Strains in critical points of pavement structure (Fig. 15)

Tablica 6. Wartości odkształceń w krytycznych punktach nawierzchni (Rys. 15)

Pavement layer (point) Warstwa nawierzchni (punkt)	Stabilized subgrade 30 cm thick Podłoże stabilizowane grubości 30 cm		Stabilized subgrade 35 cm thick Podłoże stabilizowane grubości 35 cm	
	Maximum strain / Maksymalne odkształcenie			
	horizontal / poziome	vertical / pionowe	horizontal / poziome	vertical / pionowe
Asphalt concrete base course (pt. A) Podbudowa z MMA (pkt A)	$108.7 \cdot 10^{-6}$	–	$108.1 \cdot 10^{-6}$	–
Crushed stone base course (pt. A) Podbudowa z kruszywa łamanego (pkt A)	–	$-296.9 \cdot 10^{-6}$	–	$-297.1 \cdot 10^{-6}$
Improved subgrade (pt. B) Grunt stabilizowany (pkt B)	–	$-536.8 \cdot 10^{-6}$	–	$-532.1 \cdot 10^{-6}$
Subgrade (pt. C) Grunt rodzimy (pkt C)	–	$-805.6 \cdot 10^{-6}$	–	$-792.2 \cdot 10^{-6}$

5. WNIOSKI

W pracy omówiono metody stosowane w projektowaniu nawierzchni lotniskowych oraz przedstawiono przykładowe rozwiązanie analityczne. Na podstawie zaprojektowanych układów warstw konstrukcyjnych nawierzchni sztywnych i podatnych stworzono modele komputerowe do obliczeń metodą elementów skończonych. Wyniki obliczeń MES, dotyczące stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w płytach, porównano z rezultatami otrzymanymi na podstawie klasycznego modelu Westergaarda.

4.3. FLEXIBLE AIRPORT PAVEMENT STRUCTURE

Two variants of pavement structure were analysed with the difference between them being the depth of subgrade stabilisation (Fig. 4). The depth of 30 cm of the first variant was increased to 35 cm in the second variant. The structural model is elastic infinite half-space loaded with a dual tandem gear. Considering symmetrical configuration (two planes of symmetry) a reduced diagram was adopted as presented in Fig. 4 and Fig. 15. The model was created according to guidelines of the mechanical road pavement design method. The pavement layers are rigidly bonded (separation is not allowed). The material is isotropic with linear elastic behaviour. The analysed parameters were maximum vertical and horizontal deflections. The results are compiled in Table 6. The contour plots of selected horizontal and vertical strain components for both analysed cases are presented in Fig. 16-17. By increasing the depth of subgrade stabilisation the vertical strain component in subgrade was reduced from $-805.6 \cdot 10^{-6}$ to $-792.2 \cdot 10^{-6}$.

5. CONCLUSION

The paper outlines the methods applied in designing airfield pavements, and it presents some exemplary analytical solutions. Some virtual models for calculations making use of the finite element method were created basing on a designed arrangement of structural layers of rigid and flexible pavements. Results of FEM calculations concerning states of stress, strains, and displacement in pavement slabs were compared with results obtained by means of Westergaard's classical model.

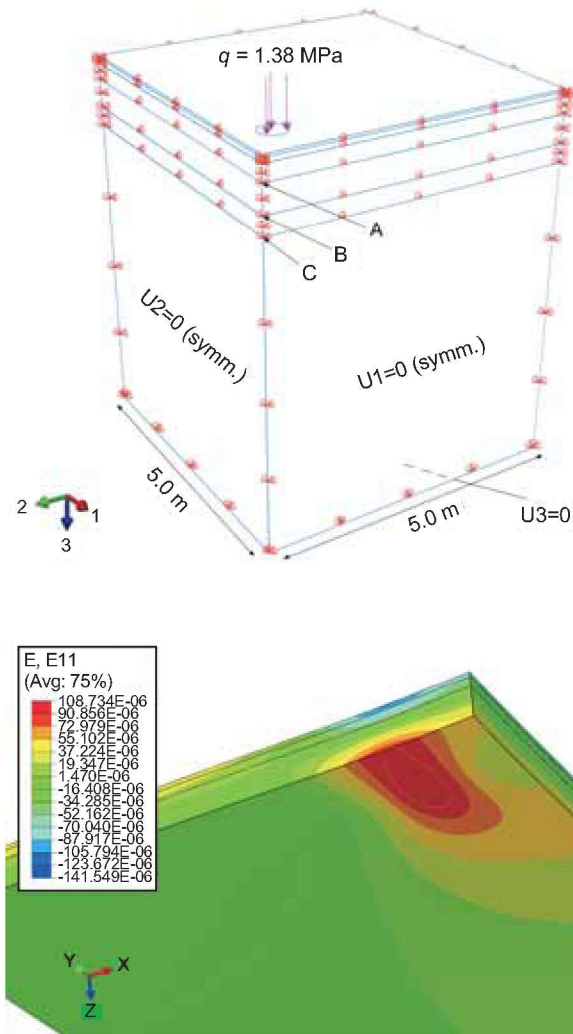


Fig. 15. Geometry of flexible pavement model with boundary conditions and loading scheme
Rys. 15. Geometria modelu nawierzchni podatnej, warunki brzegowe oraz sposób przyłożenia obciążenia

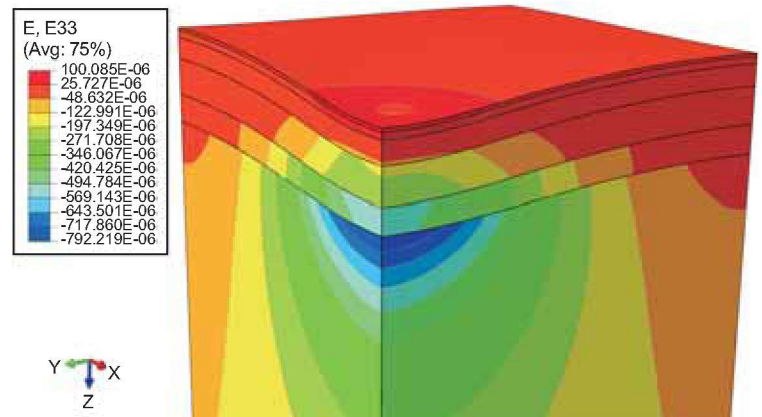


Fig. 17. Contours of vertical strain component ε_{zz} in flexible pavement - model with 35 cm layer of improved subgrade; deformation scaling factor 300
Rys. 17. Wykres warstwowy odkształceń pionowych ε_{zz} w nawierzchni podatnej - rozwiązanie z 35 cm warstwą ulepszanego podłoża; przemieszczenia przeskalowane 300-krotnie

Fig. 16. Contours of horizontal strain component ε_{xx} at the bottom of asphalt concrete base - model with 30 cm layer of improved subgrade

Rys. 16. Wykres warstwowy odkształceń poziomych ε_{xx} na spodzie podbudowy z betonu asfaltowego - rozwiązanie z 30 cm warstwą ulepszanego podłoża

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz porównawczych oceniono różnice wynikające ze stosowania metod analitycznych i metody MES do wymiarowania nawierzchni lotniskowych. Z porównania zastosowania metod do lotniskowych nawierzchni sztywnych wynika, że metoda analityczna charakteryzuje się następującymi cechami: dokładne obliczenie naprężeń od obciążeń samolotem nawierzchni betonowej w charakterystycznych punktach płyty według schematu Westergaarda tj. w narożu płyty, w środku krawędzi płyty oraz w środku płyty; uwzględnienie naprężeń termicznych wynikających z różnic

It results from the comparison of the applied methods for airfield pavements that the analytical method is marked by the following features: exact calculations of stress induced by an aircraft load in characteristic points of a slab according to Westergaard's diagram i.e. in the slab corner, in the midpoint of slab edge, and in the slab centre; taking into consideration thermal stresses brought about by temperature differences between top and bottom of the concrete slab. Moreover, FEM enables: loading with optional numbers of wheels and their mutual location on the main undercarriage leg (e.g. 2, 4, 6, or more wheels on the main leg situated longitudinally or parallel) in an optional place of the rigid slab of airfield pavement; a possibility of fast determination of stresses in an assumed path of approach of wheels of the main undercarriage leg (e.g. outside the

temperatury między górą a spodem płyty betonowej. Natomiast metoda MES pozwala na: położenie obciążenia od dowolnej liczby kół i ich wzajemnego usytuowania na goleni głównej samolotu (np.: 2, 4, 6 czy więcej kół w goleni głównej usytuowanych podłużnie czy równolegle) w dowolnym miejscu płyty sztywnej nawierzchni lotniskowej, możliwość szybkiego określenia naprężeń w założonej ścieżce przejazdu kół goleni głównych samolotu (np. poza narożem płyty, środkiem krawędzi płyty czy środka płyty); definiowanie kontaktu pomiędzy warstwami z założonym współczynnikiem tarcia; modelowanie możliwości odrywania się płyty od podbudowy.

W przypadku obliczeń lotniskowych nawierzchni podanych różnice między metodami charakteryzują się następująco. W metodzie analitycznej przyjmuje się obciążenie na jedno koło samolotu obliczeniowego uwzględniając liczbę kół w goleni głównej, schemat geometryczny rozstawu kół i odległości między kołami oraz ciśnienie w oponach. Dodatkowo uwzględnia się charakterystykę podłoża gruntowego, wartości współczynników obliczeniowych i minimalną dopuszczalną grubość warstw konstrukcyjnych w zależności od przyjętego materiału. Natomiast model MES stworzono zgodnie z wymogami mechanistycznej metody projektowania nawierzchni drogowych. Warstwy zostały ze sobą sztywno połączone (bez możliwości separacji). Materiał przyjęto jako liniowo sprężysty, izotropowy. Badano maksymalne wartości odkształceń pionowych oraz poziomych na dowolnych poziomach.

slab corner, the midpoint of slab edge, or the slab centre); defining contacts between layers with an assumed friction factor; modelling the risk of breaking the slab off the sub-soil.

In case of the airfield calculations of flexible pavements the differences between the methods are as follows. In the analytical method the load per one wheel of a computational aircraft is assumed and the number of wheels of the main leg, geometrical scheme of wheel track, the distance between legs as well as the pressure of aircraft wheel tires are taken under consideration. Moreover, sub-soil characteristics, values of computational factors and the minimal permissible thickness of structural layers depending on adopted material are taken under account. Whereas the model created with the use of FEM was in accordance with requirements of the mechanistic method for pavement design. Individual layers were stiffly joined together (with no possibility of separation). The material was regarded as a linear-elastic isotropic one. The maximal values of vertical and horizontal displacements at optional levels were examined.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Kozieł S.*: Lotniskowe nawierzchnie betonowe. WKiŁ, Warszawa, 1972
- [2] *Łopatek Z.*: Projektowanie konstrukcji nawierzchni lotniskowych. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1967
- [3] *Nita P.*: Betonowe nawierzchnie lotniskowe: teoria i wymiarowanie konstrukcyjne. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2005
- [4] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. IBDiM, GDDP, Warszawa, 2001
- [5] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM, GDDP, Warszawa, 1997
- [6] *Graczyk M.*: Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych, Studia i materiały, zeszyt 63, IBDiM, Warszawa, 2010
- [7] *Papagiannakis A.T., Masad E.A.*: Pavement Design and Materials. Wiley, New Jersey, 2008
- [8] *Szydło A.*: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego: teoria, wymiarowanie, realizacja. Polski Cement, Kraków, 2004
- [9] *Yoder E.J., Witczak M.W.*: Principles of Pavement Design. 2nd Ed., Wiley, New York, 1975
- [10] Wytyczne lotniskowe - projektowanie ukształtowania i obliczenie nawierzchni pól wzlotów stałych lotnisk wojskowych MON. DWLot, Poznań
- [11] Aerodrome Design Manual (Doc 9157-AN/901) Part 3 Pavements-ICAO
- [12] *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.*: The Finite Element Method. Fifth edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000
- [13] ABAQUS Analysis User's Manual, Ver. 6.12. Dassault Systèmes, 2012