Krzysztof BLACHA, Mariusz WESOŁOWSKI

ANALIZA STANU NOŚNOŚCI UKŁADU SZTYWNEGO KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI LOTNISKOWEJ WEDŁUG ZAŁOŻEŃ METODY ACN-PCN

Streszczenie

Nawierzchnia lotniskowa to wyznaczona i odpowiednio przygotowana powierzchnia elementu funkcjonalnego lotniska (EFL) spełniającego określoną funkcję w realizacji operacji lotniczych. Konstrukcję nawierzchni lotniskowej stanowi najczęściej zespół warstw, których zadaniem jest przejęcie i przeniesienie na podłoże gruntowe obciążeń pochodzących od poruszających się statków powietrznych i śmigłowców w sposób zapewniający określoną jej trwałość. Podstawowym rodzajem nawierzchni lotniskowych są nawierzchnie sztywne (sprężyste) wykonane z betonu cementowego. Jedną z głównych cech eksploatacyjnych nawierzchni lotniskowej jest jej nośność, czyli zdolność układu konstrukcyjnego do bezpiecznego przenoszenia obciążeń od statków powietrznych w określonym czasie. Ocena nośności nawierzchni lotniskowych przeprowadzana jest według założeń metody ACN-PCN. Zasadniczym problemem przy wymiarowaniu nawierzchni lotniskowych jest przyjęcie właściwego modelu obliczeniowego konstrukcji, który opisuje sposób współpracy oraz właściwości mechaniczne poszczególnych warstw.

W artykule przedstawiono podejście do oceny stanu nośności układu sztywnego konstrukcji nawierzchni lotniskowych według założeń metody ACN-PCN. Zaprezentowano fizyczne i matematyczne modele obliczeniowe dla podłoża gruntowego i konstrukcji nawierzchni lotniskowych wykonanych w technologii betonu cementowego, które mają praktyczne zastosowanie w warunkach krajowych.

WSTĘP

Nawierzchnia lotniskowa to wyznaczona i odpowiednio przygotowana powierzchnia elementu funkcjonalnego lotniska (EFL) spełniającego określoną funkcję w realizacji operacji lotniczych, tj. przeznaczonego do ruchu, postoju i obsługi statków powietrznych. Współczesne statki powietrzne generują odpowiednio wysokie obciążenia i poruszają się z dużymi prędkościami, wobec czego wymagają nawierzchni lotniskowych dobrze zaprojektowanych, prawidłowo wybudowanych i utrzymanych w wysokiej kulturze technicznej. Czynniki te mają na celu zapewnić bezpieczeństwo przemieszczających się po nich statków powietrznych.

Konstrukcję nawierzchni lotniskowej stanowi najczęściej zespół warstw, których zadaniem jest przejęcie i przeniesienie na podłoże gruntowe obciążeń pochodzących od poruszających się statków powietrznych i śmigłowców w sposób zapewniający określoną jej trwałość.

Nawierzchnie lotniskowe można podzielić na dwie grupy [4]:

- nawierzchnie naturalne: gruntowe, trawiaste i darniowe,
- nawierzchnie sztuczne, które w zależności od sposobu przenoszenia obciążeń można podzielić na:
  - nawierzchnie sztywne (sprężyste) wykonane z betonu cementowego,
  - nawierzchnie podatne wykonane z betonu asfaltowego,
  - nawierzchnie złożone (sprężysto – podatne), w których wykonano wzmocnienie konstrukcji sztywnej warstwą z betonu asfaltowego.

Podstawowym rodzajem nawierzchni lotniskowych są nawierzchnie z betonu cementowego. Innego rodzaju nawierzchnie np. nawierzchnie z betonu asfaltowego są również stosowane, stanowią jednak tylko uzupełnienie podstawowego rodzaju nawierzchni. Ograniczone stosowanie nawierzchni z betonu asfaltowego wynika z emisji gorących gazów spalinowych pochodzących z dysz współcześnie eksploatowanych samolotów, którym nawierzchnie te nie są w stanie sprostać. Dlatego nawierzchnie betonowe obecnie i w najbliższej przyszłości stanowić będą podstawowy rodzaj, który jednak może być modyfikowany i przystosowywany do nowych zadań i potrzeb.

Jedną z głównych cech eksploatacyjnych nawierzchni lotniskowej jest jej nośność rozumiana jako zdolność układu konstrukcyjnego do przenoszenia obciążeń od statków powietrznych w określonym czasie. Nośność nawierzchni uzależniona jest nie tylko od obciążeń samolotów, lecz także od wielu czynników zewnętrznych, w tym od czynników atmosferycznych [9]. W przypadku nawierzchni wykonanych z betonu cementowego, jako najważniejsze można wymienić:

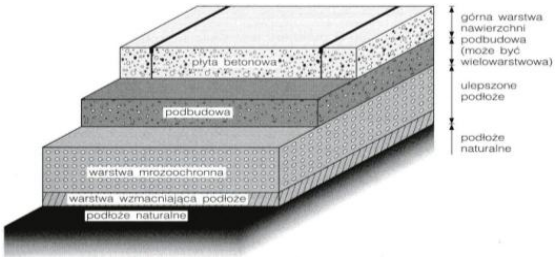
- liczbę operacji lotniczych odbywających się lub planowanych na przedmiotowej nawierzchni,
- wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu,
- przekrój konstrukcji nawierzchni,
- rodzaj, zagęszczenie, wilgotność podłoża gruntowego,
- temperaturę podczas prowadzonych badań.

Parametry podłoża gruntowego mogą zmieniać się w zależności od istniejących warunków meteorologicznych. W przypadku nawierzchni lotniskowych wykonanych z betonu cementowego należy również wziąć pod uwagę wpływ zjawiska deformacji płyt betonowych pod wpływem temperatury. Biorąc pod uwagę powyższe przyjmuje się, że badania nośności powinny być wykonywane w okresie wiosennym lub późnojesiennym, nie powinno zaś się ich wykonywać w okresie zimowym.

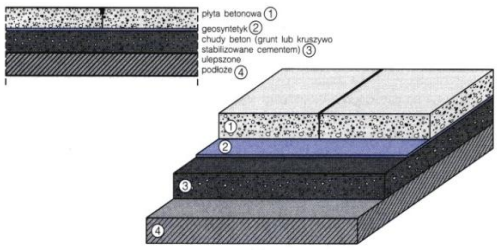
Do pełnej analizy nośności nawierzchni lotniskowej niezbędna jest identyfikacja parametrów fizykomechanicznych materiałów poszczególnych jej warstw konstrukcyjnych i podłoża gruntowego. Identyfikacja powinna być prowadzona w sposób uwzględniający rzeczywiste warunki pracy nawierzchni, ponieważ ma istotny wpływ na określanie nośności nawierzchni lotniskowych ze względu na fakt, iż sposób przekazywania obciążenia przez statki powietrzne na podłoże gruntowe jest zależny od rodzaju konstrukcji nawierzchni lotniskowej. W zależności od jej rodzaju oraz sposobu pracy, do wyrażenia charakteru oddziaływania statku powietrznego na nawierzchnię wykorzystuje się odpowiednie modele matematyczne.

1. UKŁADY KONSTRUKCYJNE BETONOWEJ NAWIERZCHNI LOTNISKOWEJ

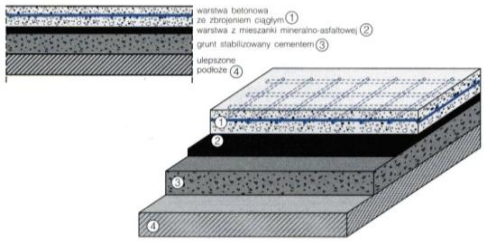
Nawierzchnia lotniskowa o układzie sztywnym to układ kilku warstw ułożonych na naturalnym lub ulepszonym podłożu, tworzących konstrukcję nośną umożliwiającą ruch statków powietrznych oraz przejmowanie i przenoszenie na podłoże gruntowe pochodzących od nich obciążeń. Warstwa nośna (warstwa jezdna) wykonana jest w postaci płyt z betonu cementowego zwykłego, dyblowanego, zbrojonego lub sprężonego. Poniżej przedstawiono typowe układy konstrukcyjne sztywnych (sprężystych) nawierzchni lotniskowych [6].



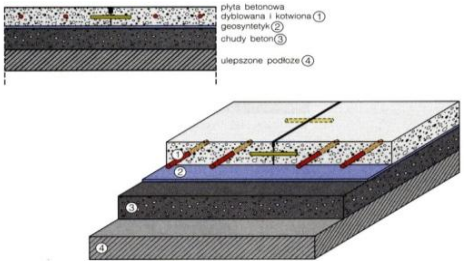
Rys. 1. *Układ warstw w konstrukcji nawierzchni z betonu cementowego*



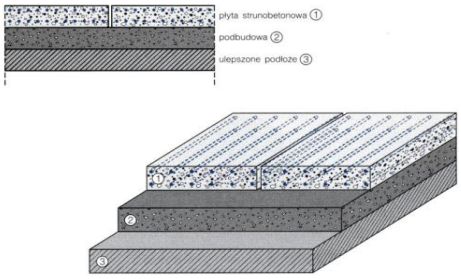
Rys. 2. *Nawierzchnia sztywna niezbrojona*



Rys. 3. *Nawierzchnia sztywna zbrojona*



Rys. 4. *Nawierzchnia sztywna dyblowana*



Rys. 5. *Nawierzchnia sztywna sprężona*

2. MODELE OBLICZENIOWE SZTYWNYCH NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH

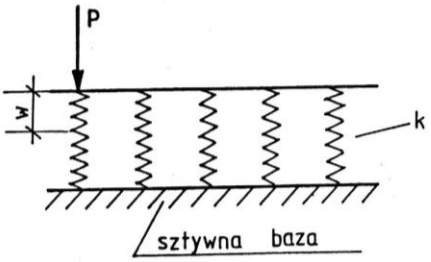
Przy wymiarowaniu nawierzchni lotniskowych podstawowym problemem jest przyjęcie modelu obliczeniowego konstrukcji, który opisuje właściwości mechaniczne poszczególnych warstw. Bardzo ważne jest, aby przyjęty model, charakteryzujący się danymi parametrami, zachowywał się pod wpływem działającego obciążenia w sposób możliwie zgodny z zachowaniem rzeczywistych warstw, do których opisu został zastosowany. Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat wraz z rozwojem nowych technologii i technik komputerowych w metodach wymiarowania nawierzchni i podłoża gruntowego obserwuje się stałą ewolucję modeli konstrukcji nawierzchni lotniskowych. Znajdują w nich zastosowanie coraz częściej modele bardziej skomplikowane pod względem zapisu matematycznego, które jednocześnie coraz bardziej zbliżone są do rzeczywistego zachowania się konstrukcji. W praktyce badawczej dla nawierzchni sztywnych najczęściej stosuje się model płyt o skończonych wymiarach w planie położonych na podłożu typu Winklera [1].

2.1. Fizyczne i matematyczne modele podłoża gruntowego

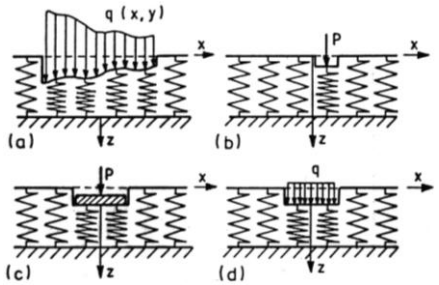
Obciążenie pochodzące od statku powietrznego, wywierane na nawierzchnię lotniskową, przekazywane jest poprzez podbudowę na podłoże gruntowe, stanowiące integralną część konstrukcji nawierzchni. Praca podłoża gruntowego charakteryzowana jest rozkładem naprężeń i odkształceń. W celu określenia wytrzymałości gruntu na obciążenia posługujemy się modelem obliczeniowym, który przedstawia zależność pomiędzy obciążeniem przekazywanym na grunt i jego odkształceniem.

Już od ponad wieku są tworzone różne fizyczne i matematyczne modele podłoża, opisującego w sposób przybliżony zachowanie się rzeczywistego ośrodka gruntowego [11]. Mechanicznie, podłoże sprężyste stanowi więzy dla konstrukcji nawierzchni lotniskowej. Matematycznie zaś modele podłoża sprężystego (więzy) opisywane są przez równania (w przypadku więzów dwustronnych) i nierówności (w przypadku więzów jednostronnych). W związku z tym, można dokonać podziału modeli podłoża na stacjonarne i niestacjonarne, ciągłe i nieciągłe, jednowymiarowe i powierzchniowe, całkowalne i niecałkowalne, idealne i nieidealne, dwustronne i jednostronne, izotropowe i anizotropowe, liniowe i nieliniowe, itp.

W 1867 roku Winkler zaproponował model podłoża sprężystego zakładając, że składa się ono z układu nie połączonych ze sobą sprężyn na nieodkształcalnej bazie, co przedstawia rysunek 6 [11]. Ugięcie podłoża występuje w miejscu przekazywania obciążeń na podłoże (rysunek 7).



Rys. 6. *Model podłoża sprężystego Winklera*



Rys. 7. *Ugięcie podłoża Winklera*

Model ten jest opisany poniższym równaniem [11]:

$$p(x^{\alpha}) = kw(x^{\alpha}) \tag{1}$$

gdzie:

$p(x^{\alpha})$ – funkcja opisująca obciążenie działające na podłoże,

k – współczynnik reakcji podłoża [N/m^3],

$w(x^{\alpha})$ – funkcja opisująca ugięcie podłoża.

Kolejnym przykładem jest model podłoża Kelvina – Voigta. Model ten jest uogólnieniem modelu Winklera, w którym uwzględnia się tłumienie w podłożu przy założeniu równoległego połączenia elementów sprężyny i tłumika, co przedstawia rysunek 8 [11].

Równanie opisujące model ma postać [11]:

$$p = p_1 + p_2 = kw + \eta \frac{\partial w}{\partial t} \tag{2}$$

gdzie η jest współczynnikiem lepkości wyrażonym w [Ns/m^3]. Do opisu zachowania modelu służą dwie stałe: *k* i *η*.

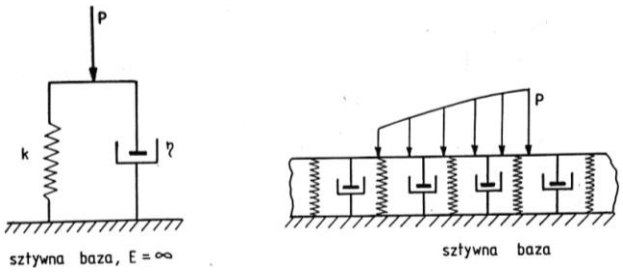
Z kolei model podłoża Maxwella stanowi szeregowe połączenie sprężyny i tłumika, co przedstawiono na rysunku 9 [11].

Całkowite ugięcie układu jest równe [11]:

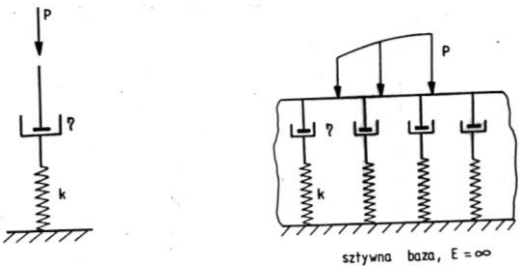
$$w = w_1 + w_2 \tag{3}$$

gdzie:

$$w_1 = \frac{p}{k}, \frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{p}{\eta} \tag{4}$$



Rys. 8. *Model podłoża Kelvina – Voigta*

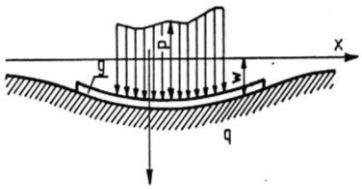


Rys. 9. *Model podłoża Maxwella*

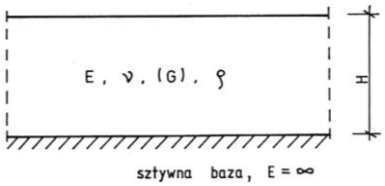
Uogólnieniem modeli Kelvina – Voigta i Maxwella są tzw. modele standardowe będące pewnymi kombinacjami sprężyn i tłumików.

Model półprzestrzeni sprężystej, izotropowej i jednorodnej charakteryzuje się dwiema stałymi: *E* i *v* lub *G* i *v*, a w przypadku problemu dynamicznego gęstością *ρ* [11]. Model ten znalazł bardzo szerokie zastosowanie w budownictwie.

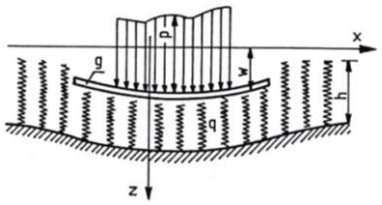
Podłoża Żemockina, Gorbunowa-Posadowa, Sinicyna, Korenieva i innych bazują na rozwiązaniach półprzestrzeni sprężystej, półpłaszczyzny (rysunek 10) lub warstwy sprężystej (rysunek 11) [11]. Spotyka się też modele kombinowane z półprzestrzeni sprężystej i modelu Winklera, co przedstawia rysunku 12 [11].



Rys. 10. *Model półpłaszczyzny sprężystej*



Rys. 11. *Model warstwy sprężystej*



Rys. 12. *Połączenie modelu półprzestrzeni sprężystej i modelu Winklera*

2.2. Modele nawierzchni lotniskowych o konstrukcji sztywnej

Zarówno teoretyczne wymiarowanie nowych konstrukcji nawierzchni, jak i ocena nośności konstrukcji istniejących wykonywane są przy następujących założeniach [8]:

- obciążenie obliczeniowe jest prostopadle skierowane do powierzchni warstw konstrukcji i ma charakter jednego z następujących rodzajów:
  - nacisku statycznego (długotrwałego), ten rodzaj obciążenia obliczeniowego jest najczęściej brany pod uwagę,
  - nacisku wolnozmiennego, branego pod uwagę przy wymiarowaniu nawierzchni z uwzględnieniem zjawisk reologicznych,
  - nacisku szybkozmiennego, czyli dynamicznego.

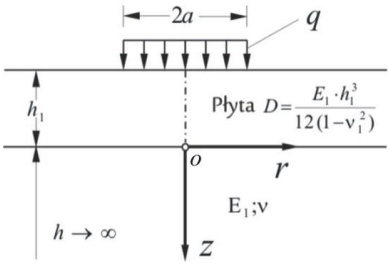
  – Ostatnie dwa rodzaje obciążenia wywoływane są nie tylko przez poruszające się koła pojazdów czy statków powietrznych, ale również przy badaniu nośności konstrukcji nawierzchni za pomocą obciążeń próbnych. Ww. typy obciążeń przekazywane są na konstrukcję za pomocą kołowych powierzchni naciskowych o średnicy 2a,
- nośność podłoża gruntowego oceniana jest za pomocą określonych wartości, tj.: modułu sprężystości i współczynnika Poissona, kąta tarcia wewnętrznego i spójności oraz współczynnika podatności *k* lub wskaźnika *CBR*,
- każda z warstw konstrukcji nawierzchni posiada stałą grubość i jest zbudowana z materiału izotropowego,

– wpływ powtarzalności obciążeń uwzględnia się poprzez określenie dopuszczalnych wartości ugięć i naprężeń, powtarzalność obciążeń brana jest również pod uwagę przy ustalaniu obliczeniowych wartości stałych materiałowych, charakteryzujących poszczególne warstwy konstrukcji nawierzchni,
– powierzchnie styku między warstwami konstrukcji nawierzchni mogą być zarówno „szorstkie", tj. przenoszące naprężenia styczne, jak i „gładkie", czyli nieprzenoszące tych naprężeń, sczepność częściową uwzględnia się wyjątkowo, tj., gdy wynika to z ustalonej technologii robót nawierzchniowych.

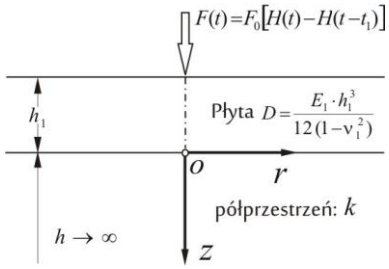
Biorąc pod uwagę powyższe założenia, zbiór modeli obliczeniowych wykorzystywanych do oceny mechanicznych własności konstrukcji betonowych nawierzchni lotniskowych, podzielić można na:

– modele oparte o teorię sprężystości (modele te obejmują zarówno konstrukcje zbudowane z warstw sprężystych, jak i konstrukcje zbudowane z płyt sprężystych. W praktyce ta grupa modeli stosowana jest przy wymiarowaniu nawierzchni sztywnych, a częściowo do obliczeń także nawierzchni podatnych),
– modele dynamiczne (modele stosowane do oceny mechanicznych własności konstrukcji nawierzchni w przypadku działania na nie obciążeń dynamicznych).

Jako przykład modelu opartego o teorię sprężystości, można przedstawić płytę ograniczoną lub nieograniczoną w planie, spoczywającą na podłożu Winklera (rysunek 13). Problem opracowany przez: Westergaard'a, Pickett'a i Ray'a oraz Koreniewa. Natomiast jako przykład modelu dynamicznego można przedstawić płytę sprężystą, nieograniczoną w planie, spoczywającą na półprzestrzeni sprężystej, obciążoną skokowym impulsem siłowym przedstawionym za pomocą funkcji Heaviside'a. Problem opracowany przez Clarka i Siłkina. Model ten wykorzystywany jest m. in. przy badaniu nośności nawierzchni istniejących za pomocą obciążeń udarowych (rysunek 14).



Rys. 13. *Płyta ograniczona lub nieograniczona w planie, spoczywająca na podłożu Winklera*



Rys. 14. *Płyta sprężysta spoczywająca na półprzestrzeni sprężystej, obciążona impulsem siłowym*

Płyta w tych modelach jest opisana modułem sprężystości Younga *E*, współczynnikiem Poissona *v* oraz grubością *h*, podłoże zaś współczynnikiem reakcji podłoża *k*. Nawierzchnię lotniskową o konstrukcji sztywnej, czyli w postaci płyt o skończonych wymiarach w planie położonych na bezinercyjnym podłożu typu Winklera, opisuje najczęściej wykorzystywany w światowej technice lotniskowej model Westergaarda. Westergaard, który opublikował po raz pierwszy swoją teorię projektowania nawierzchni z betonu cementowego w roku 1927, rozważał płyty „ćwierćnieskończone", uwzględniając trzy najbardziej charakterystyczne położenia obciążenia modelującego nacisk kół, a mianowicie położenie w narożu płyty, w środku i na jej krawędzi. Wyprowadzone przez niego wzory, które opisują stan naprężeń maksymalnych w płycie dla wymienionych przypadków obciążeń, mają następującą postać [3], [4], [9]:

– dla położenia I – naroże płyty:

$$\sigma_r = \frac{3P}{h^2}\left[1-\left(\frac{a\sqrt{2}}{l}\right)^{0,6}\right] \tag{5}$$

– dla położenia II – środek płyty:

$$\sigma_r = 0{,}275\frac{P}{h^2}(1+\nu)\left[4\log\left(\frac{l}{b}\right)+1{,}069\right] \tag{6}$$

– dla położenia III – krawędź płyty:

$$\sigma_r = 0{,}529(1+0{,}540\nu)\frac{P}{h^2}\left[4\log\left(\frac{l}{b}\right)+0{,}359\right] \tag{7}$$

gdzie:
P – obciążenie płyty [kN],
h – grubość płyty [m],
ν – współczynnik Poissona,
l – promień względnej sztywności płyty:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E\cdot h^3}{12\cdot(1-\nu^2)\cdot k}} \tag{8}$$

E – moduł sprężystości płyty [MPa],
k – współczynnik reakcji podłoża [MPa/m],
a – promień koła styku opony z nawierzchnią [m]
b – promień równoważny, uwzględniający rozkład obciążeń w dolnej części płyty [m],

$$b = \sqrt{(1{,}6a^2+h^2)} - 0{,}675h \quad gdy \quad a < 1{,}724h,$$
$$b = a \quad gdy \quad a > 1{,}724h$$

Westergard podał również zależność do obliczania naprężeń od temperatury, rozpatrując liniowy przebieg zmian temperatur (dla płyt o grubości do 30 cm) oraz nieliniowy przebieg zmian temperatur (dla płyt o znacznej grubości) [3], [4], [6].

Rozpatrując liniowy przebieg zmian temperatur, naprężenia w środku płyty o nieskończonych wymiarach oblicza się stosując wyrażenie w postaci [3]:

$$\sigma_0 = \frac{E\ \varepsilon_t \Delta T}{2(1-\nu)} \tag{9}$$

gdzie:
E – współczynnik sprężystości betonu,
ε_t – współczynnik termicznej rozszerzalności betonu,
ΔT – różnica temperatur górnej i dolnej powierzchni płyty (Δt=0,66 *h*),
v – współczynnik Poissona,
h – grubość płyty.

Natomiast dla płyt rzeczywistych, przy nieliniowym przebiegu zmian temperatury wprowadzono współczynniki uwzględniające realną pracę płyty, uzyskując wzór w postaci [3]:

$$\sigma_h = \frac{E\ \varepsilon_t}{1-\nu}\left[-\theta_h + \frac{F}{h}(1-k_e) - \frac{6S}{h^2}(1-C_x)\right] \quad (10)$$

gdzie:

k_e – współczynnik poprawkowy zależny od konstrukcji szczelin,

C_x – współczynnik uwzględniający wymiary płyty,

Θ_h – temperatura na dowolnej głębokości h,

v – współczynnik Poissona,

F – pole przekroju temperatury w przekroju pionowym płyty o grubości h,

S – moment statyczny pola F względem poziomej osi przekroju pionowego płyty.

Model Westergaarda jest wykorzystywany w takich metodach wymiarowania, jak metoda PCA (*Portland Cement Association*), starsza wersja metody FAA (*Federal Aviation Administration*), metoda francuska, czechosłowacka oraz metoda brytyjska (LCN-LCG). Jego wzory znalazły również praktyczne zastosowanie w metodzie wymiarowania OSŻD (*Organizacja Sotrudniczestwa Żelaznych Dorog* – Organizacja Współpracy Kolei).

3. OCENA NOŚNOŚCI BETONOWYCH NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH METODĄ ACN-PCN

Metodologię oceny nośności konstrukcji nawierzchni lotniskowych według założeń metody ACN-PCN (w tym podejście stosowane u nas w kraju), opisano w pracy [1]. Przypomnieć jednak należy, że wyniki uzyskane podczas badania nośności metodą ACN-PCN można przedstawić w postaci wskaźnika nośności PCN lub/i wyznaczonej dopuszczalnej, całkowitej liczby operacji lotniczych, które wyznacza się dla określonej liczby powtórzeń N. Liczba dopuszczalnych powtórzeń obliczana jest w zależności od przyjętego modelu obliczeniowego ocenianej konstrukcji nawierzchni lotniskowej. Dla nawierzchni sztywnych przyjmuje się kryterium dopuszczalnych naprężeń.

Metoda ACN-PCN jest dostosowana do współcześnie istniejących na świecie możliwości oceny nośności nawierzchni lotniskowych i daje możliwość stosowania *„in situ”* dowolnych technik pomiarowych dla dokonywania takiej oceny, w tym charakteryzujących się wysoką efektywnością metod dynamicznych. W ocenie nośności konstrukcji nawierzchni lotniskowych w wielu krajach wykorzystuje się procedury *odwrotne do wymiarowania* (*back calculation*) [2]. W praktyce projektowania grubości warstw konstrukcyjnych nawierzchni lotniskowych stosuje się dwie grupy metod: empiryczne i teoretyczno-empiryczne.

W warunkach krajowych, do wymiarowania i oceny nośności nawierzchni lotniskowych o układzie sztywnym stosowany jest model Westergarda (płyta o skończonych wymiarach w planie spoczywająca na podłożu typu Winklera), który jest najczęściej wykorzystywany w wielu innych metodach wymiarowania w światowej technice lotniskowej. W warunkach terenowych, ocena nośności konstrukcji nawierzchni lotniskowych według założeń metody ACN-PCN polega na pomiarze ugięć sprężystych nawierzchni lotniskowej przy wykorzystaniu ciężkiego ugięciomierza udarowego typu HWD (*Heavy Weight Deflectometer*). Na podstawie zarejestrowanych ugięć nawierzchni lotniskowej oraz w oparciu o wyniki badań wytrzymałościowych materiałów pobranych z nawierzchni, określa się moduły sprężystości poszczególnych warstw konstrukcyjnych i wyznacza się parametry podłoża gruntowego. Następnie wyznaczana jest dopuszczalna liczba obciążeń N, którą oblicza się na podstawie porównania naprężeń występujących w betonowej nawierzchni lotniskowej dla przyjętych parametrów modelu obliczeniowego, z naprężeniami dopuszczalnymi, wyznaczonymi z kryterium naprężeń uwzględniającego powtarzalność obciążeń. Wynikiem końcowym analizy jest wskaźnik nośności PCN lub/i dopuszczalna, całkowita liczba operacji lotniczych. Podejście w poszczególnych, stosowanych metodach wymiarowania nawierzchni lotniskowych jest bardzo zróżnicowane, co przedstawiono poniżej na wybranych przykładach [6].

Metoda wymiarowania *OSŻD* oparta jest na modelu płyty rozwiązanym przez Westergarda. Płyta w tym modelu jest opisana modułem sprężystości E_p oraz współczynnikiem Poissona v_p, podłoże zaś współczynnikiem reakcji podłoża k (wymagane $k \geq 80$ MPa/m). Obciążenie zlokalizowane jest w trzech charakterystycznych miejscach: środek, krawędź i naroże. Naprężenia w płycie obliczane są według wzorów wyznaczonych przez Westergarda. Metoda ta również wykorzystuje zależność naprężeń od temperatury σ_t. Wymiarowanie grubości płyty polega na porównaniu obliczonych, maksymalnych naprężeń z naprężeniami dopuszczalnymi, sprawdzając warunek [6]:

$$\sigma^{\max} = \sigma_{dop} \quad (11)$$

Naprężenia maksymalne oblicza się z zależności:

$$\sigma^{\max} = \alpha\,\sigma_r + \beta\,\sigma_t \quad (12)$$

$$\sigma^{\max} = \alpha\,\sigma_r + \delta\,\sigma_t \quad (13)$$

gdzie:

α – współczynnik przenoszenia sił z jednej płyty na drugą,

β – współczynnik uwzględniający zmniejszenie się naprężeń od paczenia się płyt,

δ – współczynnik uwzględniający zmniejszanie się naprężeń przy obciążeniach powtarzalnych.

Modelem obliczeniowym w metodzie wymiarowania *PCA* jest płyta o skończonych wymiarach w planie, ułożona na podbudowie lub podłożu. Płyta w tym modelu jest opisana modułem sprężystości E_i oraz współczynnikiem Poissona v_i, podłoże zaś współczynnikiem reakcji podłoża k. W rzeczywistości jest to model Westergarda. W metodzie tej określa się *szkodę zmęczeniową* nawierzchni od obciążenia oraz *szkodę erozyjną* w podbudowie. Obliczanie naprężeń i przemieszczeń w płycie odbywa się za pomocą metody elementów skończonych. W metodzie podane są stabelaryzowane wartości równoważnych naprężeń w płycie w funkcji grubości płyty oraz współczynnika reakcji podłoża w zależności od rodzaju obciążenia i umocnienia podłoża.

W metodzie *Francuskiej* modelem obliczeniowym jest sprężysta półprzestrzeń warstwowa ułożona na półprzestrzeni sprężystej (podłoże gruntowe). Warstwy są nieograniczone w planie i opisane przez moduły sprężystości E_i, współczynniki Poissona v_i oraz grubości h_i. Obliczanie naprężeń rozciągających odbywa się za pomocą programów komputerowych. W modelu tym obliczane są naprężenia rozciągające w warstwie jezdnej (płyta betonowa) oraz w podbudowie, gdy jest ona wykonana z materiałów zawierających spoiwo cementowe.

Natomiast metoda *Brytyjska* nie podaje modelu obliczeniowego. Do wymiarowania w tej metodzie służą opracowane, odpowiednie nomogramy.

WNIOSKI

Konstrukcja betonowej nawierzchni lotniskowej składa się najczęściej z zespołu warstw, których zadaniem jest przejęcie i przeniesienie na podłoże gruntowe obciążeń pochodzących od poruszających się statków powietrznych. Nośność nawierzchni, rozumiana jako zdolność układu konstrukcyjnego do bezpiecznego przenoszenia obciążeń jest jedną z głównych cech eksploatacyjnych nawierzchni lotniskowych. Do oceny stanu nośności nawierzchni lotniskowych wykorzystywana jest metoda ACN-PCN. Analiza stanu

nośności konstrukcji nawierzchni lotniskowych jest procedurą bardzo złożoną. Wpływ na taki stan rzeczy ma fakt, iż nośność uzależniona jest nie tylko od obciążeń samolotów, ale i od innych czynników zewnętrznych (czynniki atmosferyczne, liczba operacji lotniczych, wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu, przekrój konstrukcyjny nawierzchni, stan podłoża gruntowego).

Zasadniczym problemem przy wymiarowaniu nawierzchni lotniskowych jest przyjęcie właściwego modelu obliczeniowego konstrukcji, który pod wpływem działania obciążenia będzie się zachowywał w sposób zgodny z zachowaniem się rzeczywistych warstw. Do wyrażenia charakteru oddziaływania statku powietrznego na nawierzchnię sztywną (sprężystą) stosuje się model obliczeniowy płyty o skończonych wymiarach w planie położonej na podłożu typu Winklera, który został opracowany przez Westergarda.

Biorąc jednak pod uwagę fakt, iż płyty betonowe spoczywają zazwyczaj na układzie wielowarstwowym, zastosowanie modelu Westergarda jest pewną niedogodnością. Istnieje wtedy problem oszacowania współczynnika reakcji podłoża *k*. Ponadto, model podłoża typu Winklera nie umożliwia obliczania naprężeń i odkształceń w podłożu. Od kilkudziesięciu lat obserwuje się w metodach wymiarowania stałą ewolucję modeli obliczeniowych konstrukcji nawierzchni. Rozwój technik komputerowych spowodował stosowanie modeli coraz bardziej skomplikowanych pod względem zapisu matematycznego oraz bardziej zgodnych z rzeczywistym zachowaniem się konstrukcji [6].

Pomimo znacznego rozwoju, nadal większość metod wymiarowania stosowanych w światowej technice lotniczej bazuje na modelu płyty spoczywającej na podłożu typu Winklera, opracowanym przez Westergarda. Do czasu opracowania modelu obliczeniowego, który w pełni będzie odzwierciedlał rzeczywisty charakter pracy nawierzchni o konstrukcji sztywnej, ocena stanu nośności betonowych nawierzchni lotniskowych, według założeń metody ACN-PCN, nadal opierać się będzie na modelu opracowanym przez Westergarda.

BIBLIOGRAFIA

1. Blacha K., Wesołowski M., Zależność wskaźnika nośności PCN od liczby operacji lotniczych przy określaniu nośności konstrukcji nawierzchni lotniskowych metodą ACN-PCN. Logistyka nr 6/2014.
2. ICAO, Doc 9157 Aerodrome Design Manual, Part 3, Pavements. 1983.
3. Marszałek J., Budowa lotnisk. Część II. Obliczanie nawierzchni. Skrypt WAT, Warszawa 1984.
4. Nita P., Betonowe nawierzchnie lotniskowe. Teoria i wymiarowanie konstrukcyjne. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2005.
5. NO-17-A500:2007 Nawierzchnie drogowe i lotniskowe. Badania nośności.
6. Szydło A., Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego, Teoria, Wymiarowanie, Realizacja. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2004.
7. Szydło A., Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
8. Wesołowski M., Nośność mobilnych pokryć kompozytowych stosowanych do odbudowy nawierzchni lotniskowych, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2012.
9. Wesołowski M., Grabowski P., Wpływ warunków klimatycznych na nośność betonowych nawierzchni lotniskowych. Drogi Lądowe Powietrzne Wodne nr 5/2009.
10. Załącznik 14 ICAO do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, Lotniska Tom I – Projektowanie i eksploatacja lotnisk, wydanie 6, lipiec 2013.
11. Jemielita G., Szcześniak W., Sposoby modelowania podłoża, Praca poglądowa, Instytut Mechaniki Konstrukcji Inżynierskich.

ANALYSIS OF THE LOAD BEARING CAPACITY OF RIGID AIRFIELD PAVEMENTS ACCORDING TO THE ACN-PCN METHOD'S ASSUMPTIONS

Abstract

Airfield pavement is a marked and appropriately prepared surface of an airfield functional element that performs a definite function in aviation operations. The structure of airfield pavement is most often composed of a set of layers whose task is to absorb and transfer loads coming from moving aircraft onto the ground in a way that ensures its definite durability. The most common type of airfield pavement is the rigid pavement made of cement concrete. One of the main operational features of airfield pavements is their load bearing capacity, that is the capability of a structural system to safely transfer loads from aircraft in a definite time. The assessment of the airfield pavement load bearing capacity is carried out in accordance with the ACN-PCN method's assumptions. The fundamental problem by measuring airfield pavements is to assume the correct computational model of a structure, which describes the way of cooperation and mechanical properties of individual layers.

In the paper the approach to the assessment of the load bearing capacity of rigid airfield pavements according to the ACN-PCN method's assumptions is presented. The physical and mathematical computational methods for the ground and airfield pavements made of cement concrete, which are practically applied in Poland, are described.

Autorzy:
Blacha Krzysztof - Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Lotniskowy, 01-494 Warszawa; ul. Księcia Bolesława 6. Tel/Fax: +48 261 851 424, krzysztof.blacha@itwl.pl
Wesołowski Mariusz - Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Lotniskowy, 01-494 Warszawa; ul. Księcia Bolesława 6. Tel: +48 261 851 324, Fax: +48 261 851 424, mariusz.wesolowski@itwl.pl