

0 POSUZOVÁNÍ LETIŠTNÍCH VOZOVEK ON AIRFIELD PAVEMENT EVALUATION

FRANTIŠEK LUXEMBURK,
BOHUSLAV NOVOTNÝ

Článek je věnován problematice určování klasifikačního čísla (PCN) letištní vozovky, výsledek postupu založeného na nomogramech je ověřován s použitím MKP. Analyzujeme i účinky návrhového letadla se zaměřením na vliv vyztužení spár vozovky a vliv teploty.

The PCN (Pavement Classification Number) evaluation procedure for airfield pavements is discussed. The results derived using nomograms are verified by the FEM analysis. The impact of the design aircraft is also analyzed, the effects of joint reinforcement and temperature being of major interest.

V práci analyzujeme otázky návrhu cementobetonových letištních vozovek a příbuzného problému určování klasifikačního čísla vozovky PCN (Pavement Classification Number). Číslo PCN má vyjadřovat únosnost letištní vozovky – v číselném vyjádření představuje 1/500 hmotnosti [kg], kterou vozovka „unes bez omezení“ [1], necháme-li její tíhu působit na jednokolovém otisku s předepsanou intenzitou 1,25 MPa.

Tab. 2 Podkladní systém letištní vozovky
Tab. 2 Airfield pavement supporting system

Materiál	Tloušťka	Modul pružnosti	Poissonovo číslo
KSC I	0,15 m	2500 MPa	0,22
SD	0,15 m	400 MPa	0,30
podloží		45 MPa	0,35

Tab. 3 Modely ekvivalentního pružného a Winklerova podloží systému z tab. 1

Tab. 3 Elastic halfspace foundation and Winkler foundation models equivalent to the supporting system from tab. 1

Model podloží	Materiálové parametry
pružný homogenní poloprostor	modul pružnosti $E_{ekv} = 170$ MPa Poissonovo číslo $\nu_{ekv} = 0,35$
Winklerovo podloží	modul reakce podloží $k = 500$ MN/m ³

Charakteristika	Hodnota
délka stran $l_x = l_y$ [m]	5
tloušťka h_d [m]	0,24
modul pružnosti E_d [GPa]	37,5
Poissonovo číslo ν_d	0,2
koeficient teplotní (délkové) roztažnosti α_d	0,00001
objemová hmotnost betonu ρ_d [kg]	2500
pevnost betonu v tahu za ohybu σ_{pev} [MPa]	4,5 až 5

Tab. 1 Charakteristiky cementobetonové desky letištní vozovky

Tab. 1 Characteristics of airfield pavement plate

Určování PCN letištní vozovky se přitom považuje za úlohu inverzní k postupu navrhování letištní vozovky, oba problémy se ale okamžitě provážou, zní-li zadání navrhnout letištní vozovku tak, aby vykazovala předepsanou hodnotu PCN.

Definice a způsob určování čísla PCN letištních vozovek vzbuzuje mnoho otázek:

- způsob hodnocení účinků specifického PCN zatížení není definován exaktně („The strength of a pavement is reported under the (ACN-PCN) method in terms of the load rating of the aircraft which the pavement can accept on an unrestricted basis“),
- nomogramy související s metodou (ACN-PCN) byly připraveny na základě Westergaardovy teorie (populární ještě před 20 až 25 lety) a lze tedy soudit, že při formulování postupů ACN-PCN se nepřihlíželo na detaily skutečného působení desek letištní vozovky,
- nedostatečně jsou zohledněny teplotní účinky, zřejmě v souladu s často uplatňovaným předpokladem „As a general rule it is accepted that, provided appropriate methods are used for the joints,

Tab. 4 Odhad hodnoty PCN postupem podle předpisů [2, 3]

Tab. 4 Estimate of PCN value based on nomograms from [2, 3]

Pevnost betonu v tahu za ohybu [MPa]	G_{sw} [kg]	PCN
4,5	30 600	24 – 25
5,0	34 000	27

stresses which have a thermic or hygrothermic origin need not be taken into account in the design“.

V práci vyšetřujeme konkrétní návrh konstrukce letištní vozovky s předepsanou hodnotou PCN = 25. První etapou je přibližné stanovení PCN podle grafů amerických předpisů [2, 3]. Výpočty ověřující PCN navrhované vozovky jsou obsahem další části práce a v závěru ověřujeme odevzu vozovky na účinky provozu návrhového (převládajícího) typu letadla.

ZÁKLADNÍ ÚDAJE VOZOVKY, PŘEDBĚŽNÉ STANOVENÍ PCN

Desky cementobetonové letištní vozovky jsou čtvercové s charakteristikami uvedenými v tab. 1.

Podkladní systém vozovky tvoří vrstvy podle tab. 2. Mechanické chování tohoto systému nahradíme homogenním poloprostorem s ekvivalentním modulem E_{ekv} , který určujeme na základě „ekvivalence“ průhybu povrchu vrstevnatého a homogenního poloprostoru (Poissonovo číslo uvažujeme hodnotou $\nu_{ekv} = 0,35$).

Dalším krokem je stanovení modulu reakce k podkladního systému, který se uplatní při ověřování hodnoty PCN podle vztahů [2 – 3] – podkladní vrstevnatý systém nahrazujeme Winklerovým podložím. Materiálové parametry těchto náhradních modelů uvádí tab. 3.

Náš podkladní systém vykazuje hodnotu modulu reakce k řádu 500 MNm⁻³. Nejdříve na základě hodnot veličin h_d , σ_{pev} , k a N_y (počet pojezdů za rok) určíme z grafu 3-17 předpisu [2] hodnotu veličiny G_{sw} (připustná hmotnost na jednokolovou zatěžovací oblast). Náš podkladní systém patří do kategorie A „ $k > 150$ MNm⁻³“, a tak podle grafu 2-2 předpisu [3] můžeme získat přímo hodnotu PCN – výsledky jsme zaznamenali v tab. 4.

Výsledky přibližné analýzy tedy naznačují, že posuzovaná vozovka splňuje požadavek PCN = 25 – vyžádáme-li provedení vozovky z betonu s pevností v tahu za ohybu 5 MPa, budeme na straně bezpečnosti. V dalším ověříme tyto výsledky podrobnou analýzou posuzované letištní vozovky na základě metody konečných prvků (MKP).

VÝPOČTOVÝ MODEL

CEMENTOBETONOVÉ VOZOVKY

Model mechanického působení cementobetonové vozovky představuje soubor desek vozovky, které ve vzájemné součinnosti přenášejí kolové tlaky do podkladního systému a podloží. Zkoumáme napětí, která v kritických místech desek vyvolávají účinky (přejezdy) podvozků jednotlivých typů letadel a tyto údaje následně zapracujeme do spolehlivostního návrhu tuhé vozovky s uplatněním údajů o skladbě leteckého provozu. Vyšetřujeme sekci vozovky, která zahrnuje konečný počet pravoúhlých desek konstantní tloušťky h_p a rozměrů $l_x \times l_y$. Materiál desky uvažujeme jako pružný s modulem E_p a Poissonovým číslem ν_p . Desky leží na podkladním systému n_p pružných vrstev nad homogenním poloprostorem. V našem přístupu ho nahradíme ekvivalentním homogenním poloprostorem s parametry E_{ekv} ν_{ekv} . Zatížení je kombinací vlastní tíhy desek a kolových tlaků podvozků letadel, které simulujeme kruhovými zatíženími konstantní intenzity. Uvažujeme účinek teplotního gradientu v důsledku rozdílu ΔT teplot na vrchním a spodním povrchu desek. Maximální teplotní rozdíl ΔT uvažujeme hodnotou

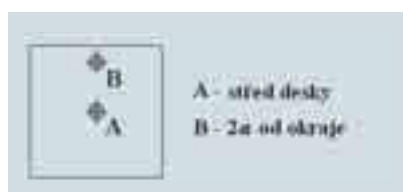
$$\Delta T \div 16 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (1)$$

kteřou pro průměrnou roční teplotu vzduchu $T_m = 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ určíme podle [5].

Desky vozovky vyšetřujeme pomocí MKP (detaily viz [6]). Půdorys desky je pokryt pravoúhlými trojúhelníky, v zlezech sítě píšeme kontaktní podmínky za předpokladu lineárního průběhu kontaktního napětí. Na spárách, v bodech umístění výztužných prvků, píšeme podmínky rovnosti průhybů sousedních desek, funkci výztužných prvků realizujeme zavedením spínacích sil. Nelinearita úlohy v důsledku vyloučení kladných kontaktních napětí, uvažování vlivu sousedních desek a vyztužení spár vede na trojúhelníkové iterační určení uzlových hodnot kontaktních napětí a spínacích sil.

Obr. 1 Schéma zatěžovacích případů

Fig. 1 Scheme of loading cases



OVĚŘENÍ HODNOTY PCN VÝPOČTEM

Klasifikační číslo vozovky PCN představuje podle [1, 2] podíl hmotnosti G odpovídající zatížení Q (tento vztah formalizujeme zápisem $G \propto Q$), které může vozovka podle výpočtu přenést v podobě standardního jednokolového zatížení (single-wheel load) rovnoměrné intenzity $q = 1,25 \text{ MPa}$ a specifické hmotnosti $S = 500 \text{ kg}$

$$PCN = \frac{G}{S}. \quad (2)$$

Máme-li prokázat, že vozovka má PCN = 25, potom z tohoto vztahu plyne hodnota $G = 12\,500 \text{ kg}$ a musíme prokázat, že vozovka přenesení zatížení s výslednicí $Q = 0,125 \text{ MN}$ ($G \propto Q$ numericky realizujeme podle přibližného vztahu: $1 \text{ kg} \propto 10 \text{ N}$). V našich výpočtech předpokládáme kruhový tvar zatěžovací plochy, její poloměr a určíme ze vztahu

$$a = \sqrt{\frac{Q}{q}} = 0,184 \text{ m}. \quad (3)$$

Desku letištní vozovky zatěžujeme jedním kruhovým zatížením a pro jednotlivé polohy zatížení j určíme maximální ohybová napětí $\sigma_{(j)oh}$. Přípustný počet přejezdů $N_{(j)}$ stanovujeme podle (konzervativního) vztahu Barenberga a Dartera [4]

$$\log N_{(j)} = 16,61 - 1,61 \left(\frac{\sigma_{(j)oh}}{\sigma_{pev}} \right) \quad (4)$$

kde σ_{pev} představuje pevnost betonu v tahu za ohybu.

Protože způsob určování hodnoty PCN není definován pomocí exaktních termínů, provedeme ověřovací výpočty na základě MKP s uvažováním skutečných rozměrů desek vozovky pro dva zatěžovací případy z obr. 1.

Výsledky řešení obou zatěžovacích pří-

Tab. 6 Charakteristiky návrhového letadla

Tab. 6 Characteristics of design plane

Veličina	Hodnota
Maximální hmotnost G [kg]	17 000
Zatížení Q [MN]	$2 \times 0,085$ (dvě kola hlavního podvozku)
Intenzita q [MPa]	1,5
Poloměr otisku kola a [m]	0,1343
Vzdálenost středů otisků d [m]	2,36

Zatěžovací případ j	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	$\sigma_{(j)oh}$ [MPa]	$N_{(j)}$	
			$\sigma_{pev} = 4,5$	$\sigma_{pev} = 5,0$
A	0	2,55	$4,4 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^7$
	16	3,43	$1,6 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^4$
B	0	2,94	$1,3 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^6$
	16	3,75	84	$2,5 \cdot 10^3$

Tab. 5 Maximální ohybová napětí a přípustný počet opakování zatížení (pojezdů)

Tab. 5 Maximum bending stresses and allowable number of load repetitions (departures)

padů obsahuje tab. 5. Poloha zatížení výrazně ovlivňuje hodnotu $N_{(j)}$ přípustného počtu přejezdů a zůstává proto otevřenou otázkou, která z poloh zatížení optimálně vystihuje podmínky definice čísla PCN: středová poloha nemusí být zcela reprezentativní, polohy u okraje desky dávají zas příliš konzervativní odhady.

Výsledky potvrzují značný vliv účinků teplotního rozdílu ΔT , přitom je nutné zvážit, že průběhu exploatace vozovky letadly (počty pojezdů) v průměru asi nejvýstižněji odpovídá případ $\Delta T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, případ $\Delta T = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je z tohoto pohledu uplatnitelný s nižší mírou závažnosti. Výsledky tab. 5 ovšem naznačují, že by se měla uvádět i hodnota PCN pro maximální teplotní rozdíl $\Delta T = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$, jak to ostatně zmiňuje i předpis [1].

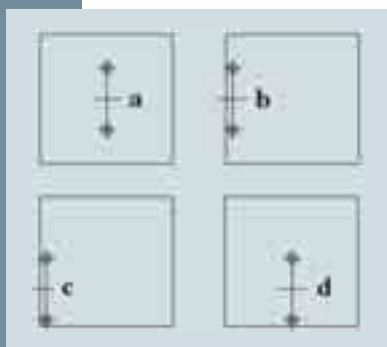
ANALÝZA ÚČINKŮ NÁVRHOVÉHO LETADLA

V této části příspěvku ukážeme postup posouzení výkonnosti navržené vozovky z hlediska účinku návrhového (převládajícího) letadla s charakteristikami uvedenými v tab. 6.

Uvažujeme čtyři polohy (a) až (d) podvozku na jediné desce, přičemž zanedbáváme účinek sousedních desek (obr. 2) a tři případy (e) až (g), kdy simulujeme spolupůsobení desek vozovky soustavou dvou desek (obr. 3).

Příčné spáry vyztužuje šestnáct kluzných trnů (trny jsou od sebe vzdáleny 0,3 m), na podélné spáře (hraně) uvažujeme sedm kotev (kotvy jsou umístěny ve vzdálenosti 0,7 m).

Výsledky řešení jsme zaznamenali v tab. 7 pro zatěžovací případy (a) až (d)



Obr. 2 Simulace účinku podvozku letadla, zatěžovací případy (a) až (d)

Fig. 2 Landing gear loading effect simulation, loading cases from (a) to (d)

Zatížení <i>j</i>	ΔT [°C]	$\sigma_{0,0h}$ [MPa]	$N_{(j)}$	
			$\sigma_{pev} = 4,5$	$\sigma_{pev} = 5,0$
a	0	2,09	$2,7 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^9$
	16	2,94	$1,3 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^6$
d	0	2,88	$2,2 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^6$
	16	3,50	834	$1,9 \cdot 10^3$
c	0	3,17	$1,6 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^5$
	16	3,99	10	358
d	0	3,56	460	$1,1 \cdot 10^3$
	16	4,39	0	14

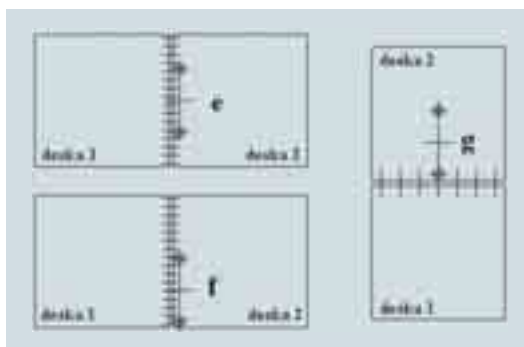
Tab. 7 Zatěžovací případy (a) až (d), ohybová napětí desky a přípustný počet opakování zatížení $N_{(j)}$.

Tab. 7 Loading cases (a) to (d), bending stresses and allowable number of departures $N_{(j)}$.

Tab. 8 Zatížení na styčných deskách – zatěžovací případy (e) až (g), ohybová napětí a přípustný počet přejezdů $N_{(j)}$.

Tab. 8 Wheel loads at pavement joints – loading cases (e) to (g), bending stresses and departures $N_{(j)}$.

Zatížení <i>j</i>	ΔT [°C]	$\sigma_{0,0h}$ [MPa]	$N_{(j)}$	
			$\sigma_{pev} = 4,5$	$\sigma_{pev} = 5,0$
e	0	D1: 1,92 D2: 1,61	$1,2 \cdot 10^9$	$6,8 \cdot 10^9$
	16	D1: 2,48 D2: 2,15	$8,3 \cdot 10^6$	$7,7 \cdot 10^7$
f	0	D1: 2,88 D2: 1,84	$2,2 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^6$
	16	D1: 3,22 D2: 2,57	$1,0 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^5$
g	0	D1: 2,60 D2: 2,37	$2,8 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^7$
	16	D1: 3,24 D2: 3,17	$8,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$



Obr. 3 Zatížení (e), (f) na příčné spáře a zatížení na podélné spáře (g)

Fig. 3 Wheel loads (e), (f) at transverse joint and (g) at longitudinal joint

(uvažována jedna deska) a v tab. 8 pro zatěžovací případy (e) až (g) (uvažovány dvě desky). Nejnepříznivější hodnoty ohybových momentů a napětí dávají polohy zatížení (c) a (d) při uvažování jediné osamocené desky. Zatěžovací případy (b) až (d) ovšem neuvažují spolupůsobení sousedních desek – spolupůsobení desek na příčné a podélné spáře (hraně) je simulováno zatěžovacími případy (e) až (g). Ve všech případech se účinek spolupůsobení projeví poklesem napětí o 20 až 30 % (v tab. 8 jsou napětí první desky označeny symbolem D1, napětí druhé desky symbolem D2). V případě zatížení (f), ale i ve všech dalších, by ještě k příznivějším výsledkům vedlo uvažování sekce čtyř spolupůsobících desek.

ZÁVĚRY

Ověřování hodnoty PCN výpočtem na základě MKP ukazuje, že „středovou“ polohu jednokolového zatížení je nutno konfrontovat i s výsledky odpovídající polohy zatížení blíže k okraji – lze diskutovat, zda-li postačí umístit střed zatížení do čtvrtiny rozpětí nebo ještě blíže k okraji. Výsledky ukazují závažný vliv teplotních účinků.

Výsledky analýzy účinků návrhového letadla (řešení zatěžovacích případů (a), (e), (f), (g) v případě uvažování betonu s hodnotou pevnosti v tahu za ohybu $\sigma_{pev} = 5$ MPa) potvrzují, že provoz letadel uvažovaného typu lze připustit bez jakýchkoliv omezení. Srovnání výsledků řešení (b) až (e), (c) až (f) a (d) až (g) dává představu o vlivu vyztužení příčných a podélných spár vozovky trny a kotvami (pokles maximálních hodnot napětí o 20 až 30 %). Opět nutno konstatovat pozo-

Literatura:

- [1] Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements, International Civil Aviation Organization, Doc. 9157-AN/901, 1983
- [2] Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN [AC 150/5335-5] US Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 1983
- [3] Airport Pavement Design and Evaluation [AC 150/5320-6D] US Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 1995
- [4] Huang Y. H.: Pavement Analysis and Design. 1. ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs 1993
- [5] TP170 Navrhování vozovek pozemních komunikací [technické podmínky], MD ČR 2004
- [6] Novotný B.: Contact problem in design of concrete roads. Building Research Journal, 2001, Vol. 49, No. 3, pp. 181–195

ruhodný vliv klimatických podmínek – vliv teplotního rozdílu ΔT je třeba proto při návrhu letištních vozovek vždy náležitě posoudit.

Příspěvek byl zpracován s podporou
výzkumného záměru MSM
6840770001

Doc. Ing. František Luxemburk, ČSc.
Katedra silničních staveb
Fakulta stavební ČVUT
Thákurova 7, 166 28 Praha 6
e-mail: luxemburk@fsv.cvut.cz
tel.: 224 354 929

Ing. Bohuslav Novotný, DrSc.
Kloknerův ústav ČVUT
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
e-mail: novotny@klok.cvut.cz
tel.: 224 353 512

Článek byl lektorován.