

Lotniskowe nawierzchnie na powłokach lodowych jezior

Airfield pavements on the lake ice sheets

Franciszek Kaźmierczyk

Dr inż.

Institut Techniczny Wojsk Lotniczych



Piotr Nita

Prof. dr hab. inż.

Institut Techniczny Wojsk Lotniczych

piotr.nita@itwl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia teoretyczne związane z możliwością wykorzystania lodowych powierzchni jezior do ewentualnego wykonywania na nich operacji lotniczych. Rozważania teoretyczne były weryfikowane w badaniach „in situ” na krajowych akwenach w rejonie warmińsko-mazurskim. Prezentowany kompleks zagadnień i przedstawione wnioski z opracowania dają możliwość wykorzystania tych obszarów do wykonywania operacji lotniczych w sytuacjach losowych.

Słowa kluczowe: Powłoka lodowa jezior; Operacja lotnicza; Równanie Hertza

Abstract: The article presents theoretical notions concerning possibility of using the lake ice sheets for performing potential flight operations. Theoretical discourse was verified „in situ” on national reservoirs in the warmińsko-mazurski region. Presented complex of issues and final conclusions allow applying aforementioned areas for flight operations in event of force majeure.

Keywords: Lake ice sheet; Flight operation; Hertz equation

Położenie geograficzne Polski podlegające wpływom klimatu kontynentalnego i atlantyckiego jest bardzo zróżnicowane, jednak to położenie nie wyklucza ograniczonego w czasie i przestrzeni, wykorzystania powłok lodowych tworzących się na jeziorach, jako powierzchni do prowadzenia operacji lotniczych. Lądowiska na powłokach lodowych mogą być wykorzystywane przez lotnictwo państwowe podczas spełniania swojej misji lub w czasie klęsk żywiołowych i innych zdarzeń, w uzasadnionych sytuacjach. Operacje lotnicze wykonywane na powłokach lodowych możliwe są do realizacji jednak przez stosunkowo lekkie samoloty o raczej tradycyjnych rodzajach napędu. Samoloty cięższe wymagają grubszych powłok o bardziej stabilnych warunkach klimatycznych. Wahania temperatur wywołują nierównomierność procesu tworzenia się powłok lodowych głównie na jeziorach.

Początek powstawania powłoki

lodowej na jeziorach naszego kraju, można zaobserwować już w trzeciej dekadzie listopada i trwa do pierwszej dekady kwietnia. Średni czas trwania pokrywy lodowej w naszych warunkach może wynosić około 90 dni. Grubość pokrywy lodowej wynosi średnio od 30 do 40 cm, a maksymalne zaobserwowane grubości wynoszą od 60 do 80 cm. Początek powstania powłoki lodowej i czasu jej zalegania zależy od warunków lokalnych a ponadto od: głębokości zbiornika, powierzchni akwenu, wysokości brzegów i ich zalesienia itp. Powstanie powłoki lodowej na akwenach jezior związana jest ściśle z cyrkulacją termiczną wód. Zaletą tych powłok jest to, że są one równe i nie wymagają dużych nakładów prac przygotowawczych.

Budowa i struktura pokrywy lodowej

Powłoka lodowa krystalizuje w układzie heksagonalnym. Optycznie krysz-

tałki lodu są jednoosiowe, przy czym oś optyczna jest identyczna z osią symetrii. Lód na jeziorach składa się z pojedynczych, nieregularnych pryzmatów skierowanych pionowo do powierzchni lustra wody. Utworzone słupki składają się z cienkich płytek, z których każda jest kryształem. Powłoka lodowa nie powstaje jednocześnie na całej powierzchni zbiornika wodnego, lecz rozpoczyna się w strefach gdzie uformowały się trwałe załączki krystaliczne, które zrastając się tworzą cienką pokrywę lodową z tendencją do dalszego jej pogrubiania. Ciężar właściwy lodu wynosi 920 kg/m^3 , ciężar objętościowy lodu (wolnego od porów) wynosi 917 kg/m^3 . Gęstość lodu utworzonego w warunkach naturalnych wynosi od $910,8 \text{ kg/m}^3$ do $911,5 \text{ kg/m}^3$. Do celów praktycznych przewodnictwo cieplne przyjmuje się przyjmując się równe 1,5 do 3,0 kcal/h. Sprężystość lodu jest nieznaczna i według [1] nie przekracza 0,08 MPa. Współczynnik sprężystości lodu jest

zależny od: struktury powłoki lodowej, stopnia zanieczyszczenia wody, temperatury powietrza i sposobu obciążenia. Zakres wartości tego współczynnika przyjmuje się (od 9000 do 115000 kG/m²) tj. 0,088 do 1,128 MPa. Uważa się, że w przypadku powłoki lodowej poprawniej jest przyjmować zamiast współczynnika sprężystości lodu moduł całkowitego odkształcenia tj. odkształceń sprężystego i plastycznego. Cechy wytrzymałościowe lodu zdeterminowane są: jego strukturą, gęstością i stopniem ewentualnego zasolenia wód akwenu i czasem trwania stabilnej temperatury. Zmiany temperatury mogą spowodować nawet dwukrotną zmianę jego wytrzymałości.

Obciążenie dopuszczalne i wymagana grubość powłoki lodowej

Można przyjąć założenie, że powłoka lodowa stanowi konstrukcję, która pod wpływem obciążenia zewnętrznego zachowuje się jak płyta sprężysta spoczywająca na podłożu sprężystym. Teorię nośności płyt lodowych zastosował po raz pierwszy H. Hertz [3], rozwiązania jej stosuje się do chwili obecnej. Doświadczenia innych badaczy [2,5,7] wykazało, że ugięcia powłoki lodowej w początkowym okresie wzrastają proporcjonalnie do wielkości obciążenia zgodnie z prawami teorii sprężystości. Jednak powstanie rysy w powłoce lodowej, zmienia te prawa i płyta lodowa pracuje już jako płyta sprężysto-plastyczna. Pierwsze pęknięcie płyty lodowej nie oznacza przekroczenia stanu krytycznego powłoki. Stan krytyczny występuje w chwili, w której powstaje wiele rys w powłoce po ich zaistnieniu następuje zniszczenie powłoki. Praktyczne pomiary [4] wykazały, że pierwsze promieniowe pęknięcia w powłoce lodowej powstają po jej obciążeniu stanowiącym 2/3 obciążenia niszczącego. Równanie różniczkowe przedstawione przez Hertza [3] dotyczące ugięcia nieskończonej wielkiej płyty sprężystej, którą utożsamiać można z pływającą po-

włoką lodową, stanowi w dalszym ciągu podstawę teoretyczną do rozwiązań płyt sprężystych na sprężystym podłożu. Równanie różniczkowe dla płyty lodowej o ciężarze właściwym γ_p , grubości h , pływającej w wodzie o ciężarze właściwym γ_s poddanej działaniu obciążenia skupionego, można przedstawić w postaci:

$$\Delta^2(\Delta^2 w) = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{d}{r dr} \right) \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{dw}{r dr} \right) = \frac{p(x,t)}{D} \quad (1)$$

gdzie: r – promień ugięcia płyty od środka działania obciążenia, w – ugięcie płyty lodowej, $p(x,t)$ – obciążenie płyty lodowej, γ_s – ciężar właściwy wody, h – grubość płyty lodowej, μ – współczynnik Poissona, D – sztywność płyty zgodnie ze wzorem (2).

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2)$$

Istota rozwiązania polega na tym, że pływająca płyta lodowa obciążona siłą P , wywiera nacisk na wodę o wielkości $p = \gamma_p \cdot h$ o ciężarze właściwym γ_s większym od ciężaru właściwego płyty γ_p wówczas reakcja wody na płytę jest następująca $p = \gamma_s \cdot w$. W środkowym punkcie obciążenia największe dodatnie promieniowe i obwodowe momenty zginające można zapisać w postaci zależności:

$$\sigma_r = \sigma_t = 1,1(1+\mu) \left(\log \frac{l}{a} + 0,26 \right) \frac{P}{h^2} \quad (3)$$

gdzie: l – promień względnej sztywności płyty zgodnie ze wzorem (4), k – współczynnik reakcji podłoża, w przypadku pokrywy lodowej – ciśnienie wody na jednostkę powierzchni, na jednostkę ugięcia, P – wielkość przyłożonego obciążenia, a – promień powierzchni stykowej obciążenia.

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (4)$$

Największy ujemny promieniowy moment zginający występuje w odległości $r = 1,9 l$ licząc od środka działania obciążenia i w przybliżeniu wynosi $M_r = 0,02 P$ na jednostkę długości.

Wzrost obciążenia zewnętrznego powoduje, że naprężenia zginające w płycie osiągają wartości bliskie wartościom wytrzymałości lodu na zginanie. Dalsze zwiększenie obciążenia powoduje to, że wzrasta długość i liczba promieniowych pęknięć w dolnej strefie płyty, na górnej powierzchni tworzy się obwodowe pęknięcie wywołane rozciąganiem. W tym stanie, zostaje osiągnięta granica wytrzymałości płyty lodowej. Moment zginający przypadający na jednostkę długości wynosi:

$$M = \frac{R_z}{6} h^2 \quad (5)$$

Teoretyczne obciążenie niszczące w przedziale praktycznego promienia rozkładu „ a ” można wyznaczyć z zależności:

$$P_0 = 3,3 \pi \left(1 - \frac{3a}{2l} \right) M_0$$

dla $0,05 < \frac{a}{l} < 1$ (6)

gdzie: M_0 – wartość granicznego momentu zginającego przypadającego na jednostkę długości.

Analiza różnych przypadków obciążenia powłoki lodowej i ich weryfikacja praktyczna przeprowadzona przez [7] wykazała, że dla przypadku gdy promień rozkładu obciążenia „ a ” jest większy od grubości pokrywy lodowej, wówczas jej obciążenie dopuszczalne można określić z zależności:

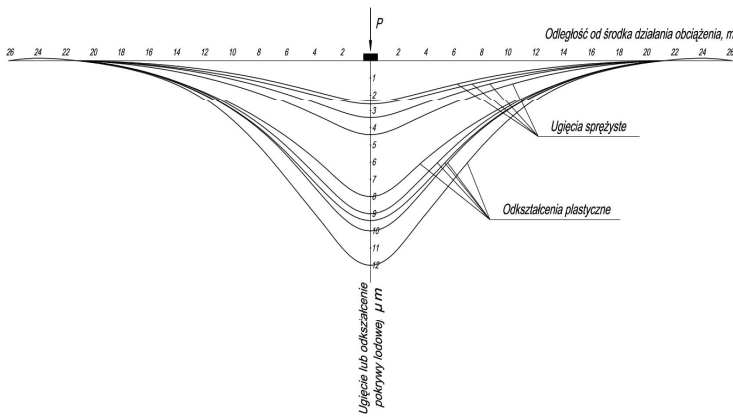
$$P_0 = R_z \cdot h^2 \quad (7)$$

Inną postać ugięcia powłoki lodowej proponuje [10] i uważa, że ugięcie tej powłoki można zobrazować w postaci krzywej logarytmicznej i wyrazić w postaci równania:

$$w = w_0 \cdot e^{-kx} \quad (8)$$

gdzie: w – ugięcie powłoki pod obciążeniem, k – współczynnik ugięcia przyjmowany najczęściej jako równy 0,1 na jednostkę długości.

Porównując objętość wypartej wody do wielkości obciążenia oraz uwzględniając zależność (8), autor



1. Wykres największych ugięć sprężystych i odkształceń plastycznych powłoki lodowej

proponuje rozłożenie obciążenia na powierzchni prostokątnej i wyprowadza zależność:

$$P = P_0 \left(1 + \frac{kS}{2\pi} + \frac{k^2 F}{2\pi} \right) \quad (9)$$

gdzie: S i F – oznaczają odpowiednio obwód i powierzchnię, na której rozłożono obciążenie, P_0 – obciążenie, którego wielkość wywołuje wyparcie wody o określonej objętości, Θ – temperatura lodu. Po wprowadzeniu poprawki ze względu na temperaturę i dokonaniu odpowiednich podstawień, uzyskano wzór na obciążenie dopuszczalne powłoki lodowej:

$$P_{dop} = 10 h^2 (1 + \Theta) (1 + 0,2S + 0,002F) \quad (10)$$

Klasyczne rozwiązanie Hertza i przedstawione wyżej propozycje autorów [1, 7, 9] nie wyczerpują wszystkich możliwych do wystąpienia zagadnień związanych z określeniem wytrzymałości powłok lodowych. Ugięcia lodowej powłoki przedstawiono na rys. 1 i 2. W celu określenia zależności pomiędzy wytrzymałością lodu na zginanie i temperaturą powietrza wykonano badania, które przeprowadzono na wyciętych z powłoki lodowej belkach.

Przykładowe wyniki w odniesieniu do stanu powłoki lodowej przedstawiono w tabelicy 1, zaś w graficznej postaci na rys. 3.

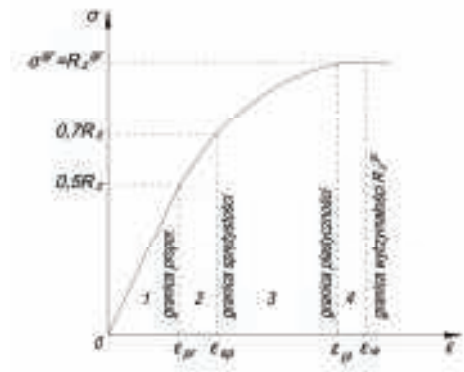
Ocena sprężystych własności powłoki lodowej

Równanie ugięcia powłoki lodowej od obciążenia skupionego wg. Hertza

można zapisać w postaci:

$$w(x) = \frac{\theta}{4l^2} \cdot Z_3(x) \quad (11)$$

gdzie: $w(x)$ – ugięcie powłoki lodowej w odległości x od miejsca przyłożenia obciążenia, Q – obciążenie powłoki lodowej, l – promień względnej sztywności powłoki lodowej, Z_3 – funkcja



2. Obszary zmian strukturalnych w powłoce lodowej

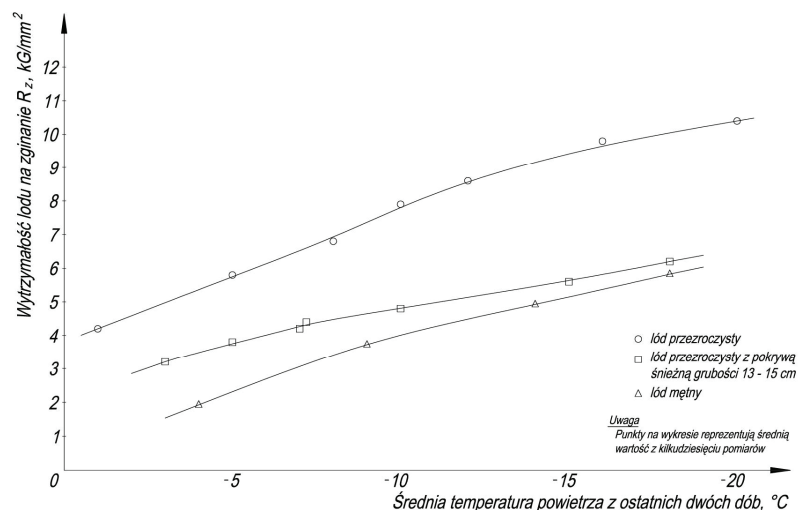
zmiennej rzeczywistej, określona z zależności (16).

Największe ugięcie płyty pod obciążeniem występuje w punkcie $x=0$ i $Z_3 = 0,5$, można je określić z zależności (12):

$$w(x) = \frac{\theta}{8l^2} \quad (12)$$

Tab. 1. Wybrane wyniki badań wytrzymałości lodu w zależności od temperatury otoczenia i stanu powłoki lodowej

Rodzaj lodu	Grubość powłoki lodowej h w [cm]	Średnia temperatura powietrza z okresu trzech ostatnich dni przed badaniem w [°C]	Liczba badań	Wytrzymałość średnia na zginanie próbek powłoki lodowej w [MPa] w [N/m ²]
Lód przezroczysty	28,0-30,0	-1	20	4,14 (405909)
	28,0-30,0	-5	20	5,73 (561921)
	28,0-30,0	-8	16	6,84 (670775)
	28,0-30,0	-10	16	7,92 (776687)
	30,0-32,0	-12	48	8,61 (844352)
	30,0-32,0	-16	20	9,89 (969878)
Lód przezroczysty z zalegającą na nim powłoką śnieżną grubości 13,0-15,0 cm	13,0-16,0	-3	21	3,11 (304987)
	13,0-16,0	-5	212	3,88 (380498)
	13,0-16,0	-7	21	4,15 (406976)
	20,0-25,0	-10	20	4,86 (476603)
	20,0-25,0	-15	20	5,62 (551134)
	20,0-25,0	-18	5	6,15 (603109)
Lód mętny	28,0-32,0	-4	10	1,98 (194172)
	28,0-32,0	-9	10	3,78 (370691)
	28,0-32,0	-14	10	4,98 (488371)
	28,0-32,0	-18	10	5,82 (570747)



3. Wykres zależności pomiędzy wytrzymałością lodu na zginanie i temperaturą powietrza

Tab. 2. Wartości współczynników C w zależności od a

Promień rozkładu obciążenia „ a ” w [m]	Współczynnik = a/l	C_1	C_2	C_3	C_4
0,125	0,024	-0,9997	0,0007	0,0004	0,0000
1,0	0,019	-0,9862	0,0399	0,0279	0,0001
1,10	0,200	-0,9845	0,0445	0,0314	0,0001
1,50	0,260	-0,9701	0,0741	0,0615	0,0007
2,08	0,390	-0,9438	0,1195	0,1191	0,0024
5,00	0,940	-0,7190	0,3375	0,7057	0,0797
10,00	1,900	-0,25 49	0,4467	2,6444	1,2651

Tab. 3. Ugięcia powłoki lodowej dla różnych powierzchni rozkładu obciążenia

Odległości „ r ” od środka działania obciążenia w [m]	Rzędne ugięć powłoki lodowej w [m] dla różnych wielkości promienia rozkładu obciążenia „ a ”					
	0,125	1,0	1,5	2,08	5,0	10,0
0	0,0045	0,0043	0,0042	0,0041	0,0036	0,0024
0,125	0,0045	-	-	-	-	-
1,0	0,0044	0,0042	0,0041	0,0041	0,0036	0,0024
1,5	0,0043	0,0041	0,0041	0,0039	0,0035	0,0024
2,0	0,0041	0,0039	0,0039	0,0038	0,0034	0,0023
4,0	0,0031	0,0031	0,0033	0,0032	0,0030	0,0022

Badania Autora [4] wykonane na rzeczywistych powłokach lodowych podczas próbnych obciążeń wykazały, że: ugięcie jej wynosi 0,004 cm na każde 1000 kg generowanego obciążenia, promień względnej sztywności powłoki lodowej wynosi wówczas 5,27 m. Przyjmując współczynnik Poissona $\mu = 0,33$, i dokonaniu przekształceń wzoru (4) oraz przyjęciu $l = 5,27$ można określić współczynnik sprężystości lodu, którego średnią wartość wyznaczono na $E = 32600 \text{ kg/cm}^2$ (0,32MPa) i wynik ten jest porównywalny z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy [6, 8]. Analizując ugięcie powłoki lodowej pod obciążeniem równomiernie rozłożonym na jej powierzchni należy mieć na uwadze to, że tak jak w przypadku płyt spoczywających na innych ośniewach zależność będzie od ciężaru samolotu i geometrycznego układu kół w goleni głównej. Można założyć, że obciążenie jest rozłożone równomiernie na powierzchni kołowej o małym promieniu $r = a$ (w porównaniu z nieskończenie wielką płytą lodową). Wyróżniamy wówczas dwa obszary oddziaływania obciążenia: wewnętrzny gdy $r \leq a$ i zewnętrzny gdy $r \geq a$. warunki brzegowe dla obu tych obszarów będą różne. Na okręgu o promieniu $r = a$, spełniają się warunki przejściowe, które wyrażają równość

ugięć i ich pochodnych do 3-go stopnia włącznie. Mając powyższe na uwadze ustalono równania równowagi dla ugięcia „ w ” odpowiadającego tym wyróżnionym obszarom:

– dla obszaru wewnętrznego:

$$w_w(x) = q [1 + C_1 \cdot Z_1(x) + C_2 \cdot Z_2(x)]$$

– dla obszaru zewnętrznego:

$$w_z(x) = q [C_3 Z_3(x) + C_4(x)] \quad (13)$$

gdzie: $C_1 - C_4$ stałe całkowania wyrażane przez $a = a/l$

$$C_1 = - \frac{K_1(\alpha)Z_3^{\wedge}(\alpha) + K_2Z_4^{\wedge}(\alpha)}{K_1^2(\alpha) + K_2^2(\alpha)};$$

$$C_2 = - \frac{K_2(\alpha)Z_3^{\wedge}(\alpha) - K_1(\alpha)Z_4^{\wedge}(\alpha)}{K_1^2(\alpha) + K_2^2(\alpha)}$$

$$C_3 = \frac{-K_1(\alpha)Z_1^{\wedge}(\alpha) - K_2(\alpha)Z_2^{\wedge}(\alpha)}{K_1^2(\alpha) + K_2^2(\alpha)};$$

$$C_4 = \frac{-K_2(\alpha)Z_1^{\wedge}(\alpha) + K_1(\alpha)Z_2^{\wedge}(\alpha)}{K_1^2(\alpha) + K_2^2(\alpha)} \quad (14)$$

przy czym:

$$K_1(\alpha) = [Z_1(\alpha) \cdot Z_3^{\wedge}(\alpha) - Z_1^{\wedge}(\alpha) \cdot Z_3(\alpha)]$$

$$- [Z_2(\alpha) \cdot Z_4^{\wedge}(\alpha) - Z_2^{\wedge}(\alpha) \cdot Z_4(\alpha)]$$

$$K_2(\alpha) = [Z_1(\alpha) \cdot Z_4^{\wedge}(\alpha) - Z_1^{\wedge}(\alpha) \cdot Z_4(\alpha)]$$

$$+ [Z_2(\alpha) \cdot Z_3^{\wedge}(\alpha) - Z_2^{\wedge}(\alpha) \cdot Z_3(\alpha)]$$

Obciążenie powłoki lodowej równomiernie rozłożone o promieniu a wyrazić można zależnościami $q = Q/\pi a^2$ lub $q = Q/\pi a^2 l^2$, Z_1, Z_2 – funkcje zmiennych rzeczywistych, związane z funkcjami cylindrycznymi Bessela pierwszego rodzaju J_0 przedstawic można je w postaci szeregowo:

$$Z_1(x) = \sum_{r=0}^{\infty} (-1)^r \left[\frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{2r}}{2r!} \right]^2$$

$$Z_2(x) = \sum_{r=0}^{\infty} (-1)^{r+1} \left[\frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{2r+1}}{2(r+1)!} \right] \quad (15)$$

Funkcje $Z_3(x)$ i $Z_4(x)$ można wyrazić pośrednio wykorzystując funkcje: $Z_1(x)$ i $Z_2(x)$ przyjmują one postać:

$$Z_3(x) = \frac{Z_1(x)}{2} - \frac{2}{\pi} \{R_1(x) + \text{Ilg} \frac{\gamma^x}{2} Z_2(x)\} \quad (16)$$

$$Z_4(x) = \frac{Z_2(x)}{2} - \frac{2}{\pi} \{R_2(x) + \text{Ilg} \frac{\gamma^x}{2} Z_1(x)\}$$

Zmiana promienia rozkładu obciążenia „ a ” powoduje zmianę wartości współczynników $C_1 - C_4$ w funkcji $a = a/l$. Obliczone wartości uwzględniają różne układy kół w goleni głównej samolotu. Przykładowo wybrane wartości współczynników $C_1 - C_4$ przedstawiono w tabelicy 2.

Wykorzystując wartości wybranych współczynników z tabelicy 2 obliczono ugięcia powłoki lodowej dla różnych powierzchni rozkładu obciążenia, których wybrane wyniki przedstawiono w tabelicy 3.

Obliczenie sił w przypadku środkowego ugięcia.

Rozpatrując przypadek symetrycznego obciążenia, w powłoce lodowej występują następujące rodzaje oddziaływań: momenty zginające M_l i M_t oraz siła ścinająca T_r , która działa w paśmie o szerokości l . Wyrażenia na te oddziaływanie są następujące

$$\begin{aligned}
 M_r &= -I^4 \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\mu}{r} \frac{dw}{dr} \right] \\
 M_t &= -I^4 \left[\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \mu \frac{d^2 w}{dr^2} \right] \\
 T_r &= I^4 \left[\frac{d^3 w}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2 w}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dw}{dr} \right]
 \end{aligned} \quad (17)$$

gdzie: l – zgodnie ze wzorem (4).

Należy mieć na uwadze to, że przy dużym r , tzn. w znacznej odległości od miejsca przyłożenia obciążenia, wyrażenia te są identyczne jak wyrażenia dla sił występujących w belkach prostych. Zastępując w równaniach (13) wyrażenia „ w ” i pochodne przez funkcje „ Z ” otrzymujemy (18).

Linie ugięć powłoki lodowej przy różnych promieniach powierzchni rozkładu obciążenia przedstawiono na rys. 1.

Wprowadzając do równań (16) wyznaczone współczynniki $C_1 - C_4$ oraz mając na uwadze warunki rozkładu obciążenia, można sformułować równania momentów i siły ścinającej dla tych przypadków:

– dla obszaru wewnętrznego gdy ($x \leq a$) (19).

– dla obszaru zewnętrznego gdy ($x \geq a$) (20).

Przy założeniu, że $x = a$ oraz $r = a$, otrzymujemy:

$$\begin{aligned}
 M_r(x) &= -q I^2 \left\{ C_1 [Z_2(x) - (1-\mu) \frac{Z_1(x)}{x}] - C_2 [Z_1(x) + (1-\mu) \frac{Z_2(x)}{x}] + \right. \\
 &\quad \left. + C_3 [Z_4(x) - (1-\mu) \frac{Z_3(x)}{x}] - C_4 [Z_3(x) + (1-\mu) \frac{Z_4(x)}{x}] \right\} \\
 M_t(x) &= q I^2 \mu \left\{ C_1 [Z_2(x) + (\frac{1}{\mu} - 1) \frac{Z_1(x)}{x}] - C_2 [Z_1(x) - (\frac{1}{\mu} - 1) \frac{Z_2(x)}{x}] + \right. \\
 &\quad \left. + C_3 [Z_4(x) + (\frac{1}{\mu} - 1) \frac{Z_3(x)}{x}] + C_4 [Z_3(x) - (\frac{1}{\mu} - 1) \frac{Z_4(x)}{x}] \right\} \\
 T_r(x) &= q I \left\{ C_1 Z_2(x) - C_2 Z_1(x) + C_3 Z_4(x) - C_4 Z_3(x) \right\}
 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 M_r^w(x,a) &= Ql^2/\pi a^2 \left\{ C_1(\alpha) [Z_2(x) - (1-\mu) \frac{Z_1(x)}{x}] - C_2(\alpha) [Z_1(x) + (1-\mu) \frac{Z_2(x)}{x}] \right\} \\
 M_t^w(x,a) &= Ql^2 \mu/\pi a^2 \left\{ C_1(\alpha) [Z_2(x) + (\frac{1}{\mu} - 1) \frac{Z_1(x)}{x}] - C_2(\alpha) [Z_1(x) - (\frac{1}{\mu} - 1) \frac{Z_2(x)}{x}] \right\} \\
 T_r^w(x,a) &= Ql^2/\pi a^2 \left\{ C_1(\alpha) Z_2(x) - C_2(\alpha) Z_1(x) \right\}
 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 M_r^z(x,a) &= Ql^2/\pi a^2 \left\{ C_3(\alpha) [Z_4(x) - (1-\mu) \frac{Z_3(x)}{x}] - C_4(\alpha) [Z_3(x) + (1-\mu) \frac{Z_4(x)}{x}] \right\} \\
 M_t^z(x,a) &= Ql^2 \mu/\pi a^2 \left\{ C_3(\alpha) [Z_4(x) + (\frac{1}{\mu} - 1) \frac{Z_3(x)}{x}] - C_4(\alpha) [Z_3(x) - (\frac{1}{\mu} - 1) \frac{Z_4(x)}{x}] \right\} \\
 T_r^z(x,a) &= Ql^2/\pi a^2 \left\{ C_2(\alpha) Z_4(x) - C_4(\alpha) Z_3(x) \right\}
 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 M_r^w(a,a) &= M_r^z(a,a), \quad M_r^w(a,a) = \\
 &= M_t^z(a,a), \quad T_r^w(a,a) = T_r^z(a,a) \quad (21)
 \end{aligned}$$

Zwiększenie nośności powłoki lodowej

Jeżeli nośność powłoki lodowej nie jest dostateczna istnieje możliwość podwyższenia tej nośności, dokonając tego można poprzez: zwiększenie grubości powłoki lodowej, zbrojenie lodu. Wybór sposobu zależy od warunków miejscowych w tym między innymi: temperatury powietrza, grubości istniejącej powłoki lodowej i innych. Najprostszy sposób tego zabiegu to: oczyszczenie górnej powierzchni powłoki lodowej (śniegu z jej powierzchni), co przyspiesza naturalny proces zamarzania i narastania grubości lodu od dołu. Ten sposób wymaga jednak dłuższej ilości czasu. W krótszym czasie efekt wzmocnienia uzyskać można polewając istniejącą powłokę lodową warstwami wody o grubości od 5,0 do 10,0 cm, jednak temperatura otoczenia nie może być niższa niż 8°C, a wytrzymałość tej warstwy niższa o około 30% od wytrzymałości naturalnego przezroczystego lodu.

Wnioski

Przeprowadzone badania w warunkach „in situ” na krajowych akwenach pozwalają na stwierdzenie, że istnieje możliwość wykorzystania powstałych na tych akwenach powłok lodowych w określonych warunkach ujemnych temperatur oraz samolotów o napędzie tłokowym. Daje to szansę na zwiększanie możliwości operacyjnych lotnictwa Sił Zbrojnych w warunkach ekstremalnego zagrożenia. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Dejugin K.K., Karelin D.B. Ledowzje nabludienij na moriach. Leningrad, 1954.
- [2] Gorecki Ł.J., Borodacz A.J. Projektowanie i stroitelstwo wiertolotnych stancji. Jzd.Liter. po stroitelstwu. Moskwa, 1964.
- [3] Hertz H. Uber das Gleich gewicht, schwimmender elastischer Platten, Wied. Ann. Phys-Chemie, 1884.
- [4] Kaźmierczyk F. Ustalenie możliwości i warunków wykorzystania krajowych pokryw lodowych na jeziorach do startów, lądowań i postoju samolotów” Praca doktorska Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 1975.
- [5] Korunow M.M. Rasczet ledjanych perepraw. Goslestiechizdat, 1940.
- [6] Ławrow W.W. Deformacja i procznost lda. Leningrad, 1969.
- [7] Meyerhof G.G. Bearing Capacity of Floating Ice Sheets. J. of the Eng. Mech. Div. Proceedings of A.M. Soc. of Civ.Eng. 1960.
- [8] Pinegin W.P. Ob. izmienenijach modulija uprugosti i koeficjenta Poissona u riecznowo lda pri zżatije. Nauka i Technika, nr.3-4, 1927.
- [9] Westergard H.M. „Stresses in Concrete Runways of Airports” Proceedings 19 th Doc.1939.
- [10] Zubow N.N. Ldy Arkytki. Izdanieje Gławsowmoruti, 1945.