

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH
Łódź, 12 – 14 maja 1999 r.

Michał WASILCZUK
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

**METODYKA PROJEKTOWANIA HYDRODYNAMICZNEGO ŁOŻY-
SKA WZDŁUŻNEGO W OPARCIU O OPTYMALIZACJĘ KSZTAŁTU
SZCZELINY SMAROWEJ**

SŁOWA KLUCZOWE:

metodyka projektowania, hydrodynamiczne łożyska wzdluzne, kształt szczeliny smarowej, optymalizacja

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono metodę projektowania hydrodynamicznych łożysk wzdluznych oparta na optymalizacji kształtu szczeliny smarowej. Metoda różni się od stosowanych dotychczas tym, że w pierwszej fazie projektowania wyznacza się optymalny dla danych warunków pracy kształt szczeliny smarowej łożyska (zastosowana wielokryterialna procedura optymalizacyjna uwzględnia wymagania charakterystyczne dla zadanych warunków pracy), a następnie poszukuje się sposobu uzyskania w łożysku wyznaczonego obliczeniowo kształtu. Metoda nie jest związana z żadną konkretną postacią konstrukcyjną łożyska, przez co poszerzony jest obszar poszukiwania rozwiązań. Zaprojektowane według przedstawionej metodyki łożysko z podatną płytą ślizgową zostało doświadczalnie porównane z klasycznym łożyskiem z wahlowymi klockami. Wyniki wykazały, że zaproponowany sposób projektowania zapewnia uzyskanie w łożysku optymalizowanym znacznie lepszych właściwości.

WPROWADZENIE

Projektowanie hydrodynamicznych łożysk wzdluznych ogranicza się obecnie do doboru rodzaju łożyska i doboru konkretnego łożyska z katalogu. Producenci łożysk dokonują doskonalenia swoich konstrukcji poprzez optymalizację parametrów konstrukcyjnych łożysk o danej konstrukcji- najczęściej łożysk z wahlowymi klockami. Takie wykorzystanie metod optymalizacji ogranicza obszar poszukiwań do konkretnej postaci konstrukcyjnej. Z drugiej

strony wiadomo, że kształt szczeliny smarowej w łożysku ma decydujący wpływ na jego właściwości. U podstaw proponowanej metodyki projektowania łożysk leży następująca teza: uzyskanie w łożysku kształtu szczeliny smarowej zbliżonego do teoretycznie wyznaczonego optimum dla danych warunków pracy wpłynie na znaczącą poprawę właściwości łożyska. Proponowana w niniejszej pracy procedura projektowania hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych składa się z następujących etapów:

- Określenie zakresu pracy i ograniczeń dla projektowanego łożyska,
- Określenie celu optymalizacji charakterystycznego dla danego zastosowania,
- Przeprowadzenie optymalizacji kształtu szczeliny smarowej dla jednego lub kilku punktów pracy z całego zakresu warunków pracy łożyska,
- Poszukiwanie zasad pracy i postaci konstrukcyjnej łożyska pozwalających na osiągnięcie optymalnych kształtów szczeliny smarowej,
- Dobór parametrów konstrukcyjnych łożyska zapewniający zbliżenie kształtu szczeliny do wyznaczonych uprzednio optimum.

Poniżej omówione zostaną poszczególne etapy proponowanej metody projektowania.

OKREŚLENIE ZAKRESU PRACY I OGRANICZEŃ

W świetle literatury dotyczącej badań hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych oraz katalogów producentów zakres warunków pracy łożysk, nie tylko klockowych, ograniczony jest przez trzy krzywe (rys. 1): minimalnej grubości filmu, maksymalnych nacisków, dopuszczalnej temperatury łożyska [1]:

- w zakresie niskich i średnich prędkości obrotowych ograniczeniem jest minimalna grubość filmu;
- w warunkach średnich prędkości średnie naciski w łożysku ograniczone są wytrzymałością mechaniczną elementów podparcia klocka łożyskowego oraz koniecznością ograniczenia jego odkształceń (to ograniczenie może nie występować przy innej postaci konstrukcyjnej łożyska);
- temperatura łożyska jest ograniczeniem w warunkach wysokich prędkości.



Rys. 1. Obszar pracy klockowych łożysk wzdłużnych wg. [1]

W związku z brakiem spójnej teorii tarcia mieszanego i płynnego niemożliwe jest określenie granicznych warunków pracy łożyska na drodze symulacji komputerowej - nie istnieją bowiem modele opisujące przejście łożyska z warunków tarcia płynnego do, niedopuszczalnych w normalnej pracy, warunków tarcia mieszanego. Dwoma niezależnymi źródłami zaleceń dotyczących granicznych warunków pracy łożyska są zalecenia dla inżynierów oraz metody obliczeniowe w postaci norm DIN [2] oraz arkuszy ESDU (Engineering Sciences Data Unit) [3]. Elementem przedstawionych metod obliczeniowych są wytyczne dotyczą-

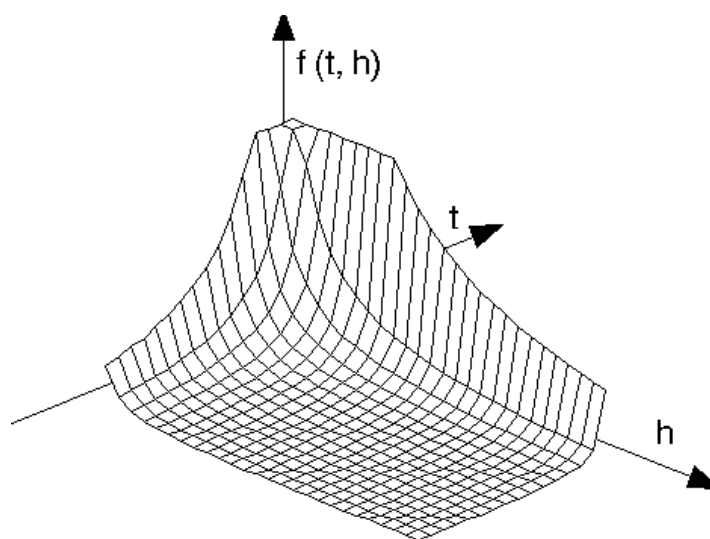
ce stanów granicznych (minimalnej grubości filmu i dopuszczalnej temperatury łożyska). Graniczne wartości minimalnej grubości filmu olejowego określone są na podstawie badań doświadczalnych oraz długoletniego doświadczenia producentów łożysk. Zalecenia te obecnie z reguły zawierają zależność od średniej średnicy łożyska lub od szerokości klocka łożyskowego oraz od chropowatości współpracujących powierzchni, co pozwala uwzględnić termiczne odkształcenia segmentu łożyska oraz dokładność jego obróbki. Dopuszczalna temperatura łożyska wzdłużnego zależy od materiału powierzchni ślizgowej łożyska. Dodatkowo, dla zachowania wystarczającej trwałości oleju zaleca się aby temperatura oleju na wylocie z korpusu łożyska nie przekraczała 75 °C (jest to wartość zalecana dla olejów mineralnych).

OKREŚLENIE FUNKCJI CELU PROCEDURY OPTIMALIZACYJNEJ

Kryteria oceny pracy hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych są jednocześnie wytyczną formułowania założeń do optymalizacji. Według rys. 1 na etapie projektowania kształtu szczeliny

optymalizacja musi uwzględniać co najmniej 2 kryteria: grubość filmu i temperaturę łożyska w sposób zależny od warunków pracy, tak aby przy mniejszej prędkości obrotowej podstawowym celem optymalizacji była maksymalizacja grubości filmu, a przy większej prędkości minimalizacja temperatury łożyska. Dla danej wielkości łożyska i warunków pracy literatura podaje graniczne wartości minimalnej grubości filmu i temperatury łożyska.

Przy zastosowaniu klasycznej metody optymalizacji (programowania nieliniowego) - odpowiedni algorytm steruje procesem kolejnych zmian w zestawie parametrów opisujących kształt szczeliny smarowej, zmierzając do uzyskania najmniejszej (albo największej) wartości funkcji celu. Dobre łożysko hydrodynamiczne powinno mieć między innymi temperaturę i grubość szczeliny smarowej **możliwie odległe** od wartości dopuszczalnych. Z wartości tych dwóch najbardziej istotnych czynników (określanych w procesie optymalizacji na drodze obliczeń termohydrodynamicznych), decydujących o bezpieczeństwie pracy łożyska, "skomponowano" następującą funkcję celu, której wykres przedstawiono na rys. 2. Według przebiegu funkcji celu w miarę oddalania się od granic wartości dopuszczalnych pochylenie jej powierzchni zmniejsza się. Celem takiego sformułowania funkcji było uzyskanie silniejszego wpływu funkcji celu na proces optymalizacji w pobliżu wartości dopuszczalnych a mniejszego w miarę oddalania się od nich, a zwłaszcza po przejściu poza wartości określone jako zadowalające.



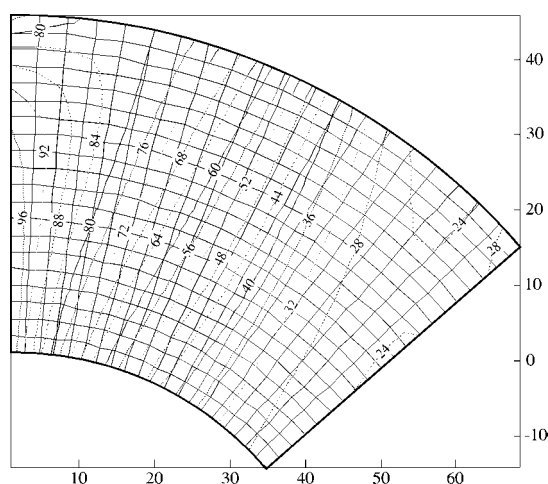
Rys. 2 Wykres funkcji celu zastosowanej w procedurze optymalizacyjnej

W szczególnych przypadkach dodatkowym, bądź nawet niekiedy podstawowym, celem optymalizacji może być minimalizacja strat tarcia w łożysku. Wówczas jednak model łożyska musi uwzględniać przepływ oleju przez korpus łożyska i w przestrzeniach między segmentami, a w szczególności związane z tym opory ruchu.

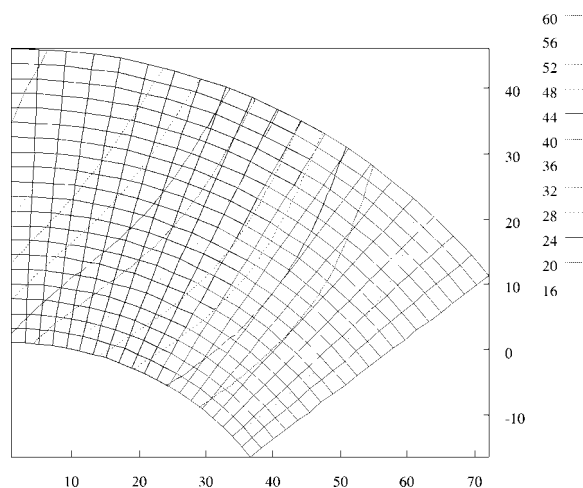
PRZEPROWADZENIE OPTIMALIZACJI KSZTAŁTU

Do poszukiwania optymalnego kształtu szczeliny smarowej zastosowano algorytm i oprogramowanie, opracowane w Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej [4]. Wykorzystany algorytm charakteryzuje się poszukiwaniem najlepszego kierunku spadku funkcji celu w przestrzeni zmiennych decyzyjnych, z okresowo wymuszaną zmianą tego kierunku (tzw. rotacją bazy) i jego ortogonalizacją (dla uniknięcia degeneracji aktywnej przestrzeni zmiennych decyzyjnych) oraz okresowymi próbami penetracji odległych regionów dla uniknięcia zatrzymania się w minimum lokalnym.

Na rysunku 3 przedstawiono postać optymalnego kształtu szczeliny dla łożyska o wymiarach 180/90 mm, obciążenia 45 kN, prędkości obrotowej 3000 obr/min, smarowanego olejem TU-32. Minimalna grubość szczeliny w wyniku optymalizacji osiągnęła $h_{\min} = 22 \mu\text{m}$, a największa temperatura w szczelinie - $t_{\max} = 66.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Kształt optymalny (rys. 3.1) charakteryzuje się niewielką krzywizną warstwic (z wyjątkiem okolic wlotowych szczeliny), tj. niewielkim ograniczeniem wpływów bocznych czynnika smarowego ze szczeliny.



Rys. 3. Kształt szczeliny smarowej osiągnięty w wyniku optymalizacji dla $n=3000$ obr/min.



Rys. 4. Kształt szczeliny smarowej osiągnięty w wyniku optymalizacji dla $n=1000$ obr/min.

Dla ilustracji wpływu warunków pracy na postać optymalnego kształtu szczeliny smarowej przeprowadzono także optymalizację dla zmienionej prędkości obrotowej. Kształt optymalny dla prędkości obrotowej 1000 obr/min (rys. 4) charakteryzuje się zwiększoną krzywizną warstwic i powiększonym ograniczeniem wypływów bocznych czynnika smarowego ze szczeliny. Procedura optymalizacyjna spowodowała powiększenie kąta opasania sekcji. Takie efekty wywołane zostały większą rolą maksymalizacji grubości filmu w tych warunkach pracy niż dla 3000 obr/min. Minimalna grubość szczeliny w wyniku optymalizacji osiągnęła $h_{\min} = 14 \mu\text{m}$, a największa temperatura w szczelinie - $t_{\max} = 56.9 \text{ }^\circ\text{C}$.

POSZUKIWANIE ZASAD PRACY I POSTACI KONSTRUKCYJNEJ

Kolejnym etapem projektowania łożyska jest poszukiwanie zasad pracy i zasad tworzenia szczeliny smarowej o pożądanym kształcie. Wskazać można kilka przykładowych zasad, na których może być oparte tworzenie korzystnego kształtu szczeliny w łożysku:

- a. obróbka mechaniczna
- b. odkształcenia termosprężyste
- c. odkształcenia postaciowe

Ad A. Obróbka mechaniczna powierzchni ślizgowej łożyska była rozpatrywana jako sposób uzyskania pożądanego kształtu szczeliny smarowej do połowy lat 70 [5]. Współcześnie nie jest brana pod uwagę ze względu na konieczność kształtowania powierzchni ślizgowej z dokładnością rzędu grubości filmu smarowego w łożysku oraz konieczność uwzględnienia odkształceń elementów łożyska oraz zużywanie się powierzchni ślizgowej łożyska podczas pracy.

Ad B. Modyfikacja kształtu powierzchni ślizgowej podczas pracy następuje na skutek odkształceń podatnych elementów łożyska w wyniku działania ciśnienia hydrodynamicznego i różnic temperatury. Odpowiedni dobór sztywności i sposobu podparcia elementów łożyska spowodować może zbliżenie kształtu szczeliny smarowej podczas pracy do optimum. Zasada ta znalazła zastosowanie w łożyskach proponowanych przez Tieu [6] i Olszewskiego [7].

Ad C. W łożyskach z polimerową warstwą ślizgową sposobem uzyskania korzystnego kształtu szczeliny smarowej jest odkształcanie warstwy podatnego materiału pokrywającego łożysko pod wpływem ciśnienia hydrodynamicznego. Wydaje się, że ta zasada tworzenia szczeliny smarowej o korzystnym kształcie leży u podstaw znakomitych właściwości łożysk z polimerową warstwą ślizgową [8].

Zapewne możliwe jest także tworzenie korzystnego kształtu szczeliny smarowej na innych, nieznanych jeszcze, zasadach.

DOBÓR PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH

Dla przyjętej zasady tworzenia korzystnego kształtu szczeliny smarowej i postaci konstrukcyjnej łożyska dobrać należy parametry konstrukcyjne tak, aby kształt szczeliny smarowej podczas pracy był możliwie bliski kształtowi optymalnemu. W tym celu konieczne jest wyznaczenie kształtu szczeliny smarowej podczas pracy. Podczas obliczeń uwzględnić należy sprzężenie zwrotne między kształtem szczeliny i rozkładem ciśnienia hydrodynamicznego i temperatury. Według dotychczasowych doświadczeń z badań prowadzonych w Politechnice Gdańskiej [9], ze względu na długie czasy obliczeń oraz z uwagi na trudności sformalizowanej oceny podobieństwa jednego kształtu do drugiego niemożliwe było zalgorytmizowanie procedury poszukiwania parametrów konstrukcyjnych łożyska o optymalnym kształcie szczeliny smarowej. Dlatego też dotychczas wykorzystywano metodę prób i błędów oraz „ręczną” zmianę przyjętych parametrów konstrukcyjnych modelu MES łożyska.

PODSUMOWANIE

Dotychczasowe metody doskonalenia konstrukcji hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych koncentrowały się na optymalizacji parametrów konstrukcyjnych przyjętej postaci konstrukcyjnej łożyska. Ze względów ekonomicznych wytwórcy łożysk wytwarzają łożyska uniwersalne – przeznaczone do szerokiego zakresu warunków pracy podczas gdy optymalny kształt szczeliny smarowej zależy od warunków pracy. Przedstawiona metoda projektowania łożysk opiera się na optymalizacji kształtu szczeliny smarowej i poszukiwaniu postaci konstrukcyjnej łożyska zapewniającej uzyskanie „zaprojektowanego”. Zaprojektowane według przyjętej metodyki łożysko zostało poddane badaniom porównawczym z łożyskiem z wahlowymi klockami. Wyniki przedstawione obszerniej w [10] wykazały, że zaproponowany sposób projektowania zapewnia zdecydowaną poprawę właściwości łożyska w porównaniu do klasycznego łożyska z wahlowymi klockami

LITERATURA

- Leopard A. J.: Tilting Pad Bearings- Limits of Operation. Lubrication Engineering, vol. 32, 12, s. 637-644.
- Hydrodynamische Axial-Gleitlager im stationären Betrieb. DIN 31 654 Teil 1-3. Mai 1991.
- Calculation methods for steadily loaded, off-set pivot, tilting pad thrust bearings. *Engineering Sciences Data Unit No 83004*
- Oleksiewicz B. "Opracowanie wybranych algorytmów optymalizacji statycznej z ...", Praca Badawcza nr 1357/MR 420/80, Instytut Okrętowy Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1980
- Rohde S. M., McAllister: On the optimization of fluid film bearings. Proc. R. Soc. Lond. A. 351, 481-497 (1976).
- Tieu A. K.: An Investigation of "Diaphragm" Type Thrust Bearings. Part I: Experiment. Trans. ASME, Journ. Lubr. Technol., Oct. 1975, 570-576.
- Olszewski O.: Thrust bearing with elastic sliding ring. 4th European Tribology Congress EU-ROTRIB '85, Ecully1985, vol. I.
- Dąbrowski L., Kurzych K., Wasilczuk M.: Określenie skali korzyści płynących z uzyskania w hydrodynamicznym łożysku wzdłużnym idealnego kształtu szczeliny smarowej. Sprawozdanie z pracy badawczej (grant) nr 011808. Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, 1998
- Simmons J. E. L., Knox R. T., Moss B. O.: PTFE Faced Thrust Bearings: State of the Art and Hydro-Generator Application in the UK. Proceedings of the First World Tribology Congress, London 1997
- Wasilczuk M.: Porównanie właściwości hydrodynamicznego łożyska wzdłużnego z wahlowymi klockami z łożyskiem optymalizowanym. Materiały konferencji Problemy Niekonwencjonalnych Węzłów Łożyskowych, Łódź 1999

METHOD OF HYDRODYNAMIC THRUST BEARING DESIGN BASED ON OPTIMISATION OF OIL GAP PROFILE

ABSTRACT

Design method for hydrodynamic thrust bearing is presented in the paper. The method is based on oil gap profile optimisation. Procedure of bearing design is divided into two phases:

optimisation of oil gap profile

searching for methods of obtaining optimum profile in a bearing.

The method does not a-priori assume any bearing type therefore it offers wider spectrum of possible solutions. A bearing with an elastic thrust plate was designed using presented method and experimentally compared to a typical tilting pad thrust bearing. The results showed that performance of an optimised bearing was superior to classical design bearing.

Recenzent: Jan Burcan