

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

Michał Wasilczuk
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

**PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI HYDRODYNAMICZNEGO
ŁOŻYSKA WZDŁUŻNEGO Z WAHLIWYMI KLOCKAMI
Z ŁOŻYSKIEM OPTYMALIZOWANYM**

SŁOWA KLUCZOWE:

hydrodynamiczne łożysko wzdluzne, łożysko z wahliwymi klockami, kształt szczeliny smarowej

STRESZCZENIE

Kształt szczeliny smarowej w hydrodynamicznym łożysku wzdluznym ma duży wpływ na właściwości łożyska, stąd jedną z dróg poprawy jego właściwości jest dążenie do optymalizacji kształtu szczeliny smarowej podczas pracy. W Politechnice Gdańskiej poddano porównawczym badaniom doświadczalnym typowe łożysko z wahliwymi klockami oraz oryginalne łożysko z podatną płytą ślizgową. Parametry konstrukcyjne łożyska z podatną płytą ślizgową dobrano, tak aby kształt szczeliny smarowej podczas pracy był możliwie bliski kształtowi optymalnemu wyznaczonemu uprzednio na drodze obliczeniowej dla założonych warunków pracy. Wyniki wykazały, że optymalizowane łożysko z podatną płytą ślizgową znacznie przewyższa właściwościami typowe łożysko klockowe.

OPTYMALNY KSZTAŁT SZCZELINY SMAROWEJ

Optymalizacja kształtu szczeliny smarowej jest jednym z obliczeniowych zadań podejmowanych prawie od początku istnienia hydrodynamicznej teorii smarowania (np. [1], [2], [3]). Za główne niedostatki dotychczasowych prób wyznaczania optymalnego kształtu szczeliny smarowej z punktu widzenia współczesnej praktyki łożyskowania uznać należy:

- wykorzystywanie izotermicznych modeli filmu smarowego,
- nieuwzględnianie wpływu odkształceń łożyska na kształt szczeliny,
- analizowanie kształtów nie mających związku z realnymi kształtami szczeliny w łożyskach,
- wykorzystywanie optymalizacji jednokryterialnej (najczęściej maksymalizacja obciążenia przy zadanej minimalnej grubości filmu).

Postęp w technice obliczeniowej umożliwiający analizę odkształceń termosprężystych i wykorzystanie bardziej realistycznych modeli filmu olejowego oraz skuteczniejszych procedur polioptymalizacyjnych, zwiększanie wymagań stawianych łożyskom oraz opracowanie koncepcji łożysk umożliwiających skuteczniejszą kontrolę kształtu szczeliny smarowej podczas pracy skłaniają do ponownego podjęcia w badaniach zagadnienia optymalizacji kształtu szczeliny smarowej hydrodynamicznego łożyska wzdluznego [4]. Podejmując na nowo zagadnienie optymalizacji kształtu szczeliny smarowej przyjęto założenie, że kształt szczeliny smarowej uzyskany zostanie w wyniku odkształceń oraz, że kryteria optymalizacji i funkcja celu powinny być sformułowane w sposób odpowiadający technicznym wymaganiom stawianym łożyskom w różnych warunkach pracy. Do poszukiwania optymalnego kształtu szczeliny smarowej zastosowano algorytmy i oprogramowanie opracowane w Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej [5]. Problem optymalizacji sformułowano następująco:

1. Celem poszukiwań są wartości 10 zmiennych decyzyjnych opisujących kształt szczeliny smarowej, dla których funkcja celu osiąga minimalną wartość,
2. Wartość funkcji celu jest wyznaczana na podstawie termohydrodynamicznych obliczeń największej temperatury i najmniejszej grubości szczeliny po interpolacji kształtu szczeliny ze zmiennych decyzyjnych,
3. Zmienne decyzyjne mają charakter ciągły, a wartość każdej jest wybierana przez algorytm optymalizujący z przedziału określonego na drodze wcześniejszych, osobnych rozważań,
4. Dla optymalnego kształtu nośność hydrodynamiczna generowana we wszystkich szczelinach łożyska powinna być zbliżona (z zadaną dokładnością) do zadanego obciążenia łożyska,
5. Największa temperatura w szczelinie i minimalna grubość szczeliny - nie mogą dla optymalnego kształtu przekroczyć wartości dopuszczanych w normach i zaleceniach dla inżynierów (np. [6]).

Wynik optymalizacji- optymalny kształt szczeliny smarowej przedstawiono w dalszej części pracy na rys. 1. Minimalna grubość szczeliny w wyniku optymalizacji osiągnęła $h_{\min} = 22 \mu\text{m}$, a największa temperatura w szczelinie - $t_{\max} = 66.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kolejnym etapem było skonstruowanie łożyska, w którym kształt szczeliny smarowej podczas pracy byłby zbliżony do kształtu optymalnego. Przyjęto, że obiektem, w którym za pomocą modyfikacji parametrów konstrukcyjnych dążyć się będzie do uzyskania optymalnego kształtu szczeliny smarowej, będzie udoskonalone łożysko z podatną płytą ślizgową [7]. Ze względu na trwające przygotowywanie zgłoszenia patentowego szczegóły konstrukcji łożyska nie mogą być ujawnione.

ŁOŻYSKO BADAWCZE Z WAHLIWIYMI KLOCKAMI

Typowe hydrodynamiczne łożysko wzdluzne z wahliwymi klockami mające służyć do celów porównawczych, zostało skonstruowane w oparciu o informacje z katalogów producentów ([8], [9], [10]). Skonstruowano łożysko o klockach podpartych na czopach kulistych (typu Kingsbury'ego). Analiza dotyczyła łożysk o wymiarach zbliżonych do przewidywanych wymiarów łożysk badawczych. Porównanie parametrów konstrukcyjnych łożysk katalogowych i zaprojektowanego łożyska badawczego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Parametry konstrukcyjne łożysk wg katalogów producentów

Wielkość	Parametry konstrukcyjne handlowych łożysk z wahliwymi klockami			Łożysko badawcze
	Glacier	Kingsbury	Waukesha	
średnica wewn. / średnica zewn. [mm]	89/178 103/192	88.9/177.8	96.8/177.8 88.9/177.8	180/90
liczba klocków	7 8	6 8	6 8	8
proporcje klocka	1	1.33 1	1.33 1	1
kąt p. podparcia/ kąta opasania klocka	~0.57 lub 0.5	0.50	0.50 lub 0.60	0.6
grubość klocka/ szer. klocka	~0.3	~0.33	~0.33	0.29
średnica podpory/ szer. klocka	~0.70- podparcie krawędziowe	~0.42 podpora kulista	~0.50 podpora kulista	0.4 podpora kulista

BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne były prowadzone na stanowisku SON-1, w warunkach stałej prędkości i narastającego schodkowo obciążenia według wypracowanej wcześniej metodyki [11]. Warunki badań były następujące:

obciążenie -	10-50 (60) kN, zmieniające co 5 kN,
prędkość obrotowa -	3000 obr/min
środek smarowy-	olej turbinowy TU-32 (lepkość odpowiadająca ISO VG-32)
ciśnienie smarowania-	0.15 MPa
temperatura oleju -	40 °C ±0.5°C

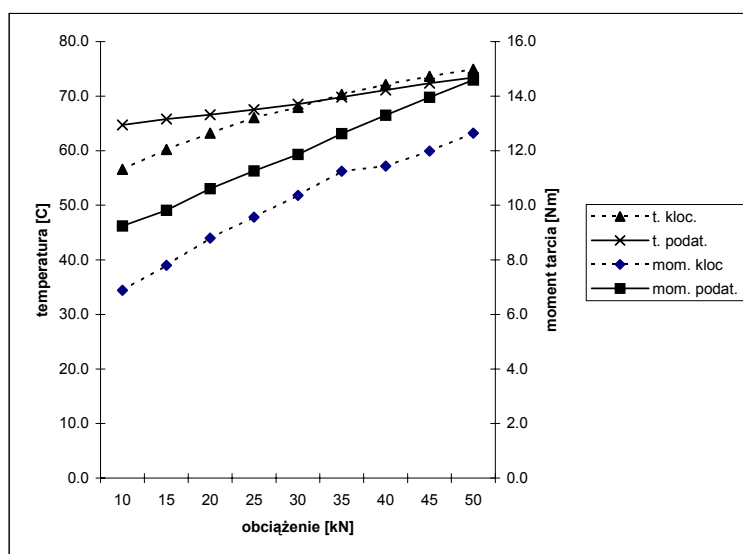
Wielkości mierzone (moment tarcia, temperaturę łożysk, temperaturę oleju na wlocie do szczeliny smarowej, położenie osiowe tarczy oporowej, przemieszczenie płyty ślizgowej lub klocka w wybranych miejscach) rejestrowano co 0.5 s za pomocą komputerowego systemu akwizycji danych wyposażonego w kartę przetworników analogowo cyfrowych i wykorzystującego własny program obsługujący akwizycję danych.

WPLYW OPTIMALIZACJI NA MINIMALNĄ GRUBOŚĆ FILMU

Na rys. 1 zestawiono wyniki pomiaru kształtu szczeliny smarowej w łożysku z podaną płytą ślizgową o optymalizowanych parametrach konstrukcyjnych i warstwicową mapę kształtu ustaloną na drodze obliczeniowej optymalizacji kształtu powierzchni ślizgowej. Kształt optymalny charakteryzuje się niewielką krzywizną warstwic (z wyjątkiem okolic wlotowych szczeliny), tj. niewielkim ograniczeniem wypływów bocznych czynnika smarowego ze szczeliny. Widoczna jest dobra jakościowa zgodność wyników obliczeń i pomiarów oraz znaczące różnice ilościowe. Według pomiarów odkształcenia płyty łożyska były mniejsze niż przewidywane w obliczeniach.

WPLYW OPTIMALIZACJI NA POZOSTALE WŁAŚCIWOŚCI OBU RODZAJÓW ŁOŻYSK

Poza minimalną grubością filmu ważnymi kryteriami oceny łożysk są temperatura i straty tarcia. W zakresie warunków pracy wybranym dla niniejszych badań (średnie prędkości obrotowe) temperatura nie jest kryterium najważniejszym, świadczy o tym także fakt, że w obu łożyskach temperatura była znacznie niższa niż wartości dopuszczalne. Porównanie temperatury obu łożysk (rys. 3) wykazuje, że w łożysku o kształcie szczeliny smarowej zbliżonym do optymalnego w nominalnych warunkach pracy temperatura była nieznacznie niższa niż w łożysku klockowym. Oznacza to, że maksymalizacja grubości filmu nie odbyła się kosztem podwyższenia temperatury. Podobnie jak w przypadku minimalnej grubości filmu uzyskanie lepszej zgodności kształtu szczeliny smarowej w łożysku badawczym z kształtem optymalnym zwiększyłyby prawdopodobnie przewagę łożyska podatnego nad łożyskiem klockowym pod względem temperatury. Porównanie momentu tarcia w obu łożyskach wykazuje, że w łożysku z kształtem szczeliny smarowej zbliżonym do optymalnego moment tarcia w filmie olejowym jest wyższy niż w łożysku klockowym. Wynika to prawdopodobnie głównie z mniejszej zbieżności szczeliny smarowej (por. rys. 2), ponieważ obliczeniowe porównanie strat tarcia w filmie o kształcie optymalnym i w filmie utworzonym w łożysku klockowym wykazuje niewielką różnicę na korzyść kształtu optymalnego. Można zatem przypuszczać, że w przypadku uzyskania w łożysku badawczym z podatną płytą ślizgową skali odkształceń zgodnej z teoretycznymi przewidywaniami łożysko to miałooby także mniejszy moment tarcia w filmie olejowym niż łożysko klockowe.



Rys. 3. Porównanie momentu tarcia i temperatury w obu łożyskach

Większy moment tarcia nie oznacza, że całkowite straty tarcia w łożysku badawczym z podatną płytą ślizgową, nawet odbiegającym od ideału, są większe. Na straty tarcia składają się, oprócz momentu tarcia w filmie olejowym, także opory mieszania oleju w korpusie łożyska, które dla łożyska z podatną płytą ślizgową są wyraźnie niższe ponieważ olej dostarczany jest bezpośrednio do rowka smarowego i łożysko nie musi być smarowane zanurzeniowo. Ten efekt nie mógł być zbadany ponieważ głowica badawcza nie umożliwia pomiaru całości strat tarcia. Ponadto drugie łożysko wzdłużne zabudowane w głowicy badawczej było łożyskiem z wahlowymi klockami i dlatego przez cały czas konieczne było zanurzeniowe smarowanie obu łożysk. O korzystnym wpływie bezpośredniego sposobu smarowania przez rowek świadczą wyniki badań doświadczalnych niedawno wprowadzonych na rynek łożysk z wahlowymi klockami ze smarowaniem przez rowek- np. łożysko LEG (Leading Edge Groove)

firmy Kingsbury, gdzie dla wyższych prędkości obrotowych możliwe jest nawet dwukrotne zmniejszenie strat tarcia w stosunku do konwencjonalnego łożyska [12]. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że optymalizacja łożyska z podatną płytą ślizgową była przeprowadzona bez uwzględnienia strat tarcia jako podstawowego kryterium optymalizacji. W przypadku kiedy straty tarcia są istotnym kryterium można ten fakt uwzględnić przy konstruowaniu funkcji celu procedury optymalizacyjnej.

PODSUMOWANIE

Opracowana skuteczna procedura optymalizacji kształtu szczeliny smarowej hydrodynamicznego łożyska wzdluznego pozwala na wyznaczenie optymalnego kształtu dla różnych warunków pracy łożyska i z wykorzystaniem zróżnicowanych, w zależności od potrzeb, kryteriów optymalizacji. Przeprowadzone dla kilku przypadków obliczenia wykazały, że w zależności od warunków postać optymalnego kształtu jest różni się znacząco.

Badania doświadczalne dostarczyły dowodów, że uzyskanie w hydrodynamicznym łożysku wzdluznym optymalnego kształtu szczeliny smarowej powoduje znaczną poprawę właściwości łożyska w porównaniu z typowym łożyskiem z wahlowymi klockami. Mimo trudności w odtworzeniu optymalnego kształtu szczeliny w łożysku badawczym z podatną płytą ślizgową - wykazuje ono znaczną (ok. 80% !) przewagę nad łożyskiem klockowym pod względem minimalnej grubości filmu, co jest w warunkach przyjętych do badań najważniejszym kryterium oceny łożyska. Poza tym łożysko o kształcie szczeliny zbliżonym do optimum pracuje przy nieco niższej temperaturze. Jediną niekorzystną cechą jest nieco wyższy moment tarcia niż w łożysku klockowym. Efekty optymalizacji byłyby prawdopodobnie jeszcze bardziej widoczne i pozbawione wzrostu momentu tarcia gdyby rzeczywiście udało się odtworzyć optymalny kształt szczeliny smarowej w łożysku badawczym ponieważ zwiększenie momentu tarcia było spowodowane nie naturalnymi wadami łożyska z podatną płytą ślizgową, ale trudnościami precyzyjnego odtworzenia optymalnego kształtu w łożysku badawczym spowodowanymi złożonością prowadzonych obliczeń. Mimo tych trudności podkreślić należy, że łożysko z podatną płytą ślizgową umożliwia uzyskanie w warunkach pracy korzystnego kształtu szczeliny smarowej.

Przeprowadzona dla różnych warunków optymalizacja ilustruje nowe perspektywy projektowania łożysk wzdluznych tak, aby spełniały one wymagane, i zróżnicowane dla różnych warunków i zastosowań, kryteria. Wydaje się, że jest to całkowicie nowe podejście do projektowania hydrodynamicznych łożysk wzdluznych zasadniczo różniące się od dotychczasowego sposobu polegającego na doborze gotowego łożyska z katalogu (w łożyskach katalogowych optymalizacji według przyjętych przez wytwórcę założeń podlegały parametry konstrukcyjne przyjętej postaci konstrukcyjnej łożyska). Przeprowadzone badania dowiodły, że efektem nowego sposobu projektowania może być znacząca poprawa wybranych właściwości łożyska.

LITERATURA

- [1]Rayleigh Lord: Notes on the theory of lubrication. Phil. Mag. 35, pp. 1-12, 1918
- [2]Rohde S. M., McAllister: On the optimization of fluid film bearings. Proc. R. Soc. Lond. A. 351, 481-497 (1976).
- [3]Anant Pal Singh: An Overall Optimum Design of a Sector-Shaped Thrust Bearing with Continuous Circumferential Surface Profiles. Wear, 117 (1987) 49-77.

- [4]Dąbrowski L. I inni: Poszukiwanie optymalnego kształtu powierzchni ślizgowej.... Pol. Gdańska, Wyd. Bud. Masz., Gdańsk 1991.
- [5]Oleksiewicz B. "Opracowanie wybranych algorytmów optymalizacji statycznej z ...", Praca Badawcza nr 1357/MR 420/80, Instytut Okrętowy Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1980
- [6]Hydrodynamische Axial-Gleitlager im stationären Betrieb. DIN 31 654. 1991.
- [7]Olszewski O.: Thrust bearing with elastic sliding ring. 4th European Tribology Congress EUROTRIB '85, Ecully1985, vol. I.
- [8]Tilting Pad Thrust Bearings. Designers' Handbook. Katalog Glacier Metal Co
- [9]Kingsbury, Inc.: Kingsbury's Guide to Equalizing Thrust Bearings, Philadelphia.
- [10]Tilting Pad Thrust Bearing Selection Guide. Katalog Waukesha Bearings Inc.
- [11]Wasilczuk M.: Wpływ cech konstrukcyjnych na właściwości hydrodynamicznego łożyska wzdłużnego z podatną płytą ślizgową. Praca doktorska. Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1994
- [12]Mikula A. M.: Further Test Results of the Leading-Edge-Groove (LEG) Tilting Pad Thrust Bearing. Trans. ASME, Journ. Tribol., Vol. 110, Jan. 1988, 174-180.

THE COMPARISON OF AN OPTIMUM PROFILE HYDRODYNAMIC THRUST BEARING WITH A TYPICAL TILTING PAD THRUST BEARING

ABSTRACT

The shape of the oil clearance in a hydrodynamic thrust bearing has a great impact on the properties of the bearing. That is why, one of the ways of improving its properties is aiming at optimization of the shape of the oil clearance during work. At Technical University of Gdansk a typical bearing with a self-aligning block and a bearing with a flexible slide plate were compared. The constructional parameters of the bearing with a flexible slide plate were chosen for the shape of the oil clearance possibly closest to the optimum shape, which had previously been calculated for particular work conditions. The results showed that the optimized bearing with a flexible slide plate has much better characteristics than a typical bearing with a self-aligning block.

Recenzent: Jan Burcan