

Michał WASILCZUK

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

WPLYW WYMUSZEŃ NA POSTAĆ OPTYMALNEGO KSZTAŁTU SZCZELINY SMAROWEJ HYDRODYNAMICZNEGO ŁOŻYSKA WZDŁUŻNEGO

Słowa kluczowe

Hydrodynamiczne łożysko wzdlużne, kształt szczeliny smarowej, optymalizacja, projektowanie.

Key words

Hydrodynamic thrust bearing, oil gap profile, shape optimisation, design.

Streszczenie

Kształt szczeliny smarowej w hydrodynamicznym łożysku wzdlużnym ma duży wpływ na właściwości łożyska, stąd jedną z, wydawałoby się oczywistych, dróg ich poprawy jest dążenie do optymalizacji kształtu szczeliny smarowej podczas pracy. Jednak studia literaturowe na temat metod projektowania i doboru hydrodynamicznych łożysk wzdlużnych wykazały, że stosowane metody projektowania nie uwzględniają zależności pożądanego kształtu szczeliny smarowej od warunków pracy łożyska (wymuszeń). Wyznaczenie optymalnego kształtu szczeliny smarowej łożyska jest jednym z etapów projektowania łożyska wzdlużnego według metody zaproponowanej przez autora. Wykorzystując opracowaną metodykę optymalizacji kształtu szczeliny smarowej przeprowadzono teoretyczne badania wpływu wymuszeń na postać optymalnego kształtu szczeliny smarowej. Podczas optymalizacji zastosowano specjalną funkcję celu zapewniającą maksymalizację bezpieczeństwa pracy łożyska. Uzyskane wyniki optymalizacji przeprowadzonej dla różnych wymuszeń wykazały, że optymalne kształty szczeliny smarowej są bardzo zróżnicowane w zależności od wymuszeń działających na łożysko podczas pracy.

Uzyskane zróżnicowane wyniki optymalizacji w zależności od wymuszeń działających na łożysko przekonują do celowości wykorzystania optymalizacji kształtu szczeliny smarowej podczas projektowania łożyska.

WPROWADZENIE – METODA OPTIMALIZACJI KSZTAŁTU SZCELINY SMAROWEJ

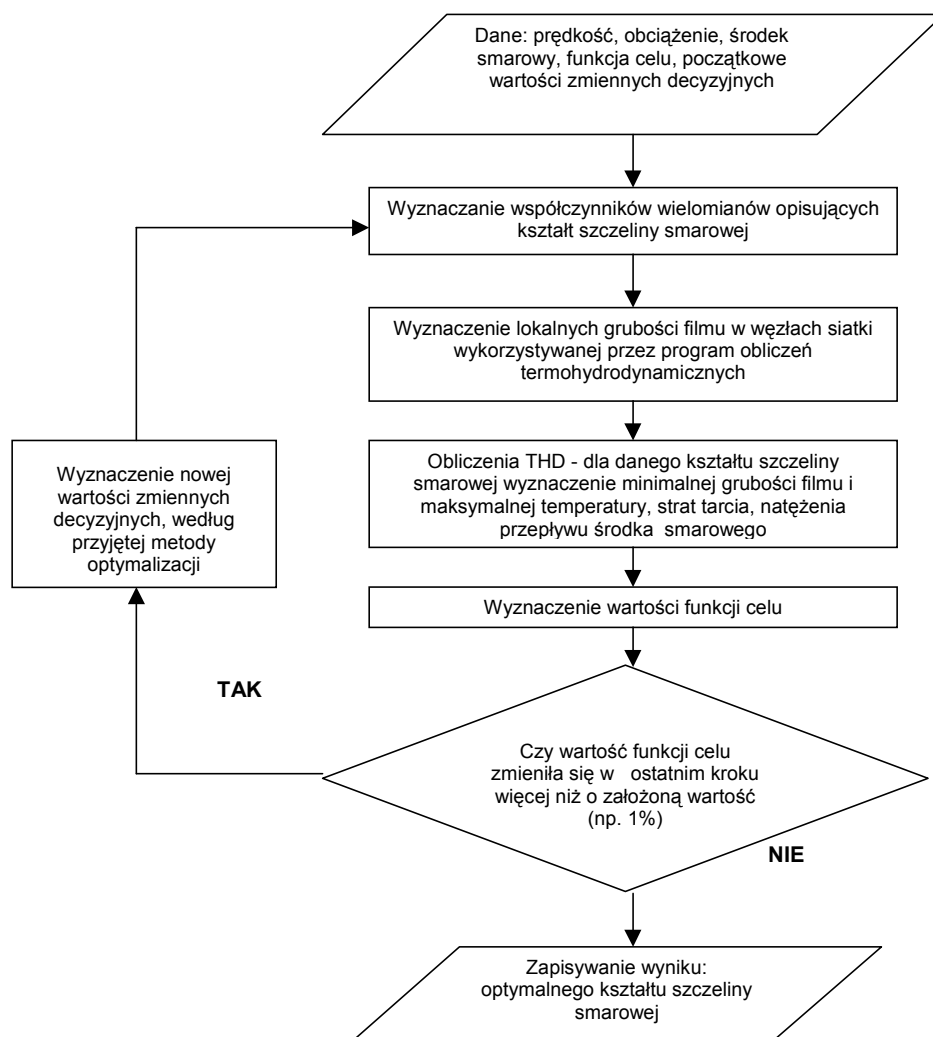
Optymalizację kształtu przeprowadzono według algorytmu przedstawionego na rys. 1 [1]. Celem optymalizacji jest uzyskanie takiego kształtu szczeliny smarowej (opisanego za pomocą 10 parametrów – zmiennych decyzyjnych), dla którego minimalna grubość filmu i maksymalna temperatura łożyska, wyznaczone za pomocą termohydrodynamicznego modelu szczeliny smarowej, są możliwie odległe od wartości dopuszczalnych. Podkreślenia wymaga fakt że według proponowanej metody projektowania wyznaczanie optymalnego kształtu szczeliny smarowej jest oddzielone od określania postaci konstrukcyjnej łożyska – kształt optymalny nie jest zatem związany z żadną konkretną postacią konstrukcyjną łożyska.

Podczas optymalizacji stosowano oryginalną funkcję celu (1) uzależnioną od maksymalnej temperatury łożyska i minimalnej grubości filmu.

$$f(h_{\min}, t_{\max}) = \left[\frac{(h_{\text{dop}} - h_{\min}) + 0.1(h_{\text{dop}} - h_{\text{dobre}})}{h_{\text{dop}} - h_{\text{dobre}}} \times \frac{(t_{\text{dop}} - t_{\max}) + 0.1(t_{\text{dop}} - t_{\text{dobre}})}{t_{\text{dop}} - t_{\text{dobre}}} \right]^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

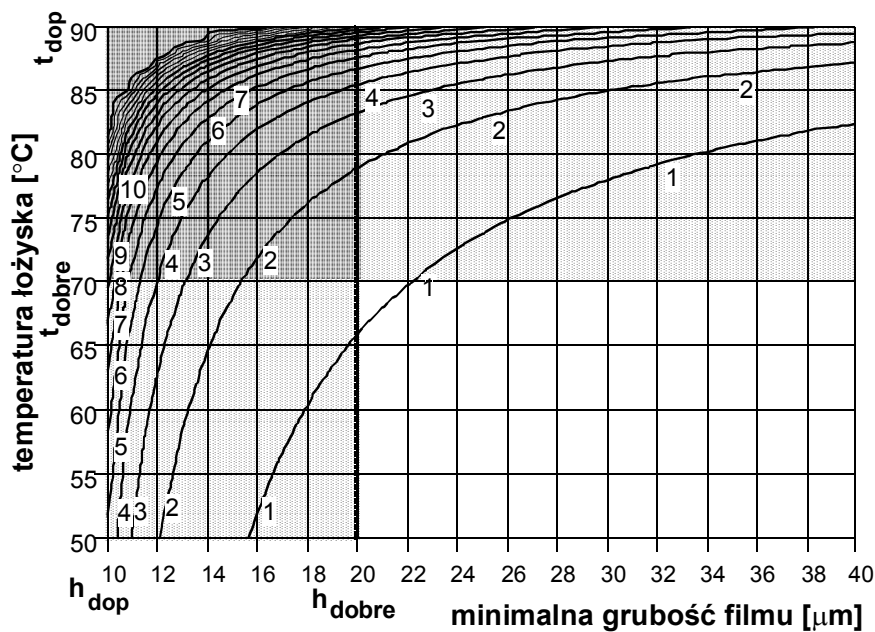
- h_{\min} - minimalna grubość filmu dla danego kształtu szczeliny
- t_{\max} - maksymalna temperatura łożyska dla danego kształtu szczeliny
- t_{dop} - dopuszczalna wartość maksymalnej temperatury łożyska
- h_{dop} - dopuszczalna wartość minimalnej grubości szczeliny smarowej
- h_{dobre} - zadowalająca wartość minimalnej grubości szczeliny smarowej
- t_{dop} - dopuszczalna wartość maksymalnej temperatury łożyska
- t_{dobre} - zadowalająca wartość maksymalnej temperatury łożyska



Rys. 1. Schemat blokowy przebiegu optymalizacji [1]
 Fig. 1. Flow chart of the optimisation procedure [1]

Warstwowy wykres funkcji celu przedstawiono na rys. 2. Przebieg opracowanej funkcji celu jest taki, że jej nachylenie maleje w miarę oddalania się wartości grubości filmu lub temperatury od wartości granicznych, co powoduje większą tendencję do powiększania grubości filmu i zmniejszania temperatury w pobliżu niebezpiecznych wartości granicznych, a mniejszą w miarę oddalania się od wartości granicznych.. Wydaje się, że tak sformułowana funkcja celu zapewnia maksymalizację bezpieczeństwa pracy łożyska. Wartości ograniczeń przyjmowane są według zaleceń norm i inżynierskich metod obliczeniowych łożysk wzdłużnych [2], [3].

Zgodnie z przyjętą metodą opisu kształtu zastosowano 10 zmiennych decyzyjnych. Dla zwiększenia pewności dotarcia do globalnego optimum w każdym przypadku stosowano kilkanaście różnych punktów startowych optymalizacji. Okazało się to konieczne ponieważ niektóre przypadki optymalizacji nie prowadziły do uzyskania ostatecznego wyniku, a inne do optimum lokalnych. Jednak z reguły kilka różnych przypadków prowadziło także do uzyskania bardzo zbliżonych wyników (kształtów) o niewielkim zróżnicowaniu wartości funkcji celu – spośród tego podzbioru wybierano przypadek o najmniejszej wartości funkcji celu i uznawano go za optimum globalne. Obliczenia jednego wariantu optymalizacji (z jednego punktu startowego) na komputerze z procesorem Pentium III o częstotliwości 800 MHz zajmowało od ok. 40 min do 3 godzin. Bliższe szczegóły dotyczące metody optymalizacji przedstawiono w [1].



Rys. 2. Warstwiczny wykres funkcji celu
 Fig. 2. Contour plot of the objective function

BADANIA WPŁYWU WYMUSZEŃ NA POSTAĆ OPTYMALNEGO KSZTAŁTU SZCZELINY SMAROWEJ

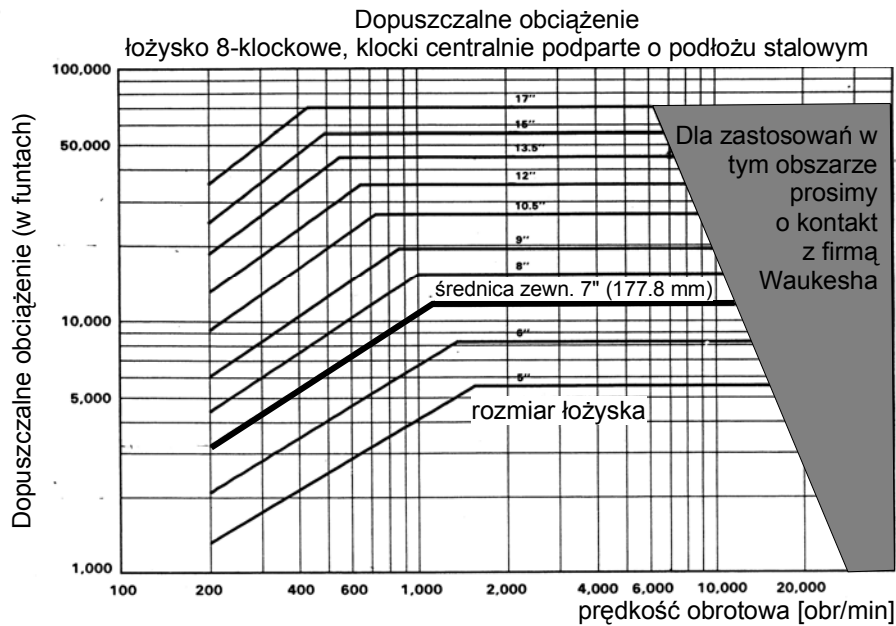
Korzystając z opracowanej metodyki optymalizacji kształtu szczeliny smarowej przeprowadzono teoretyczne badania wpływu wymuszeń na optymalny kształt szczeliny smarowej hydrodynamicznego łożyska wzdłużnego. Jak wykazał przegląd literatury badania takie wcześniej nie były prowadzone, a prezentowane w literaturze optymalne kształty szczeliny smarowej są wynikami optymalizacji jednokryterialnej (najczęściej maksymalizowano nośność hydrodynamiczną – wypadkową ciśnienia hydrodynamicznego dla zadanej minimalnej grubości filmu, niekiedy alternatywnie minimalizowano straty tarcia [4], [5]). W wyniku stosowania maksymalizacji obciążenia jako celu optymalizacji oraz wykorzystywania izotermicznych modeli szczeliny smarowej uzyskiwano optymalne kształty niezależne od prędkości ślizgania w łożyskach [6]. Tymczasem istnienie zróżnicowanych ograniczeń obszaru wymuszeń, w którym łożysko hydrodynamiczne może bezpiecznie pracować [7], przemawia za istnieniem zróżnicowanych optimum kształtu w zależności od wymuszeń działających na łożysko. W łożysku o niskiej prędkości obrotowej uzyskanie wymaganej grubości filmu będzie wymagało zwiększania obciążalności, natomiast w warunkach wysokiej prędkości kształt szczeliny powinien sprzyjać obniżaniu temperatury łożyska tak, aby nie przekroczyła ona wartości dopuszczalnych.

WYBÓR WARUNKÓW BADAŃ

Dla zapewnienia realizmu w wyborze wymuszeń w łożyskach przyjęto obciążenia typowe dla przemysłowych łożysk z wahliwymi klockami. Wybrano łożyska firmy Waukesha o średnicy zewnętrznej ok. 180 mm (7"). W katalogu Waukesha [8] dobór łożysk dokonywany jest w oparciu o wykres (rys. 3) pokazujący ograniczenie dopuszczalnego obciążenia łożyska w funkcji prędkości obrotowej. Do badań wybrano 4 przypadki obejmujące cały, dopuszczalny według katalogu, zakres prędkości obrotowych:

Najmniejsza prędkość obrotowa, dla której wykonano wykresy w katalogu:	n=200 obr/min – dopuszczalne obciążenie dla tej prędkości 14.2 kN
Średnia prędkość obrotowa:	n=1000 obr/min – obciążenie 48.9 kN n = 3000 obr/min – obciążenie 48.9 kN
Maksymalna prędkość obrotowa	n = 13 500 obr/min – obciążenie 48.9 kN

Zgodnie z katalogiem założono, że temperatura wlotowa oleju wynosi ok. 50°C (120F) i, że łożysko smarowane jest olejem o lepkości ISO VG-32 (według katalogu takie samo jest dopuszczalne obciążenia łożyska przy smarowaniu olejami o klasach lepkości od ISO VG-32 do ISO VG-68.



Rys. 3. Obciążalność łożysk firmy Waukesha [8]

Fig. 3. Selection chart of Waukesha tilting pad thrust bearings [8]

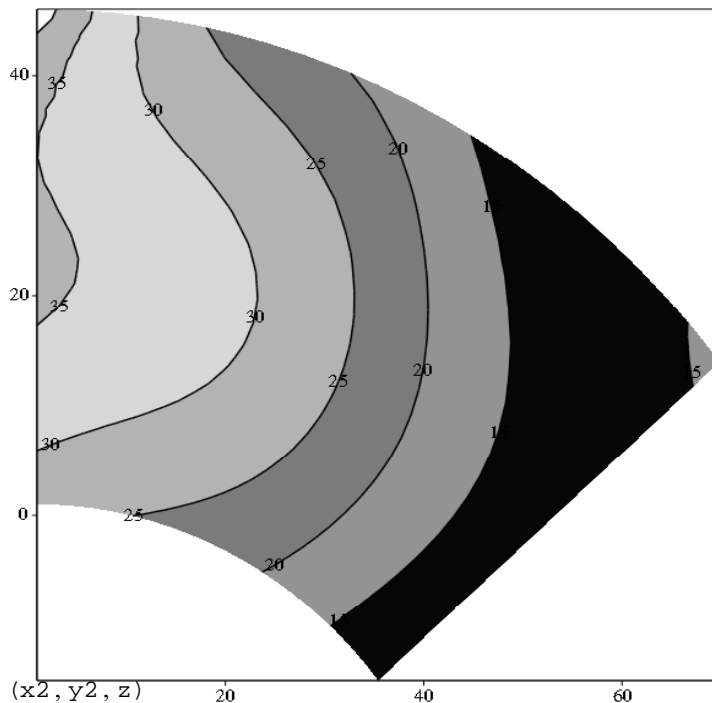
Wartości ograniczeń zostały wyznaczone zgodnie z ESDU 83004 [2] oraz DIN 31 654 [3] i wynosiły $h_{\min}=8.3 \mu\text{m}$ i $t_{\max}=90^{\circ}\text{C}$, natomiast wykorzystywane do wyznaczania funkcji celu wartości zadowalające zostały narzucone przez autora na podstawie doświadczeń z eksploatacji łożysk wzdłużnych w przemyśle. Przyjęte wartości zadowalające wynosiły $h_{\text{dobre}}=20 \mu\text{m}$ i $t_{\text{dobre}}=70^{\circ}\text{C}$.

OPTIMALNY KSZTAŁT SZCZELINY SMAROWEJ DLA RÓŻNYCH WARTOŚCI WYMUSZEŃ - DYSKUSJA WYNIKÓW

Przypadek niskiej prędkości

Wykres doboru łożysk pokazuje, że dla tych wymuszeń (obciążenie/prędkość) nośność hydrodynamiczna nie jest jeszcze duża i dlatego optymalizacja powinna polegać głównie na maksymalizacji grubości filmu. Temperatura łożyska prawdopodobnie nie będzie duża i w funkcji celu opisanej wzorem (23) czynnik związany z temperaturą nie będzie odgrywał roli.

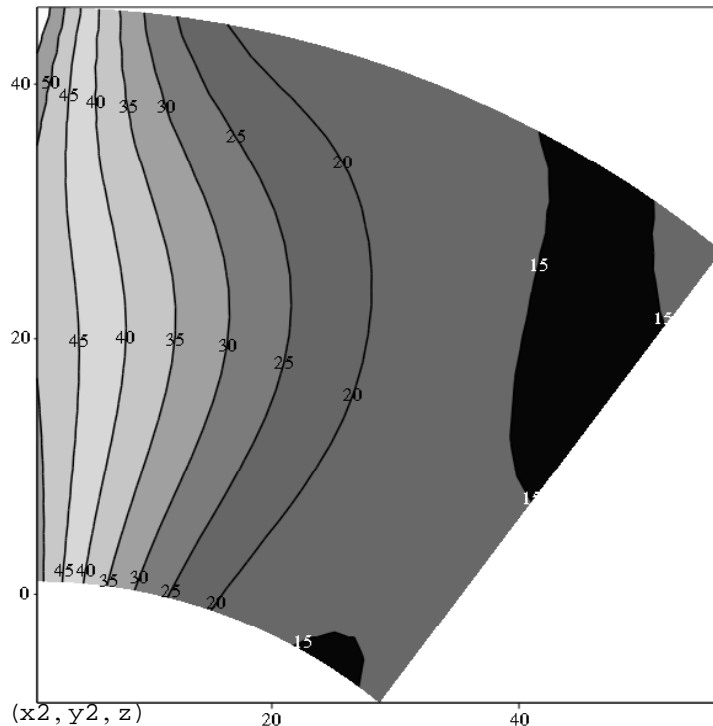
Optymalny kształt dla przypadku niskiej prędkości pokazany jest na rys. 4, uwagę zwraca wyraźna wklęsłość powierzchni ślizgowej przyczyniająca się do zmniejszenia wpływów bocznych i w ten sposób do zwiększania nośności hydrodynamicznej. Stosunek maksymalnej grubości filmu do minimalnej wynosi 4.1. Uzyskana w wyniku optymalizacji minimalna grubość filmu wyniosła 10.5 μm (o ok. 2 μm więcej niż dopuszczalna). Minimalna grubość filmu jest znacznie niższa niż „grubość dobra” określona na 20 μm , co powoduje, że istnieje wyraźny wpływ powiększania minimalnej grubości filmu na wartość funkcji celu. Temperatura łożyska zgodnie z oczekiwaniami jest niska i wynosi 64.8°C, czyli o ponad 25°C mniej niż temperatura dopuszczalna. Temperatura jest niższa niż „temperatura dobra” określona na 70°C, co powoduje, że wpływ zmniejszania temperatury na wartość funkcji celu jest mało wyraźny. Optymalny dla tego przypadku okazał się podział pierścienia łożyska na 6 segmentów, zapewniający możliwość narastania ciśnienia hydrodynamicznego na dłuższej drodze.



Rys. 4. Optymalny kształt powierzchni ślizgowej dla $n=200$ obr/min
 Fig. 4. Optimum film profile for 200 rpm

Przypadek średniej prędkości

Dla prędkości 1000 obr/min łożysko uzyskuje już, według wykresu obciążalności (rys. 3) pełną obciążalność. W takich warunkach prawdopodobnie większą, chociaż nie decydującą, rolę zacznie odgrywać czynnik funkcji celu związany z temperaturą łożyska. Kształt optymalny pokazany jest na rys. 5. Nadal wyraźna jest wklęsłość powierzchni ślizgowej. Minimalna grubość filmu wynosi 14.3 μm , a stosunek maksymalnej grubości filmu do minimalnej wynosi 4.2.

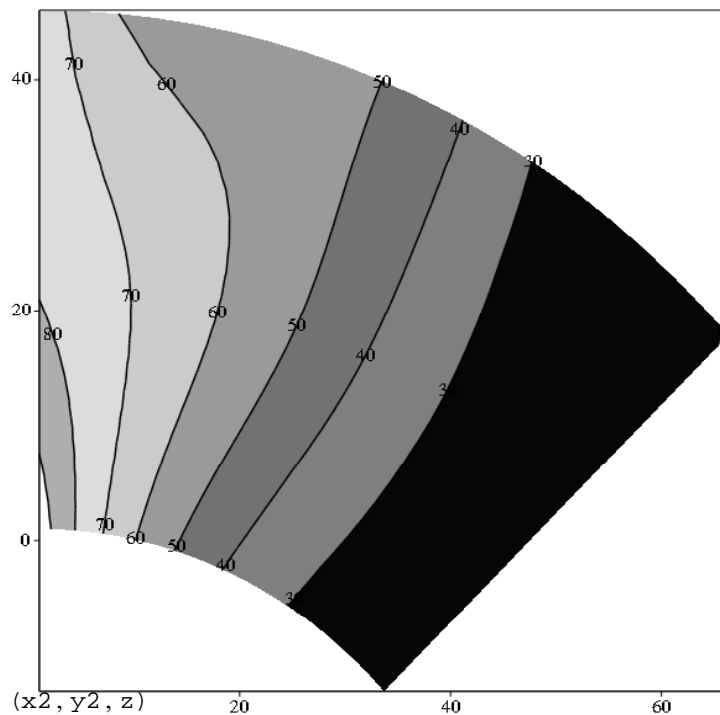


Rys. 5. Optymalny kształt powierzchni ślizgowej dla $n=1000$ obr/min.
Fig.5. Optimum film profile for 1 000 rpm

Minimalna grubość filmu jest wyraźnie (o 6 μm) wyższa niż grubość dopuszczalna, ale mniejsza niż „grubość dobra”. Maksymalna temperatura wynosząca 62°C jest niższa zarówno od temperatury dopuszczalnej, jak i „dobrej”. Takie relacje między wartościami uzyskanymi z optymalizacji a wartościami granicznymi świadczą o tym, że podczas optymalizacji dla 1000 obr/min większe znaczenie dla minimalizacji funkcji celu miało zwiększanie grubości filmu niż obniżanie temperatury.

Przypadek większej prędkości (3000 obr/min)

Kolejne obliczenia przeprowadzono dla prędkości 3000 obr/min. Optymalny kształt dla tego przypadku przedstawiono na rys. 6. Dla tej, dość dużej, prędkości obrotowej kształt powierzchni ślizgowej jest zbliżony do pochylonej płaszczyzny. W strefie środkowej wklęsłość jest bardzo nieznaczna, natomiast w strefie wlotowej wklęsłość powierzchni jest bardziej wyraźna. Minimalna grubość filmu wynosi $22.9 \mu\text{m}$, jest więc prawie trzykrotnie wyższa niż grubość dopuszczalna i również nieco wyższa niż grubość „dobra”. Maksymalna temperatura wynosząca 67°C jest zdecydowanie niższa niż temperatura dopuszczalna, a także nieco niższa niż temperatura „dobra”. Stosunek maksymalnej grubości filmu do minimalnej wynosi 4.2. W wyniku procesu optymalizacji oba parametry oceny łożyska uzyskały wartości nieznacznie lepsze niż wartości uznane za zadowalające, co w przypadku potwierdzenia w praktyce oznaczałoby wysokie bezpieczeństwo pracy łożyska. Dla takich warunków pracy udało się uzyskać równowagę między cieplnym i hydrodynamicznym obciążeniem łożyska.

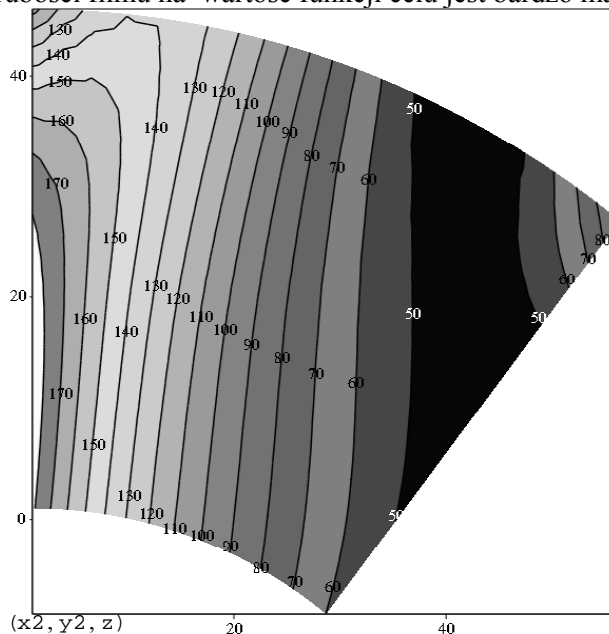


Rys. 6. Optymalny kształt powierzchni ślizgowej dla $n=3000$ obr/min.

Fig. 6. Optimum film profile for 3 000 rpm

Przypadek wysokiej prędkości.

Prędkość obrotowa wynosząca 13 500 obr/min, jest dla łożyska o założonej średnicy prędkością graniczną. Dalszy wzrost prędkości jest ograniczony trudnością w opanowaniu nadmiernego wzrostu temperatury łożyska. Można się spodziewać, że celem optymalizacji kształtu szczeliny smarowej dla takich wymuszeń będzie głównie minimalizacja temperatury. Grubość filmu jest prawdopodobnie znacznie większa niż dopuszczalna, co powoduje, że w funkcji celu czynnik związany z grubością filmu nie odgrywa istotnej roli. Optymalny kształt dla przypadku wysokiej prędkości pokazany jest na rys. 7, uwagę zwraca nieznaczna wypukłość powierzchni ślizgowej przyczyniająca się do wzrostu przepływu oleju i w ten sposób do zmniejszania temperatury łożyska. Stosunek maksymalnej grubości filmu do minimalnej wynosi 4.4. jedynie w strefie wlotowej szczelina smarowa jest domknięta w okolicach zewnętrznej średnicy łożyska. Temperatura łożyska zgodnie z oczekiwaniami jest dość wysoka i wynosi 71.4 °C, czyli o prawie 20°C mniej niż temperatura dopuszczalna. Temperatura jest nieco wyższa niż „temperatura dobra” określona na 70°C, co powoduje, że wpływ zmniejszania temperatury na wartość funkcji celu jest jeszcze dosyć wyraźny. Uzyskana w wyniku optymalizacji minimalna grubość filmu wyniosła 42.5 μm (pięciokrotnie więcej niż dopuszczalna). Minimalna grubość filmu jest ponad dwukrotnie większa niż „grubość dobra” określona na 20 μm, co powoduje, że wpływ powiększania minimalnej grubości filmu na wartość funkcji celu jest bardzo mały.



Rys. 7. Optymalny kształt powierzchni ślizgowej dla $n=13500$ obr/min
 Fig. 7. Optimum film profile for 13 500 rpm

WNIOSKI

Przeprowadzone badania pokazują silny wpływ wartości wymuszeń działających na łożysko na optymalny kształt szczeliny smarowej przy optymalizacji, której celem jest powiększenie pewności ruchowej łożyska. Uzyskane dla różnych wymuszeń kształty różnią się wyraźnie pod względem:

- zbieżności szczeliny smarowej,
- liczby sekcji na które podzielono powierzchnię ślizgową łożyska,
- charakteru kształtu – wklęsły, płaski lub wypukły

Pomimo tak wyraźnych różnic optymalnego kształtu producenci łożysk, dla szerokiego zakresu wartości wymuszeń (np. dla wszystkich omówionych powyżej przypadków!) proponują zastosowanie tego samego łożyska, co powoduje, że w typowym przemysłowym łożysku kształt szczeliny smarowej na pewno odbiega znacząco od kształtu optymalnego. Wpływ różnicy między kształtem optymalnym, a rzeczywistym kształtem szczeliny smarowej typowego łożyska z wahliwymi klockami został przez autora zbadany doświadczalnie – wyniki tych badań omówione są w [9]. Zróznicowanie optimum kształtu szczeliny smarowej w zależności od wartości wymuszeń działających na łożysko jest bardzo ważnym argumentem za wykorzystywaniem optymalizacji kształtu szczeliny smarowej w procesie projektowania łożyska.

LITERATURA

- [1] Wasilczuk M.: Optymalizacja kształtu szczeliny smarowej w hydrodynamicznym łożysku wzdłużnym. W: Polska Tribologia 2000 Teoria i Praktyka, Politechnika Radomska s. 196-204
- [2] Hydrodynamische Axial-Gleitlager im stationären Betrieb. DIN 31 654 Teil 1-3. Mai 1991.
- [3] Calculation methods for steadily loaded, off-set pivot, tilting pad thrust bearings. *Engineering Sciences Data Unit No 83004*
- [4] Kanarachos A.; A Contribution to the Problem of Designing Optimum Performance Bearings. Trans. ASME, Journ. Lubr. Technol., Oct. 1977, p. 462-468.
- [5] Anant Pal Singh: An Overall Optimum Design of a Sector-Shaped Thrust Bearing with Continuous Circumferential Surface Profiles. *Wear*, 117 (1987) p. 49-77.
- [6] Rohde S. M., McAllister: On the optimization of fluid film bearings. Proc. R. Soc. London, A. 351, p. 481-497 (1976).

- [7] Leopard A. J.: Tilting Pad Bearings- Limits of Operation. Lubrication Engineering, vol. 32, 12, p. 637-644.
- [8] Waukesha Bearings: Tilting Pad Thrust Bearing Selection Guide (katalog), Waukesha (USA).
- [9] Wasilczuk M.: Comparison of an optimum profile hydrodynamic thrust bearing with a typical tilting pad thrust bearing. W: [Proc] Nordtrib 2000. 9th Nordic Symposium on Tribology,. Vol. 3 s. 1054-1061

Influence of operating conditions on optimum film profile of a thrust bearing

Abstract

Oil gap profile exerts a great influence on the bearing properties therefore obtaining a film profile close to an optimum should improve bearing performance. Optimisation of oil film profile was a classical task of the theory of hydrodynamic lubrication but due to complexity of calculations, isothermal models of oil film were used until recently. Now it is possible to utilise more realistic oil film models.

Safe operation of a hydrodynamic bearing is limited by three limits: minimum film thickness limit, specific load limit and temperature limit. Limits of operation of hydrodynamic bearings may be used for setting optimisation objectives. In the optimisation procedure a thermohydrodynamic model of the fluid film and a special objective function were used. In the objective function the main criteria of bearing safe operation were considered but other objectives can be used alternatively to reflect characteristic requirements of various applications.

Results illustrate the differences of the optimum film profiles for various operating conditions. It seems that modern CAD/CAM systems make it economically feasible that bearings are individually designed and manufactured. Then optimisation procedure can be one of the steps of individual bearing design leading to improved bearings performance.