PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH
Łódź 06-07 grudnia 1993 roku

POWRÓT

WYKORZYSTANIE ODKSZTAŁCEŃ W HYDRODYNAMICZNYCH ŁOŻYSKACH WZDŁUŻNYCH.

LESZEK DĄBROWSKI, OLGIERD OLSZEWSKI, MICHAŁ WASILCZUK
Politechnika Gdańska, Zakład Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12.

SŁOWA KLUCZOWE

hydrodynamiczne łożysko wzdłużne, wykorzystanie odkształceń powierzchni ślizgowej

STRESZCZENIE

Nominalne naciski dopuszczane w łożyskach wzdłużnych z wahliwymi klockami są znacznie niższe od osiąganych w hydrodynamicznych łożyskach poprzecznych. Przyczynami są: nierównomierny rozkład obciążeń oraz niekorzystne odkształcenia klocków w warunkach pracy łożyska. Jednym z dotychczasowych kierunków rozwoju łożysk wzdłużnych jest ograniczanie tych odkształceń.

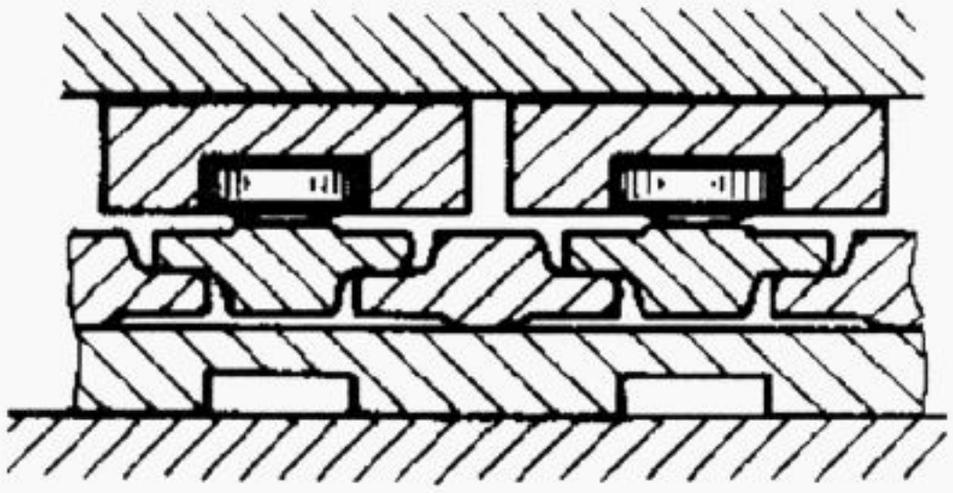
Dzięki rozwojowi technik pomiarowych i komputerowych metod analizy konstrukcji stało się możliwe wykorzystywanie odkształceń elementów łożyska w warunkach pracy do podniesienia jego obciążalności.

W referacie przedstawiono dwa przykłady wykorzystania odkształceń elementów łożyska dla podniesienia jego obciążalności:

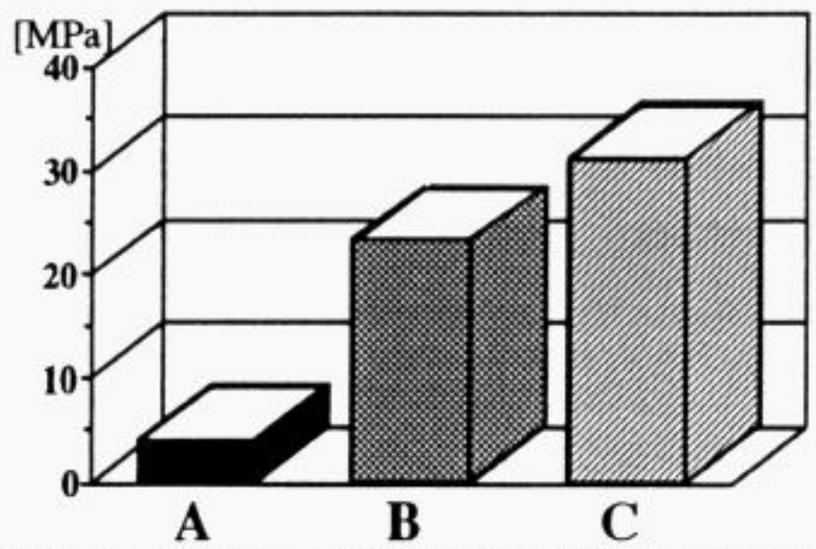
- wyrównujące obciążenia na poszczególne klocki podparcie łożyska na elementach podatnych, dla których opracowano metodę wstępnego doboru sztywności, opartą na komputerowej symulacji pracy łożyska w warunkach nierównoległości gniazda łożyska i tarczy wału,
- konstrukcję i wyniki badań łożyska wzdłużnego, w którym korzystny kształt szczeliny smarowej powstaje jedynie dzieki sprężystemu odkształceniu powierzchni ślizgowej (płaskiej przed obciążeniem łożyska).

WPROWADZENIE

W wyniku trwającego prawie 90 lat rozwoju, dzięki złożonej konstrukcji, współczesne przemysłowe łożyska wzdłużne typu Michella lub Kingsbury'ego (rys. 1) zdolne są do wyrównywania nacisków na klocki i kompensacji odkształcalności elementów ślizgowych w warunkach obciążenia. Jak to przedstawiono na rys. 2, ich obciążalność A jest znacznie niższa niż obciążalność hydrodynamicznych łożysk poprzecznych C oraz badawczych wersji łożysk wzdłużnych B, w których osiągano prawie o rząd wielkości wyższe średnie naciski od dopuszczanych w łożyskach przemysłowych. Wskazuje to na ograniczoną skuteczność dotychczas stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.



Rys. 1. Współczesne przemysłowe łożysko Kingsbury'ego [1].



Rys. 2. Naciski obliczeniowe dopuszczane w łożyskach hydrodynamicznych [2].

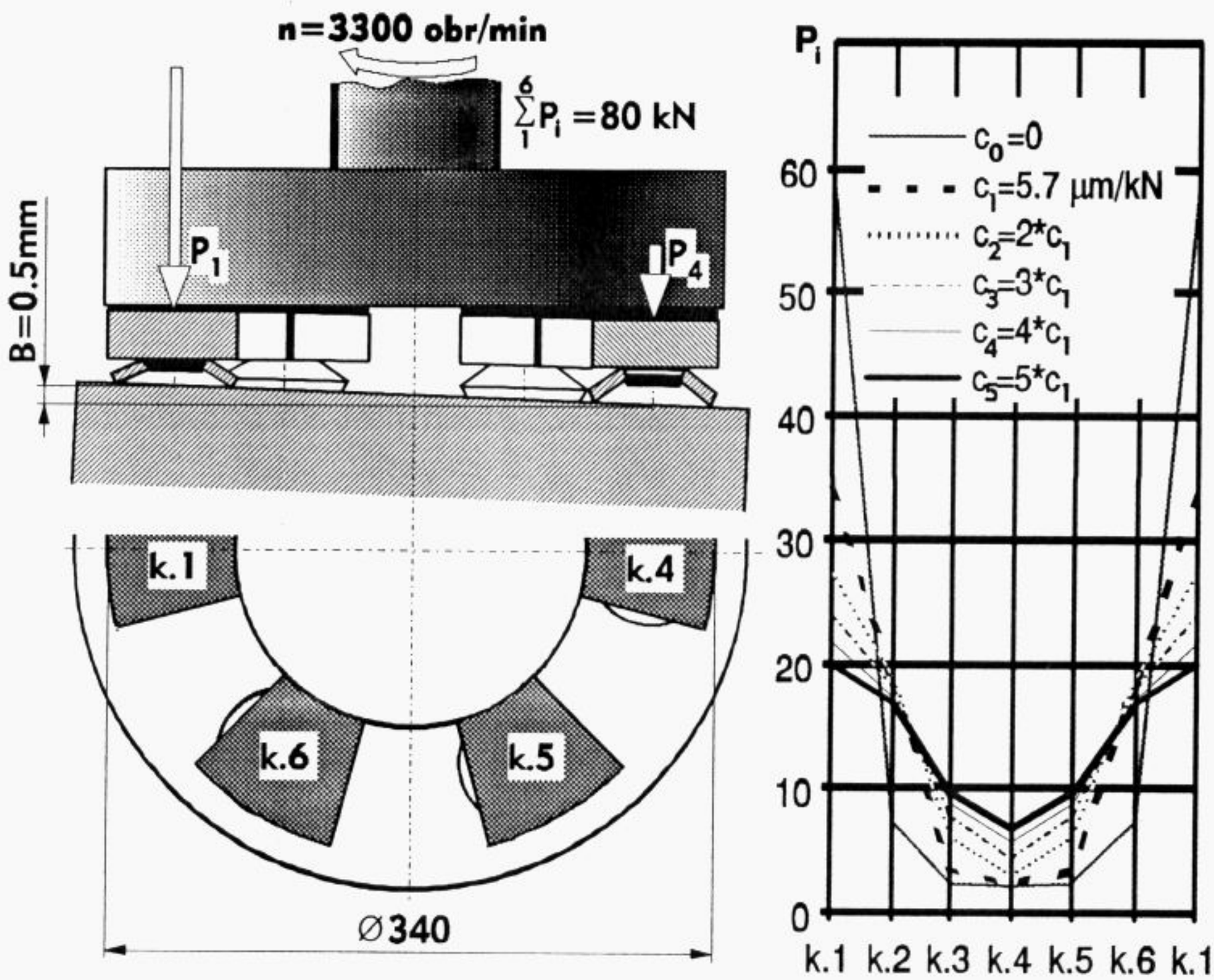
W przeciwieństwie do tradycyjnego kierunku rozwoju łożysk ślizgowych, polegającego na ograniczaniu odkształceń elementów łożyska, obecnie obserwuje się próby wykorzystania odkształceń do podniesienia nośności łożysk. Uzyskanie **w warunkach pracy łożyska** optymalnych (tj. niewielkich i ściśle określonych) odkształceń wymaga zastosowania na etapie projektowania precyzyjnych (komputerowych) metod analizy konstrukcji oraz dokładnych technik pomiarowych.

WYRÓWNANIE NACISKÓW NA POWIERZCHNI ŁOŻYSKA

Cieplne i sprężyste odkształcenia korpusów łożysk dużych maszyn wirnikowych powodują, że starannie dopasowane podczas montażu powierzchnie ślizgowe tarczy wału i łożyska wzdłużnego w warunkach pracy maszyny nie zachowują równoległości. Zjawisko to często przebiega odmiennie w różnych egzemplarzach maszyn o tej samej konstrukcji, zależy od obciążenia oraz innych (zmiennych w czasie) warunków pracy maszyny i dlatego trudno je skompensować podczas montażu. Przy dużych nierównoległościach na najbardziej obciążonych klockach następuje zrywanie filmu

smarowego. Dla uzyskania wysokiej niezawodności ułożyskowania zapobiega się temu przez obniżanie wartości średnich nacisków obliczeniowych (do wartości znacznie niższych od osiąganych w warunkach laboratoryjnych). Wyrównanie nacisków w obszarze węzła łożyskowego wydaje się najprostszym sposobem podniesienia jego nośności w tak niekorzystnych warunkach. Skuteczność wyrównywania obciążeń na poszczególne klocki poprzez ich podparcie na systemie dźwigni (por. rys. 1) jest praktycznie ograniczona do samonastawności montażowej (wg [3] i wielu innych). Znane są konstrukcje łożysk z klockami podpartymi na elementach podatnych, jednak w literaturze nie znajdujemy zależności między stywnością podpór takich klocków, a dopuszczalną nierównoległością tarczy oporowej do gniazda łożyska.

Na Politechnice Gdańskiej przeprowadzono komputerową analizę pracy całego łożyska wzdłużnego, uwzględniającą podatność filmu smarowego i elementów podpierających klocki [4]. Na rys. 3 przedstawiono rozkład sił działających na poszczególne klocki łożyskowe w zależności od podatności elementów podparcia klocka dla konkretnej wartości błędu nierównoległości tarczy oporowej do gniazda łożyskowego. Zaproponowana metoda umożliwia dla znanego (przewidywanego) błędu nierównoległości wyznaczenie sztywności elementów podatnych zapewniających założoną, dopuszczalną nierównomierność obciążeń klocków. Dodatkowo można wyznaczyć przemieszczenie wału spowodowane podatnością łożyska. Wstępnie dobrana tą metodą

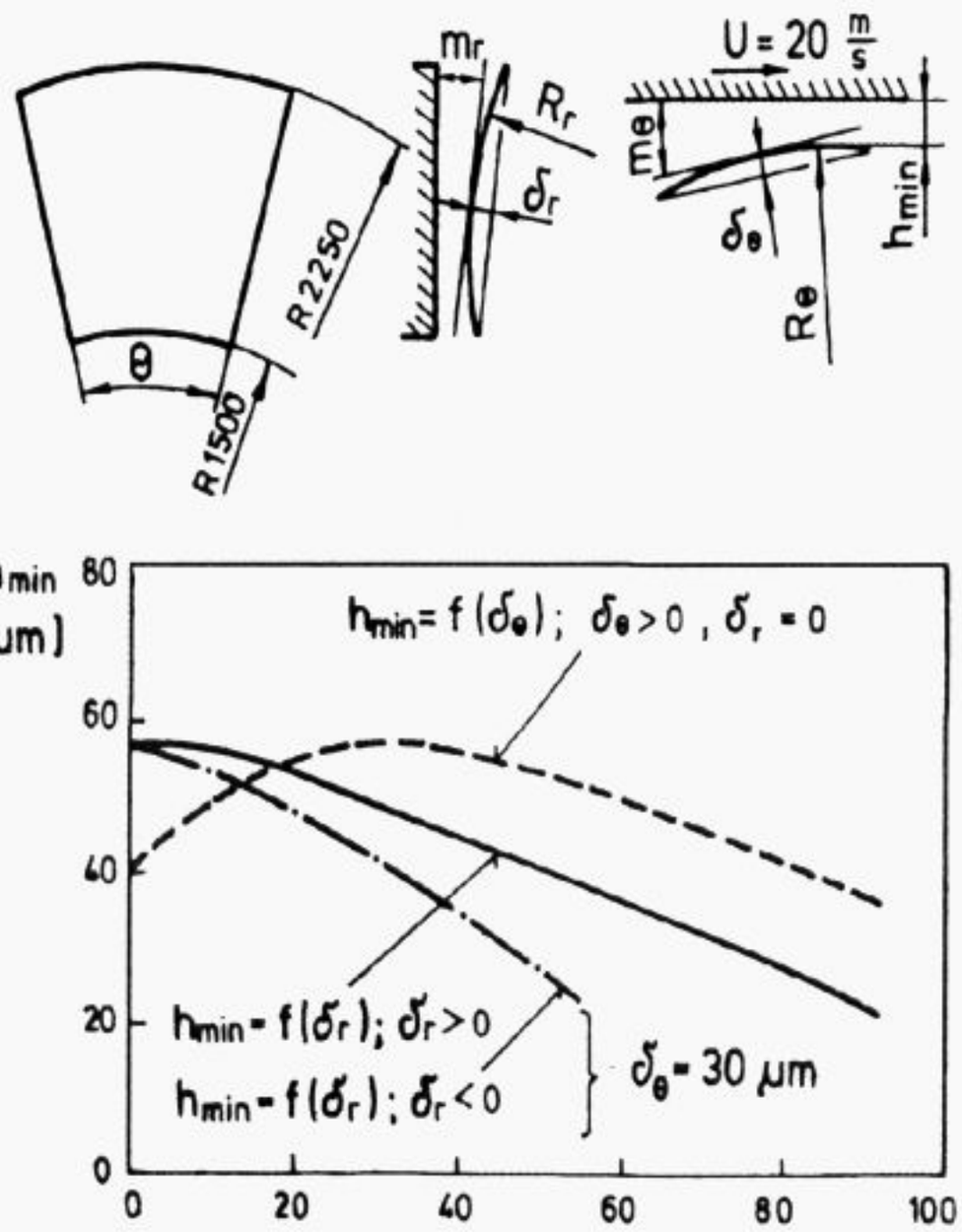


Rys. 3. Wpływ sztywności sprężyn podpierających na rozkład sił na klocki łożyska w gnieździe nierównoległym do tarczy wału [4].

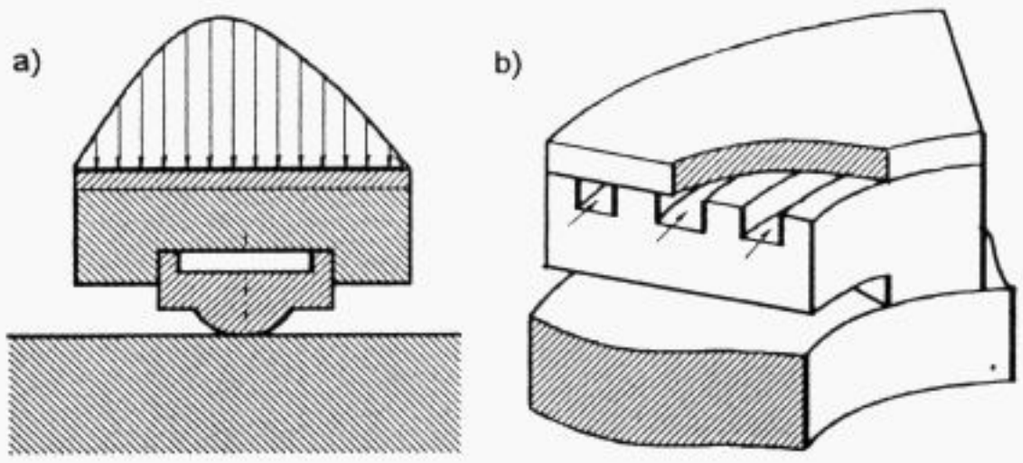
sztywność podparcia klocków musi być następnie zweryfikowana ze względu na niebezpieczeństwo pojawienia się drgań wirnika lub klocków łożyskowych, a konstrukcję podparcia należy przeanalizować ze względu na możliwość pojawienia się zużycia frettingowego.

POPRAWA KSZTAŁTU POWIERZCHNI ŚLIZGOWEJ.

Jak wynika z badań, których wyniki przedstawiono na rys. 4, promieniowa krzywizna powierzchni ślizgowej klocka zawsze obniża obciążalność łożyska, natomiast optymalna wysokość krzywizny obwodowej jest niewielka (porównywalna z grubością filmu smarowego). Uzyskanie takiej krzywizny w warunkach obciążenia jest trudne, stąd też jednym z dotychczasowych kierunków rozwoju łożyskowania hydrodynamicznego jest dążenie do zachowania w tych warunkach płaskości powierzchni ślizgowej poprzez konstrukcyjne ograniczanie odkształceń klocków łożyskowych. Na rys. 5 przedstawiono dwa przykłady konstrukcji łożysk ze zmniejszonymi odkształceniami. Klocek łożyskowy z rys. 5a [6] podparty jest jedynie na obrzeżu podpory, dzięki czemu typowe odkształcenia termiczne (które są przyczyną krzywizny powierzchni ślizgowej) są kompensowane przez odkształcenia wywołane ciśnieniem hydrodynamicznym. Klocek łożyskowy z rys. 5b [5] jest dwuwarstwowy. W kanałach wykonanych w dolnej części przepływa chłodny olej, co zmniejsza gradient temperatury, a co za tym idzie jej odkształcenia termiczne. Odkształcenia sprężyste tej części są niewielkie dzięki dużej grubości. W górnej, cienkiej płytce (pokrytej stopem łożyskowym) gradient temperatury jest duży,



Rys. 4. Wpływ krzywizny powierzchni klocka w przekroju obwodowym (δ_θ) i promieniowym (δ_r) na minimalną grubość filmu smarowego w łożysku (wyniki obliczeń komputerowych [5]).



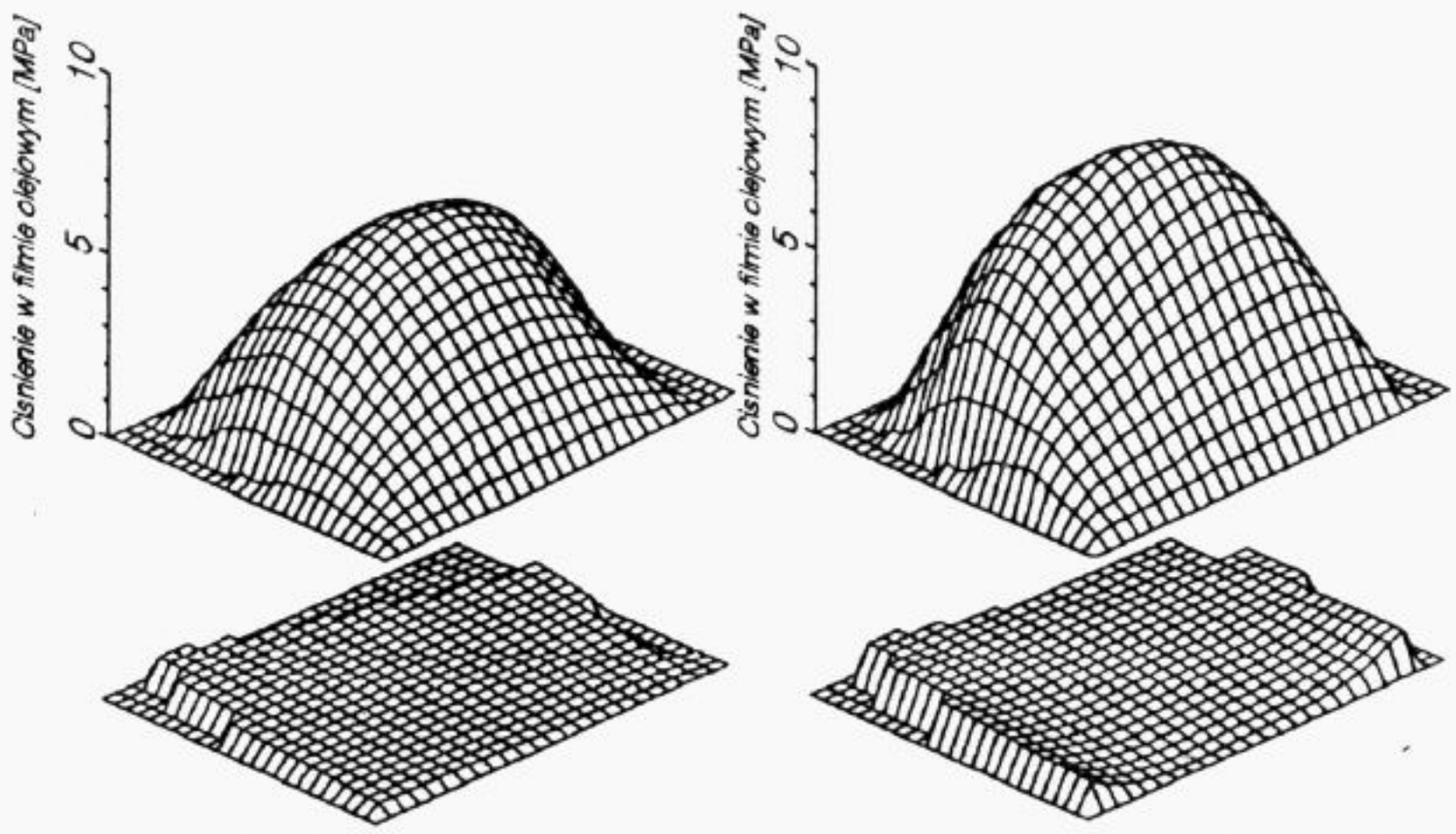
Rys. 5. Klocki łożyskowe ze zmniejszonymi odkształceniami.

ale płytka ta pozostaje płaska gdyż jest dociskana do dolnej części przez ciśnienie hydrodynamiczne.

Obok wspomnianych badań na temat wpływu odkształceń na obciążalność łożysk istnieje bogata literatura na temat pożądanego kształtu powierzchni ślizgowej łożyska wzdłużnego w warunkach pracy (np. [7]). W pracach tych teoretycznie wyznacza się optymalny kształt powierzchni ślizgowej, przyjmując najczęściej jako funkcję celu uzyskanie maksymalnej nośności przy zadanej minimalnej grubości filmu. Praktyczne wykorzystanie wyników jest utrudnione z trzech powodów:

- wyniki przedstawiają optymalny kształt powierzchni ślizgowej w warukach pracy - czyli po wystąpieniu wielu współzależnych zjawisk, których efekty trudno precyzyjnie przewidzieć na etapie projektowania, a nawet zmierzyć w pracującym łożysku,
- uzyskanie wyznaczonych, często złożonych kształtów powierzchni ślizgowych wymagałoby skrawania ich z dokładnością rzędu kilku do kilkunastu mikrometrów,
- dobre właściwości łożyska o wyprofilowanej powierzchni ślizgowej ulegają pogorszeniu wskutek nawet małego zużycia, nieuniknionego w warunkach eksploatacji.

W odróżnieniu od prac Singh'a [7] i innych, w których zakładano kształtowanie powierzchni ślizgowej w procesie wytwarzania elementów łożyska, teoretyczne prace nad optymalnym kształtem powierzchni ślizgowej łożyska wzdłużnego prowadzono na Politechnice Gdańskiej przy założeniu, że zostanie on



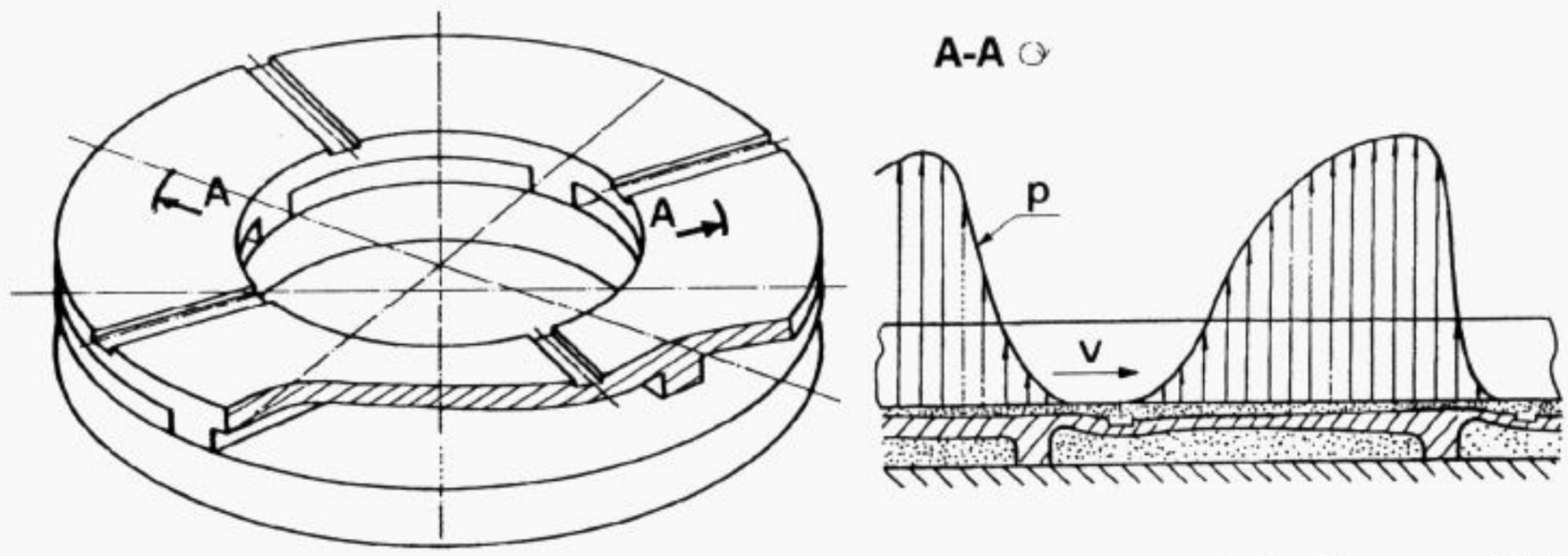
Płaska powierzchnia optymalnie nachylona

Kształt poprawionej powierzchni ślizgowej

Rys. 6. Wzrost nośności po modyfkacji kształtu powierzchni ślizgowej przy zachowaniu minimalnej grubości filmu smarowego (wyniki symulacji komputerowej) wg [8].

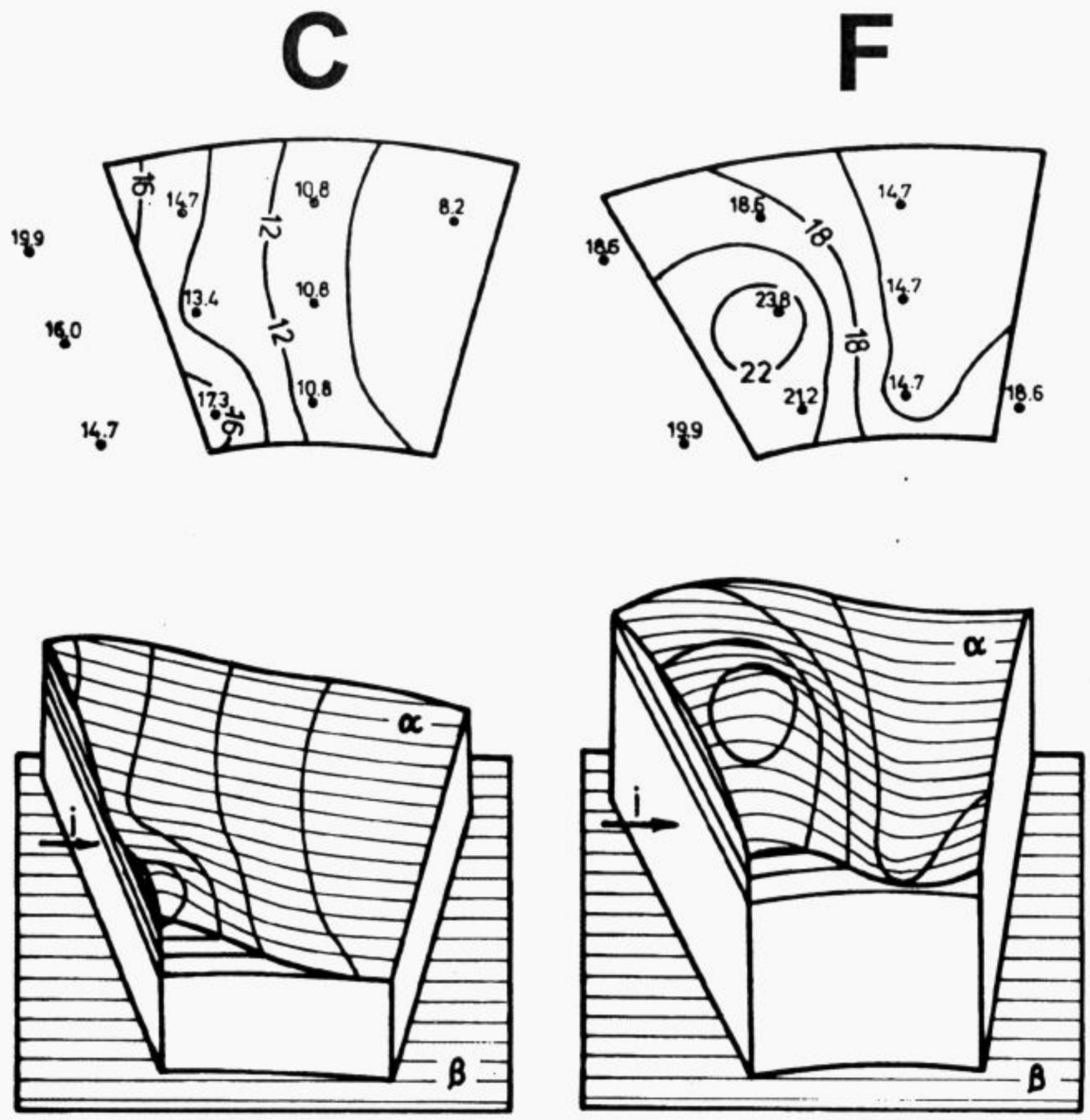
uzyskany w wyniku odkształcenia [8]. Prace potwierdziły istnienie korzystnej postaci geometrycznej powierzchni o kształcie pokazanym na rys. 6. Obliczony wzrost nośności w porównaniu z powierzchnią płaską o optymalnej zbieżności wyniósł około 30%.

W oparciu o koncepcję uzyskania korzystnego kształtu powierzchni ślizgowej w wyniku jej odkształceń opracowano konstrukcję łożyska wzdłużnego [9] (rys. 7)



Rys. 7. Hydrodynamiczne łożysko wzdłużne z podatną powierzchnią ślizgową [9].

składającego się z płaskiej, pierścieniowej płyty ślizgowej i pierścienia podporowego. W płycie ślizgowej łożyska wykonane są rowki smarowe, dzielące ją na sekcje. Płyta ślizgowa ma występy realizujące podparcie w wybranych miejscach. Podczas pracy łożyska płyta pod wpływem ciśnienia hydrodynamicznego ulega odkształceniom tworząc na obszarze każdej sekcji zbieżną szczelinę smarową, sprzyjającą powstaniu nośności hydrodynamicznej. Obciążalność łożyska z podatną płytą ślizgową, wynikająca z rozkładu ciśnienia w filmie smarowym, zależy od kształtu szczeliny smarowej. Kształt szczeliny smarowej zależny jest od rozkładu ciśnień hydrodynamicznych działających na podatną płytę ślizgową i od postaci odkształcenia płyty ślizgowej, będącego konsekwencją jej sposobu podparcia oraz sztywności. Badania doświadczalne potwierdziły istotny wpływ kształtu szczeliny smarowej na właściwości łożyska [10]. Część wyników tych badań zaprezentowano na rys. 8 - dwie różnego kształtu szczeliny smarowe (przedstawione w postaci widoku perspektywicznego oraz mapy warstwicowej) i związane z nimi właściwości łożyska. Łożysko z podatną płytą ślizgową zostało już z powodzeniem zweryfikowane w trakcie eksploatacji pompy olejowej turbiny energetycznej elektrociepłowni EC II Gdańsk i turbosprężarki K-500 (moc 2800 kW, 7500 obr/min) linii skraplania powietrza Zakładów Azotowych Puławy [11] oraz zaprojektowane do turbiny elektrowni wodnej Brodzkie Młyny (inwestycja wstrzymana) i turbiny elektrowni wodnej Dwory (inwestycja w realizacji).



WŁAŚCIWOŚCI

F=2.0 kN	F= 2.0 kN
p= 2.1 MPa	p= 2.1 MPa
t= 64.2°C	t= 60.5°C
M= 1.1 Nm	M= 0.9 Nm
h_{min}= 8 μm	h_{min}= 14 μm

OZNACZENIA

•	punkt pomiarowy [μm]
α	powierzchnia sekcji płyty ślizgowej
β	powierzchnia tarczy oporowej
i	wlot oleju
F	siła osiowa
p	średnie naciski
t	temperatura płyty ślizgowej
M	moment tarcia
h_{min}	minimalna grubość filmu olejowego

Rys. 8. Właściwości łożyska z podatną powierzchnią ślizgową dla dwóch wariantów kształtu filmu smarowego wg [10].

recenzował: Prof. dr hab. inż. Jan Burcan

LITERATURA

[1] Waukesha Bearings: Tilting Pad Thrust Bearing Selection Guide.

[2] Neale M. J.: Tribology Handbook. Butterworths, London 1973.

[3] Bielec M. K., Leopard A. J.: Tilting Pad Thrust Bearings: Factors Affecting Performance and Improvements with Directed Lubrication. Proceedings of the IME, Tribology Convention 1970 (Paper 13), London.

[4] Dąbrowski L.: Dobór podatności podparcia hydrodynam. łożyska wzdłużnego. Mater. IX Konf. "Metody i środki projektowania wspom. komputerowo", W-wa 1993.

[5] Kawaike K., Okano K., Furukawa Y.: Performance of a Large Thrust Bearing with Minimized Thermal Distortion. ASLE Trans.,Vol. 22, 2, 125-134.

[6] Ettles C., Cameron A.: Thermal and Elastic Distortions in Thrust-Bearings. Instn Mech Engrs, Lubr. Wear Conv. 1963, Paper 7, 60-71.

[7] Anant Pal Singh: An Overal Optimum Design of a Sector-Shaped Thrust Bearing with Continuous Circumferential Surface Profiles. Wear, 117 (1987) 49-77.

[8] Dąbrowski L., Popowicz Z., Wasilczuk M., Siwek B., Olszewski O.: Poszukiwanie optymalnego kształtu powierzchni ślizgowej odkształconej przez hydrodynamiczny film smarowy oraz sposobów uzyskania takiego odkształcenia. Sprawozdanie z projektu Nr DNS-T/03/173/90-02. Pol. Gdańska, Wydz. Bud. Masz., Gdańsk 1991.

[9] Olszewski O., Łożysko ślizgowe wzdłużne. Patent Nr 140387.

[10] Dąbrowski L., Olszewski O.,Wasilczuk M., : Poszukiwanie optymalnego kształtu powierzchni odkształconej przez hydrodynamiczny film smarowy. Etap III: Doświadczalne badanie właściwości filmu smarowego uzyskanego na powierzchni ślizgowej ukształtowanej poprzez jej sprężyste odkształcenie w warunkach obciążenia. Sprawozdanie z proj. nr7 7041 91 02. Pol. Gdańska, Wydz. Mechan., Gdańsk 1992.

[11] Dąbrowski L., Olszewski O., Wasilczuk M.: Badania i przykłady zastosowania łożyska z podatną płytą ślizg. Mater. XVI Sympozjonu PKM, W-wa 1993, s. 70-75.

THE USE OF DEFORMATIONS FOR INCREASING LOAD-CARRYING CAPACITY OF HYDRODYNAMIC THRUST BEARINGS.

Summary

Load-carrying capacity of the hydrodynamic thrust bearings is much lower than that of the journal bearings mainly because of poor load distribution. Difficulties in controlling the deformations of the bearings elements are the reason for restricting the deformations in traditional bearing designs.

Modern measurement techniques and computer aided analysis methods made it possible to use the deformations of the bearing elements to improve its load carrying capacity.

The paper presents two examples of the use of the deformations:

- analysis of the elastic support of the bearing pads improving load distribution among the pads
- idea and the results of research of an original thrust bearing in which hydrodynamic pressure is formed only due to the elastic deformations of a bearing plate.