

**Michał WODTKE<sup>\*</sup>, Michel FILLON<sup>\*\*</sup>, Michał WASILCZUK<sup>\*</sup>**

## **WPLYW ZAŁOŻEŃ MODELU OBLICZENIOWEGO NA WYNIKI OBLICZEŃ HYDRODYNAMICZNYCH ŁOŻYSK WZDŁUŻNYCH**

### **THE INFLUENCE OF MODEL SIMPLIFICATIONS ON THE PREDICTED PERFORMANCE OF HYDRODYNAMIC THRUST BEARINGS**

#### **Słowa kluczowe:**

obliczenia hydrodynamicznych łożysk wzdluznych, modele TEHD

#### **Key-words:**

thrust bearing models, TEHD calculations

#### **Streszczenie**

Na przestrzeni ostatnich lat opracowanych zostało wiele modeli obliczeniowych przeznaczonych do wyznaczania własności hydrodyna-

---

<sup>\*</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel.: (58) 347 25 84, fax.: (58) 347 27 42, e-mail: mwodtke@pg.gda.pl, e-mail: mwasilcz@box43.pl

<sup>\*\*</sup> LMS Laboratoire de Mécanique des Solides, UFR Sciences, UMR CNRS 6610 – Université de Poitiers, SP2MI, Bd Pierre et Marie Curie, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, FRANCE, tel.: +33 5 49 49 65 43, e-mail: michel.fillon@lms.univ-poitiers.fr

micznych łożysk wzdłużnych. Umożliwiają one uwzględnienie w analizach obliczeniowych wielu istotnych zjawisk oraz cech konstrukcyjnych istotnych z uwagi na działanie łożyska, jednak dokładność uzyskanych z ich wykorzystaniem wyników wydaje się wciąż niewystarczająca.

W referacie przedstawiono porównanie wyników obliczeń własności hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych otrzymanych z wykorzystaniem dwóch niezależnie opracowanych modeli obliczeniowych TEHD (termoelastohydrodynamicznych). Wykorzystane w obliczeniach programy różnią się głównie założeniami i uproszczeniami przyjętymi, zwłaszcza w odniesieniu do części przepływowej zadania. Symulacje obliczeniowe przeprowadzono stosując w przypadku obu modeli te same warunki brzegowe. Wskazano na różnice otrzymanych wyników spowodowane użyciem różnych założeń upraszczających oraz dokonano ich porównania ze znanymi z literatury danymi doświadczalnymi.

## WPROWADZENIE

W celu wyznaczenia charakterystyk hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci opracowanych zostało niezależnie wiele modeli obliczeniowych [L. 2, 3, 4]. Od najprostszych, zakładających daleko idące uproszczenia, np. izotermiczny przepływ oleju w szczelinie smarowej czy też brak odkształceń segmentu łożyskowego, do bardziej zaawansowanych i kompleksowych uwzględniających złożone zjawiska mogące mieć istotny wpływ na modelowe własności węzła łożyskowego. Sprawdzenie ich poprawności dokonywane jest zwykle z wykorzystaniem danych eksperymentalnych, które dostępne są głównie dla łożysk o stosunkowo niewielkich rozmiarach. Z tego powodu nie pewne wydaje się wykorzystanie opracowanych modeli obliczeniowych do wyznaczenia własności łożysk charakteryzujących się dużymi rozmiarami, a wątpliwości te dodatkowo zdają się potwierdzać niektóre wyniki badań [L. 6]. Mnogość uwzględnianych zwyczajowo w analizie obliczeniowej różnorodnych zjawisk sprawia, że rozwiązanie zadania jest stosunkowo trudne. Dodatkowo każdorazowa konieczność przyjęcia pewnych założeń upraszczających oraz warunków brzegowych do uzyskania rozwiązania problemu może skutkować niepoprawnością wyznaczonych charakterystyk łożysk. Jak się wydaje, wyznaczane teoretycznie własności łożysk mogą istotnie zależeć od rodzaju założeń upraszczających użytych do opracowania modeli obliczeniowych, stąd pomysł oceny ich



wpływu na wyznaczone charakterystyki hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych.

## CEL PRACY

W referacie zaprezentowano porównanie wyników obliczeń własności hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych uzyskanych z wykorzystaniem dwóch niezależnie opracowanych modeli obliczeniowych TEHD (termoelastohydrodynamicznych). Wykorzystane w pracy modele obliczeniowe różnią się między sobą głównie przyjętymi uproszczeniami szczególnie w odniesieniu do części przepływowej zadania. Intencją autorów było wskazanie ewentualnych różnic w uzyskanych wynikach analiz, mimo przyjęcia tych samych warunków brzegowych w obu wykorzystanych modelach obliczeniowych. Wybrane wyniki obliczeń porównano także do wyników pomiarów dostępnych w literaturze, stąd możliwa była również ocena poprawności działania użytych w pracy modeli obliczeniowych a tym samym zasadności uproszczeń wykorzystanych do ich opracowania.

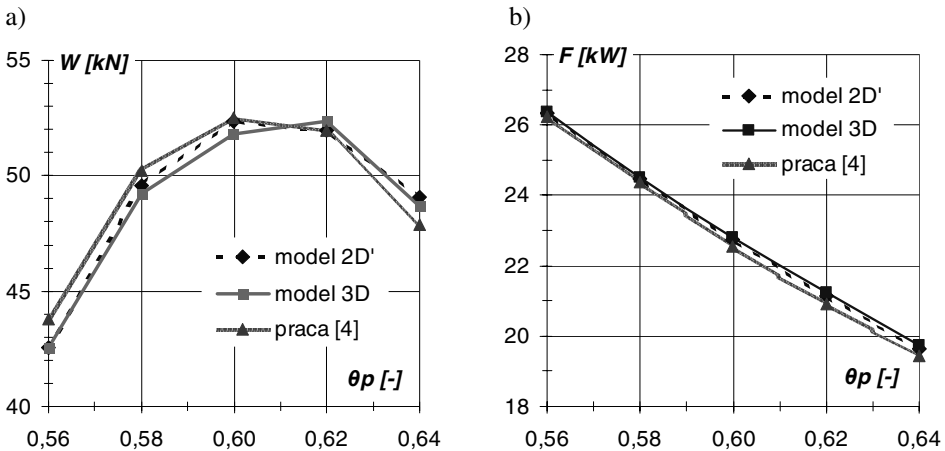
## MODELE OBLICZENIOWE TEHD WYKORZYSTANE W PRACY

W pracy wykorzystano dwa niezależnie opracowane modele obliczeniowe TEHD do wyznaczania charakterystyk łożysk wzdłużnych (pojedynczego segmentu przy założeniu równości przenoszonych obciążeń przez wszystkie segmenty). Najważniejsza różnica założeń wykorzystanych do opracowania obu modeli dotyczyła części przepływowej zadania. Pierwszy model opracowany przez Fillona [L. 3] uwzględnia trójwymiarową zmienność temperatury oleju oraz jego lepkości w szczelinie smarowej łożyska (model nazywany dalej **3D**). Drugi model opracowany w Politechnice Gdańskiej [L. 1] jest modyfikacją znanego z literatury modelu 2D (adiabatycznego), w którym do uwzględnienia zjawiska przepływu ciepła ze szczeliny smarowej do elementów łożyska (segmentu i tarczy oporowej) wykorzystano dodatkowe założenie o parabolicznym rozkładzie temperatury wzdłuż wysokości szczeliny smarowej (model nazywany dalej **2D'**). Do rozwiązania części przepływowej zadania w obu modelach użyto metody różnic skończonych, natomiast do obliczeń deformacji termosprężystych segmentu metody elementów skończonych. Dokładny opis obu modeli przedstawiony został w pracy [L. 5].



## WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia z wykorzystaniem zaproponowanych modeli TEHD przeprowadzono dla łożysk, dla których znane są z literatury wyniki analogicznych obliczeń lub badań eksperymentalnych. Pozwoliło to nie tylko na porównanie wyników obliczeń między modelami obliczeniowymi, ale także z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy. W tym celu na wstępie powtórzono obliczenia THD (bez deformacji segmentu) łożyska o wymiarach:  $R_z = 237$  [mm],  $R_w = 160$  [mm],  $\beta = 22,5^\circ$  przy prędkości obrotowej wału  $n = 1500$  [obr./min], zaprezentowanych w pracy [L. 4]. Dodatkowym założeniem wprowadzonym do obliczeń w pracy [L. 4] było ograniczenie minimalnej grubości szczeliny olejowej do wartości  $h_{\min} = 100$  [ $\mu\text{m}$ ]. Ponieważ w obu rozważanych modelach obliczeniowych możliwe jest prowadzenie analiz przy założeniu izotermicznego przepływu oleju w szczelinie smarowej, rozpoczęto porównywanie wyników od tego przypadku, który jest najprostszy z uwagi na stopień komplikacji zadania. Wyniki obliczeń w funkcji względnego obwodowego położenia środka podparcia segmentu  $\theta p$  ( $r_p = 0,5$ [-]) zaprezentowano na Rys. 1.



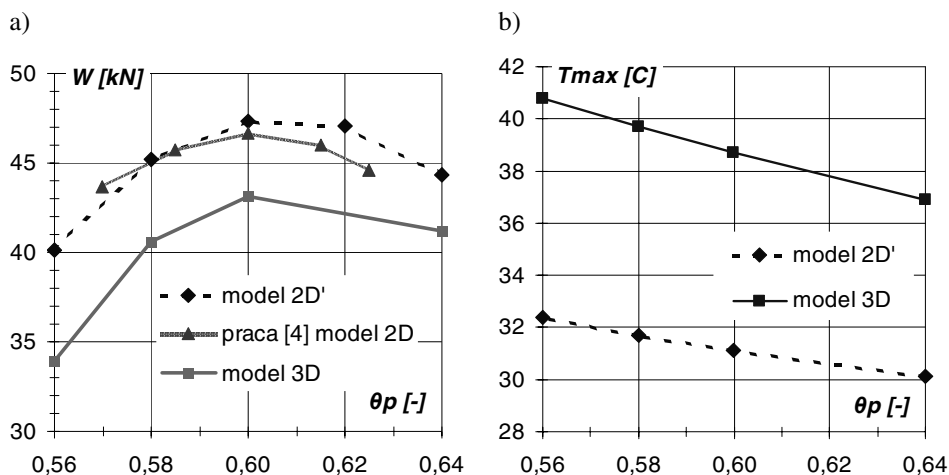
Rys. 4. Porównanie wyników obliczeń dla łożyska wg [L. 4] uzyskanych modelem 2D' i 3D dla izotermicznego przepływu oleju w szczelinie: a) nośność łożyska  $W$ , b) starty tarcia  $F$

Fig. 4. Results comparison for bearing taken from ref. [L. 4] obtained with the use of 2D' and 3D models for isothermal assumption of fluid flow in bearing oil gap, a) bearing load capacity, b) bearing friction power losses



Porównanie wyników wskazuje na bardzo dobrą zgodność wyznaczonych wielkości zarówno w odniesieniu do wyznaczonej nośności łożyska (także profili ciśnień), geometrii szczeliny olejowej, jak i notowanych strat tarcia.

Niezadowolającą zgodność uzyskanych wyników zaobserwować można dla przypadku obliczeń THD zarówno w odniesieniu do nośności łożyska (**Rys. 2a**), jak i mocy tarcia, które z wykorzystaniem modelu 2D' wyznaczane są zdecydowanie większe porównując do wyników obliczeń za pomocą modelu 3D. Dzieje się tak pomimo zastosowania tych samych warunków brzegowych w obu analizach, w tym między innymi przyjętej jednakowej wartości temperatury wlotowej oleju do szczeliny ( $T_{wl} = 27[^\circ\text{C}]$ ) oraz jednakowych parametrów oleju, a także wymuszeń działających na łożysko. Większe straty tarcia w łożysku obliczane są z wykorzystaniem modelu 2D'. Wiąże się to z wynikami obliczeń temperatur powierzchni ślizgowej segmentu i oleju w szczelinie smarowej, które wyliczane są na znacznie niższym poziomie niż analogiczne uzyskane z wykorzystaniem modelu 3D (**Rys. 2b**).



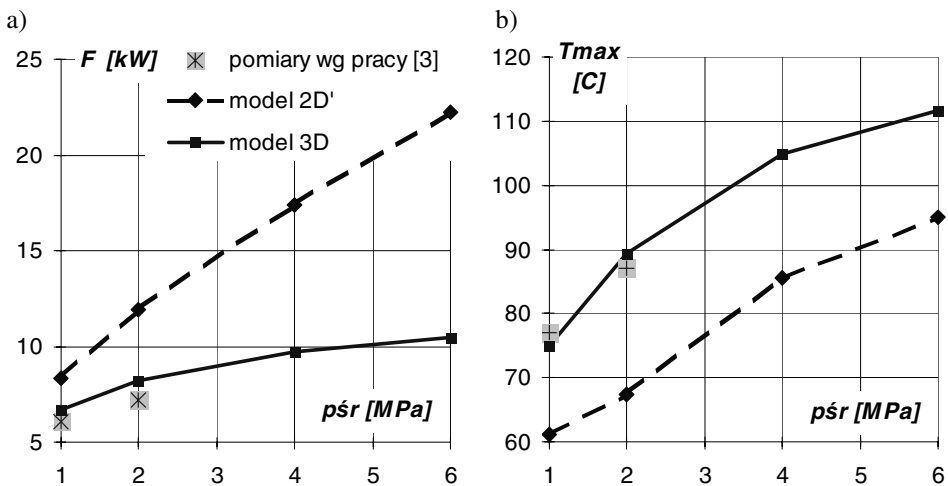
**Rys. 5. Porównanie wyników obliczeń THD uzyskanych modelem 2D', 3D oraz z pracy [L. 4]: a) nośność łożyska, b) maksymalna temperatura powierzchni ślizgowej segmentu**

Fig. 5. THD analysis results comparison obtained with the use of 2D', 3D models and taken from ref. [L. 4], a) bearing load capacity, b) maximum pad sliding surface temperature.



Kolejne obliczenia z wykorzystaniem modeli 2D' oraz 3D, tym razem z uwzględnieniem deformacji termicznych i sprężystych segmentu (obliczenia TEHD), przeprowadzono dla segmentu łożyska wzdłużnego o parametrach zaczerpniętych z pracy 0. Podstawowe parametry tego łożyska to:  $R_z = 114,3$  [mm],  $R_w = 57,15$  [mm],  $\beta = 50^\circ$ ,  $n = 3000$  [obr./min]. W cytowanej pracy [L. 3] zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych łożyska, stąd istnieje możliwość porównania wyznaczonych teoretycznie charakterystyk łożyska z danymi pomiarowymi. Porównanie takie dla temperatury maksymalnej powierzchni ślizgowej i strat tarcia w łożysku, wyliczone w funkcji wartości średnich nacisków przedstawiono na Rys. 3.

Mimo zastosowania w obu analizach TEHD takiego samego zestawu warunków brzegowych zaobserwować można w wynikach obliczeń znaczne różnice. Trendy zmian analizowanych wielkości są podobne, jednak wielkości strat tarcia wyznaczanych z wykorzystaniem modelu 2D' są wyższe a temperatury powierzchni ślizgowej niższe niż obliczone z wykorzystaniem modelu 3D. Co warto podkreślić zarówno straty tarcia jak i maksymalne temperatury **wyznaczone z wykorzystaniem modelu 3D są bardzo bliskie wartościom zmierzonym eksperymentalnie.**



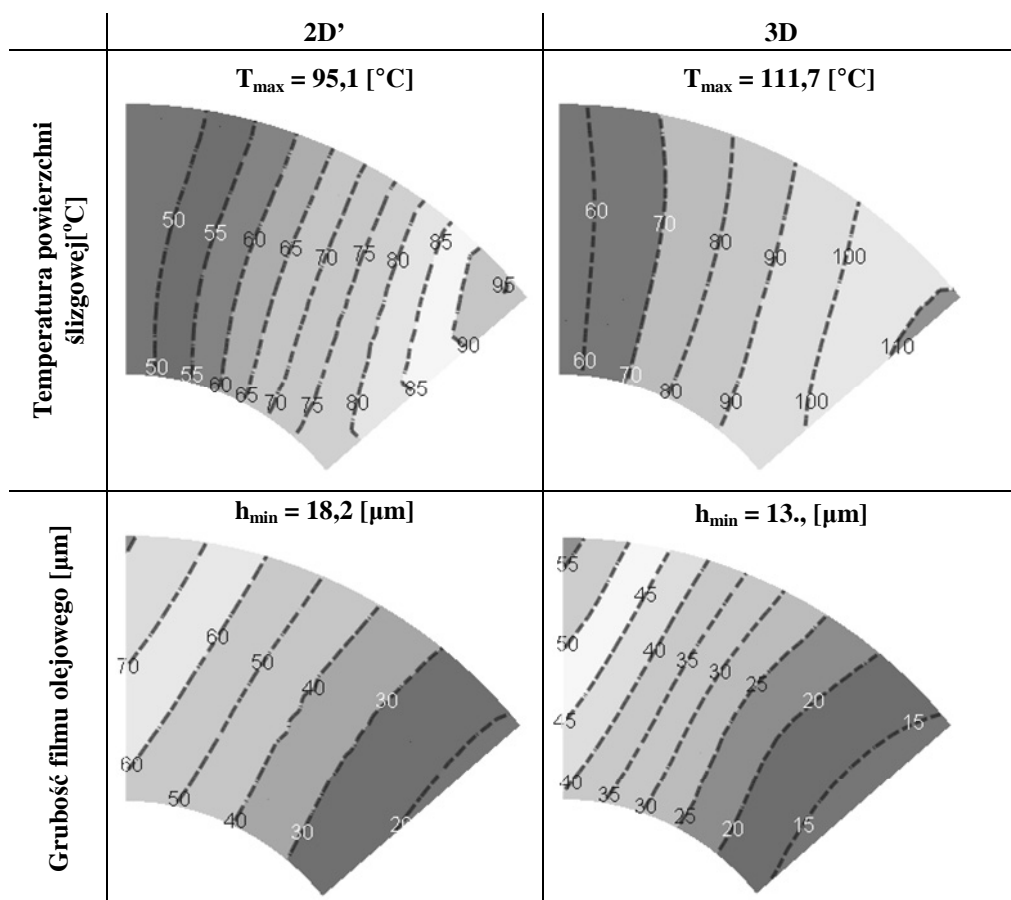
Rys. 6. Wyniki obliczeń TEHD wykonanych dla łożyska o parametrach wg pracy [L. 3] z wykorzystaniem modeli 2D' oraz 3D oraz z zaznaczeniem dostępnych danych pomiarowych, a) moc tarcia w łożysku, b) temperatura maksymalna powierzchni ślizgowej

Fig. 6. Results of TEHD calculations made for bearing from ref. [L. 3] with the use of 2D' and 3D models with marked available measuring data, a) bearing friction power losses, b) maximum pad sliding surface temperature

Oprócz prezentowanych powyżej porównań wartości wyliczanych wielkości, dokonano również porównania obliczanych profili temperatur oraz kształtu szczeliny smarowej (**Tab. 1**) dla wybranego przypadku obciążenia średniego łożyska  $p_{sr} = 6$  [MPa], który uwypukla najbardziej różnice wyników obliczeń. Jak można zaobserwować, wyznaczone profile wielkości z wykorzystaniem obu programów różnią się istotnie. O ile profile temperatury utrzymują stosunkowo podobny charakter różniąc się

**Tabela 1. Porównanie wyników obliczeń profili temperatury oraz grubości filmu olejowego wyznaczonych z wykorzystaniem modeli 2D' oraz 3D i tych samych warunków brzegowych dla nacisków średnich w łożysku  $p_{sr} = 6$  [MPa]**

Table 1. Comparison of surface temperature distribution and film profiles calculated with the use of 3D and 2D' with the use the same set of boundary conditions for bearing average pressure  $p_{sr} = 6$  [MPa]



zdecydowanie wyznaczonymi wartościami temperatury, o tyle szczelina smarowa uzyskana z wykorzystaniem modelu 3D, pomijając różnice wartości minimalnych grubości szczeliny smarowej w porównaniu z wynikami uzyskanymi z użyciem modelu 2D', wykazuje znacznie mniejsze pochylenie obwodowe segmentu.

## WNIOSKI

W pracy przedstawiono porównanie wyników obliczeń własności hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych, uzyskanych z wykorzystaniem dwóch niezależnie opracowanych modeli obliczeniowych TEHD z zamiarem identyfikacji różnic wyznaczonych charakterystyk. Na podstawie przeprowadzonych analiz wyciągnąć można następujące wnioski:

- uzyskano dobrą zgodność wyników obliczeń oboma modelami przy założeniu izotermicznego przepływu smaru w szczelinie olejowej,
- porównanie wyników analiz THD uzyskanych z wykorzystaniem modeli 2D' oraz 3D ujawniają różnice, choć trendy zmian są podobne. Wartości obliczonych modelem 3D temperatur są wyższe, natomiast moce tarcia i nośności niższe niż wyliczone modelem 2D',
- analogiczne do powyższego wnioski dotyczą porównania wyników analiz TEHD,
- wyniki obliczeń uzyskane za pomocą modelu 3D wykazują dobrą zgodność z wynikami pomiarów doświadczalnych, podczas gdy wyniki uzyskane z użyciem modelu 2D' odbiegają znacznie od wartości pomierzonych,
- wprowadzenie założenia upraszczającego odnośnie do parabolicznego rozkładu temperatury wzdłuż grubości filmu olejowego w modelu 2D' wprowadza znaczne niedokładności do wyznaczanych charakterystyk łożyska, o czym świadczą wyniki prezentowanych analiz.

*Praca naukowa finansowana częściowo ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy.*

## LITERATURA

1. Dąbrowski L., Wasilczuk M.: Evaluation of a water turbine hydrodynamic thrust bearing performance on the basis of thermoelastohydrodynamic calculations and operational data. Proc. Instn. Mech. Engrs., Part J, 218, 2004, s. 413–421.





2. Heinrichson N., Santos I., Fuerst A.: The Influence of Injection Pockets on the performance of Tilting – Pad Thrust Bearings: Part I –Theory. Proc. 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Turin, 2006.
3. Glavatskih S., Fillon M.: TEHD Analysis of Thrust Bearings With PTFE-Faced Pads. Transactions of the ASME, Journal of Tribology. 128 (1), 2006, s. 49–58.
4. Kim K., Tanaka M., Hori Y.: A Three-Dimensional Analysis of Thermohydrodynamic Performance of Sector-Shaped, Tilting-Pad Thrust Bearings. Transactions of the ASME, Journal of Lubrication Technology, 105 (3), 1983, s. 406–413.
5. Wodtke M., Wasilczuk M., Fillon M.: Predicting performance of thrust bearings with the use of contemporary models. Proceedings of 7th EDF & LMS Poitiers Workshop, Poitiers, France, October 2008, paper no. P (dokument elektroniczny).
6. Yuan J. H., Medley J. B., Ferguson J. H.: Spring-supported thrust bearings used in hydroelectric generators: comparison of experimental data with numerical predictions. Tribology Transactions, Vol. 44, 2001, s. 27–34.

**Recenzent:**  
**Wojciech WIELEBA**

## Summary

Over last decades, a lot of analytical models were built dedicated to predicting the performance of thrust bearings through numerical calculations. They allow taking into account many phenomena and design features that are important for bearing properties, but still in many cases predicted bearing characteristics seem not accurate enough.

In this paper, a comparison of the results of predicted performance for hydrodynamic thrust bearings with the use of different independently developed TEHD (thermo elasto hydrodynamic) bearing models was illustrated. The main differences between the models comprise assumptions taken for fluid flow in the model. Calculations were carried out for the same boundary conditions applied in both codes. Obtained results were compared in order to reveal differences in calculated bearing characteristics caused by different solutions of fluid flow in the model. Some selected results of simulations were additionally compared to experimental data available from published literature.

