Michał WODTKE[*], Michał WASILCZUK[*], Grzegorz ROTTA[*], Piotr PAJĄCZKOWSKI[*]

BADANIA TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE ROZKŁADU TEMPERATUR W HYDRODYNAMICZNYM ŁOŻYSKU WZDŁUŻNYM

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE PROFILE IN HYDRODYNAMIC THRUST BEARING

Słowa kluczowe:

hydrodynamiczne łożyska wzdłużne, badania doświadczalne, badania teoretyczne

Key words:

hydrodynamic thrust bearings, experimental investigation, theoretical investigation

[*] 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, e-mail: grotta@pg.gda.pl, e-mail: pajak1@op.pl.

Streszczenie

W referacie zaprezentowano przykładowe wyniki obliczeń uzyskane dzięki zastosowaniu rozwijanej w Politechnice Gdańskiej nowej metody oceny własności hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych. Bazuje ona na wykorzystaniu techniki automatycznej wymiany informacji pomiędzy uwzględnianymi w analizach problemów obliczeń łożyskowych obszarami zadania, tj. płynowym i strukturalnym, wykorzystując w tym celu dostępne programy obliczeniowe MES (technika FSI – *Fluid Solid Interaction*). Analizy przeprowadzono dla łożyska wzdłużnego, dla którego uzyskano również wyniki badań doświadczalnych na stanowisku SON Politechniki Gdańskiej. Porównano wybrane wyniki analiz obliczeniowych oraz badań doświadczalnych, przeprowadzając w ten sposób weryfikację modelu obliczeniowego.

WPROWADZENIE

Tendencja powiększania wymagań eksploatacyjnych stawianych łożyskom poprzez zwiększanie ich obciążalności czy też nominalnych prędkości działania, z równoczesnym żądaniem zapewnienia ich bezawaryjnej pracy sprawia, że poszukiwane są nowe rozwiązania konstrukcji węzłów łożyskowych mogące spełnić stawiane im podwyższone wymagania. Z tego powodu, chociaż doświadczenia eksploatacyjne dotyczące hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wahliwymi segmentami sięgają już ponad stu lat ich użytkowania, są one nadal przedmiotem dociekań i badań. Opracowane do tej pory specjalnie do prowadzenia analiz teoretycznych modele obliczeniowe łożysk segmentowych nie są niestety wolne od ograniczeń i wad. Zaliczyć do nich należy konieczność przyjęcia warunków brzegowych, niezbędnych do uzyskania wyniku obliczeń. Ich wartości (a także zmienność) są zwykle nieznane i mogą istotnie zmieniać wyniki analiz **[L. 6]**. Dodatkowo weryfikacja wyników obliczeń uzyskanych z użyciem znanych modeli obliczeniowych była zwykle (z uwagi na związane z tym koszty) dokonywana jedynie z wykorzystaniem danych pomiarowych uzyskanych dla łożysk o mniejszych średnicach **[L. 1, 3]**. Jak wskazują na to doświadczenia autorów **[L. 5]**, a także doniesienia literaturowe **[L. 7]** w przypadku łożysk o dużych średnicach, uzyskiwane wyniki analiz odbiegają zwykle znacznie od wartości pomierzonych. Stąd wynika potrzeba dalszego rozwoju metod obliczeniowych,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

pozwalających w sposób odpowiedzialny na ocenę własności łożyska w różnych warunkach jego działania.

CEL PRACY

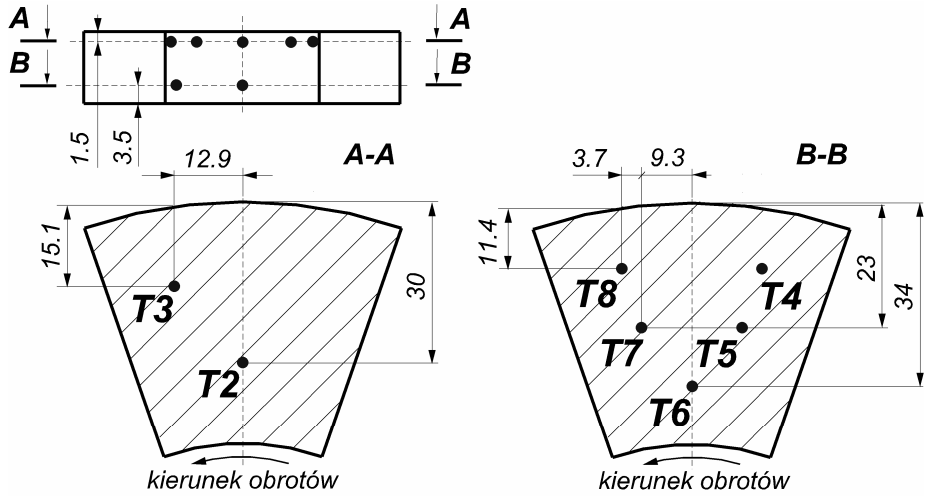
W Politechnice Gdańskiej, z udziałem autorów, rozwijany jest nowy sposób oceny własności hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych wykorzystujący tzw. technikę FSI (Fluid Solid Interaction). Polega ona na automatycznej wymianie informacji pomiędzy uwzględnianymi w analizach problemów obliczeń łożyskowych obszarami zadania, tj. płynowym i strukturalnym, wykorzystując w tym celu dostępne programy obliczeniowe. Celem niniejszej pracy jest przeprowadzanie wstępnej oceny poprawności uzyskiwanych z wykorzystaniem procedury FSI charakterystyk łożyska wzdłużnego. Ocena ta była możliwa z użyciem wyników badań doświadczalnych prowadzonych na stanowisku badawczym SON Politechniki Gdańskiej. Porównano wybrane wyniki analiz obliczeniowych oraz badań doświadczalnych, przeprowadzając w ten sposób weryfikację modelu obliczeniowego.

OBIEKT BADAŃ

Stanowisko SON Politechniki Gdańskiej jest przeznaczone do prowadzenia badań hydrodynamicznych segmentowych łożysk wzdłużnych o średnicach zewnętrznych do 200 [mm], obciążeniach osiowych do 90 [kN] i prędkości obrotowej wału stanowiska do 7000 [obr./min]. Prezentowane w dalszej części wyniki pomiarów zostały uzyskane dla łożyska wzdłużnego złożonego z 6 segmentów podpartych poprzez specjalne pryzmy podpierające punktowo niesymetrycznie. Podstawowe wymiary łożyska badanego: średnica zewnętrzna 180 [mm], średnica wewnętrzna 90 [mm], wysokość segmentu 12 [mm], kąt segmentu 38^{o}. Łożysko smarowano zanurzeniowo olejem ISO VG 32. Ocenę warunków działania łożyska umożliwiają pomiary: momentu tarcia w łożysku, szczeliny hydrodynamicznej oraz temperatur segmentów. W prezentowanej pracy główny akcent położono na porównanie pomierzonych oraz wyznaczonych teoretycznie wartości temperatur w objętości segmentu, parametr ten z uwagi na łatwość pomiaru oraz stosunkowo niewielką jego niepewność jest powszechnie stosowany do monitorowania własności łożysk. Łożysko badawcze wyposażone zostało w jeden segment pomiarowy, w którym umieszczono siedem czujników termoparowych w dwóch war-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

stwach, tak jak to pokazano na **Rys. 1**. Szczegółowy opis stanowiska badawczego oraz wyników pomiarów można znaleźć w pracy **[L. 4]**.



Rys. 1. Rozmieszczenie termopar w segmencie pomiarowym łożyska badawczego SON, punkty od T2 do T8 symbolizują położenie końcówek pomiarowych czujników

Fig. 1. Arrangement of the thermocouples in the test pad of the SON test stand bearing, points from T2 to T8 represent location of the gauging points of the temperature sensors

PROCEDURA OBLICZENIOWA

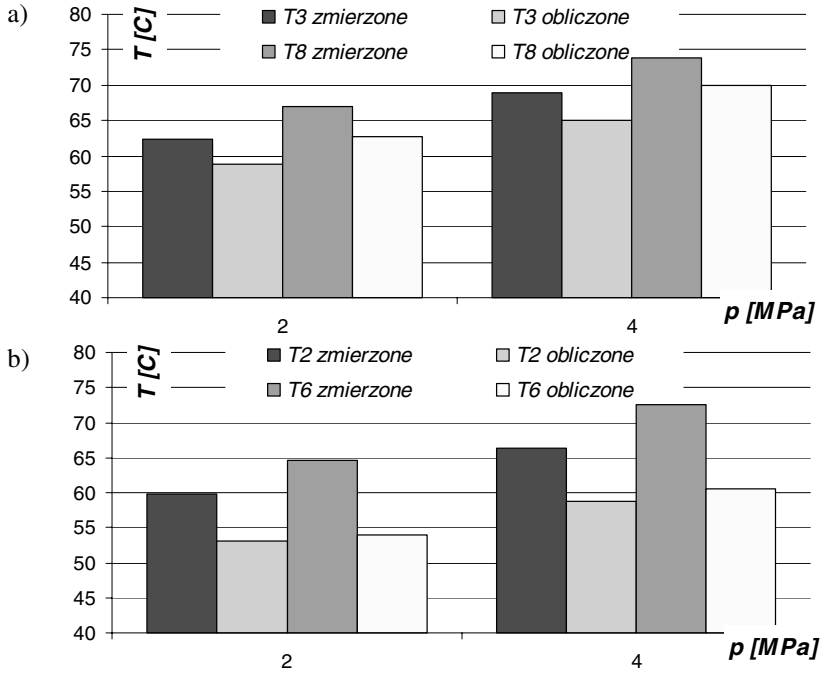
W prezentowanej pracy do oceny własności hydrodynamicznego łożyska wzdłużnego wykorzystana została rozwijana z udziałem autorów w zespole Politechniki Gdańskiej metoda bazująca na wykorzystaniu techniki FSI. Technika ta polega na połączeniu działania dwóch odrębnych programów obliczeniowych, z których każdy przeznaczony jest do analizy zjawisk w różnych obszarach węzła łożyskowego, tj. płynowym (program wykorzystujący CFD) oraz strukturalnym (program wykorzystujący MES). Informacje pomiędzy oboma programami wymieniane są automatycznie w pętli iteracyjnej do uzyskania satysfakcjonującej zbieżności rozwiązania. Model obliczeniowy w części strukturalnej, korzystając z założenia równomiernego obciążenia wszystkich segmentów łożyskowych, obejmował pojedynczy segment łożyskowy wraz z wycinkiem (1/6) tarczy oporowej. Efekt wahliwości segmentu uzyskano, ustalając węzeł segmentu leżący na jego spodzie w miejscu położenia punktu pod-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

parcia (nie uwzględniono w analizie rzeczywistego podparcia segmentów na pryzmie). W części przepływowej model obliczeniowy obejmował szczelinę smarową oraz przepływ oleju w sąsiedztwie segmentu w wannie olejowej. Zastosowanie techniki FSI do prowadzenia analiz hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych umożliwia uwzględnienie wszystkich istotnych z punktu widzenia działania łożyska zjawisk: generowania ciepła w szczelinie smarowej i jego dystrybucji, deformacji termosprężystych segmentów oraz ich wahliwości. Więcej informacji dotyczących techniki obliczeniowej FSI znaleźć można w pracy **[L. 2]**.

WYNIKI ANALIZ

Porównanie wyników pomiarów w wybranych punktach objętości segmentu z wynikami obliczeń uzyskanych FSI zostało zaprezentowane na **Rys. 2** i **3**.

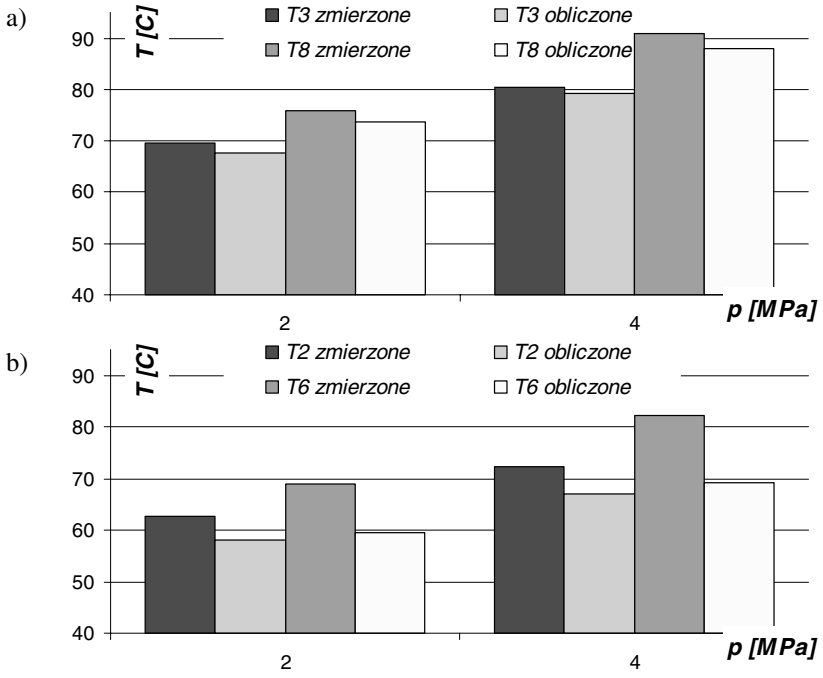


Rys. 2. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów temperatur [^{o}C] segmentu łożyska badanego w zależności od średnich nacisków w łożysku przy n = 2000 [obr./min], a) temperatury T3 i T8, b) temperatury T2 oraz T6

Fig. 2. Comparison of the calculations results and measurements for bearing pad temperatures [^{o}C] as a function of specific bearing pressure for n = 2000 [rpm], a) temperatures T3 and T8, b) temperatures T2 and T6

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 2 zawiera zestawienie wyników pomiarów i obliczeń temperatury w zależności od średnich nacisków panujących w łożysku przy prędkości obrotowej wału n = 2000 [obr./min], natomiast **Rys. 3** analogiczne wyniki uzyskane dla prędkości obrotowej n = 4000 [obr./min]. Z uwagi na ilość uzyskanych wyników porównania ograniczono tylko do czterech wybranych punktów pomiaru temperatury, które w sposób reprezentatywny demonstrują tendencje uzyskanych wyników. Do porównań wybrano dwa punkty temperatury zlokalizowane w obszarze najgorętszym segmentu (punkty T8 oraz T3 w pobliżu wylotu ze szczeliny smarowej, (**Rys. 1**) oraz dwa punkty w pobliżu wewnętrznej średnicy łożyska (punkty T6 oraz T2). Obie pary punktów pomiarowych zlokalizowane są w przybliżeniu w tym samym miejscu segmentu, patrząc na segment w rzucie z góry, ale w dwóch różnych warstwach. W ten sposób możliwa jest także ocena gradientu temperatury wzdłuż jego grubości.



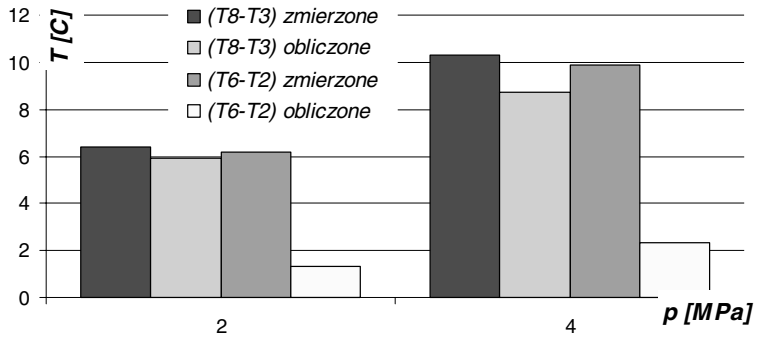
Rys. 3. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów temperatur [^{o}C] segmentu łożyska badanego w zależności od średnich nacisków w łożysku przy n = 4000 [obr./min], a) temperatury T3 i T8, b) temperatury T2 oraz T6

Fig. 3. Comparison of the calculations results and measurements for bearing pad temperatures [^{o}C] as a function of specific bearing pressure for n = 4000 [rpm], a) temperatures T3 and T8, b) temperatures T2 and T6

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wyniki pomiarów wskazują oczywistą zależność wzrostu temperatury notowanej w objętości segmentu pomiarowego wraz ze wzrostem średniej wartości nacisków w łożysku. Podobną tendencję zaobserwować można także w wynikach obliczeń, jednak ujawniają one pewne różnice w stosunku do wartości pomierzonych. Obliczone wartości temperatur są zaniżone we wszystkich pomierzonych punktach temperatur. Charakterystyczne jest to, iż dla najgorętszej części objętości segmentu łożyska (w sąsiedztwie punktów T3 i T8) notowane są niewielkie różnice pomierzonych i obliczonych wartości temperatury, i wynoszą one nie więcej niż 4 [^{o}C] (podobnie jest także w punkcie T7 nie ujętym w prezentowanych wynikach). Tendencja ta jest niezależna od prędkości obrotowej (patrz **Rys. 2a** oraz **Rys. 3a**). Podobna zależność występuje w wynikach uzyskanych dla punktów zlokalizowanych w pobliżu wewnętrznego promienia łożyska (termopary T2 i T6), z tą różnicą, że notowane niezgodności wartości temperatur zmierzonych i wyliczonych są znacznie większe i sięgają nawet nieco powyżej 13 [^{o}C] (patrz **Rys. 2b** oraz **Rys. 3b**). Podobną tendencje zaobserwowano w punktach termopar T4 oraz T5.

Na **Rys. 4** zaprezentowano porównanie wyników gradientów temperatur uzyskanych na grubości segmentu z pomiarów oraz obliczeń teoretycznych dla n = 4000 [obr./min].



Rys. 4. Porównanie gradientów temperatur wzdłuż grubości segmentu obliczonych i zmierzonych dla prędkości wału stanowiska badawczego n = 4000 [obr./min]

Fig. 4. Comparison of the measured and calculated temperature gradients across bearing pad for test stand shaft rotational speed n = 4000 [obr./min]

Stosunkowo dobrą zgodność wyników pomiarów i obliczeń uzyskano dla gradientów w obszarze wylotowym ze szczeliny smarowej (T8-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

T3), słabą natomiast dla obszaru wewnętrznego promienia segmentu łożyska.

WNIOSKI

Na podstawie zaprezentowanych porównań wyników badań temperatur segmentu pomiarowego oraz analiz obliczeniowych można wyciągnąć następujące wnioski:

- zaobserwowano zadowalającą zgodność wyników pomiarów i obliczeń temperatury oraz jej gradientów wzdłuż grubości segmentu w obszarze wylotowym ze szczeliny smarowej,
- w pozostałym obszarze segmentu zgodność wyników i obliczeń jest niezadowalająca,
- porównanie wyznaczonych wartości gradientów temperatury do wartości pomierzonych wskazuje, że w obszarze wlotowym do szczeliny smarowej występują większe gradienty, a tym samym intensywniejszy przepływ ciepła przez grubość segmentu niż został on oszacowany z wykorzystaniem obliczeń FSI,
- jak się wydaje przyczyn znacznych różnic temperatur obliczonych oraz pomierzonych należy się doszukiwać w błędach wprowadzanych do modelu obliczeniowego poprzez nieuwzględnienie w obliczeniach rzeczywistej konstrukcji podparcia segmentu, co może mieć wpływ na kształt szczeliny smarowej, a tym samym na rozkład temperatur.

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

LITERATURA

1. Ettles C., Anderson H.: Three – dimensional thermoelastic solutons of thrust bearings using code Marmac 1. Transactions of the ASME, Journal of Tribology, 113 (2), 1991, s. 405–412.
2. Pajączkowski P., Schubert A., Wasilczuk M., Wodtke M.: Transient bearing simulations – warm and cold start – up of a large thrust bearing. Referat zgłoszony – 14th Nordic Symposium on Tribology, NordTrib 2010, Szwecja, czerwiec 2010.
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.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4. Wasilczuk M., Rotta G., Dąbrowski L., Wodtke M.: Badania zjawisk w przestrzeni międzysegmentowej i ich wpływu na właściwości łożyska, Raport końcowy z projektu badawczego nr 4 T07C 017 29, Politechnika Gdańska, 2009.
5. Wasilczuk M., Wodtke M., Pajączkowski P., Fillon M., Dabrowski L.: Thrust bearings investigations – stage II. Raport niepublikowany z pracy zleconej dla ALSTOM Hydro (Szwajcaria) Ldt, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2009.
6. Wodtke M., Fillon M., Wasilczuk M.: Wpływ założeń modelu obliczeniowego na wyniki obliczeń hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych. Tribologia: Teoria i Praktyka, nr 5, vol. 227 (2009), s. 237–245.
7. 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:
Jarosław SĘP

Summary

In this paper, some example results of calculations focused on the assessment of pivoted pad thrust bearing operation are presented. Results were obtained with the use of a calculation technique called FSI (Fluid Structure Interaction). This method utilises the automatic exchange of information between fluid (evaluated with CFD) and structural (evaluated with FEM) domains, which are necessary in bearing lubrication problem investigations.

Analysis was carried out for a hydrodynamic thrust bearing, for which experimental data had been collected at Gdansk University of Technology SON test stand. Selected results of theoretical investigations were compared to results of measurements, and on this basis, proposed model accuracy was determined.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl