



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

**Prof. dr hab. inż. Krzysztof J. Kaliński, prof. zw. PG**  
**Katedra Mechaniki i Mechatroniki**

Gdańsk, dnia 10.11.2017 r.

## O C E N A

rozprawy doktorskiej mgr. inż. **Jakuba Roemera**  
pt. „**Wykorzystanie materiałów termoelektrycznych do poprawy  
stabilności termicznej systemów łożyskowania opartych o łożyska  
foliowe**”  
(„**The use of thermoelectric materials for improving thermal stability of  
foil bearings in high speed rotating machinery**”)

---

Praca wykonana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl

Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Lubieniecki

Podstawa oceny: uchwała Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH  
oraz pismo z dnia 18.07.2017 r. prof. dr. hab. inż. Antoniego Kalukiewicza,  
Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH,  
wraz z otrzymanym egzemplarzem pracy doktorskiej.

---

### 1. Dobór tematu, cel i zakres pracy

Przedmiotem przedłożonej przez **mgr. inż. Jakuba Roemera** pracy doktorskiej są badania dotyczące poprawnych warunków pracy łożysk foliowych w szybkoobrotowych układach wirujących. Dzięki nowoczesnym możliwościom wynikającym z technologii wytwarzania warstw powierzchniowych folii o bardzo dobrych właściwościach tribologicznych, cieszą się one w ostatnich latach coraz większą popularnością, zwłaszcza w zakresie szerokich zastosowań technicznych. Wykorzystanie łożysk foliowych obserwuje się coraz częściej w systemach chłodniczych, turbinach gazowych i kompresorach, czy w lotnictwie.

W porównaniu z klasycznymi łożyskami ślizgowymi posiadają one szereg zalet. Do najważniejszych należy zaliczyć wysoką żywotność spowodowaną brakiem występowania tarcia suchego podczas ich normalnej pracy, możliwość pracy w cięższych warunkach obciążenia, nieosiągalnych dla innych łożysk hydrodynamicznych, a także – szeroki zakres temperatur roboczych sięgający nawet kilkuset stopni Celsjusza. Ich wadą są jednak ograniczone możliwości odprowadzania ciepła, co w konsekwencji może doprowadzić do niekorzystnego zjawiska zwanego niestabilnością termiczną łożyska. Może ona skutkować w krótkim czasie nawet zniszczeniem łożyska w wyniku zatarcia obracającego się wału z powierzchnią folii gładkiej. Tym kierunkiem badań zajmuje się wiele ośrodków naukowych i instytucji przemysłowych, zainteresowanych zarówno koniecznością zapewnienia prawidłowych warunków pracy łożysk foliowych, jak też – monitorowaniem ich stanu technicznego czy uszkodzeń.

Praca doktorska mgr. inż. Jakuba Roemera wychodzi naprzeciw tym wyzwaniom. Proponuje się w niej, w celu poprawy efektywności pracy łożysk foliowych, rozwiązanie polegające na wykorzystaniu materiałów termoelektrycznych do poprawy stabilności termicznej łożysk, poprzez lokalne oddziaływanie na ich strukturalną warstwę nośną. Jest ono konkurencyjne w porównaniu z istniejącymi dotychczas rozwiązaniami, polegającymi zwłaszcza na powszechnie uważanym za najskuteczniejsze odprowadzaniu ciepła z warstw współpracujących elementów łożysk poprzez ich chodzenie powietrzem. To ostatecznie stanowi efektywną ochronę jedynie przed przegrzaniem oraz nierównomierną rozszerzalnością temperaturową zespołu wał-panewka. Nie chroni natomiast łożyska przed szczególnie niebezpiecznym występowaniem gradientów temperatur. Biorąc pod uwagę rosnące zainteresowanie opracowywaniem nowych rozwiązań w zakresie inżynierii łożyskowania, a zwłaszcza – łożysk foliowych, wybór tematu należy uznać za trafny. Upoważnia do tego dokonany przez doktoranta obszerny, krytyczny i wnikliwy przegląd publikacji osiągnięć naukowych. Wiele wiodących ośrodków prowadzi w przedmiotowej tematyce zaawansowane na skalę światową badania podstawowe i stosowane.

Celem rozprawy było, zdaniem doktoranta, opracowanie nowoczesnego sposobu wykorzystania materiałów termoelektrycznych do poprawy stabilności termicznej łożysk foliowych. Stało się to możliwe dzięki zauważalnemu rozwojowi w ostatnich latach technologii wytwarzania materiałów termoelektrycznych i towarzyszącemu wzrostowi efektywności, w połączeniu z jednoczesnym sukcesywnym spadkiem cen komponentów. Cel ten został określony w sposób jasny i zrozumiały, zaś kolejne rozdziały pracy są logicznym następstwem jego realizacji.

Praca, zredagowana prawie w całości w języku angielskim, liczy 28+198 stron i zawiera streszczenie w języku angielskim, rozszerzone streszczenie w języku polskim, spis treści, listę rysunków wraz z podpisami, wykaz skrótów, 9 rozdziałów zasadniczych (w tym podsumowanie) oraz wykaz 114 pozycji aktualnej literatury, w zdecydowanej większości opublikowanej po roku 2000. Treść rozprawy wzbogaca 6 załączników zawierających dokumentację łożysk foliowych, procedurę ich montażu, a także – informacje na temat konfiguracji badań, danych oraz wyników eksperymentów.

W wykazie załączonych prac przygotowanych przy współudziale doktoranta dostrzega się jedynie 3 pozycje, w tym 1 publikację w materiałach konferencyjnych, 1 artykuł i 1 publikację o

niezidentyfikowanym opisie bibliograficznym. Należy również zauważyć, że są to opracowania zespołowe, liczące 4-5 współautorów. Powyższe nie najlepiej świadczy o zaangażowaniu doktoranta w realizację zadań naukowo-badawczych, których uwieńczeniem jest oceniana rozprawa. Natomiast w załączonym wykazie literatury zauważa się wiele pozycji w wysoko punktowanych czasopismach z listy JCR posiadających Impact Factor (np. *Journal of Tribology*, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *Tribology Transactions*). Dostrzega się również materiały publikowane w materiałach znanych konferencyjnych międzynarodowych, raporty niepublikowane, opracowania wewnętrzne oraz witryny internetowe. Z uwagi na znaczącą zawartość merytoryczną cytowanych materiałów, w świetle powyższego należy stwierdzić dobrą rozpoznawalność zamieszczonych pozycji przeglądu literatury. Staranny dobór cytowanych źródeł predestynuje przedmiotową rozprawę doktorską do rangi wartościowego opracowania naukowego.

Zakres ocenianej pracy obejmuje tematykę łożysk gazowych ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień dotyczących łożysk foliowych oraz ich nośności, badania wstępne łożysk foliowych w partnerskim Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, w celu określenia momentu strat, modelowanie numeryczne zjawisk termoelektrycznych, prace eksperymentalne przeprowadzone na stanowisku do badań łożyska foliowego ze zintegrowanymi modułami termoelektrycznymi współpracującymi z nieruchomym wałem, weryfikację zaproponowanej koncepcji wykorzystania materiałów termoelektrycznych do poprawy stabilności łożysk foliowych podczas badań eksperymentalnych układów wirujących na stanowisku laboratoryjnym, oraz podsumowanie treści rozprawy i perspektywy dalszych prac badawczych.

Zakres pracy został sformułowany prawidłowo, ponieważ zawiera wszystkie podstawowe elementy charakteryzujące rozprawy naukowe.

## 2. Merytoryczna ocena pracy

### 2.1. Charakter pracy

Recenzowana rozprawa jest pracą teoretyczno-eksperymentalną z zakresu modelowania i symulacji numerycznych złożonych zjawisk termicznych w łożyskach foliowych szybkoobrotowych układów wirujących. Na bazie obszernego, wnikliwego i krytycznego przeglądu wartościowej i rozpoznawalnej literatury przedmiotu rozprawy oraz wstępnych wyników badań przeprowadzonych w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku doktorant zaproponował oryginalną koncepcję łożyska foliowego ze zintegrowanymi modułami termoelektrycznymi. W celu weryfikacji proponowanej koncepcji zbudował model obliczeniowy, w którym uwzględnił zależności analityczne definiujące ilość przenoszonego ciepła (efekt Peltiera). Model ten umożliwił przeprowadzenie szeregu symulacji komputerowych, dzięki результатам których stanowiskowe badania materialne łożysk foliowych zostały poprzedzone dojrzałymi rozważaniami wspomaganymi nowoczesną techniką komputerową.

Ogromna liczba rozmaitych opracowań i materiałów źródłowych instytucji zewnętrznych (krajowych i zagranicznych) cytowanych w rozprawie świadczy o powszechnym zainteresowaniu jej tematyką nie tylko w kategoriach merytorycznych. Dostrzega się również jej wymiar w szerokim zakresie użytkowym. Osiągnięcia pracy są na tyle uniwersalne, że po ich odpowiednim rozwinięciu mogą posłużyć do opracowania metodyki oraz aplikacyjnych procedur zastosowania przedstawionej metodyki badań łożysk foliowych w praktyce eksploatacyjnej.

## 2.2. Samodzielny i oryginalny dorobek doktoranta

Oceniana praca doktorska mgr. inż. Jakuba Roemera prezentuje metodyczne rozwiązanie postawionych problemów, umiejętne wykorzystanie wybranych nauk podstawowych i stosowanych (m.in. tworzenia modelu obliczeniowego, symulacji komputerowych) oraz nowoczesnych metod i narzędzi badań eksperymentalnych. Istotny i oryginalny dorobek doktoranta to:

- utworzenie i weryfikacja zredukowanego modelu generacji ciepła w filmie powietrznym, bazującego na rozkładzie temperatury oraz bilansie energetycznym pracującego łożyska. Zaproponowany model składa się z 36 segmentów zdefiniowanych ilością generowanego w nich ciepła i w sensie tego zjawiska jest on zgodny ze znanym z literatury przedmiotu rozkładem temperatury w łożysku;
- opracowanie koncepcji integracji modułów termoelektrycznych w strukturze panwi łożyska foliowego oraz wielopunktowego oddziaływania na folię gładką i falistą łożyska, w celu redukcji występujących gradientów temperatury;
- poprawa stabilności termicznej łożysk foliowych poprzez lokalne oddziaływanie na ich strukturalną warstwę nośną.

Ważnym osiągnięciem recenzowanej pracy jest doprowadzenie jej rezultatów do postaci o dużym znaczeniu aplikacyjnym, rokującym realną możliwość ich wykorzystania w praktyce. Tak rozumiana idea praktycznego zastosowania wyników badań powinna znajdować odzwierciedlenie w realizowanych pracach naukowych jak najczęściej.

## 2.3. Tezy naukowe i wnioski z pracy

Podejmując temat pracy doktorant nie sformułował jawnej tezy pracy. Na podstawie lektury recenzowanej rozprawy można jednak przedstawić tezę domyslną, która brzmi następująco:

**Możliwe jest spełnienie warunku poprawy stabilności termicznej warstwy gładkiej i falistej łożyska foliowego dzięki zastosowaniu rozwiązania bazującego na wykorzystaniu materiałów termoelektrycznych**

Realizacja rozprawy potwierdziła aspekt studyjny i praktyczny osiągnięć doktoranta, bardzo istotny w kontekście prac wykonywanych na wyższych uczelniach technicznych, co zasługuje na szczególne

podkreślenie. Doktorant wykazał prawdziwość sformułowanej tezy, co jest niekwestionowanym, pozytywnym rezultatem opiniowanej rozprawy, tak w sensie poznawczym jak i – użytkowym. W tym miejscu należy jednak zauważyć, że oceny skuteczności proponowanej metody poprawy stabilności termicznej łożyska foliowego dokonano w warunkach laboratoryjnych. Stąd, oczekiwania o znaczeniu praktycznym, dotyczące wykorzystania proponowanego rozwiązania w zaawansowanych zastosowaniach użytkowych, powinny być formułowane z większą ostrożnością. Zwłaszcza, że przedmiotowa rozprawa była realizowana w ramach projektu PBS1/A6/6/2012 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. To ostatnie implikuje zapytanie o brak w rozprawie potwierdzenia jej rezultatów bardziej przekonującymi przykładami.

## 2.4. Uwagi dotyczące pracy

### 2.4.1. Uwagi ogólne

- 2.4.1.1. Tytuł pracy w języku angielskim nie odpowiada tytułowi w języku polskim.
- 2.4.1.2. Celowość przyjęcia w ostatniej grupie sesji pomiarowej podczas badań na stanowisku w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN prądów o wartości skutecznej powyżej 1 A wymaga uzasadnienia. Pozostaje bowiem w sprzeczności do zaleceń producenta modułów termoelektrycznych, w myśl których najlepszą sprawność uzyskuje się w przypadku zasilania prądem poniżej 1 A.
- 2.4.1.3. Otrzymanie w przypadku folii gładkiej pozytywnych wyników redukcji rozrzutu temperatury jedynie dla 13 spośród 102 przetestowanych kombinacji, generalnie nie potwierdza stwierdzenia doktoranta o dobrej skuteczności proponowanej metody (nawet przy maksymalnej redukcji rozrzutu 55,2 %, lecz z jednoczesnym pogorszeniem wyników dla folii falistej). Skuteczność tą udało się wykazać jedynie w przypadku folii falistej (63 na 102 przebadane kombinacje parametrów, przy redukcji rozrzutu temperatury do 76,8 %).
- 2.4.1.4. Podczas czytania rozprawy dostrzega się ryzyko zniszczenia podczas badań łożyska foliowego, a nawet – czujników temperatury. Jak powyższe wpływa na opłacalność ekonomiczną badań łożysk, zwłaszcza że wyniki uzyskiwane z uszkodzonych czujników są i tak ignorowane (89<sub>2-1</sub>).

### 2.4.2. Uwagi szczegółowe

- 2.4.2.1. 9<sub>11</sub>: Powinno być przywołanie do rys. 3.5.
- 2.4.2.2. 20<sub>4</sub>: Powinno być przywołanie do rys. 3.16.
- 2.4.2.3. 23: Opisy na rys. 3.19 i 3.20 są słabo czytelne.
- 2.4.2.4. 26<sub>6-5</sub>: Przedstawiony fragment tekstu nie świadczy o zaistnieniu stanu ustalonego pracy łożyska.

- 2.4.2.5. 33: Oznaczenia na rys. 3.35 są nieczytelne.
- 2.4.2.6. 34<sup>10</sup>: Przywołanie do (nieistniejącego) wzoru 3.36.
- 2.4.2.7. 36<sup>4</sup>: Niewłaściwe przywołane do wzoru 3.13.
- 2.4.2.8. 38<sup>6</sup>: Długość wzdłuż osi łożyska mierzona w jednostkach mocy [W].
- 2.4.2.9. 40<sub>12-10</sub>: Przegląd literatury dotyczącej modelowania termoelektryczności z wykorzystaniem MES (FEM) jest mało wnikliwy, zwłaszcza w świetle liczebności cytowanych pozycji.
- 2.4.2.10. 49: Opisy na rys. 4.8 są słabo czytelne.
- 2.4.2.11. 59-60: Rys. 5.6 i 5.8 są identyczne.
- 2.4.2.12. 65: Jakie zależności matematyczne są podstawą przeprowadzonych symulacji (p. 5.3).
- 2.4.2.13. 67: Oznaczenia na rys. 5.17-5.20 są nieczytelne.
- 2.4.2.14. 74: Niektóre opisy na rys. 6.2 są podane w jęz. polskim.
- 2.4.2.15. 85: Schemat blokowy na rys. 7.8 wymaga wyjaśnienia. Co z czym jest na nim porównywane.
- 2.4.2.16. 103<sub>4</sub>: Niewłaściwe przywołanie rysunków („Figures 15, 15, ...”).
- 2.4.2.17. 112<sub>6-5</sub>: Podsumowanie uzyskanych wyników nie odpowiada danym zamieszczonym na rys. 8.34 i 8.35.
- 2.4.2.18. 131-135: W wymiarach zamieszczonych na rysunkach stanowiących dokumentację łożyska foliowego zauważa się brak oznaczeń dotyczących odchyłek geometrycznych, tolerancji, chropowatości. Czy to oznacza, że wszystkie wymiary są wykonane w tzw. „warsztatowej” (zgrubnej) klasie dokładności?

### 3. Ocena pracy pod względem redakcyjnym

Układ treści jest logicznie prawidłowy. Tytuły rozdziałów i podrozdziałów są zrozumiałe i w większości odpowiadają ich zawartości. Materiał ilustracyjny dobrano właściwie do treści poszczególnych fragmentów. Język pracy jest na ogół poprawny, czytelny i zrozumiały, aczkolwiek w treści zauważa się przekłamania literowe i błędy gramatyczne. Doktorant powinien dołożyć większej staranności w celu poprawnego opracowania pracy pod względem językowym i edytorskim. Natomiast wadliwości redakcyjnych i terminologicznych, które wyszczególniam poniżej, należy unikać podczas pisania rozpraw naukowych.

- 3.1. Obszerny fragment „List of figures” (7 stron) można z powodzeniem pominąć, bez jakiegokolwiek szkody dla całości rozprawy.
- 3.2. Część „Glossary” zawiera skróty powszechnie znane i spotykane w literaturze naukowej oraz w wydawnictwach popularyzujących wiedzę, np. DC (Direct Current), FEM (Finite Element

Method), PC (Personal Computer), PID (Proportional-Integral-Derivative), RMS (Root Mean Square). Stąd, ich dodatkowe wyjaśnienie mija się z celem.

3.3.2<sub>17</sub> i w innych miejscach: w przypadku cytowania wielu pozycji literatury należy stosować jedną parę nawiasów [ ].

3.4.6 i w innych miejscach: W podpisach pod rysunkami, np. po słowie „Figure 3.1” należy stawiać znak „.”, a nie „:”.

3.5.44<sub>5-2</sub> i w innych miejscach: Między wartością liczbową, a jednostką wielkości fizycznej należy stosować spację.

3.6. 106: We wzorze (8.2) jest błędna pisownia indeksów, a zamiast mnożenia występuje znak splotu („\*”).

#### 4. Wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że oceniana praca mgr. inż. Jakuba Roemera spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Zamieszczone uwagi mają charakter dyskusyjny i w żadnym wypadku nie pomniejszają pozytywnej oceny wartości merytorycznej rozprawy. Praca stanowi, w myśl art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595 z późn. zmianami) oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jak również – dokumentuje wiedzę teoretyczną kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej.

Doktorant prezentuje sylwetkę dojrzałego i nowoczesnego naukowca, co również potwierdza opanowanie nietrawnej umiejętności kształtowania skomplikowanych rozwiązań inżynierskich o charakterze badawczym i stosowanym w zakresie nowoczesnej inżynierii łożyskowania układów wirujących z dużymi prędkościami.

Wnioskuje o dopuszczenie pracy jako rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

