

Dr inż. Michał Wodtke

Politechnika Gdańska

Wydział Mechaniczny

Katedra Konstrukcji Maszyn i Pojazdów

AUTOREFERAT

Przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych, w szczególności określonych w art.16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

SPIS TREŚCI

1. IMIĘ I NAZWISKO	3
2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE Z PODANIEM NAZWY, MIEJSCA ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	3
3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU	3
4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA* WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. U. NR 65, POZ. 595 ZE ZM.):	4
A) TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO/ARTYSTYCZNEGO	4
B) OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO/ARTYSTYCZNEGO WW. PRACY/PRAC I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW WRAZ Z OMÓWIENIEM ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA	5
5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH	20
A) DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA PROWADZONA PRZED DOKTORATEM	20
B) DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA PROWADZONA PO DOKTORACIE	21
C) POZOSTAŁA DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA	23
D) ZREALIZOWANE ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA PROJEKTOWE, KONSTRUKCYJNE I TECHNOLOGICZNE	25
E) UDZIELONE PATENTY I ZASTRZEŻENIA WZORÓW UŻYTKOWYCH	27
F) SUMARYCZNY <i>IMPACT FACTOR</i> (IF) WEDŁUG LISTY JOURNAL CITATION REPORTS (JCR), ZGODNIE Z ROKIEM OPUBLIKOWANIA:	27
G) LICZBA CYTOWAŃ PUBLIKACJI WEDŁUG BAZY WEB OF SCIENCE:	27
H) INDEKS HIRSCHA WEDŁUG BAZY WEB OF SCIENCE (WoS):	28
I) KIEROWANIE MIĘDZYNARODOWYMI I KRAJOWYMI PROJEKTAMI BADAWCZYMI ORAZ UDZIAŁ W TAKICH PROJEKTACH	28
J) MIĘDZYNARODOWE I KRAJOWE NAGRODY ZA DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWĄ	29
K) WYGŁOSZENIE REFERATÓW NA MIĘDZYNARODOWYCH I KRAJOWYCH KONFERENCJACH TEMATYCZNYCH	29
6. DOROBK DYDAKTYCZNY I POPULARYZATORSKI ORAZ INFORMACJA O WSPÓŁPRACY MIĘDZYNARODOWEJ HABILITANTA	30
A) UCZESTNICTWO W PROGRAMACH EUROPEJSKICH ORAZ INNYCH PROGRAMACH MIĘDZYNARODOWYCH I KRAJOWYCH	30
B) UDZIAŁ W KOMITETACH ORGANIZACYJNYCH MIĘDZYNARODOWYCH I KRAJOWYCH KONFERENCJI NAUKOWYCH	30
C) KIEROWANIE PROJEKTAMI REALIZOWANYMI WE WSPÓŁPRACY Z NAUKOWCAMI Z INNYCH OŚRODKÓW POLSKICH I ZAGRANICZNYCH ORAZ WE WSPÓŁPRACY Z PRZEDSIĘBIORCAMI	30
D) CZŁONKOSTWO W MIĘDZYNARODOWYCH I KRAJOWYCH ORGANIZACJACH ORAZ TOWARZYSTWACH NAUKOWYCH	30
E) OSIĄGNIĘCIA DYDAKTYCZNE I W ZAKRESIE POPULARYZACJI NAUKI LUB SZTUKI	31
F) OPIEKA NAUKOWA NAD STUDENTAMI	32
G) STAŻE W ZAGRANICZNYCH I KRAJOWYCH OŚRODKACH NAUKOWYCH LUB AKADEMICKICH	32
H) WYKONANE EKSPERTYZY LUB INNE OPRACOWANIA NA ZAMÓWIENIE	33
I) RECENZOWANIE PUBLIKACJI W CZASOPISMACH MIĘDZYNARODOWYCH I KRAJOWYCH	34
J) INNE OSIĄGNIĘCIA, NIE WYMNIENIONE WCZEŚNIEJ	35

1. Imię i Nazwisko

Michał Wodtke

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- 2005 **Uzyskanie stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie naukowej „budowa i eksploatacja maszyn”**. Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, specjalność Inżynieria Łożyskowania. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Modelowanie hydrostatycznego wspomagania w hydrodynamicznym łożysku wzdlużnym*. Promotor pracy - prof. dr hab. inż. Antoni Neyman.
- 2002 **Uzyskanie tytułu magistra inżyniera**. Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, kierunek Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność Napędy, Sterowanie i Automatyzacja Maszyn. Praca dyplomowa magisterska pt.: *Analiza konstrukcyjna i projekt modernizacji przyrządu do pomiaru wewnętrznej geometrii rurociągu*. Promotor dr inż. Eugeniusz Głuchowski.
- 1997 **Ukończenie Technikum Mechanicznego w Grudziądzu** z wyróżnieniem, kierunek Budowa Maszyn.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniuw jednostkach naukowych

- 2006 - aktualnie **Adiunkt w Katedrze Konstrukcji Maszyn i Pojazdów** (poprzednia nazwa Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn), Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska.
- 2015.03 **Visiting Professor** w Université de Poitiers (Francja), miesięczny pobyt w charakterze profesora wizytującego.
- 2002 - 2005 **Asystent w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn**, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska.

poza jednostkami naukowymi

- 2013 **Specjalista R&D** w NOVA Sp. z o.o. Gdynia (w wymiarze 1/8 etatu).
- 2006 - 2008 **Inżynier Mechanik, specjalista analiz MES** w Tecwill Polska Sp. z o.o. Gdańsk (w wymiarze 2/5 etatu).

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) wskazuję jednotematyczny cykl publikacji zatytułowany:

„Rozwój teoretycznych i eksperymentalnych metod badawczych hydrodynamicznych łożysk wzdluznych”

Cykl ten tworzy autorska monografia habilitacyjna [A1] oraz jedenaście publikacji uzupełniających [A2-A12] wyszczególnionych w wykazie umieszczonym poniżej. Przedstawione publikacje stanowią własne osiągnięcia badawczo-naukowe dotyczące tematyki wzdluznych łożysk hydrodynamicznych. Treść i główne wyniki badań zostały opisane w przewodniku w punkcie **4b** niniejszego autoreferatu.

Wybrane publikacje wchodzące w skład cyklu:

- A1. **Wodtke M.** (100 %): Hydrodynamiczne łożyska wzdluzne z warstwą ślizgową z PEEK, **Monografia** nr 161. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2017, s. 216.
- A2. **Wodtke M.** (100 %): Hydrodynamic thrust bearings with polymer lining. Tribologia: Tarcie, Zużycie i Smarowanie, Nr 4 (2016), s. 225-237.
- A3. **Wodtke M.** (80 %), Wasilczuk M.: Evaluation of apparent Young's modulus of the composite polymer layers used as sliding surfaces in hydrodynamic thrust bearings. Tribology International, Vol. 97 (2016), s. 244-252, **(JCR IF 2,903)**.
- A4. Wasilczuk M., **Wodtke M.** (50 %), Braun W.: Centrally pivoted tilting pad thrust bearing with carbon-based coated collar - experimental results of low- and medium-speed operation. Tribology Transactions, vol. 58 (Nr 5), 2015, s. 882-893, **(JCR IF 1,418)**.
- A5. **Wodtke M.** (33 %), Olszewski A., Wasilczuk M.: Application of the Fluid-Structure Interaction technique for the analysis of hydrodynamic lubrication problems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J - Journal of Engineering Tribology, vol. 227 (Nr 8), 2013, s. 888-897, **(JCR IF 0,660)**.
- A6. **Wodtke M.** (40 %), Schubert A., Fillon M., Wasilczuk M., Pajęczkowski P.: Large hydrodynamic thrust bearing: comparison of the calculations and measurements. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J - Journal of Engineering Tribology, vol. 228 (Nr 9), 2014, s. 974-983, **(JCR IF 0,916)**.
- A7. Pajęczkowski P., Schubert A., Wasilczuk M., **Wodtke M.** (15 %): Simulation of large thrust-bearing performance at transient states, warm and cold start-up. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J - Journal of Engineering Tribology, vol. 228 (Nr 1), 2014, s. 96-103, **(JCR IF 0,916)**.

- A8. **Wodtke M.** (40 %), Fillon M., Schubert A., Wasilczuk M.: Study of the influence of heat convection coefficient on predicted performance of a large tilting-pad thrust bearing. Journal of Tribology – Transactions of the ASME, vol. 135 (Nr 2), 2013, s. 1-11, **(JCR IF 0,897)**.
- A9. Dąbrowski L., Pajęczkowski P., Rotta G., Wasilczuk M., **Wodtke M.** (15 %): Improving performance of large thrust bearings through modeling and experimentation. Mechanics & Industry, vol. 14, Nr 4, 2013, s. 267-274, **(JCR IF 0,206)**.
- A10. Wasilczuk M., **Wodtke M.** (50 %): Influence of collar deformations on hydrodynamic thrust bearing performance. ASME/STLE International Joint Tribology Conference, 22-24 Październik 2007, San Diego, USA.
- A11. **Wodtke M.** (100 %): Experimental comparison of hydrodynamic thrust bearings with different pad surface materials. 14th EDF/Pprime Workshop: "Influence of design and materials on journal and thrust bearing performance", 8-9 Październik 2015, Futuroscope, Francja.
- A12. **Wodtke M.** (80 %), Wasilczuk M.: Effect of coating material properties on tilting-pad thrust bearing performance. 12th EDF/Pprime Workshop: "Solutions for performance improvement and friction reduction of journal and thrust bearings", 17-18 Wrzesień 2013, Futuroscope, Francja.

Oświadczenia współautorów publikacji, potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku zostały umieszczone w załączniku 6.

b) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Przedmowa

Prezentowany przewodnik po najważniejszych publikacjach jest podsumowaniem moich wieloletnich badań własnych nad hydrodynamicznymi łożyskami wzdłużnymi. W celu czytelniejszego przedstawienia dorobku wszystkie publikacje i pozostałe prace zostały oznaczone odpowiednimi symbolami literowymi poprzedzającymi ich numer, zgodnie z opisem umieszczonym poniżej:

- [A..] - jednotematyczny zbiór publikacji odnoszący się do ocenianego osiągnięcia naukowego,
- [B..] - pozostałe publikacje związane z inżynierią łożyskowania,
- [P..] - patenty,
- [G..] - granty i inne projekty badawcze,
- [W..] - zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe i wdrożenia,
- [E..] - ekspertyzy.

Dla łatwiejszego zapoznania się z dorobkiem autora spis prac dodatkowo umieszczono w oddzielnym załączniku 4 dołączonym do wniosku.

Omówienie celu naukowego prowadzonych badań

Hydrodynamiczne łożyska wzdłużne z wahliwymi segmentami są znane i stosowane szeroko w technice od początku XX wieku. Znalazły zastosowanie w wielu urządzeniach i maszynach, w tym m.in. w turbinach parowych i wodnych, sprężarkach, przekładniach, kompresorach czy też pompach. Najbardziej spektakularną aplikacją łożysk tej odmiany konstrukcyjnej jest z pewnością wykorzystanie ich do przenoszenia obciążeń osiowych działających na wał hydroturbin w elektrowni wodnej Trzech Przełomów w Chinach. Wykorzystane tam łożyska mają średnicę zewnętrzną 5,2 metra oraz są zdolne do działania pod obciążeniem 60 000 kN.

Głównymi elementami składowymi łożysk są segmenty (najczęściej w kształcie wycinka pierścienia) rozmieszczone równomiernie wokół wału i współpracujące z tarczą ślizgową, odpowiedni system podparcia zapewniający możliwość wahliwości w kierunku obwodowym (czasem również w kierunku promieniowym), olej smarujący łożysko oraz dodatkowe instalacje lub elementy węzła łożyskowego (np. układ chłodzenia oleju lub wyrównywania obciążeń przenoszonych przez segmenty). Największą zaletą stosowania takich łożysk jest działanie w zakresie tarcia płynnego oraz zdolność do samoregulacji, tj. dostosowania geometrii szczeliny smarowej (dzięki wahliwemu podparciu segmentów) do działających na nie wymuszeń (prędkości i obciążenia).

Ogólna budowa wzdłużnego łożyska segmentowego jest stosunkowo prosta. Jego działaniu towarzyszy jednak szereg bardzo złożonych zjawisk i procesów, które wpływają na parametry pracy węzła łożyskowego. Przepływ oleju w zbieżnej szczelinie olejowej wywołuje efekt klina smarnego, czyli powstawania ciśnienia hydrodynamicznego równoważącego obciążenie zewnętrzne przenoszone przez łożysko. Działanie ciśnienia w filmie powoduje deformacje sprężyste elementów łożyska (w szczególności jego segmentów). Tarcia płynnemu w filmie smarnym towarzyszy generowanie ciepła wskutek intensywnego ścinania oleju. Ciepło to jest unoszone ze szczeliny z olejem oraz przewodzone przez elementy łożyska (segment i tarczę wału), które w wyniku tego procesu deformują się termicznie. Olej znajdujący się w obudowie łożyska omywa segmenty przejmując przewodzone przez nie ciepło. Z kolei ciepło przewodzone przez tarczę wału przejmowane jest przez powietrze otaczające jej zewnętrzną powierzchnię. Deformacje termiczne i sprężyste elementów łożyska zmieniają kształt filmu smarnego, co ma wpływ na przebieg opisywanych wcześniej zjawisk (rozkład ciśnienia, temperatury i lepkości w filmie, strumieni ciepła itd.).

Wraz z rozwojem techniki, hydrodynamicznym łożyskom wzdłużnym (podobnie jak wielu innym komponentom maszyn i urządzeń) stawiane są coraz wyższe wymagania. Związane jest to głównie z podniesieniem efektywności działania urządzeń. W przypadku przedmiotowych łożysk wyraża się to zwykle zwiększeniem wartości przenoszonych obciążeń z równoczesnym wymogiem zapewnienia odpowiedniego stopnia ich niezawodności. Jak wskazują doniesienia literaturowe oraz doświadczenia eksploatacji, w odniesieniu do łożysk z pokryciem powierzchni ślizgowej wysokocynowymi stopami łożyskowymi (historycznie pierwszy materiał pokryć łożysk) osiągnięta została granica ich rozwoju. W przypadkach coraz większej liczby aplikacji, nie są one w stanie sprostać cięższym warunkom eksploatacyjnym (tj. zwiększonemu obciążeniu, prędkości

i temperaturze). W takich wypadkach doskonałą alternatywą są łożyska, których warstwę ślizgową wykonano z polimerów (najczęściej kompozytów PTFE oraz PEEK) [A1, A2]. Łożyska z pokryciem polimerowym różnią się od łożysk z pokryciem warstwy ślizgowej stopem łożyskowym głównie materiałem pokrycia. Obie wymienione grupy materiałów mają znacząco różne parametry materiałowe, które zmieniają w istotny sposób przebieg zjawisk i procesów w łożysku. Zwiększona podatność warstwy ślizgowej oraz izolacyjność cieplna w przypadku łożysk z pokryciem polimerowym wpływa korzystnie na działanie łożyska.

Jak wskazują studia literatury [A1], do analiz teoretycznych łożysk wzdłużnych stosowane są do dnia dzisiejszego głównie modele obliczeniowe, które zostały opracowane w latach 80 i 90 XX wieku. Uwzględniają one zasadniczo (poza istotnymi wyjątkami) wszystkie z wymienionych wcześniej zjawisk towarzyszących działaniu łożyska, jednak niektóre z nich jedynie w sposób uproszczony. Modele te oparte są na analizie przepływu oleju jedynie w szczelinie smarowej z wykorzystaniem rozwiązania dla uogólnionego równania Reynoldsa. Natomiast zjawiska i procesy związane z przepływem oleju poza szczeliną uwzględniane są w sposób uproszczony. Dotyczy to głównie przejmowania ciepła z segmentu czy też mieszania oleju w przestrzeni międzysegmentowej, które wpływa na temperaturę wlotową filmu, a także na zjawiska cieplne w tarczy wału. Ponadto wiele modeli obliczeniowych pomija deformacje termiczne tarczy ślizgowej, których wartość, jak wykazują badania, jest zwykle zbliżona do deformacji segmentu. Te z kolei są w analizach teoretycznych łożysk wzdłużnych uwzględniane praktycznie zawsze. Co warto także zauważyć, mimo znanych korzyści ze stosowania łożysk z pokryciem polimerowym jak dotychczas nie przeprowadzono kompleksowych badań teoretycznych tego typu łożysk, z uwzględnieniem odmiennej specyfiki polimerowego materiału pokrycia.

Stosowane dotychczas modele obliczeniowe łożysk wzdłużnych z wahliwymi segmentami pozwalają na analizę ich działania właściwie jedynie w stanach ustalonych. Analiza stanów przejściowych, które występują każdorazowo przy jego rozruchu czy też zatrzymaniu, wymaga prowadzenia badań doświadczalnych. Wynika to z występowania w strefie styku powierzchni ślizgowych łożyska tarcia mieszanego, którego analiza teoretyczna nie została dotychczas w sposób zadowalający rozwiązana. Ten obszar zastosowań hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych nie był jak dotąd przedmiotem doświadczalnych badań porównawczych zrealizowanych dla różnych materiałów powierzchni ślizgowych w węźle łożyskowym.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz własnych doświadczeń zdobytych przy okazji badań hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wahliwymi segmentami nadrzędny cel naukowy określono jako:

Ocena dotychczas stosowanych metod badań teoretycznych hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wahliwymi segmentami i opracowanie własnej metodyki badań dla stanów ustalonych połączone z weryfikacją eksperymentalną. Wykonanie badań doświadczalnych łożysk z różnymi skojarzeniami materiałowymi powierzchni ślizgowej dla stanów przejściowych działania.

Elementy osiągnięcia będą opisane w dalszej części bardziej szczegółowo. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

1. **Przeprowadzenie badań teoretycznych hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wykorzystaniem dotychczas stosowanych modeli obliczeniowych** oraz odniesienie ich wyników do danych eksperymentalnych.
2. **Opracowanie bardziej zaawansowanych modeli komputerowych oraz przeprowadzenie analiz teoretycznych łożysk wzdłużnych** pozwalających na szczegółową analizę zjawisk i procesów towarzyszących ich działaniu oraz wyeliminowanie problemów modelowania zaobserwowanych w badaniach powszechnie używanymi obecnie metodami. Wykonanie analiz porównawczych łożyska z pokryciem powierzchni ślizgowej stopem łożyskowym (najczęściej użytkowane) oraz warstwą polimeru PEEK.
3. **Opracowanie metodyki oraz przeprowadzenie pomiarów wybranych najważniejszych parametrów materiałowych pokrycia polimerowego łożysk** do wykorzystania w badaniach teoretycznych, które istotnie wpływają na obliczeniowe charakterystyki łożysk, takich jak: moduł sztywności i współczynnik przewodzenia ciepła warstwy. Zaproponowana metodyka uwzględnia wpływ temperatury na wartość modułu sztywności pokrycia polimerowego co jest istotne z uwagi na silną zależność poszukiwanej wielkości od tego parametru.
4. **Opracowanie metodyki badań doświadczalnych działania łożysk w stanach ustalonych** w celu weryfikacji wyników badań teoretycznych. Badania łożysk w stanach ustalonych zrealizowano dla łożysk z pokryciem białym metalem oraz polimerem PEEK. Ponadto **opracowanie metodyki badań łożysk w stanach nieustalonych z różnymi skojarzeniami materiałowymi powierzchni ślizgowych** (dla segmentów z pokryciem wysokocynowym stopem łożyskowym, kompozytem PEEK oraz bez pokrycia współpracujących z tarczą z powłoką DLC – *Diamond - like Carbon*) w celu porównania właściwości różnych skojarzeń materiałowych pokryw powierzchni ślizgowych łożysk.
5. **Przeprowadzenie badań porównawczych łożysk** dla różnych skojarzeń materiałowych powierzchni ślizgowych oraz różnych stanów jego działania. Wymagało to **modernizacji istniejącego stanowiska badawczego hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych SON**. Badania doświadczalne wszystkich łożysk przeprowadzono w zbliżonych warunkach wymuszeń i parametrów geometrycznych łożysk.

Syntetyczne wyniki badań i najważniejsze elementy wymienionych publikacji

Najobszerniejszą publikacją wymienioną w spisie publikacji jest autorska monografia [A1], która zawiera syntetyczne podsumowanie aktualnego stanu wiedzy związanego z hydrodynamicznymi łożyskami wzdłużnymi z wahlowymi segmentami z pokryciem powierzchni ślizgowej polimerem PEEK. Zawiera ona oryginalne wnioski i wyniki badań łożysk z pokryciem polimerowym prowadzonych przez autora. Uzupełnieniem tej tematyki są także prace [A2, A3, A11, A12].

W pracach [A8, A9, A10] zawarto wyniki oceny wykorzystywanych obecnie modeli obliczeniowych hydrodynamicznych łożysk wzdluznych. Zawierają one rezultaty analiz teoretycznych łożysk odniesione do znanych danych pomiarowych oraz wnioski co do dokładności stosowanych modeli obliczeniowych łożysk (głównie przyjmowanych uproszczeń). Z kolei w pracach [A1, A5, A6, A7] zawarto szczegółowe informacje o zaproponowanej nowej metodzie prowadzenia analiz obliczeniowych hydrodynamicznych łożysk wzdluznych z wykorzystaniem analizy komputerowej FSI (*Fluid-Structure-Interaction – sprzężona analiza płynowo - strukturalna*) oraz jej weryfikacji doświadczalnej. W pracy [A4] opisano wyniki badań doświadczalnych wykonanych dla hydrodynamicznego łożyska wzdluznego z niekonwencjonalnym skojarzeniem materiałowym współpracujących powierzchni ślizgowych stal/DLC.

Udział autora w badaniach hydrodynamicznych łożysk wzdluznych zrealizowanych na potrzeby projektów rozwojowych we współpracy z wieloma firmami łożyskowymi zaowocował zdobyciem licznych doświadczeń w tym zakresie. W ich następstwie podjąłem szczegółowe studia adekwatności powszechnie stosowanych modeli teoretycznych segmentowych łożysk wzdluznych wykorzystywanych do wyznaczania parametrów ich działania.

W badaniach hydrodynamicznych łożysk wzdluznych stosowane są powszechnie modele obliczeniowe, które uwzględniają przepływ oleju jedynie w szczelinie smarowej (z rozwiązaniem równania Reynoldsa). Natomiast przepływ oleju poza szczeliną (powodujące omywanie segmentu oraz tarczy) i jego wpływ na parametry działania łożyska jest uwzględniany w obliczeniach w sposób uproszczony. Dotyczy to m.in. przejmowania ciepła przez opływający segment olej, temperatury wlotowej filmu czy też temperatury tarczy. Wymienione parametry, na potrzeby analiz, są często zakładane z wykorzystaniem np. wiedzy zaczerpniętej z doświadczeń, najczęściej obiektów o innych cechach geometrycznych czy też konstrukcyjnych. W pracach [A8-A10] przeprowadzono badania wpływu wykorzystywanych w analizach założeń na uzyskiwane obliczeniowo parametry działania łożysk wzdluznych. Badaniom poddano wpływ uproszczeń modelu przepływu oleju w szczelinie (zmiennosc temperatury i lepkości oleju w filmie 2D i 3D), temperatury wlotowej filmu, współczynnika przejmowania ciepła na ściankach segmentu zakładanego do uwzględnienia przejmowania ciepła przez opływający go olej a także wpływ deformacji termosprężystych tarczy ślizgowej. Wyniki analiz zostały porównane do wyników eksperymentalnych uzyskanych najczęściej dla łożysk hydrodynamicznych o dużych rozmiarach. Ujawniły one, że warunki brzegowe, których przyjęcie jest wymagane do prowadzenia analiz łożysk obecnie stosowanymi modelami, mają bardzo duży wpływ na uzyskiwane wyniki teoretyczne parametrów działania łożyska (ciśnienia i temperatury filmu, kształt szczeliny smarnej oraz deformacje segmentu).

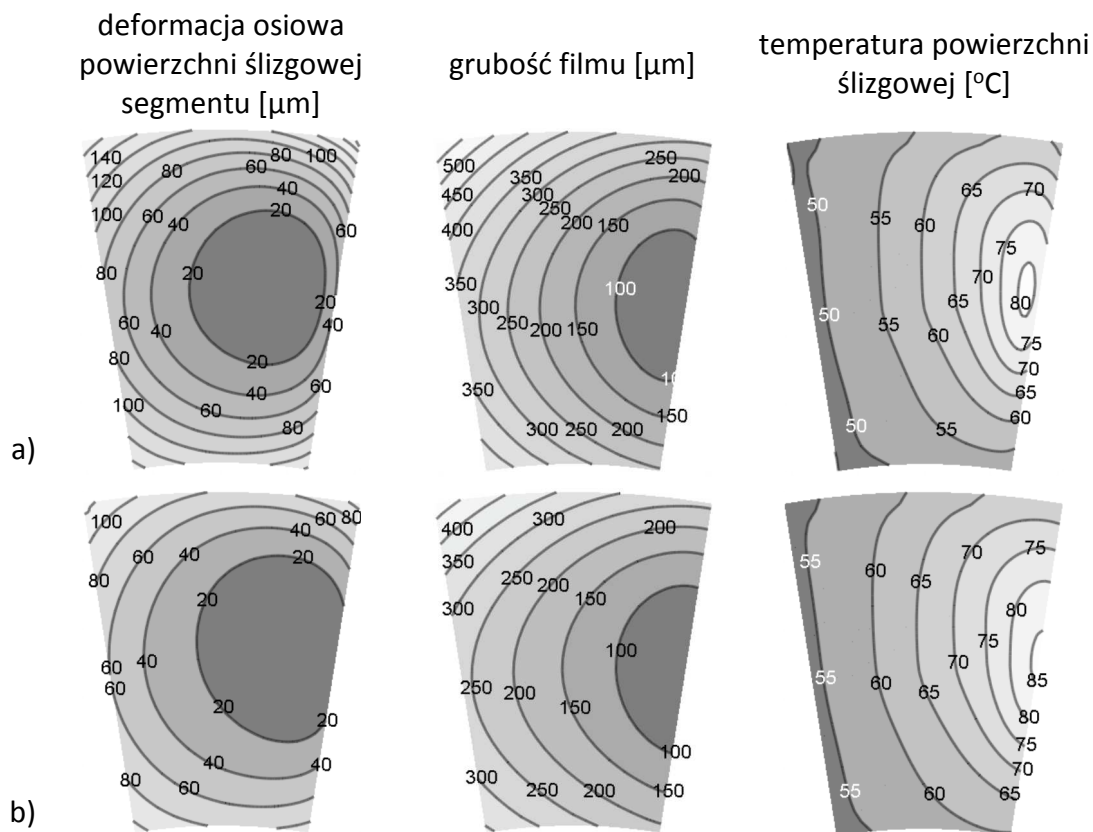
W konsekwencji potwierdzenia niedostatków powszechnie używanych modeli łożysk wzdluznych na Politechnice Gdańskiej rozpoczęto prace nad rozwojem innych alternatywnych metod prowadzenia badań teoretycznych łożysk. Opracowana z sukcesem metodyka bazuje na metodzie prowadzenia analizy FSI dostępnej w zaawansowanych programach obliczeniowych. Metoda FSI umożliwia wykonanie współzależnych analiz - przepływowej i strukturalnej w

jednym zadaniu. Analizy przepływowe prowadzone są z wykorzystaniem narzędzi CFD (*Computational Fluid Dynamics* – obliczeniowa mechanika płynów), natomiast analizy strukturalne z wykorzystaniem programów obliczeniowej mechaniki ciała stałego (najczęściej z wykorzystaniem MES). Opracowana metodyka analiz łożysk z użyciem FSI pozwala na uwzględnienie szeregu elementów, które we wcześniej prowadzonych badaniach teoretycznych nie mogły zostać wzięte pod uwagę. Najważniejsze z nich to: przepływ oleju poza szczeliną i jego wpływ na procesy oraz zjawiska cieplne w segmencie i na wlocie filmu, praktycznie dowolny kształt segmentu, możliwość uwzględnienia dowolnej postaci konstrukcyjnej podparcia, czy też wpływ deformacji tarczy wału na wyniki analiz. Opracowane modele obliczeniowe oraz ich weryfikacja dla łożysk wzdlużnych o różnych rozmiarach zostały opisane w pracach [A5, A6, A7].

Opracowana metodyka badań teoretycznych z wykorzystaniem metody FSI została także wykorzystana do przeprowadzenia analiz obliczeniowych łożysk wzdlużnych z pokryciem polimerowym. Wyniki analiz porównujące obliczone parametry łożysk z pokryciem powierzchni różnymi materiałami polimerowymi (PTFE, PEEK) oraz białym metalem zaprezentowano w pracy [A12], natomiast wybrane wyniki analiz doświadczalnych łożyska z pokryciem kompozytem na bazie polimeru PEEK w pracy [A11]. Syntetyczny przegląd stanu wiedzy w tym obszarze zawarto z kolei w pracy [A2]. Podsumowanie wszystkich badań autora poświęconych łożyskom z pokryciem polimerowym zostały szczegółowo opisane w monografii [A1]. Monografia składa się z pięciu głównych rozdziałów. W pierwszym zawarto obszerny przegląd literatury i podsumowanie stanu wiedzy dotyczącej hydrodynamicznych łożysk wzdlużnych z wahliwymi segmentami z pokryciem powierzchni ślizgowej warstwą polimeru. W drugim rozdziale zdefiniowano cel i zakres pracy. Rozdział trzeci zawiera opis opracowanej metodyki badań teoretycznych łożysk z pokryciem polimerowym oraz wyniki badań teoretycznych łożyska z warstwą ślizgową wykonaną z PEEK. Do ich realizacji wykonano także badania doświadczalne warstwy pokrycia polimerowego, które miały na celu wyznaczenie nieznanych wartości parametrów materiałowych pokrycia wymaganych do symulacji komputerowych. Podobne wyniki badań opisano także w pracy [A3] dla innych materiałów polimerowych stosowanych na pokrycia hydrodynamicznych łożysk wzdlużnych (w tym PTFE). W rozdziale czwartym opisano opracowaną metodykę badań łożyska w celu weryfikacji uzyskanych wyników symulacji komputerowych w ustalonych stanach działania łożysk. Zamieszczono również opis stanowiska badawczego łożysk wzdlużnych, wykorzystanych metod pomiarowych oraz wyniki badań w stanach przejściowych działania łożyska. Co warto podkreślić, wszystkie badania teoretyczne i doświadczalne opisane w monografii wykonano również dla łożyska z pokryciem powierzchni ślizgowej wysokocynowym stopem łożyskowym. Pozwoliło to na ocenę różnic w parametrach działania łożysk w tych samych warunkach badań, spowodowaną jedynie różnym materiałem pokrycia powierzchni ślizgowej. W ostatnim piątym rozdziale opisano wnioski końcowe z badań oraz przewidywane dalsze ich kierunki. Uzupełnienie wyników badań doświadczalnych w przejściowych stanach działania łożyska, które współpracuje z tarczą ślizgową pokrytą powłoką DLC, opisano w pracy [A4].

Najważniejsze oryginalne elementy prezentowanego cyklu publikacji oraz wkład osiągnięcia naukowego w dyscyplinę budowa i eksploatacja maszyn:

1. **Zbadano wpływ założeń modelu obliczeniowego łożysk wzdłużnych wykorzystujących rozwiązanie równania Reynoldsa oraz warunków brzegowych na wyniki analiz obliczeniowych.** Analizom poddano te elementy modeli, których wpływ na uzyskiwane wyniki analiz jest największy.
- a) Studia wpływu współczynnika przejmowania ciepła – parametr ten jest definiowany w analizach teoretycznych łożysk do uwzględnienia zjawiska przejmowania ciepła z bocznych ścian segmentu w wyniku jego opływu przez olej znajdujący się w korpusie łożyska zgodnie z równaniem Fouriera. Jak wskazują zrealizowane badania (Rys. 1) w zależności od przyjętej wartości tego parametru zmieniają deformacje termiczne segmentu, które wpływają na pozostałe parametry obliczeniowe łożyska (kształt filmu, rozkład temperatury i ciśnienia). Im większa założona jest jego wartość tym deformacje termiczne segmentu są większe. Doświadczenia eksploatacji wskazują, że w różnych przypadkach łożysk może on przyjmować wartości z szerokiego zakresu od 100 do 3000 W/m²K.



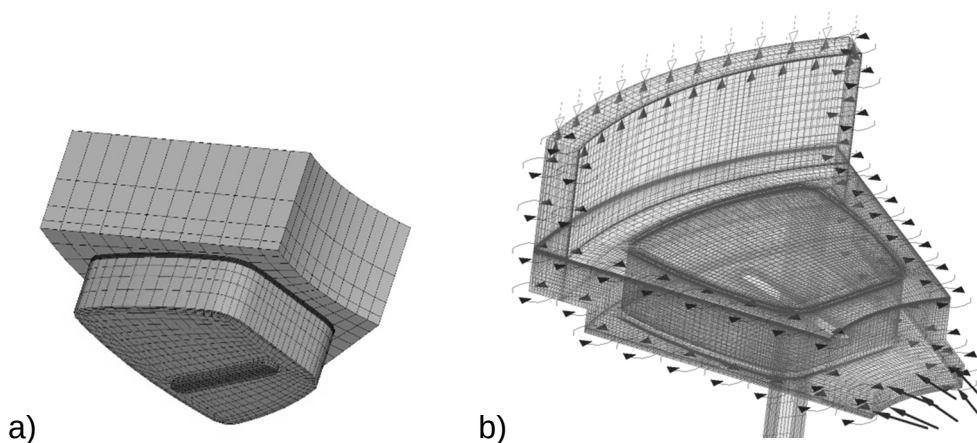
Rys. 1. Wyniki obliczeń TEHD segmentu dużego łożyska wzdłużnego dla założonych różnych wartości współczynnika przejmowania ciepła, a) wartość stała współczynnika 750 W/m²K, b) wartości na wybranych ścianach funkcją wysokości segmentu (od 20 do 420 W/m²K)

- b) Studia wpływu przyjętych założeń modelu przepływu w szczelinie – wykonano badania porównawcze modeli wykorzystujących założenie o dwuwymiarowej (2D) i

trójwymiarowej (3D) zmienności parametrów oleju w filmie (głównie temperatury i lepkości), a także wpływu założonej temperatury wlotowej filmu na wyniki obliczeń. Porównanie uzyskanych wyników analiz do wartości pomierzonych w łożysku wykazało, że do uzyskania wiarygodnych rezultatów konieczne jest uwzględnienie trójwymiarowej zmienności parametrów w filmie olejowym. Znaczący wpływ, bez względu na rodzaj rozważanej zmienności parametrów filmu (2D lub 3D), ma również przyjęta temperatura wlotowa filmu. Parametr ten jest zwykle wielkością wprowadzaną do obliczeń (warunkiem brzegowym).

- c) Studia wpływu deformacji termosprężystej tarczy wału na obliczeniowe parametry łożyska – efekt ten jest zazwyczaj pomijany w analizach łożysk wzdłużnych, podczas gdy deformacje termiczne tarczy wału mogą osiągać porównywalne wielkości jak deformacje segmentu. Przeprowadzone badania wskazują, że uwzględnienie deformacji powierzchni ślizgowej tarczy wału pozwala na uzyskanie wyników bliższych wartościom zmierzonym. Efekt ten, szczególnie w analizach łożysk dużych rozmiarów, powinien być uwzględniany.

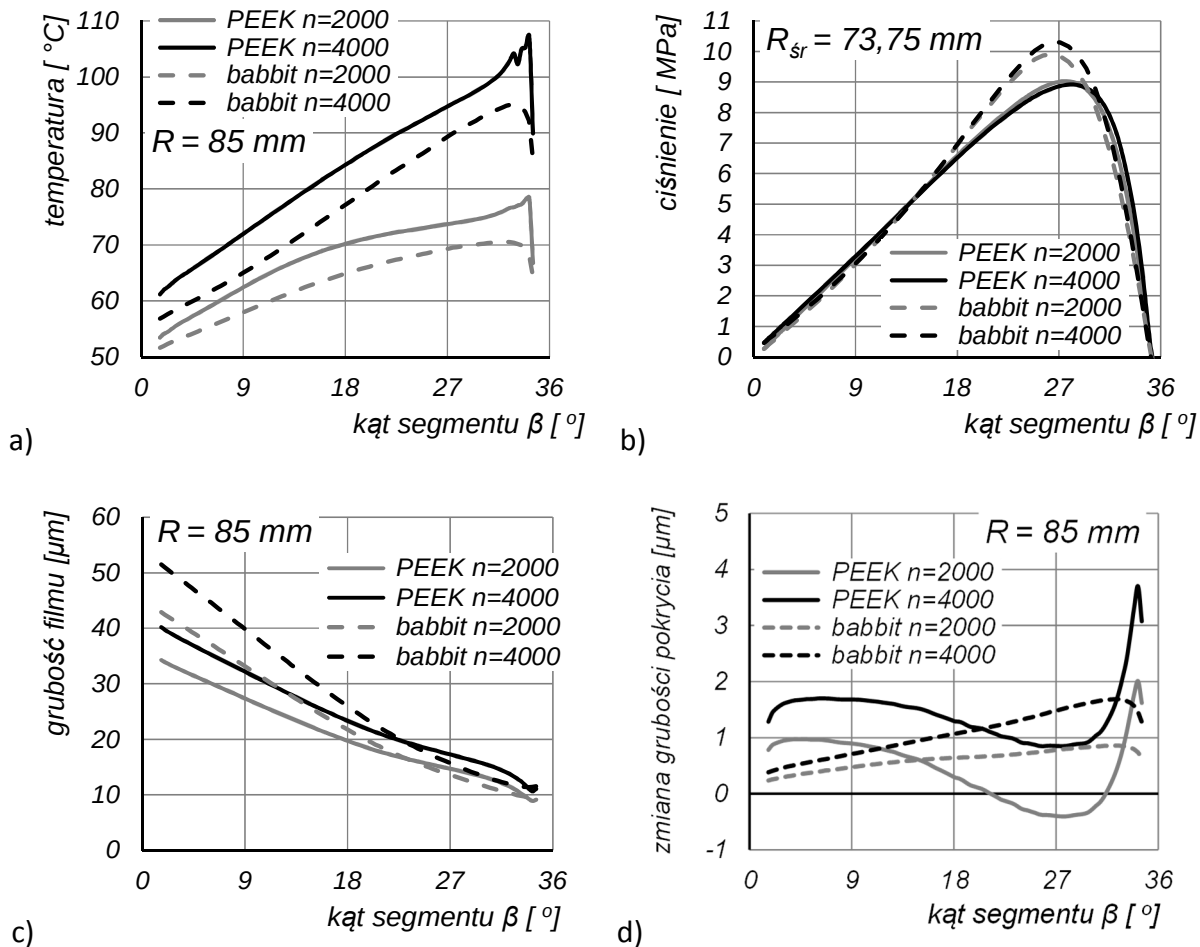
2. **Opracowano metodykę analiz teoretycznych łożysk z wykorzystaniem metody FSI oraz wykonano systematyczne analizy obliczeniowe łożysk z pokryciem kompozytem PEEK i stopem białego metalu.** Zaproponowana oryginalna metodyka analiz uwzględnia wszystkie wnioski wypływające z przeprowadzonych studiów nad metodami obliczeniowymi łożysk. Pozwala na przeprowadzenie pełnej analizy TEHD łożyska z uwzględnieniem przepływu 3D oleju w szczelinie i wokół segmentu, deformacji termosprężystej segmentu i tarczy wału, generowania ciepła i jego dystrybucji w elementach łożyska oraz wahliwość segmentu (Rys. 2). Najważniejszą zaletą metodyki jest brak wymogu definicji warunków brzegowych takich jak: współczynnik przejmowania ciepła czy temperatura wlotowa filmu, których wpływ na obliczeniowe parametry łożyska (jak dowodzą zrealizowane badania) jest znaczący. Wielkości te w opracowanej metodyce są wynikiem obliczeń. Analizy zrealizowano dla dwóch łożysk różniących się materiałem pokrycia: PEEK oraz wysokocynowy stop łożyskowy. Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę różnic w przebiegu zjawisk i procesów towarzyszących ich działaniu.



Rys. 2. Reprezentacja łożyska w opracowanym modelu FSI; a) segment z tarczą wału, b) olej

Analizy teoretyczne zrealizowano badając wpływ wymuszeń (prędkości oraz obciążenia) na charakterystyki łożysk. Zaproponowana metodyka badań teoretycznych, umożliwiła studia wielu parametrów działania łożysk niedostępnych lub nieanalizowanych wcześniej, np. temperatura wlotowa filmu, temperatura tarczy, współczynniki przejmowania ciepła na ścianach segmentu czy też wartości strumieni ciepła przewodzone przez elementy łożyska.

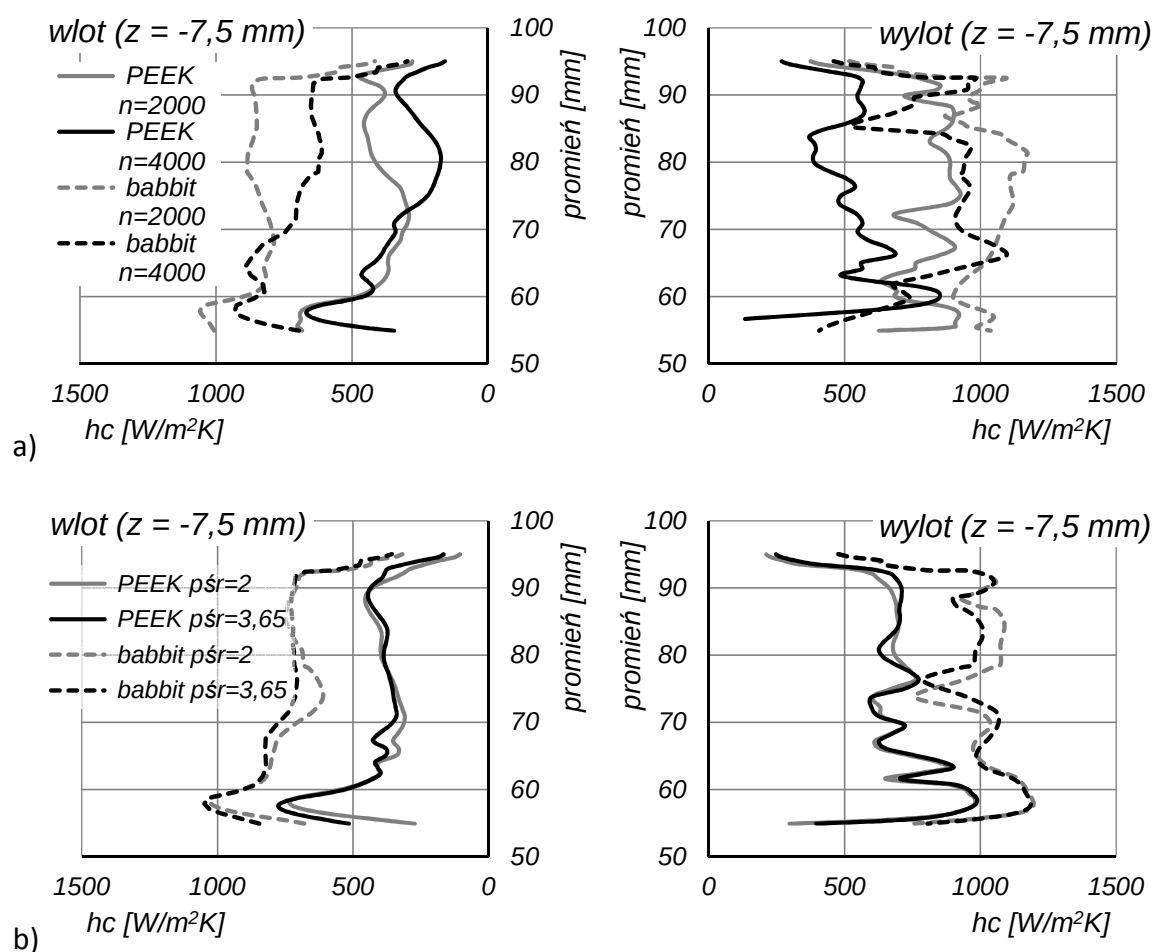
Przeprowadzone obliczenia TEHD łożysk wykazały znaczne różnice parametrów ich działania w zależności od materiału pokrycia segmentu (Rys. 3).



Rys. 3. Porównanie wyników analiz TEHD łożysk (profile obwodowe) z pokryciem PEEK i stopem łożyskowym w funkcji prędkości obrotowej; a) temperatura powierzchni segmentu, b) rozkład ciśnienia filmu, c) grubość filmu, d) zmiana grubości warstwy ślizgowej

Mała przewodność cieplna warstwy PEEK (około 200 razy w porównaniu do stopu łożyskowego) skutkuje większą temperaturą powierzchni ślizgowej oraz mniejszym (kilkukrotnie) przepływem strumienia ciepła przez segment. Mniejsza wartość modułu sztywności warstwy PEEK (o około 25 razy) powoduje lokalne zagłębienie kształtu filmu w strefie wylotowej ze szczeliny. Wpływa to korzystnie na rozkład ciśnienia w filmie obniżając jego wartość maksymalną w łożysku z pokryciem polimerowym w porównaniu do łożyska z pokryciem stopem łożyskowym. Efekt ten jest mniej znaczący dla mniejszych obciążeń łożyska.

Zróźnicowanie warunków dla przepływu ciepła w łożysku w zależności od materiału pokrycia jego warstwy ślizgowej uwiadczenia się także w wyznaczonej (jako wyniki obliczeń FSI przepływu ciepła w segmencie oraz przepływu oleju wokół niego) wartości współczynnika przewodzenia ciepła na ścianach segmentu (Rys. 4). Jego rozkład zależy od warunków przepływu (lokalnych wirów i zakrzywień przepływu spowodowanych ruchem obrotowym wału), od rozważanej ściany segmentu (rozkładu strumienia ciepła wprowadzanego przez powierzchnię ślizgową) i warunków działania łożyska. Jak wskazują wyniki analiz, zmiana obciążenia łożyska nie zmienia warunków przepływu ciepła podczas gdy zmiana prędkości ma na niego znaczący wpływ.

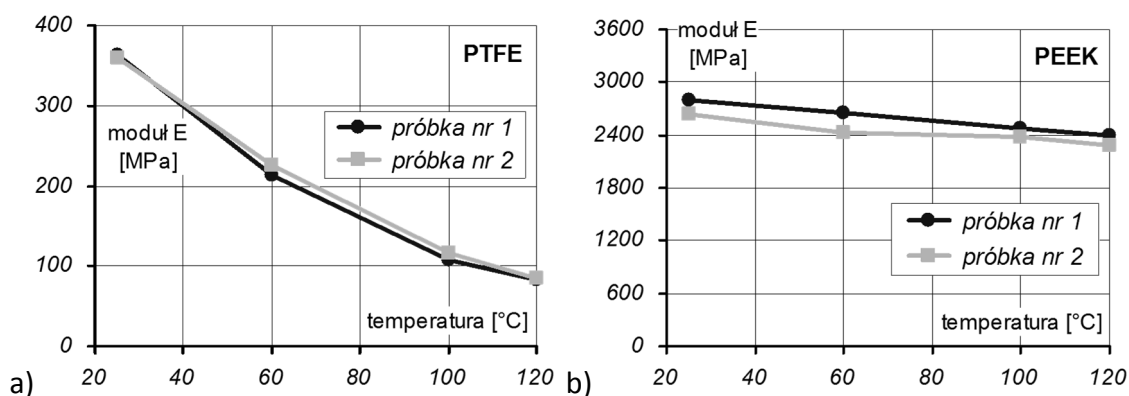


Rys. 4. Wyznaczony rozkład wartości współczynnika przejmowania ciepła hc na ścianach wlotowej i wylotowej segmentów (w połowie wysokości ściany); a) w funkcji prędkości [obr/min], b) w funkcji nacisków średnich [MPa]

3. Opracowywano metodykę oraz przeprowadzono badania doświadczalne kompozytowego pokrycia w celu wyznaczenia wartości parametrów materiałowych niezbędnych do przeprowadzenia wiarygodnych symulacji obliczeniowych. Parametry materiałowe, takie jak moduł sztywności wzdłużnej oraz przewodność cieplna mają

istotny wpływ na przebieg procesów i zjawisk w łożysku. Od wartości tych parametrów zależy kształt szczeliny smarowej oraz ilość ciepła przewodzonego przez segment. Analizy obliczeniowe łożysk z polimerowym pokryciem powierzchni znane z literatury wykorzystywały zazwyczaj jedynie dane katalogowe polimerów, bez uwzględnienia wpływu na nie temperatury oraz obecności warstwy pośredniej używanej do połączenia polimerowej warstwy ślizgowej ze stalowym pokryciem segmentu. Użycie standardowych metod badań nie było możliwe z uwagi na specyficzny wymagany normą kształt próbki. Zaletą opracowanej metodyki jest to, że bazowała na wynikach pomiarów zrealizowanych dla próbek wyciętych z segmentów łożyskowych. W ten sposób określono poszukiwane parametry dla całej kompozytowej warstwy ślizgowej, a nie tylko dla samego polimeru.

- a) Zastępczy moduł sztywności wzdłużnej warstwy określono z wykorzystaniem autorskiej metodyki dla najczęściej stosowanych grup materiałów polimerowych stosowanych jako warstwy ślizgowe łożysk (PTFE i PEEK). Badania (próby ściskania) zrealizowano w zakresie temperatur charakterystycznych dla pracy łożysk hydrodynamicznych. Przykładowe wyniki pomiarów pokazano na Rys. 5. Wskazują one na znaczący wpływ temperatury na zastępczy moduł sztywności wzdłużnej warstwy ślizgowej (rozumianej jako kompozyt polimer/warstwa pośrednia). Wyznaczone wartości są mniejsze niż wartości katalogowe dla niemodyfikowanych polimerów z powodu prawdopodobnego wpływu warstwy pośredniej używanej do połączenia polimeru ze stalową podstawą segmentu.

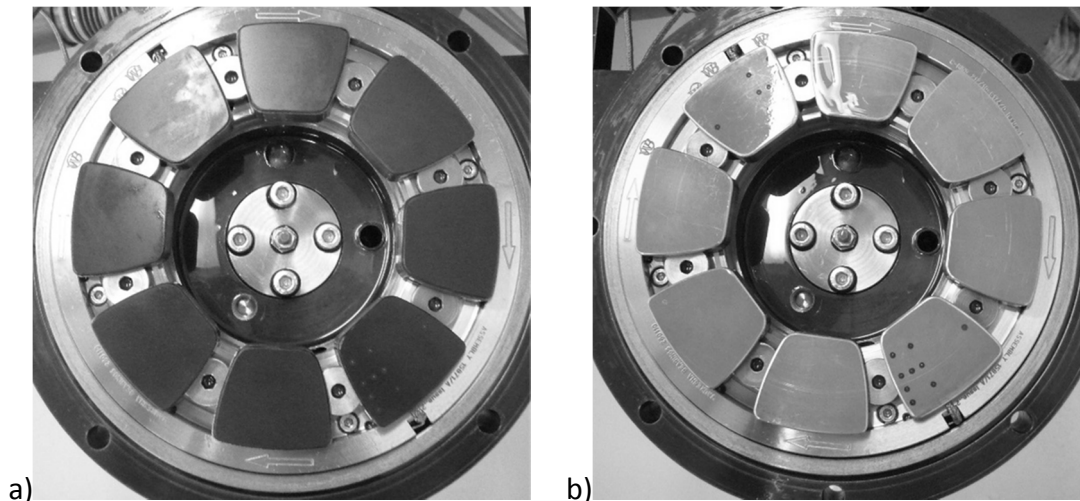


Rys. 5. Wartość zastępczego modułu sztywności wzdłużnej polimerowego pokrycia segmentów łożysk wzdłużnych w funkcji temperatury; a) PTFE, b) kompozyt PEEK napełniony włóknem węglowym i PTFE

- b) Przewodność cieplną warstwy ślizgowej pomierzono z wykorzystaniem oryginalnej metodyki bazującej na pomiarze rozkładu temperatur w próbce w warunkach znanego przepływu ciepła.

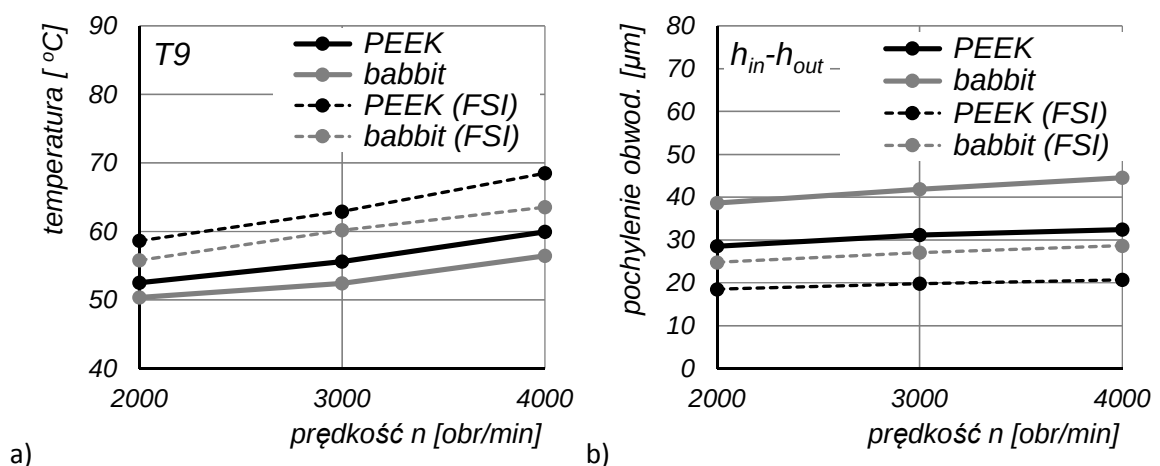
Wyniki pomiarów wykorzystano jako parametry materiałowe pokrycia segmentów w zrealizowanych badaniach teoretycznych łożyska.

4. Zbadano łożyska z pokryciem PEEK oraz stopem łożyskowym w stanach ustalonych działania w celu weryfikacji badań teoretycznych (Rys. 6). W tym celu zmodernizowano istniejące stanowisko badawcze łożysk wzdlużnych SON oraz rozbudowano system diagnostyczny o możliwość pomiaru temperatury tarczy wału. Opracowano autorską metodykę prowadzenia badań.



Rys. 6. Łożyska badawcze; a) z pokryciem PEEK, b) z pokryciem stopem łożyskowym

W czasie badań mierzono wiele parametrów działania łożysk, w tym m.in.: 10 temperatur w 2 segmentach każdego z łożysk, 3 temperatury tarczy wału, moment tarcia w łożysku, grubości filmu oraz temperaturę wylotową oleju z głowicy. Zebrano bogaty materiał badawczy potwierdzający zasadniczo obserwacje oraz wnioski z badań teoretycznych (Rys. 7).

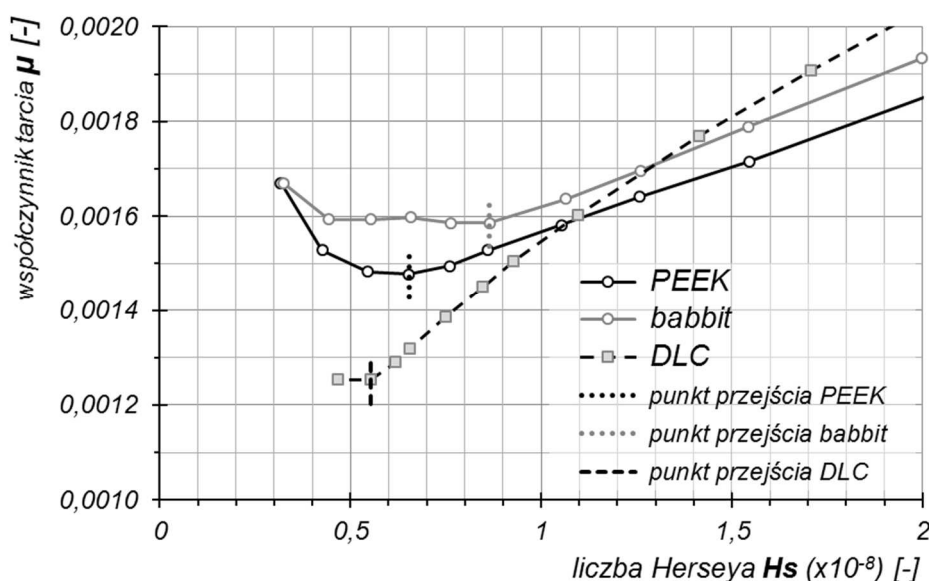


Rys. 7. Porównanie wybranych wyników badań teoretycznych i doświadczalnych łożysk z różnym materiałem pokrycia; a) temperatura wlotowa oleju, b) nachylenie obwodowe segmentu

5. Przeprowadzono badania porównawcze łożysk w stanach przejściowych działania (wybieg) dla różnych skojarzeń materiałowych powierzchni ślizgowych. Badania te stanowią uzupełnienie badań teoretycznych, które zrealizowane zostały jedynie dla

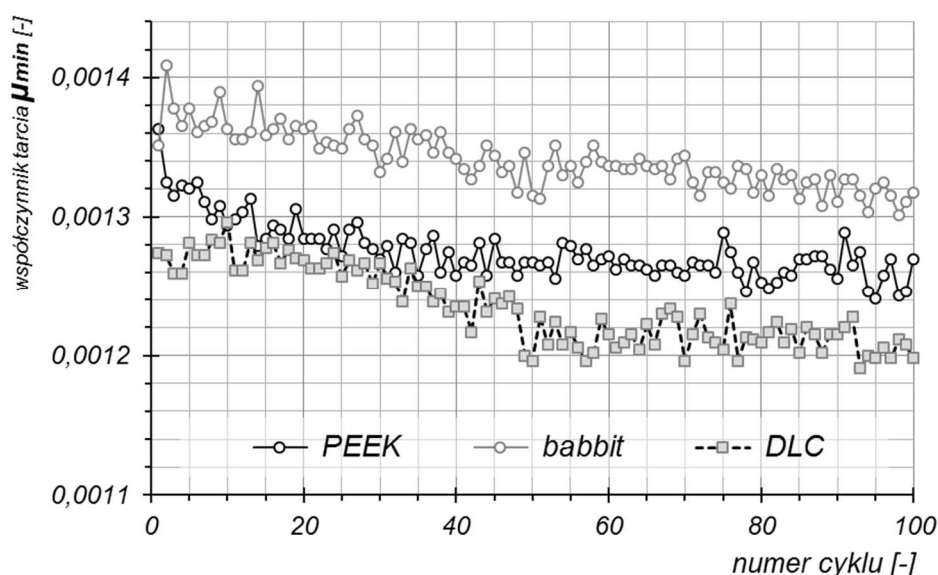
stanów ustalonych działania łożysk. Badaniom poddano trzy skojarzenia materiałowe powierzchni ślizgowych. Dwa pierwsze przypadki dotyczą łożysk współpracujących ze stalową tarczą wału i segmentów pokrytych warstwą ślizgową wykonaną z kompozytu na bazie PEEK i wysokocynowego stopu łożyskowego. Trzecim skojarzeniem materiałowym jest łożysko z segmentami stalowymi (bez pokrycia) współpracujące z tarczą wału pokrytą warstwą DLC. Każde z łożysk charakteryzowało się zbliżonymi cechami geometrycznymi oraz przebadano je w podobnych warunkach wymuszeń. **Zbadano charakterystyki tribologiczne poszczególnych łożysk oraz określono podobieństwa i różnice w ich działaniu w stanach przejściowych.** W tym celu opracowano metodykę przeprowadzenia takich badań oraz zrealizowano je w dwóch różnych testach dla każdego łożyska: próbie dążącej do wyznaczenia punktu przejścia od tarcia płynnego do mieszanego w łożysku (krzywe Herseya-Stribecka) oraz próbach start / stop z pełnym obciążeniem w czasie wybiegu wału (w trakcie 100 cykli).

- a) **Badania doświadczalne krzywych Herseya-Stribecka wykazały, że wśród badanych przypadków łożysko ze skojarzeniem materiałowym DLC / stal jest zdolne do działania w tarcu płynnym przy najmniejszych wartościach liczby Herseya (najmniejszych prędkościach) i charakteryzuje się najmniejszym współczynnikiem tarcia na granicy z tarciem mieszanym.** Porównanie uzyskanych wyników przedstawiono na Rys. 8. Najmniej korzystnymi cechami pod tym względem charakteryzuje się łożysko z klasycznym pokryciem powierzchni ślizgowej stopem łożyskowym. Najmniejsza wartość współczynnika tarcia dla łożyska z pokryciem białym metalem (babbitem) wyniosła 0,00159, dla łożyska z pokryciem PEEK 0,00148, a dla łożyska z segmentami stalowymi współpracującymi z tarczą pokrytą DLC jedynie 0,00125. Świadczy to możliwości uzyskania tarcia płynnego przy zastosowaniu tej odmiany konstrukcyjnej łożysk w najszerszym zakresie wymuszeń.



Rys. 8. Porównanie wyników pomiarów krzywych Herseya-Stribecka łożysk z różnymi skojarzeniami materiałowymi powierzchni ślizgowych

- b) **Wyniki badań łożysk w próbach start / stop (wybiegi pod obciążeniem) wskazują na podobieństwo zjawisk i procesów towarzyszących działaniu łożysk z testowanymi skojarzeniami materiałowymi powierzchni ślizgowych.** Na uwagę zasługuje jednak fakt, że widoczny jest trend stopniowego zmniejszania się wyznaczonej wartości minimalnego współczynnika tarcia w trakcie kolejnych zrealizowanych wybiegów pod obciążeniem (docieranie się powierzchni ślizgowych łożyska). Podobnie jak w przypadku prób do określenia punktu przejścia między tarcie płynnym i mieszanym w łożysku, najmniejsze współczynniki tarcia oszacowano dla pary ślizgowej DLC/stal, największe zaś dla skojarzenia stal/biały metal. Porównanie uzyskanych wyników zestawiono na Rys. 9. Potwierdza to doskonale właściwości tribologiczne pary ciernej DLC/stal w zastosowaniu do działania w tarcu mieszanym we wzdłużnym łożysku hydrodynamicznym. Na podstawie przedstawionego porównania jedynie nieco gorzej sklasyfikować można parę cierną stal/PEEK. Najmniej korzystnymi cechami wśród badanych przypadków w obszarze tarcia mieszanego charakteryzuje się skojarzenie biały metal/stal.



Rys. 9. Porównanie wyników pomiarów minimalnego współczynnika tarcia zmierzonego w próbach start/stop łożysk z różnymi skojarzeniami materiałowymi powierzchni ślizgowych.

Możliwości wykorzystania wyników badań

Uzyskane wyniki badań teoretycznych oraz doświadczalnych są, zdaniem autora, wartościowym źródłem wiedzy do wykorzystania w pracach rozwojowych hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wahliwymi segmentami.

W przypadku prowadzenia obliczeń parametrów łożysk modelami obliczeniowymi bazującymi na rozwiązaniu przepływu oleju w szczelinie smarowej z użyciem równania Reynoldsa przydatna jest udokumentowana wiedza o istotnym wpływie warunków brzegowych modelu na uzyskiwane wyniki symulacji komputerowych. Zainteresowanie tym aspektem wśród wiodących

koncernów z branży łożyskowej potwierdzają także zrealizowane z udziałem autora prace dla Alstom Hydro [E15, E16].

W analizach łożysk z pokryciem polimerowym powierzchni ślizgowej możliwe są do wykorzystania określone w badaniach wartości parametrów materiałowych pokrycia: modułu sztywności wzdłużnej w funkcji temperatury oraz przewodności cieplnej. Ich użyteczność potwierdzają także prace zrealizowane przez autora dla światowych koncernów z branży energetycznej, takich jak Andritz i Alstom [E6, E13, E14]. Dodatkowo wyniki badań doświadczalnych wskazują, że łożyska z pokryciem polimerowym mogą działać z nieco mniejszymi oporami tarcia niż łożyska z pokryciem stopem łożyskowym. Jest to istotne w kontekście nowych i modernizowanych maszyn i urządzeń, którym stawia się coraz surowsze wymogi minimalizowania strat mocy.

Istotną nowością jest możliwość rozszerzenia stosowania nietypowego skojarzenia materiałowego stal/DLC (lub DLC/DLC) na wysoko obciążone łożyska działające blisko zakresu przejścia do tarcia mieszanego. Powłoki DLC stosowano dotychczas w skojarzeniach z tarcie mieszanym w zastosowaniach motoryzacyjnych (np. krzywki rozrządu, łożyska toczne). Przeprowadzone badania łożysk wynikały z prac rozwojowych zrealizowanych przy współpracy z koncernem Schaeffler.

Opracowana i zweryfikowana nowa metodyka prowadzenia analiz teoretycznych łożysk (bazująca na FSI), może zostać zastosowana do badań dowolnej postaci konstrukcyjnej łożyska wzdłużnego, co potwierdzają wyniki analiz.

Przeprowadzone badania doświadczalne łożysk wzdłużnych z różnymi skojarzeniami materiałowymi powierzchni ślizgowych w warunkach tarcia mieszanego pozwalają na wyciągnięcie wniosków, co do skojarzeń materiałowych najkorzystniejszych z uwagi na opory ruchu wężła łożyskowego.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

a) działalność naukowo-badawcza prowadzona przed doktoratem

Przygotowanie do działalności naukowo-badawczej rozpocząłem już w roku 2000 podczas 3 roku studiów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. W tym czasie, ówczesny Kierownik Katedry Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, prof. A. Neyman zaprosił mnie do współpracy i uczestnictwa w pracach Katedry. Początkowo pod opieką dr inż. L. Dąbrowskiego zdobywałem niezbędne umiejętności oraz doświadczenie związane z wykonywaniem analiz obliczeniowych z wykorzystaniem programów Metody Elementów Skończonych (MES). W ten sposób zdobyłem pierwsze szlify oraz praktyczne umiejętności bardzo przydatne w dalszej pracy naukowej. W kolejnym roku studiów wystąpiłem do Dziekana Wydziału Mechanicznego o wyrażenie zgody na indywidualny tok studiów. Zgodę taką otrzymałem, dzięki czemu program zajęć moich dalszych studiów został dostosowany do przyszłych potrzeb i wymogów pracy naukowej. Oprócz dalszego zdobywania umiejętności analiz numerycznych zostałem zaangażowany do wykonywania pierwszych badań teoretycznych hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych przy wykorzystaniu oryginalnego oprogramowania będącego w posiadaniu Katedry (modelu TEHD łożyska). Uczestniczyłem również w badaniach możliwości oraz tworzeniu algorytmu pozwalającego na zaawansowaną diagnostykę łożysk hydrodynamicznych przy wykorzystaniu pomiaru temperatury segmentów.

Z inicjatywy mojego opiekuna naukowego dr inż. L. Dąbrowskiego zostałem również włączony w trakcie trwania studiów do zespołu realizującego projekt mający na celu opracowanie algorytmu interpretującego pomierzone deformacje rurociągu przesyłowego ropy lub gazu na wartości naprężeń w ścianie rurociągu. Projekt ten został zakończony wykonaniem odpowiedniego algorytmu obliczeniowego oraz wdrożeniem go w Centrum Diagnostyki Rurociągów i Aparatury (CDRiA) w Gdańsku. W wyniku kooperacji z tym przedsiębiorstwem zrealizowałem również swoją pracę dyplomową magisterską pt. *„Analiza konstrukcyjna i projekt modernizacji przyrządu do pomiaru wewnętrznej geometrii rurociągu”*. Praca ta została wyróżniona przez prezesa Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników w Polsce (SIMP) w III Edycji Ogólnopolskiego Konkursu o Dyplom i Nagrodę Prezesa, na najlepszą pracę dyplomową w dziedzinie mechaniki (2002). Za ukończenie studiów z oceną celującą otrzymałem również Złotą Odznakę absolwenta przyznaną przez Rektora Politechniki Gdańskiej.

Po zakończeniu studiów rozpocząłem pracę w charakterze asystenta w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn w zespole zajmującym się inżynierią łożyskowania. Równocześnie także zacząłem brać udział w zajęciach Środowiskowego Studium Doktoranckiego przy Politechnice Gdańskiej. Od samego początku mojej pracy naukowej związany byłem głównie z badaniami hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych, zarówno teoretycznymi jak i doświadczalnymi.

Równolegle z wykonywaną pracą naukową rozpocząłem także prowadzenie moich pierwszych zajęć dydaktycznych ze studentami z przedmiotów „Podstawy Konstrukcji Maszyn” oraz „Grafika Inżynierska”.

W kolejnych latach zacząłem uczestniczyć w konferencjach naukowych i wygłaszać referaty naukowe. Uczestniczyłem także w projektach badawczo-rozwojowych i pracach eksperckich oraz rozwojowych zlecanych przez przemysł. Wykonywane zadania związane były w dużej części z inżynierią łożyskowania.

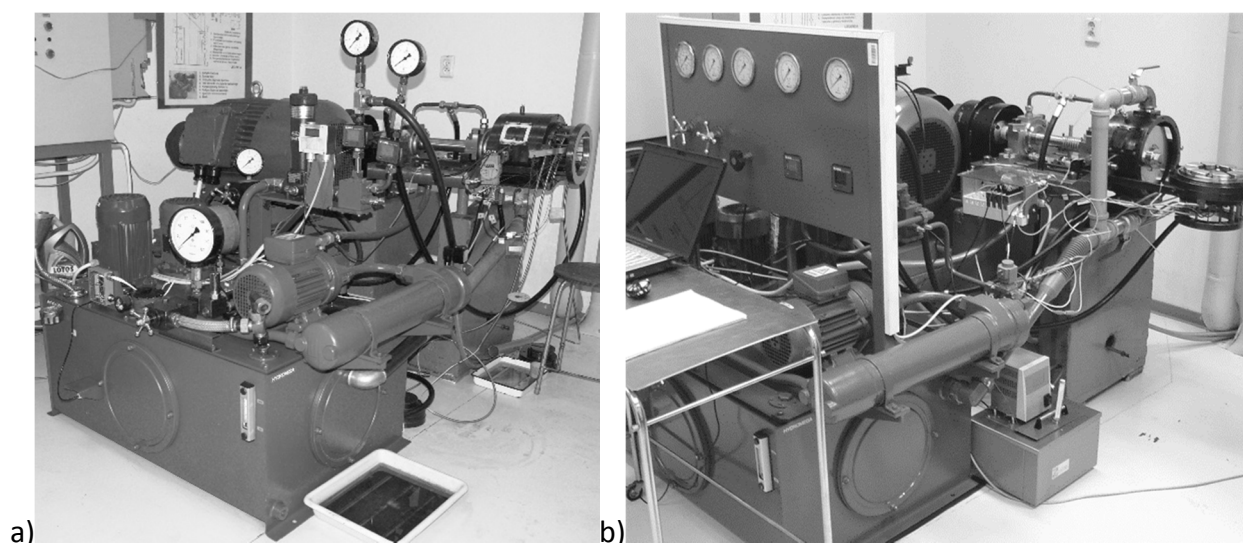
W trakcie realizacji prac rozwojowych i badawczych w Katedrze byłem zazwyczaj członkiem zespołu odpowiedzialnym za analizę teoretyczną działania modernizowanych węzłów łożyskowych, najczęściej dużych elektrowni wodnych. Moje zainteresowanie zwróciły szczególnie problemy związane z analizą teoretyczną łożysk hydrodynamicznych w różnych stanach działania oraz weryfikacją doświadczalną uzyskanych wyników. W 2004 roku otworzyłem przewód doktorski pt. *„Modelowanie hydrostatycznego wspomaganie w hydrodynamicznym łożysku wzdłużnym”*, którego promotorem został prof. A. Neyman. W ramach realizacji rozprawy doktorskiej podjąłem pracę naukową nad interesującą mnie tematyką. W zakresie zrealizowanej pracy wykonałem analizy obliczeniowe hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wahlowymi segmentami działających w reżimie hydrostatycznym. W tym celu zdobyłem umiejętność prowadzenia symulacji z wykorzystaniem Obliczeniowej Mechaniki Płynów (CFD). Uzyskane wyniki analiz zostały pozytywnie zweryfikowane doświadczalnie na stanowisku badawczym AGH w Krakowie. Praca doktorska została zakończona w 2005 roku po publicznej obronie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. Uzyskane w trakcie realizacji rozprawy doświadczenia naukowe oraz organizacyjne były ważnym etapem, który ukształtował moje późniejsze działania naukowe.

b) działalność naukowo-badawcza prowadzona po doktoracie

Po zakończeniu procedury związanej z rozprawą doktorską, na początku 2006 roku zostałem zatrudniony w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn na stanowisku adiunkta. W dalszym ciągu kontynuowałem rozpoczęte wcześniej badania związane z problemami analiz teoretycznych łożysk hydrodynamicznych.

Jako jeden z głównych wykonawców brałem udział w projekcie badawczym KBN przyznanym Politechnice Gdańskiej pt. *„Badanie zjawisk w przestrzeni międzyklockowej i ich wpływu na właściwości łożyska”* (kier. prof. M. Wasilczuk, grant zakończony w 2007) [G5]. Dzięki uczestnictwu w tym projekcie miałem okazję osobistej realizacji badań doświadczalnych hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych działających w reżimie hydrodynamicznym na unikatowym w skali kraju stanowisku badawczym SON, będącym w posiadaniu Katedry. Badania te dotyczyły skuteczności oraz efektywności działania różnych systemów zasilania łożysk segmentowych w olej (smarowanie zanurzeniowe, natryskowe i przy użyciu rowka w powierzchni ślizgowej tzw. LEG). Była to doskonała okazja do oceny ograniczeń samego stanowiska, które skonstruowano i wdrożono do eksploatacji w latach 90 dwudziestego wieku a także problemów badań samych łożysk. Brałem również udział w dyskusjach dotyczących możliwych sposobów prowadzenia analiz komputerowych łożysk z różnymi systemami zasilania. Wyniki prac zostały przedstawione na krajowych i zagranicznych konferencjach naukowych oraz opublikowane w czasopiśmie [B13, B18, B26].

Zdobyte doświadczenia badawcze upewniły mnie w przekonaniu o konieczności modernizacji posiadanego stanowiska SON w celu zbliżenia jego możliwości badawczych do standardów światowych. Dodatkowo, kontakty z naukowcami i inżynierami z branży inżynierii łożyskowania (przy okazji uczestnictwa w konferencjach i realizacji różnych prac rozwojowych dla przemysłu) oraz doniesienia literaturowe skłoniły mnie do rozpoczęcia badań własnych nad łożyskami z polimerową warstwą ślizgową. W roku 2007 uzyskałem finansowanie projektu badawczego, którego byłem kierownikiem pt. „*Badania hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z polimerową warstwą ślizgową*” przyznane przez KBN (zakończony w 2010) [G2]. Dzięki uzyskaniu finansowania zrealizowałem kompleksową modernizację stanowiska badawczego łożysk wzdłużnych SON. W jej wyniku zwiększono znacznie możliwości badawcze stanowiska i wyeliminowano zaobserwowane wcześniej wady poprzez m.in. wprowadzenie komputerowej regulacji obciążenia łożysk, zrealizowanie pomiaru temperatur w wirującej tarczy wału stanowiska czy też zwiększenie liczby dostępnych do pomiaru i akwizycji danych torów pomiarowych. Wprowadzono również zmiany w układzie odprowadzenia oleju z głowicy badawczej, znacząco poprawiono ergonomię obsługi stanowiska czy też skonstruowano nową przekładnię pasową w układzie napędowym stanowiska (Rys. 10). Z wykorzystaniem zmodernizowanego stanowiska przeprowadziłem obszerne badania doświadczalne łożyska z warstwą ślizgową wykonaną z polimeru PEEK. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych wykorzystałem do weryfikacji opracowanego modelu teoretycznego łożyska. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w formie referatów oraz publikacji [A1 – A3, A11, A12].



Rys. 10. Stanowisko badawcze łożysk wzdłużnych SON Politechniki Gdańskiej;
a) przed modernizacją, b) po modernizacji

Wspólnie z prof. M. Wasilczukiem rozpocząłem także równoległą współpracę naukową z M. Fillon'em, dyrektorem naukowym laboratorium instytutu Pprime w Poitiers we Francji. Jest on światowym autorytetem w dziedzinie badań doświadczalnych i teoretycznych łożysk hydrodynamicznych. Wspólnie prowadzone badania teoretyczne łożysk wzdłużnych zaowocowały szeregiem publikacji oraz prezentacji na konferencjach naukowych [A6, A8, B4, B12, B14, B20, B25]. Ponadto, w ramach współpracy zostałem zaproszony w charakterze

Profesora Wizytującego (*visiting professor*) na miesięczny pobyt w Université de Poitiers, który odbyłem w marcu 2015 r. W ramach tego pobytu uczestniczyłem m.in. w badaniach doświadczalnych łożyska wzdłużnego, które działało w reżimie hybrydowym (równoczesne działanie hydrostatyczne oraz hydrodynamiczne). Badania zostały przeprowadzone na oryginalnym stanowisku badawczym łożysk wzdłużnych będących w posiadaniu instytutu Pprime. Kontynuuję rozpoczętą w 2006 r. współpracę do dnia dzisiejszego.

Istotnym elementem mojej działalności naukowo-badawczej są także prace rozwojowe prowadzone we współpracy i na zlecenie koncernów z branży energetyki wodnej i łożyskowej, w tym dla VATEch, Alstom, Andritz, Waukesha Bearings czy Schaeffler. Realizowane projekty we wszystkich przypadkach dotyczyły różnych aspektów działania hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych. W ich zakresie prowadziłem badania doświadczalne łożysk a także analizy teoretyczne. Wymiernym efektem tych prac są publikacje naukowe, referaty oraz ekspertyzy [A4, B5, B16, B35, E2-E6, E9-E11, E13-E16, E18].

Szczegółowy spis dorobku uzyskanego po doktoracie zamieszczono w załączniku 4 dołączonym do wniosku.

c) pozostała działalność naukowo-badawcza

W trakcie swojej dotychczasowej działalności naukowo-badawczej brałem także udział w charakterze głównego wykonawcy w wielu zadaniach (w tym w projektach finansowanych przez KBN i NCBiR), w których przedmiotem zainteresowania były hydrodynamiczne łożyska poprzeczne smarowane wodą.

W projekcie pt. „Charakterystyki pracy ekologicznych łożysk foliowych poprzecznych smarowanych wodą z uwzględnieniem wpływu przytarcia powłoki łożyskowej” (kierownik dr inż. P. Hryniewicz z Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku) m.in. opracowałem oryginalny, parametryczny, przestrzenny model obliczeniowy części strukturalnej łożyska foliowego poprzecznego. Model ten uwzględniał obecność szeregu folii falistych ukształtowanych w celu uzyskania odpowiedniej sztywności podparcia oraz folię ślizgową. Oddziaływaniu pomiędzy elementami łożyska towarzyszyło zjawisko tarcia. Model ten, w połączeniu z częścią przepływową, w której rozwiązywano równanie Reynoldsa został wykorzystany do badań symulacyjnych. Celem tych badań było określenie postaci konstrukcyjnej prototypu łożyska oraz dokładnej jego geometrii, która zapewni uzyskanie odpowiednich warunków jego działania, tj. nośności przy zachowaniu możliwie największego marginesu bezpieczeństwa. Uzyskane wyniki symulacji zostały wykorzystane przy budowie prototypów łożysk, które poddane zostały weryfikacji doświadczalnej na stanowisku badawczym Politechniki Gdańskiej. Wyniki tych badań zostały opublikowane oraz zaprezentowane na konferencjach naukowych [B10, B11, B19, B23, B29, B31-B33].

Uczestniczyłem także w opracowaniu modelu obliczeniowego łożyska poprzecznego smarowanego wodą pozwalającego na uwzględnienie lokalnych deformacji panewki łożyskowej (w kształcie tulei), która wykonana była z materiału o zwiększonej podatności w porównaniu do łożyska sztywnego. Model ten został wykorzystany do badań teoretycznych zjawisk

elastohydrodynamicznych oraz ukosowania wału towarzyszących działaniu łożysk smarowanych wodą. Uzyskane wyniki zostały opisane w pracach [B9, B27].

W projekcie pt. „*Nowe ekologiczne łożysko foliowe smarowane wodą – metodyka projektowania i badania doświadczalne prototypów*” (kierownik dr inż. A. Olszewski) zrealizowałem nowatorski sposób podejścia do analizy obliczeniowej łożyska z wykorzystaniem metody FSI. Opracowałem przestrzenny model obliczeniowy poprzecznego łożyska wodnego uwzględniającego film wodny oraz czop wału i panewkę łożyska. Zaproponowany model pozwalał na równoczesne analizowanie zjawisk związanych z przepływem wody w filmie i sprężystością elementów łożyska oraz ich wzajemnej interakcji. W ten sposób możliwe było uwzględnienie w analizie komputerowej odkształcalności panewki łożyskowej i jej wpływu na charakterystyki łożyska. Przeprowadziłem szereg symulacji komputerowych dla różnych wartości wymuszeń działających na łożysko oraz dla różnych parametrów konstrukcyjnych i materiałowych łożyska (luzu czy też parametrów materiałowych panewki). Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie prototypu łożyska poprzecznego o polepszonych cechach eksploatacyjnych, które zostały potwierdzone w badaniach stanowiskowych. Wyniki zostały zaprezentowane w formie publikacji oraz referatów konferencyjnych [B2, B7, B8].

Jako główny wykonawca uczestniczyłem również w projekcie badawczym KBN pt. „*Badania teoretyczne i doświadczalne wielopowierzchniowych łożysk hydrodynamicznych podpartych na czaszy kulistej*” (kierownik dr inż. A. Olszewski). W ramach realizacji projektu opracowałem parametryczny model komputerowy systemu podparcia łożyska poprzecznego, który składa się z obudowy z gniazdem kulistym oraz współpracującej z nią oprawy łożyskowej z zewnętrzną powierzchnią sferyczną. Z wykorzystaniem zbudowanego modelu przeprowadziłem badania teoretyczne mające na celu określenie wpływu ukosowania czopa oraz określenie warunków niezbędnych do uzyskania samonastawności eksploatacyjnej dla różnych rozwiązań postaci konstrukcyjnych wahliwego podparcia. Model obliczeniowy został poddany weryfikacji doświadczalnej na stanowisku badawczym łożysk poprzecznych Politechniki Gdańskiej i opisany w pracach [B22, B24, B28, B30].

Zebrane doświadczenia w zakresie badań teoretycznych łożysk hydrodynamicznych różnych odmian konstrukcyjnych oraz działających z różnym środkiem smarowym, będę miał okazję wykorzystać w badaniach planowanych do realizacji w dwóch projektach badawczych, które niedawno uzyskały finansowanie z NCN w konkursie OPUS12 rozstrzygniętym w maju 2017. Jako jeden z głównych wykonawców będę odpowiedzialny za część badań teoretycznych m.in. łożysk działających z wykorzystaniem lewitacji akustycznej oraz wodnych łożysk hydrodynamicznych działających w niekorzystnych warunkach pracy.

d) zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne

W trakcie swojej dotychczasowej kariery zawodowej w Politechnice Gdańskiej miałem okazję uczestniczyć w szeregu prac o charakterze użytkowym. Brałem czynny udział we współpracy z firmami jako członek zespołu i współautor w realizacji zadań przemysłowych. Wymiernym ich efektem jest realizacja 15 wdrożeń. Wykonane przeze mnie prace dotyczyły zarówno inżynierii łożyskowania (w szczególności hydrodynamicznych łożysk wzdlużnych) jak również zagadnień związanych z projektowaniem oraz eksploatacją maszyn oraz różnych elementów mechanicznych.

Najważniejszych zrealizowanych osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych i technologicznych zrealizowane po uzyskaniu stopnia doktora:

1. Opracowałem projekt modernizacji hydrodynamicznego łożyska wzdlużnego Elektrowni Wodnej (EW) Trzyczyn (2013). W zakresie prac projektowych znajdowała się m.in. ocena stanu elementów łożyska po okresie długoletniej eksploatacji, propozycja zmiany rozwiązania osadzenia lustra tarczy ślizgowej, zmiana konstrukcji podparcia segmentów, wprowadzenie modyfikacji ułatwiających montaż oraz osiowanie łożyska oraz regeneracja wszystkich elementów zespołu łożyska nośnego, które nosiły ślady eksploatacji. Opracowałem kompleksowy projekt modernizacji węzła łożyskowego, wykonałem stosowną dokumentację techniczną. Praca została wykonana dla Zakładów Remontowych Energetyki (ZRE) w Gdańsku oraz wdrożona w EW Trzyczyn [W2].
2. Uczestniczyłem w modernizacjach hydrodynamicznych łożysk nośnych hydroturbin dużych elektrowni wodnych. Prace te miały za zadanie zwiększenie stopnia bezpiecznej eksploatacji łożyska, zwykle poprzez wprowadzenie modyfikacji konstrukcji segmentów łożyskowych oraz układów ich podparcia, a także powiększenie możliwości diagnostycznych. W zrealizowanych pracach, oprócz uczestnictwa w analizie możliwości wprowadzenia zmian konstrukcji łożysk, wykonałem dokumentację projektową [W1, W3].
3. Brałem udział jako współautor projektów we wdrożeniach hydrodynamicznych łożysk wzdlużnych ze specjalną konstrukcją podparcia. Opracowane i wdrożone rozwiązania konstrukcyjne podparcia łożysk wzdlużnych zapewniały korzystniejsze rozłożenie obciążeń przypadających na poszczególne segmenty łożyska. W zakresie zrealizowanych prac prowadziłem analizy teoretyczne możliwych rozwiązań oraz uczestniczyłem w opracowaniu dokumentacji projektowej [W4, W6].
4. Jako członek zespołu jestem również współautorem kilku wdrożeń o charakterze konstrukcyjnym. Do najciekawszych z nich zaliczyć należy projekty związane z przebudową oraz modernizacją platform wiertniczych oraz systemów pomocniczych zatłaczania ropy i gazu wykonane na zlecenie Lotos Petrobaltic S.A. (2010-2017) [W7, W9-W12, W14], kierowanie zespołem realizującym analizy komputerowe związane z

wdrożeniem pierwszego polskiego wiatrakowca [W8] oraz projekt zmian konstrukcyjnych młyna rurowego cementu [W13].

Wybrane wdrożenia związane z łożyskami hydrodynamicznymi (po uzyskaniu stopnia doktora, w odwróconym porządku chronologicznym):

- W1. Wasilczuk M., **Wodtke M.** (50%): Projekt przystosowania segmentów łożyska nośnego do zainstalowania dodatkowych czujników pomiaru temperatury w ESP Porąbka-Żar. Praca wykonana na zamówienie PGE Energia Odnawialna S.A., 2014. Praca wdrożona.
- W2. **Wodtke M.** (100%): Projekt Modernizacji Łożyska Nośnego EW Tryszczyn. Praca wykonana na zamówienie ZRE Gdańsk, 2013. Praca wdrożona w EW Tryszczyn.
- W3. Wasilczuk M., Dąbrowski L., **Wodtke M.** (25%), Rotta G.: Projekt Modernizacji Łożyska Nośnego Hydrozespołu HZ-3 ESP Żydowo. Praca wykonana na zamówienie Elektrownie Szczytowo-Pompowe, 2011. Praca wdrożona w EW Żydowo.
- W4. Olszewski A., **Wodtke M.** (50%): Projekt i wdrożenie wzdłużnego łożyska segmentowego z podatną płytą podpierającą. Praca wykonana na zlecenie SIEMENS, 2009. Praca wdrożona w turbinie gazowej.
- W5. Olszewski A., **Wodtke M.** (50%): Dobór wcisku tulei głowy i stopy korbowodu pompy N-C552. Praca wykonana na zlecenie PKN Orlen S.A., 2008. Praca wdrożona.
- W6. Olszewski A., Olszewski O., **Wodtke M.** (30%): Projekt hydrodynamicznego łożyska wzdłużnego z dzieloną płytą podporową oraz mechanizmem wyrównywania obciążeń na poszczególne segmenty do sprężarki LINDE. Praca wykonana na zamówienie Universal Turbomachinery Equipment (UTE), 2006. Praca wdrożona w Grupa Azoty S.A.

Pełną listę najważniejszych zrealizowanych osiągnięć zamieszczono w załączniku 4.

e) udzielone patenty i zastrzeżenia wzorów użytkowych

Jestem współautorem **1** patentu oraz **1** wzoru użytkowego. Oba zgłoszenia uzyskały ochronę UP RP oraz zostały wdrożone.

Wykaz patentów oraz wzorów użytkowych w odwróconym porządku chronologicznym po uzyskaniu stopnia doktora (w nawiasie podano udział procentowy autora)

- P1. Olszewski A., **Wodtke M.** (25%), Wasilczuk M., Dąbrowski L.: Urządzenie do pomiaru modułu sztywności, zwłaszcza kompozytowych warstw ślizgowych łożysk hydrodynamicznych. Zgłoszenie patentowe P393204, 2010, **patent wdrożony**.
- P2. Romanowski P., Grymek S., **Wodtke M.** (20%), Stankiewicz C., Sierszeń W.: Uchwyt Kości Skroniowej. Wzór użytkowy nr 65173 (publikacja WUP 30.11.2010), **wzór użytkowy wdrożony**.

f) sumaryczny *impact factor* (IF) według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania:

Impact factor (IF) = **8,260**

W sumie jestem współautorem **8** publikacji [**A3-A9, B19**] w czasopiśmie naukowych posiadających współczynnik wpływu Impact Factor (IF), które znajdują się w bazie JCR (część A wykazu czasopism naukowych wg MNiSW).

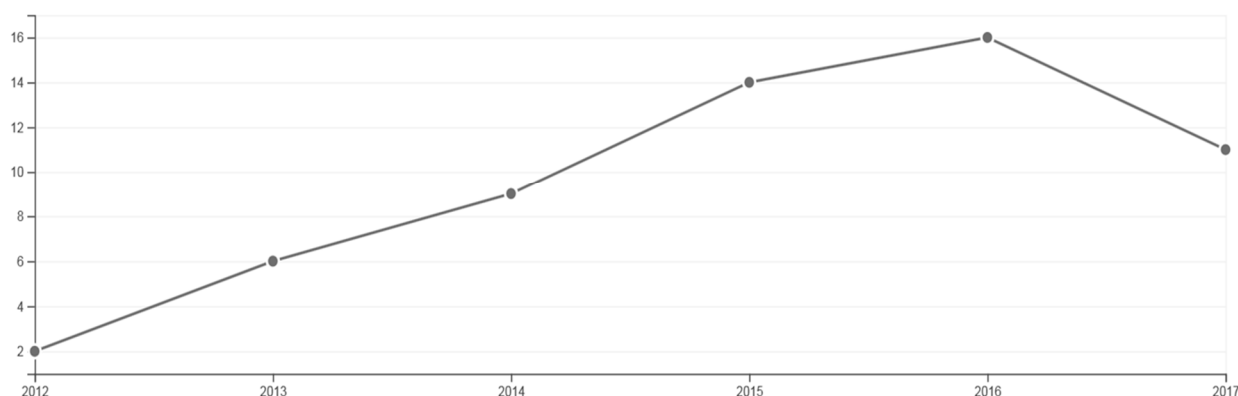
g) liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science:

stan na dzień 26.06.2017

Web of Science: 58

Google Scholar: 89

Sum of Times Cited per Year



Rys. 11. Liczba cytowań wg bazy Web of Science na dzień 26.06.2017

h) indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS):**Indeks Hirscha według bazy Web of Science: 4**

według Google Scholar: 5

i) kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach

Po uzyskaniu stopnia doktora brałem udział w 5 projektach badawczych, z czego w 1 przypadku byłem kierownikiem projektu, a w pozostałych głównym wykonawcą. Wszystkie zrealizowane projekty były ściśle związane z tematyką łożysk hydrodynamicznych, która jest główną dziedziną moich zainteresowań naukowych. Wymienione poniżej pozycje [G2, G5] dotyczyły problematyki hydrodynamicznych łożysk wzdlużnych. Pozostałe projekty poświęcone były badaniom łożysk hydrodynamicznych poprzecznych, w tym smarowanych wodą [G1, G4] oraz podpartych na czaszy kulistej [G3] (w celu kompensacji nierównoległości wału względem osi panewki).

Udział oraz kierowanie projektami badawczymi po uzyskaniu stopnia doktora

- G1. *Nowe ekologiczne łożysko foliowe smarowane wodą – metodyka projektowania i badania doświadczalne prototypów.* Projekt badawczy rozwojowy NR03-0036-10/2010 finansowany przez NCBiR, 2010-2013, główny wykonawca.
- G2. *Badania hydrodynamicznych łożysk wzdlużnych z polimerową warstwą ślizgową.* Projekt badawczy KBN nr N502 4579 33, 2007-2010, **kierownik**.
- G3. *Badania teoretyczne i doświadczalne wielopowierzchniowych łożysk hydrodynamicznych podpartych na czaszy kulistej.* Projekt badawczy KBN N502 040 32/3013, 2007-2009, główny wykonawca.
- G4. *Charakterystyki pracy ekologicznych łożysk foliowych poprzecznych smarowanych wodą z uwzględnieniem wpływu przytarcia powłoki łożyskowej.* Projekt badawczy KBN 1683/T007/2005/29, 2007-2009, główny wykonawca.
- G5. *Badanie zjawisk w przestrzeni międzyklockowej i ich wpływu na właściwości łożyska.* Projekt badawczy KBN nr 4 T07C 017 29, 2005 – 2007, wykonawca.

Poza projektami już zakończonymi, jestem także jednym z głównych wykonawców w dwóch projektach badawczych finansowanych przez NCN, które uzyskały finansowanie w czerwcu 2017 r. w ramach programu OPUS12:

- *Studia nad wykorzystaniem lewitacji akustycznej wywołanej efektem Poissona do bezstykowego transportu lekkich obiektów* (kierownik prof. dr hab. inż. M. Wasilczuk).
- *Badania skojarzeń ślizgowych smarowanych wodą w wybranych niekorzystnych warunkach pracy* (kierownik dr hab. inż. W. Litwin).

j) międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową

- a) Pierwsza nagroda „Best Poster Award” przyznana przez Francuską Sekcję American Society of Mechanical Engineers (ASME) za pracę pt. „ Compliance Tests of the Polymer Layers Used as Hydrodynamic Bearing Coatings” zaprezentowaną na 14th EDF-Pprime Workshop, Poitiers, Francja.
- b) Nagroda zespołowa Rektora Politechniki Gdańskiej za rozwój laboratorium Wydziału Mechanicznego dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn (2008).
- c) Uzyskałem wyróżnienie w III Edycji Ogólnopolskiego Konkursu o Dyplom i Nagrodę Prezesa SIMP, na najlepszą pracę dyplomową w dziedzinie mechaniki (2002).

k) wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych

Razem wygłosiłem **8** referatów na konferencjach naukowych, w tym **4** referaty na zagranicznych konferencjach międzynarodowych (USA, Francja, Finlandia). Uczestniczyłem w najważniejszych polskich konferencjach związanych z tematyką hydrodynamicznych łożysk ślizgowych i szerzej pojętej tribologii. Czynnie brałem udział między innymi w konferencjach Inżynieria Łożyskowania oraz Jesiennych Szkołach Tribologicznych. Ponadto regularnie od 2006 roku (w sumie czterokrotnie) biorę aktywny udział w EDF/Pprime Workshop w Poitiers (Francja) jako uczestnik konferencji i współautor prezentowanych prac. Ponadto byłem uczestnikiem wielu warsztatów tribologicznych i seminariów.

Zagraniczne konferencje międzynarodowe o zasięgu światowym - wystąpienie z referatem
(po uzyskaniu stopnia doktora):

1. **Wodtke M.**, Wasilczuk M.: Analysis of a Hydrodynamic Thrust Bearing Using Multi-Physical Modeling Technique. 71st Annual Meeting and Exhibition, 16-19 Maj, 2016, Las Vegas, **USA**.
2. **Wodtke M.**: Experimental comparison of hydrodynamic thrust bearings with different pad surface materials. 14th EDF/Pprime Workshop: “Influence of design and materials on journal and thrust bearing performance”, 8-9 Październik 2015, Futuroscope, **Francja**.
3. **Wodtke M.**, Schubert A., Fillon M., Wasilczuk M., Pajęczkowski P.: Large Hydrodynamic Thrust Bearing - Comparison of the Theoretical Prediction and Measurements. 9th EDF/Pprime (LMS) Poitiers Workshop: “Improvement of Bearing Performance and Evaluation of Adverse Conditions”, 7- 8 Październik 2010, Futuroscope, **Francja**.
4. **Wodtke M.**, Olszewski A., Hryniewicz P.: Water lubricated foil bearing - experimental and numerical examination. NordTrib 2008, 13th Nordic Symposium on Tribology, Tampere, 10-13 Czerwiec 2008, **Finlandia**.

6. Dorobek dydaktyczny i popularyzatorski oraz informacja o współpracy międzynarodowej habilitanta

a) uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych

Uczestniczyłem w programie ERASMUS+ w ramach którego odbyłem tygodniową wizytę w **National Technical University of Athens, Ateny, Grecja**. W ramach pobytu wygłosiłem serię wykładów dla studentów 5 roku oraz doktorantów wydziału inżynierii morskiej nt. projektowania, badań, diagnostyki i eksploatacji hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych. Wyjazd finansowany przez fundusz UE, 5 dni, czerwiec 2016.

b) udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych

Byłem członkiem komitetu organizacyjnego następujących ogólnopolskich konferencji oraz warsztatów naukowych:

1. Członek komitetu organizacyjnego ogólnopolskiej konferencji „XXXV Jesienna Szkoła Tribologiczna”, Gdańsk 19-22 Wrzesień 2016.
2. Współorganizator i uczestnik „Warsztatów Tribologicznych: Projektowanie i Eksploatacja Łożysk Ślizgowych”, Gdańsk 22 kwiecień 2010.

c) kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami

W trakcie swojej działalności badawczej w Politechnice Gdańskiej kierowałem 6 pracami badawczymi zleconymi przez przedsiębiorców i firmy zewnętrzne (Alstom, Schaeffler).

Od 2013 roku byłem zaangażowany w rozwój polskiego wiatrakowca (w ramach NOVA Sp. z o.o.). Kierowałem zespołem odpowiedzialnym za analizy obliczeniowe elementów struktury jednostki, w tym ramy i zawieszenia.

Od 2010 roku uczestniczę w szeregu prac związanych z ekspertyzami oraz przebudową platform wiertniczych będących w posiadaniu Lotos Petrobaltic. W ramach prowadzonych prac byłem odpowiedzialny za analizy obliczeniowe elementów platformy oraz kierowałem zespołem wykonującym takie analizy.

d) członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych

Członek Polskiego Towarzystwa Tribologicznego.

e) osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki

1. Jestem autorem przedmiotu *Podstawy Budowy Maszyn* realizowanego od 2009 roku na międzywydziałowym kierunku Transport w Politechnice Gdańskiej. Specjalnie na potrzeby przedmiotu opracowałem autorski program obejmujący treści wykładowe oraz program ćwiczeń.
2. Jestem autorem materiałów udostępnianych studentom do zajęć laboratorium komputerowego wykorzystującego programy CAD do opracowywania dokumentacji technicznej wyrobów (modele komputerowe, rysunki płaskie wykonawcze oraz złożeniowe ćwiczonych zespołów i elementów). Ponadto, w przypadku każdego rodzaju zajęć dydaktycznych prowadzonych przeze mnie, studenci otrzymywali dodatkowe materiały pozwalające na sprawdzenie swojej wiedzy m.in. opracowałem zestawy zadań rachunkowych do samodzielnej pracy.
3. Biorę aktywny udział w rozwoju laboratorium dydaktycznego Katedry Konstrukcji Maszyn i Pojazdów. Jestem współtwórcą ćwiczenia laboratoryjnego związanego z badaniami doświadczalnymi charakterystyk sprężyn. Uczestniczyłem w opracowaniu projektu oraz instrukcji do ćwiczenia. W uznaniu wkładu w rozwój laboratorium otrzymałem nagrodę zespołową Rektora Politechniki Gdańskiej trzeciego stopnia w 2008 roku.
4. Dotychczas prowadziłem następujące zajęcia dydaktyczne:

w języku polskim:

- a. *Podstawy Budowy Maszyn* – wykład dla kierunku Transport.
- b. *Podstawy Budowy Maszyn* – ćwiczenia dla kierunku Transport.
- c. *Podstawy Konstrukcji Maszyn* – wykład dla kierunku Mechatronika (semestr w zastępstwie).
- d. *Podstawy Konstrukcji Maszyn* – ćwiczenia dla kierunku Mechatronika, Mechanika i Budowa Maszyn oraz Podstawy Budowy Maszyn.
- e. *Podstawy Konstrukcji Maszyn* – laboratorium komputerowe CAD i maszynowe dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, Mechatronika, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji oraz Inżynieria Mechaniczno – Medyczna.
- f. *Grafika Inżynierska* – dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn.
- g. *Modelowanie w Projektowaniu* – laboratorium komputerowe.
- h. *Komputerowe modelowanie 3D* – laboratorium komputerowe.

w języku angielskim:

- i. *Modeling in Machine Design* – laboratorium komputerowe dla kierunku International Design Engineer.

f) opieka naukowa nad studentami

1. Jestem promotorem **9** prac dyplomowych (**6** magisterskich oraz **3** inżynierskich). Kolejne **3** prace dyplomowe magisterskie, których jestem promotorem, są w trakcie realizacji. Jestem także autorem **9** recenzji prac dyplomowych.
2. Zdecydowana większość prowadzonych przeze mnie prac dyplomowych powstała w odpowiedzi na zainteresowanie przemysłowe. Studenci pod moją opieką mieli okazję do rozwiązania postawionego przed nimi konkretnego problemu (konstrukcyjnego oraz analitycznego), którego źródłem były potrzeby zdefiniowane np. przez fabrykę urządzeń oraz osprzętu pojazdów do usuwania odpadów z pojemników EKOCEL (z Rekowa Górnego, k. Pucka).
3. Opracowałem autorski program kursów wykorzystania symulacji komputerowych w mechanice i prowadziłem dla zainteresowanych studentów oraz pracowników uczelni warsztaty praktyczne przeprowadzania analiz obliczeniowych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.
4. Z racji prowadzenia zajęć dydaktycznych wykorzystujących w sposób praktyczny inżynierskie programy Metody Elementów Skończonych byłem wielokrotnie konsultantem prac doktorskich oraz dyplomowych poświęconych analizom obliczeniowym różnych obiektów, np. panewek samochodowych, klatki bezpieczeństwa samochodu, implantom zębowym czy też skutkom zderzenia statku z urządzeniami portowymi.

g) staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

1. **Francja, Université de Poitiers, Poitiers.** Miesięczny pobyt w charakterze Profesora Wizytującego (*Visiting Professor*) na zaproszenie strony francuskiej. W ramach pobytu wygłosiłem wykłady nt. hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych oraz nowoczesnych technik ich badania. Brałem również aktywny udział w pracach badawczych w laboratorium instytutu Pprime oraz licznych dyskusjach dotyczących badań łożysk hydrodynamicznych (z badaczami i doktorantami). Wspólnie z naukowcami z Francji opracowałem metodykę badań, brałem udział w przygotowaniach i wykonałem badania łożyska hydrostatycznego działającego w reżimie hybrydowym. Miałem okazję do dogłębnego poznania metod badawczych łożysk hydrodynamicznych stosowanych w laboratorium w Poitiers, osobistego uczestnictwa w nich oraz wymiany doświadczeń. Wyjazd finansowany przez Univeristé de Poitiers, marzec 2015.
2. **Grecja, National Technical University of Athens, Ateny.** Wygłosiłem serię wykładów dla studentów 5 roku oraz doktorantów wydziału inżynierii morskiej nt. projektowania badań i eksploatacji hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych. Miałem okazję również do osobistej wymiany doświadczeń dydaktycznych oraz naukowych. Wyjazd finansowany przez fundusz UE, 5 dni, czerwiec 2016.

3. **Szwajcaria, GE Renewable Energy Hydro** (wcześniej Alstom Hydro GmbH), **Birr**. Trzykrotny pobyt na zaproszenie koncernu GE (Alstom) (kwiecień 2017, marzec 2010 oraz czerwiec 2007). Udział w 2 dniowych seminariach dotyczących hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych oraz prezentacje możliwości oraz osiągnięć badawczo-rozwojowych Politechniki Gdańskiej. Ponadto dyskusje oraz wymiana poglądów na temat potencjalnych kierunków rozwoju łożysk nośnych hydrogeneratorów.
4. **Niemcy, VATech Escher Wyss, Ravensburg**. Pobyt na zaproszenie VATech. Udział w seminarium nt. problemów eksploatacji hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych elektrowni wodnych oraz potencjalnych źródeł ich awarii. 2 dni, maj 2003.

h) wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie

W okresie mojego zatrudnienia w Politechnice Gdańskiej byłem autorem (samodzielnie lub w zespole badawczym) **24** ekspertyz oraz opracowań dla takich firm jak: GE (wcześniej Alstom), Andritz, Schaeffler Technologies GmbH, VATech Escher Wyss GmbH, ZRE Gdańsk, Mondi Packaging S.A., Soda Ciech S.A., PKN Orlen S.A., Lotos Petrobaltic S.A., KGHM Polska Miedź S.A. Dotyczyły one w zdecydowanej większości łożysk hydrodynamicznych **[E1-E18]**, pozostałe natomiast różnych problemów z zakresu inżynierii mechanicznej **[E19-E24]**.

Wykonane ekspertyzy dotyczące łożysk hydrodynamicznych

(po uzyskaniu stopnia doktora, w odwróconym porządku chronologicznym)

- E1. **Wodtke M.**, Olszewski A., Olszewski D., Łubniewski M., Pawłusik K.: Analiza Konstrukcji i Możliwości Modernizacji Łożyska Nośnego EW Dębe. Ekspertyza wykonana na zlecenie ZRE Gdańsk, 2016.
- E2. **Wodtke M.**, Wasilczuk M.: Estimation of the Thrust Bearing Pad Polymer Lining Properties in Elevated Temperatures. Praca badawcza wykonana na zlecenie Alstom Renewable Ltd (Szwajcaria), 2015.
- E3. **Wodtke M.**, Wasilczuk M.: Thrust Bearing Tests With 9 Pads. Praca badawcza wykonana na zlecenie Alstom Renewable Ltd (Szwajcaria), 2015.
- E4. Wasilczuk M., Olszewski A., **Wodtke M.**, Gliwiński J.: Experimental Testing of Journal Bearings Stage I - Design Of Test Setup. Praca wykonana na zlecenie Schaeffler Technologies AG (Niemcy), 2014.
- E5. **Wodtke M.**, Wasilczuk M.: Study of the Heat Transfer Between Thrust Bearing Pads. Praca badawcza wykonana na zlecenie Alstom Renewable Ltd (Szwajcaria), 2014.
- E6. **Wodtke M.**, Wasilczuk M.: Estimation of the Thrust Bearing Pad Polymer (PTFE) Lining Properties. Praca badawcza na zlecenie Alstom Renewable Ltd (Szwajcaria), Gdańsk, 2014.
- E7. Wasilczuk M., **Wodtke M.**: Ocena projektu łożyska nośnego hydrogeneratora EW Otmuchów. Ekspertyza na zlecenie Dolnośląskiej Fabryki Maszyn Elektrycznych, 2014.
- E8. Olszewski A., **Wodtke M.**: Analiza konstrukcji i geometrii łożysk wzdłużno-poprzecznych turbosprężarki A1.3001 typ 3M65 wraz z koncepcją modernizacji łożyska. 2013. Ekspertyza wykonana na zlecenie SODA Ciech Polska.

- E9. **Wodtke M.**, Wasilczuk M.: Experimental Testing of Bronze Pads Thrust Bearings. Praca badawcza wykonana na zlecenie Schaeffler Technologies AG (Niemcy), 2013.
- E10. **Wodtke M.**, Wasilczuk M.: Experimental Testing of Special Design Thrust Bearings Lubricated with ISO VG 32 Oil. Praca badawcza wykonana na zlecenie Schaeffler Technologies AG (Niemcy), 2013.
- E11. **Wodtke M.**, Wasilczuk M., Rotta G., Gliwiński J., Łuczywo J.: Experimental Testing of Special Design Thrust Bearings. Praca badawcza wykonana na zlecenie Schaeffler Technologies AG (Niemcy), 2013.
- E12. Wasilczuk M., Dąbrowski L., **Wodtke M.**: Ocena Stanu Łożyska Nośnego Hydrozespołu HZ-2 EW Żarnowiec i Przyczyn Jego Awarii w Dniach 31.05 i 16.06.2011. Ekspertyza na zamówienie Elektrownie Szczytowo-Pompowe, 2011.
- E13. **Wodtke M.**, Wasilczuk M., Zorn J.: Study of Material Properties of Polymer Composite Sliding Layers for Hydrodynamic Bearings. Praca badawcza wykonana na zamówienie Andritz Hydro (Austria), 2011.
- E14. **Wodtke M.**, Wasilczuk M., Zorn J.: Study of Material Properties of Polymer Composite Sliding Layers for Hydrodynamic Bearings. Praca badawcza wykonana na zamówienie Alstom Hydro (Szwajcaria), 2011.
- E15. **Wodtke M.**, Wasilczuk M., Pajęzkowski P., Fillon M., Dąbrowski L.: Thrust Bearings Investigations – Stage II. Praca badawcza wykonana na zamówienie Alstom Hydro Ltd (Szwajcaria), 2009.
- E16. Wasilczuk M., **Wodtke M.**: Thermo-elasto-hydrodynamic Calculations of Thrust Bearings. Comparison of Results Obtained with the Use of Various Models. Praca wykonana na zlecenie Alstom Hydro Ltd. Gdańsk, 2008.
- E17. Olszewski A., **Wodtke M.**: Analiza Optymalnych Parametrów Regeneracji Korbowodów Dresser-Rand. Ekspertyza wykonana na zamówienie PKN Orlen, 2007. Praca wdrożona.
- E18. Wasilczuk M., **Wodtke M.**: Scaling Effects in Hydrodynamic Thrust Bearings. Praca badawcza wykonana na zlecenie VA TECH HYDRO GmbH & Co. Gdańsk, 2005.

Pełną listę wykonanych ekspertyz zamieszczono w załączniku 4.

i) recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

Od 2013 roku otrzymuję zaproszenia do recenzji artykułów zagranicznych w renomowanych czasopismach z listy **JCR**. W sumie jestem autorem 24 recenzji do czasopism naukowych z dziedziny tribologii, w tym dla:

- 1) Tribology International, Journal of Elsevier (IF = 2,903 za 2016 r.), od 2013 roku - **11** recenzji.
- 2) Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology, (IF = 1,320 za 2016 r.), od 2013 roku - **9** recenzji.
- 3) Mechanics & Industry (IF = 0,599 za 2015 r.), od 2015 roku - **1** recenzja.

- 4) Tribology Transactions, STLE Transactions (IF = 1,418 za 2015 r.), od 2015 roku - **1** recenzja.
- 5) Journal of Tribology, Transactions of ASME (IF = 1,521 za 2016 r.), od 2015 roku - **1** recenzja.
- 6) Advances in Mechanical Engineering (IF = 0,827 za 2016 r.), od 2016 roku - **1** recenzja.

Ponadto recenzowałem artykuły zamieszczone w czasopismach spoza listy czasopism JCR, w tym w *Tribologii* czy też *Tribology in Industry* oraz referaty konferencyjne (*XXV sympozjon PKM 2011*). Wszystkie recenzowane artykuły dotyczyły inżynierii łożyskowania.

j) inne osiągnięcia, nie wymienione wcześniej

1. Ukończyłem liczne kursy doszkalające, z których najważniejsze to:
 - a. Kursy związane z wykorzystaniem programów wspomagania komputerowego CAD, (Inventor, NX),
 - b. Kursy związane z wykorzystaniem CFD oraz MES (Ansys, Ansys Workbench, CFX), w tym również kurs analiz obliczeniowych z wykorzystaniem metody FSI,
 - c. Kurs obsługi oprogramowania pomiarowego (LabVIEW i DASYlab).
2. Byłem koordynatorem wydziałowej licencji pakietu ANSYS Academic Research (2011-2012).
3. Byłem członkiem Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej na Wydziale Mechanicznym (2009).
4. Ukończyłem szkolenie pt. „Komercyjne eNauczanie” (2014).
5. Ostatnio przeprowadzona ocena pracy naukowo-dydaktycznej przez Komisję ds. Nauczycieli Akademickich na Politechnice Gdańskiej oceniała moją pracę na ocenę wyróżniającą.
6. Zostałem nagrodzony przez Rektora PG „Złotą odznaką absolwenta Politechniki Gdańskiej” za ukończenie studiów z oceną celującą (2002).

Michał Wodtke

TABELARYCZNE PODSUMOWANIE DOROBKU

	Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
Publikacje w czasopismach zawartych w bazach Journal Citation Reports - lista A MNiSW	0	8	8
Publikacja w recenzowanym czasopiśmie krajowym lub zagranicznym wymienionym w wykazie ministra – lista B MNiSW	2	11	13
Autorstwo monografii lub podręcznika akademickiego	0	1	1
Rozdziały w książkach o zasięgu międzynarodowym	0	1	1
Wygłoszone referaty na zagranicznych konferencjach naukowych o zasięgu światowym	0	4	4
Wygłoszone referaty na międzynarodowych i krajowych konferencjach w Polsce	2	4	6
Pozostałe recenzowane publikacje i materiały konferencyjne	0	31	31
Patenty i wzory użytkowe (w tym wdrożone)	0	2 (2)	2 (2)
Liczba cytowań według bazy			
a) Web of Science	0	58	WoS=58
b) Google Scholar	0	89	GSch=89
Indeks Hirscha według bazy:			
a) Web of Science	0	4	H_{WoS}=4
b) Google Scholar	0	5	H_{GSch}=5
Sumaryczny impact factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports	0	8,260	IF=8,260
Organizacja konferencji naukowych	0	1	1
Udział w grantach badawczych (w tym kierownik)	0	5 (1)	5 (1)
Recenzje dla czasopism zawartych w bazach JCR	0	24	24
Ekspertyzy	5	24	29
Wdrożenia przemysłowe	2	15	17
Pozostałe prace niepublikowane	6	20	26

Michał Wodtke