



POLITECHNIKA  
GDAŃSKA



MICHAŁ WODTKE

HYDRODYNAMICZNE  
ŁOŻYSKA WZDŁUŻNE  
Z WARSTWĄ ŚLIZGOWĄ Z PEEK

GDAŃSK 2017

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Janusz T. Cieśliński*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Michał Szydłowski*

REDAKTOR SERII

*Krzysztof J. Kaliński*

RECENZENCI

*Jarosław Sęp*

*Wojciech Wieleba*

REDAKCJA JĘZYKOWA

*Agnieszka Frankiewicz*

PROJEKT OKŁADKI

*Jolanta Cieślawska*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
[www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog](http://www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog)  
zamówienia prosimy kierować na adres [wydaw@pg.gda.pl](mailto:wydaw@pg.gda.pl)

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2017

ISBN 978-83-7348-696-6

---

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 16,5, ark. druku 13,5, 161/962

---

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski  
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

# SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW .....	5
WSTĘP .....	7
1. HYDRODYNAMICZNE ŁOŻYSKA WZDŁUŻNE Z POLIMEROWĄ WARSTWĄ ŚLIZGOWĄ – STAN WIEDZY .....	11
1.1. Rys historyczny .....	11
1.2. Materiały stosowane na łożyska z wahliwymi segmentami .....	13
1.2.1. Babbitt (biały metal) .....	16
1.2.2. PTFE (politetrafluoroetylen) .....	19
1.2.3. PEEK (polieteroeteroketon) .....	22
1.2.4. Porównanie materiałów stosowanych na warstwy ślizgowe łożysk .....	24
1.2.5. Wpływ warunków pracy na opory tarcia par ciernych polimer–metal ...	27
1.3. Połączenie polimerowej warstwy ślizgowej z segmentem łożyska .....	31
1.3.1. Rodzaje połączeń .....	31
1.3.2. Wytrzymałość połączenia .....	34
1.4. Badania teoretyczne łożysk .....	35
1.4.1. Zjawiska i procesy towarzyszące działaniu łożyska .....	35
1.4.2. Rozwój badań łożysk wzdluznych .....	37
1.4.3. Problemy badań .....	41
1.4.4. Aktualnie rozwijane metody badań teoretycznych .....	48
1.4.5. Wyniki badań teoretycznych łożysk z polimerową warstwą ślizgową ...	51
1.5. Badania doświadczalne łożysk .....	62
1.5.1. Problemy badań doświadczalnych .....	63
1.5.2. Wyniki badań doświadczalnych łożysk z pokryciem polimerowym .....	66
1.5.3. Doświadczenia eksploatacji .....	77
1.6. Podsumowanie stanu wiedzy .....	82
1.6.1. Wady i zalety łożysk z polimerową warstwą ślizgową .....	83
1.6.2. Materiały warstw ślizgowych .....	84
1.6.3. Wnioski z przeglądu wyników badań teoretycznych i doświadczalnych .....	85
2. PROBLEMATYKA BADAWCZA. CEL I ZAKRES PRACY .....	88
3. BADANIA TEORETYCZNE .....	90
3.1. Model teoretyczny łożyska wzdluznego .....	90
3.2. Ocena wybranych parametrów materiałowych pokrycia .....	97
3.2.1. Moduł sztywności wzdluznej pokrycia segmentu w funkcji temperatury .....	97
3.2.2. Przewodność cieplna pokrycia segmentu .....	103

3.3. Wyniki analiz TEHD łożyska wzdłużnego .....	110
3.3.1. Wpływ prędkości obrotowej .....	111
3.3.2. Wpływ nacisków średnich w łożysku .....	125
3.4. Rozkład nacisków na powierzchni ślizgowej łożyska .....	137
3.5. Podsumowanie wyników badań teoretycznych .....	144
4. BADANIA DOŚWIADCZALNE .....	151
4.1. Obiekt badań .....	151
4.2. Stanowisko badawcze łożysk wzdłużnych SON .....	153
4.3. Monitorowane parametry pracy łożyska .....	157
4.3.1. Obciążenie łożyska i prędkość obrotowa tarczy wału .....	157
4.3.2. Parametry oleju smarującego .....	157
4.3.3. Czujniki przemieszczeń – pochylenie segmentu .....	158
4.3.4. Moment tarcia w łożysku .....	159
4.3.5. Temperatura tarczy oporowej .....	160
4.3.6. Temperatura powierzchni ślizgowej i segmentów .....	161
4.4. Problemy pomiaru temperatury powierzchni ślizgowej .....	162
4.5. Wyniki badań doświadczalnych .....	167
4.5.1. Badania w stanach ustalonych – wpływ prędkości .....	168
4.5.2. Badania w stanach ustalonych – wpływ nacisków średnich .....	173
4.5.3. Krzywe Stribeck-Hersey .....	177
4.5.4. Wybiegi łożyska pod obciążeniem .....	180
4.6. Podsumowanie wyników badań doświadczalnych .....	187
5. WNIOSKI KOŃCOWE I PODSUMOWANIE .....	191
5.1. Wnioski praktyczne .....	194
5.2. Wnioski dotyczące dalszych badań .....	195
BIBLIOGRAFIA .....	197
Streszczenie w języku polskim .....	215
Streszczenie w języku angielskim .....	216

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

## Oznaczenia

B	–	długość obwodowa segmentu [mm]
c	–	ciepło właściwe materiału segmentu / polimeru [J/kg K]
$c_p$	–	ciepło właściwe oleju [J/kg K]
$d_{sr}$	–	średnia średnica łożyska [mm]
E	–	moduł sztywności wzdłużnej (Younga) [MPa, GPa]
F	–	obciążenie łożyska [N, kN]
g	–	grubość segmentu [mm]
h	–	grubość filmu smarnego [ $\mu\text{m}$ ]
$h_{in}, h_{out}$	–	grubość filmu na wlocie / wylocie [ $\mu\text{m}$ ]
$h_{min}$	–	grubość minimalna filmu [ $\mu\text{m}$ ]
$h_c$	–	współczynnik przejmowania ciepła oleju ze ścian segmentu [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
$h_p$	–	współczynnik przejmowania ciepła powietrza z bocznych walcowych powierzchni próbek w pomiarze przewodności cieplnej polimeru [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
$h_s$	–	współczynnik wymiany ciepła przez styk [ $\text{W}/\text{mK}$ ]
i	–	liczba segmentów łożyska [–]
k	–	współczynnik przenoszenia ciepłego oleju [–]
L	–	długość promieniowa segmentu [mm]
$M_T$	–	moment tarcia w łożysku badanym [Nm]
n	–	prędkość obrotowa [obr/min]
$N_T$	–	straty mocy łożyska [kW]
P	–	siła ściskająca [N]
p	–	ciśnienie w filmie smarnym [MPa]
$p_c$	–	naciski stykowe [MPa]
$p_{max}$	–	ciśnienie maksymalne filmu [MPa]
$p_{sr}$	–	naciski średnie [MPa]
q	–	gęstość strumienia ciepła [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
Q	–	strumień ciepła [W]
$Q_{wlot}^*, Q_c^*$	–	wydatek oleju na wlocie segmentu lub modelu płynowego FSI, wydatek całkowity łożyska [l/min]
R, $\Theta$ , z	–	współrzędne: promieniowa, kątowa oraz osiowa w walcowym układzie współrzędnych [m]
$R_{in}$	–	wewnętrzny promień łożyska [mm]
$R_{out}$	–	zewewnętrzny promień łożyska [mm]
$R_{sr}$	–	średni promień łożyska [mm]
T	–	temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_a$	–	temperatura odniesienia (temperatura oleju w korpusie łożyska) [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{in} / T_{out}$	– temperatura filmu na wlocie / wylocie [°C]
$T_{max}$	– temperatura maksymalna powierzchni ślizgowej segmentu / tarczy [°C]
$T_s$	– temperatura oleju zasilającego łożysko [°C]
$T_{seg}$	– temperatura ścianki segmentu [°C]
$T_{splyw}$	– temperatura oleju na wylocie z głowicy łożyska / wylocie modelu FSI [°C]
$v, v_{sr}$	– prędkość ślizgania, średnia prędkość ślizgania [m/s]
$\alpha$	– współczynnik rozszerzalności liniowej [1/K]
$\beta$	– kąt segmentu względem krawędzi wlotowej [°]
$\beta_z$	– zakres kątowy segmentu [°]
$\eta$	– lepkość dynamiczna oleju [Pa s]
$\lambda, \lambda_{seg}$	– współczynnik przewodzenia ciepła, dla materiału segmentu [W/mK]
$\lambda_m$	– współczynnik przewodzenia ciepła próbki miedzianej [W/mK]
$\lambda_o$	– współczynnik przewodzenia ciepła oleju [W/mK]
$\lambda_p$	– współczynnik przewodzenia ciepła pokrycia segmentu [W/mK]
$\lambda_s$	– współczynnik przewodzenia ciepła stali [W/mK]
$\mu$	– współczynnik tarcia [–]
$\nu$	– liczba Poissona [–]
$\rho$	– gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	– gęstość oleju [kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	– prędkość kątowa [rad/s]

### Skróty

CFD	– obliczeniowa mechanika płynów ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
EW	– elektrownia wodna
FSI	– metoda obliczeniowa do opisu wzajemnego oddziaływania płynu i struktury ( <i>Fluid Structure Interaction</i> )
FVM	– metoda objętości skończonych ( <i>Finite Volume Method</i> )
MES	– metoda elementów skończonych
PEEK	– polieteroeteroketon
PTFE	– politetrafluoroetylen
TEHD	– model termoelelastohydrodynamiczny
THD	– model termohydrodynamiczny

## WSTĘP

Łożyska hydrodynamiczne są elementami maszyn powszechnie stosowanymi w technice. W praktyce w tego rodzaju łożyskach do przeniesienia obciążenia z części ruchomych na korpus urządzenia wykorzystywany jest najczęściej efekt tzw. klina smarnego, który powstaje w wyniku wciągania smaru (oleju lub innego środka smarnego, np. wody) do zwężającej się w kierunku ślizgania szczeliny, która rozdziela współpracujące powierzchnie elementów. Przy zapewnieniu odpowiedniej różnicy prędkości stycznej powierzchni, wskutek przepływu smaru w zbieżnej szczelinie smarnej, powstaje ciśnienie hydrodynamiczne zdolne do przeniesienia obciążenia zewnętrznego z wirujących elementów maszyn na korpus urządzenia.

Poprawnie zastosowane i eksploatowane łożyska hydrodynamiczne wykazują doskonałe właściwości w szerokim zakresie działania. Do ich najważniejszych zalet, w porównaniu z innymi rodzajami łożysk, należy zaliczyć: przenoszenie obciążeń pomiędzy współpracującymi elementami w warunkach tarcia płynnego, co gwarantuje zminimalizowanie zużycia oraz strat tarcia; wysoką niezawodność i obciążalność; znaczną sztywność węzłów łożyskowych czy też stosunkowo prostą konstrukcję. Głównymi wadami łożysk hydrodynamicznych są: ograniczona nośność łożysk w stanach przejściowych, takich jak rozruchy i wybiegi maszyny; konieczność precyzyjnej obróbki elementów, a także stosunkowo niska maksymalna temperatura działania, ograniczona odpornością termiczną smaru oraz elementów łożyska.

Wraz z rozwojem techniki łożyska hydrodynamiczne są stosowane w coraz bardziej wymagających warunkach działania, zwiększonych obciążeniach, prędkości oraz temperatury. Dodatkowym wymogiem stawianym węzłom łożyskowym jest wysoka niezawodność, ponieważ w wielu maszynach są one elementami krytycznymi, których awaria może powodować poważne konsekwencje techniczne, ekonomiczne czy też dotyczące bezpieczeństwa użytkowników. Równocześnie, mimo prac badawczych nad innymi ciekawymi odmianami łożysk, np. magnetycznymi [190, 200] czy wykorzystującymi zjawisko lewitacji akustycznej [197, 198], do tej pory nie udało się opracować rozwiązania, które mogłoby na szeroką skalę zastąpić łożyska hydrodynamiczne.

Badania prowadzone obecnie na świecie przez ośrodki naukowe i producentów skupiają się na sposobach powiększenia zakresu bezpiecznej eksploatacji łożysk hydrodynamicznych. Można wyróżnić dwa podstawowe nurty rozwoju: pierwszy – związany ze zmianami konstrukcji węzłów łożyskowych i drugi – związany ze stosowaniem nowych materiałów oraz pokryw elementów. Między innymi prowadzi się intensywne badania wpływu modyfikacji geometrii powierzchni ślizgowej łożyska na jego właściwości eksploatacyjne, np. w postaci mikrowgłębień [67, 93] lub rowków [191, 192]. Rozwijają się nowe konstrukcje podparć segmentów, szczególnie w dużych łożyskach wzdłużnych z wahliwymi segmentami, w celu skuteczniejszego wyrównania obciążenia, np. system membran wypełnionych olejem, umieszczonych pod segmentami łożyskowymi [219]. Wprowadzane są systemy aktywnego smarowania (*Actively-Lubricated Bearings*) zmieniające właściwości dynamiczne węzłów łożyskowych [185, 186]. Powierzchnie ślizgowe łożysk pokrywa się powłokami, np. powłoką węglowo-diaamentową (*Diamond Like Carbon, DLC*) [105, 223, 224], w celu

zmniejszenia strat mocy oraz zwiększenia odporności łożysk na zużycie w warunkach tarcia mieszanego. Stosuje się również alternatywne materiały do wykonania elementów łożysk, takie jak np. ceramika [200], lub pokryć powierzchni elementów, np. brąz [1] lub polimery, w celu uzyskania warstwy ślizgowej o odpowiednich właściwościach i odporności na czynniki działające w filmie olejowym.

Od początku lat 80. ubiegłego wieku w Katedrze Konstrukcji Maszyn i Pojazdów (wcześniej Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn) Politechniki Gdańskiej prowadzone są także prace badawcze oraz rozwojowe łożysk hydrodynamicznych. Badania te dotyczyły wielu aspektów i problemów eksploatacji oraz rozwoju łożysk hydrodynamicznych różnych odmian i typów, m.in. łożysk ceramicznych [149], wzdłużnych łożysk z podatną płytą ślizgową [148, 218] oraz łożysk poprzecznych smarowanych wodą [146]. Autor niniejszej monografii od momentu rozpoczęcia swojej działalności naukowej w 2002 roku uczestniczył w licznych pracach badawczych (doświadczalnych i teoretycznych), projektowych i eksploatacyjnych, dotyczących głównie hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wahliwymi segmentami. W ramach projektu badawczego KBN [248], realizowanego w latach 2007–2010 pod kierownictwem autora na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej, rozpoczęto również badania hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z polimerową warstwą ślizgową, prowadzone do dnia dzisiejszego.

Łożyska hydrodynamiczne z pokryciem powierzchni ślizgowej warstwą polimeru są interesującą alternatywą dla łożysk z pokryciem w postaci warstwy tzw. stopu łożyskowego (wysokocynowy stop ołowiowy, tzw. babbitt lub biały metal), który jest najczęściej spotykanym rozwiązaniem. Doświadczenia eksploatacyjne w zakresie stosowania tych łożysk wskazują na ich bardzo korzystne cechy. Mimo to nie znalazły one dotąd szerokiego zastosowania. Przyczyn tego należy się doszukiwać w braku wystarczającej wiedzy na temat ich działania, konserwatyźmie użytkowników i niechęci do wprowadzania zmian, a także w około dwukrotnie wyższych kosztach produkcji i zakupu łożysk z pokryciem polimerowym.

Genezą niniejszej monografii były doświadczenia autora zebrane przy okazji realizacji projektu badawczego finansowanego ze środków KBN nr N502 4579 33 pt. *Badania hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z polimerową warstwą ślizgową*. Zaprezentowane w dalszej części wyniki są rozwinięciem wcześniejszych prac w tym obszarze. Zdecydowana ich większość nie była wcześniej publikowana.

Monografia stanowi podsumowanie aktualnego stanu wiedzy dotyczącej hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z polimerową warstwą ślizgową oraz zawiera wyniki oryginalnych badań autora nad tym zagadnieniem. Rozważania zawężono do łożysk wzdłużnych z wahliwymi segmentami, które ze względu na swoje korzystne cechy stanowią znaczną większość wszystkich aplikacji. Na pracę składa się pięć rozdziałów. Pierwszy rozdział zawiera omówienie aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z polimerową warstwą ślizgową. W rozdziale drugim zdefiniowano cel opracowania oraz jego zakres. W trzecim rozdziale zaprezentowano wyniki badań teoretycznych nad hydrodynamicznymi łożyskami wzdłużnymi z polimerową warstwą ślizgową. Uzyskane wyniki analiz porównano także z rezultatami uzyskanymi dla łożyska z pokryciem warstwy ślizgowej białym metalem. W początkowej części tego rozdziału opisano wyniki przeprowadzonych przez autora badań materiałowych polimerowego pokrycia segmentów, których



---

celem było uzyskanie wiarygodnych danych do przeprowadzonych analiz obliczeniowych. W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki badań doświadczalnych łożyska testowego z pokryciem PEEK, które posłużyły do weryfikacji poprawności badań teoretycznych. Rozdział uzupełniono, podobnie jak rozdział wcześniejszy, o wyniki badań doświadczalnych łożyska z pokryciem białym metalem. W tej części monografii opisano również rezultaty porównawczych badań doświadczalnych łożysk w warunkach tarcia mieszanego oraz zatrzymań pod obciążeniem. W ostatnim rozdziale podsumowano uzyskane wyniki, sformułowano wnioski oraz wskazano potencjalne kierunki dalszych badań.