

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH  
Łódź, 12 – 14 maja 1999 r.

Leszek Dąbrowski,  
Michał Wasilczuk  
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

**ZASTOSOWANIE POLIMEROWEJ WARSTWY ŚLIZGOWEJ W HY-  
DRODYNAMICZNYCH ŁOŻYSKACH HYDROGENERATORÓW**

**SŁOWA KLUCZOWE:**

turbiny wodne, hydrodynamiczne łożyska wzdłużne, polimerowa warstwa ślizgowa

**STRESZCZENIE**

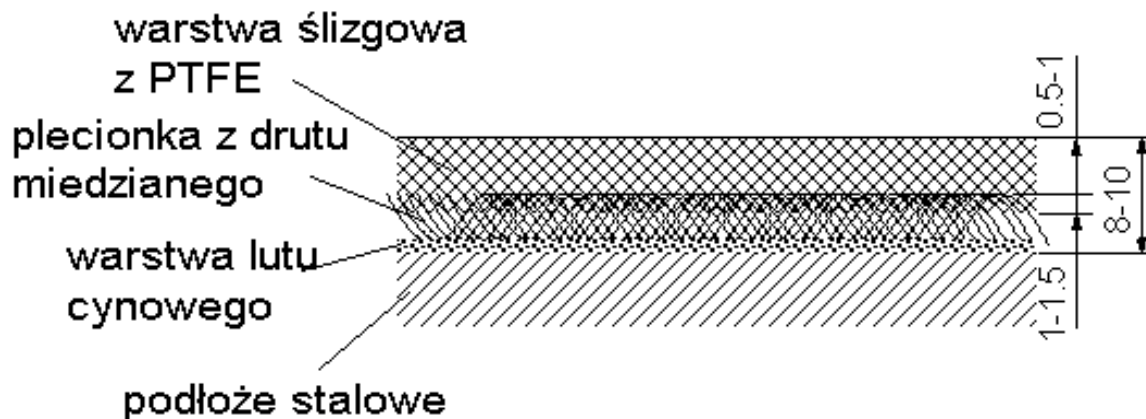
Wysokocynowe stopy łożyskowe dzięki znanym zaletom od wielu lat są dominującym materiałem na łożyska hydrodynamiczne. Od pewnego czasu na świecie widoczne jest zainteresowanie tworzywami sztucznymi stosowanymi jako materiał łożyskowy, nie tylko dla łożysk bezsmarowych czy smarowanych wodą, ale także dla łożysk hydrodynamicznych smarowanych olejem.

W pracy przedstawiono przegląd zagranicznych doniesień na temat eksploatacji łożysk wzdłużnych z wahliwymi klockami z warstwą ślizgową wykonaną z polimerów na świecie, a także informacje uzyskane bezpośrednio od użytkowników takich łożysk. Jak wskazują doświadczenia z eksploatacji łożyska te pod wieloma względami przewyższają łożyska z warstwą wysokocynowego stopu łożyskowego, co według autorów związane jest z podatnością warstwy ślizgowej. Dzięki swej podatności powierzchnia ślizgowa pod wpływem ciśnienia hydrodynamicznego odkształca się umożliwiając tworzenie szczeliny smarowej o korzystnym kształcie

**WPROWADZENIE**

W latach 70 i 80 w Związku Radzieckim na skutek licznych awarii łożysk nośnych pokrytych tradycyjnymi stopami łożyskowymi podjęto próby zastosowania łożysk z segmentami pokrytymi kompozycją metalu z PTFE, zwanymi segmentami EMP. Dostępne opisy materiału [1] nie pozwalają na dokładne odtworzenie budowy segmentu. Budowa segmentów przedstawiona jest orientacyjnie na rys. 1. Segment łożyskowy składa się z następujących warstw: stalowe podłoże, sprężysta plecionka wykonana z drutu brązowego lub miedzianego, polimerowe pokrycie z PTFE. Łączenie warstwy stalowej z plecionką wykonane jest za pomocą lutowania, natomiast warstwa z PTFE jest na gorąco sprasowana z warstwą plecionki

tak, że tworzywo sztuczne na głębokość około 1-1.5 mm wtapia się w plecionkę. Jedną z pierwszych elektrowni, w których zastosowano takie łożyska była Bracka Elektrownia Wodna, gdzie przed zmianami w 18 turbinach przez 20 lat miało miejsce 87 awarii łożysk wzdłużnych tradycyjnej konstrukcji o naciskach od 4 do 5.5 MPa [2]. Na jednej z turbin w roku 1978 zainstalowano łożyska z segmentami pokrytymi PTFE. Po około 4 latach eksploatacji przeprowadzono oględziny zmodernizowanych segmentów, które wykazały praktyczny brak zużycia polimerowych powierzchni łożyska. Od 1983 roku wszystkie łożyska hydrogeneratorów tej elektrowni wymieniono na łożyska z pokryciem z PTFE. W ciągu całej ich eksploatacji (do 1989 kiedy opublikowano artykuł) wydarzyła się tylko jedna awaria łożyska. Obecnie zmodernizowano łożyska nośne w większości elektrowni wodnych b. ZSRR.



Rys. 1. Budowa kompozytowego pokrycia segmentu łożyskowego

Doświadczenia z eksploatacji opisane w pracach [1] - [5] wykazały między innymi, że:

- łożyska pracują bez układów hydrostatycznego smarowania podczas rozruchu,
- pracochłonność montażu nowych łożysk jest mniejsza gdyż nie wymagają one skrobania,
- możliwy jest rozruch po dłuższym postoju bez konieczności podnoszenia wału na hamulcach,
- możliwe jest obracanie wału na sucho bez konieczności dosmarowywania,
- możliwa jest praca przy podwyższonej temperaturze oleju w wannie, co zmniejsza straty tarcia w łożysku (nawet o około 20-30% przy podwyższeniu temperatury oleju do ok. 60°C!),
- łożyska mogą pracować przy naciskach podwyższonych do 10 MPa (łożyska tradycyjne 2-3.5 MPa , a wyjątkowo do 5 MPa).

## **PRÓBY STOSOWANIA ŁOŻYSK WZDŁUŻNYCH Z WARSTWĄ ŚLIZGOWĄ Z PTFE W WIELKIEJ BRYTANII**

W krajach zachodnich pod wpływem informacji o korzystnych właściwościach łożysk wzdłużnych pokrytych PTFE napływających z terenu b. ZSRR oraz z Chin, gdzie łożyska te były także wykorzystywane, rozpoczęto również prace mające na celu wdrożenie łożysk z pokryciem z PTFE do praktyki łożyskowania hydrozespołów. W Wielkiej Brytanii prace prowadzone są wspólnie przez wytwórnię łożysk ślizgowych Michell Bearings oraz firmę First Hydro, która jest właścicielem największych brytyjskich elektrowni szczytowo-pompowych [6], [7]. Pierwszym etapem prac wdrożeniowych było opracowanie własnej, różniącej się od stosowanej w Rosji, technologii pokrywania segmentów warstwą PTFE. Według

technologii brytyjskiej PTFE wprasowane jest na gorąco w siatkę z drutu tak, że całkowicie wypełnia wolne przestrzenie siatki. Technologia taka zapewnia dużą niezawodność łączenia, ale zmienia istotnie podatność warstwy ślizgowej. Następnie podjęto intensywne badania doświadczalne łożysk w stanowisku badawczym. Do badań użyto łożyska o mniejszej średnicy niż przewidziane do zastosowania. Podczas badań łożysko poddawano naciskom do 10 MPa przy prędkości ślizgania do 35.5 m/s. Po zakończeniu programu badań łożysko poddano dokładnym oględzinom, które wykazały nieznaczne tylko ślady zużycia powierzchni i brak trwałych odkształceń warstwy ślizgowej mimo stosowania podczas badań nacisków ponad trzykrotnie większych niż stosowane typowo w łożyskach wzdłużnych z warstwą ślizgową z białego metalu. Wyniki testów były zachętą do zainstalowania łożysk nowej konstrukcji w jednej z pompoturbin elektrowni Ffestiniog. Łożyska oporowe turbozespołów elektrowni Ffestiniog są łożyskami z wahliwymi klockami podpartymi niesymetrycznie (maszyny w Ffestiniog są wyposażone w dwa wirniki i zarówno dla pracy pompowej, jak i turbinowej kierunek obrotów wału jest taki sam). Podstawowe dane techniczne hydrogeneratorów EW Ffestiniog i Dinorwig podano w tabeli 1.

**Tabela 1.** Zestawienie podstawowych danych technicznych EW Ffestiniog i Dinorwig

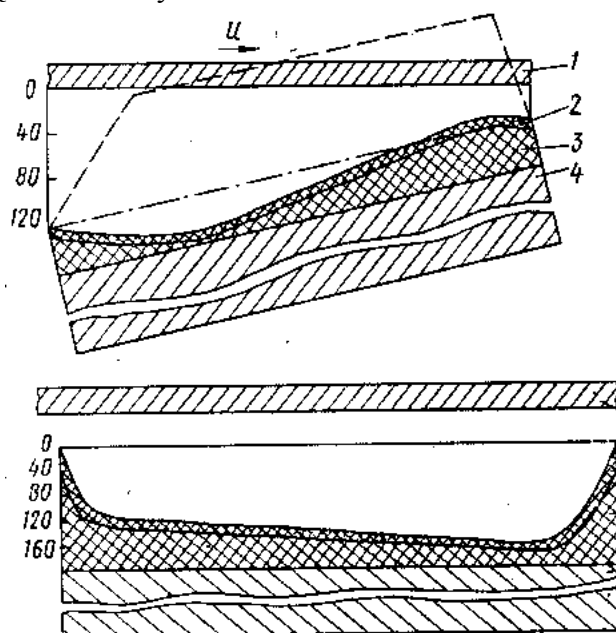
Wielkość	Ffestiniog	Dinorwig
Moc	90 MW	300 MW
Przełyk	29 m <sup>3</sup> /s	60 m <sup>3</sup> /s
Spad	305 m	ok. 550 m
Prędkość obrotowa	428 obr/min	500 obr/min
Łożyska nośne		
Średnia średnica	1290 mm	1220 mm
Liczba segmentów	12	10
Średnie naciski	2.8 MPa	3.7 MPa (max. 6.3 MPa)
Prędkość ślizgania	28.9 m/s	32 m/s

Zmodernizowane łożysko nie posiada systemu hydrostatycznego wspomagania podczas rozruchu. Po ponad pół roku i przepracowaniu 2900 godzin przy prawie 900 startach łożysko poddano oględzinom, które wykazały znakomity stan powierzchni ślizgowej z ciągle widocznym śladami obróbki mechanicznej powierzchni PTFE. Do grudnia 1997 łożysko przepracowało bezawaryjnie ok. 5500 godzin, wykonano 1700 rozruchów. Kolejnym obiektem, w którym planowana jest modernizacja łożysk jest elektrownia Dinorwig. Łożyska nośne pompoturbin elektrowni szczytowo-pompowej Dinorwig są łożyskami z wahliwymi klockami podpartymi na sprężynach. Łożyska te od samego początku eksploatacji wielokrotnie ulegały awariom, średnia żywotność zestawu klocków łożyskowych wynosiła ok. 2 lat. Łożysko nośne jest tu przykładem łożyska pracującego na granicy możliwości przy minimalnym zapasie bezpieczeństwa. Przed zainstalowaniem łożyska z pokryciem z PTFE podjęto badania doświadczalne na łożysku o rzeczywistych wymiarach. W tym celu w Michell Bearings (producent łożyska) zbudowano stanowisko badawcze o odpowiednich możliwościach. W stanowisku badane są łożyska złożone z czterech segmentów identycznych z segmentami łożysk, które zainstalowane będą w elektrowni. W czasie około dwóch miesięcy przeprowadzono serię przyspieszonych badań doświadczalnych i w lecie 1998 w jednej z maszyn zainstalowano łożysko z pokryciem z PTFE. Podobnie jak w Ffestiniog także w Dinorwig łożysko z PTFE pozbawione jest układu hydrostatycznego zasilania. W czasie trwającej około dwóch mie-

sięcy normalnej eksploatacji maszyny zaobserwowano bardzo duże opory tarcia podczas rozruchu. Na powierzchniach ślizgowych zaobserwowano niewielkie ubytki PTFE, prawdopodobnie spowodowane kawitacją. W związku z rozpoczęciem okresu intensywnej eksploatacji firma First Hydro nie zdecydowała się ryzykować awarii maszyny w wyniku pozostawienia nie do końca sprawdzonego łożyska w maszynie. Obecnie w Michell Bearings podjęto nową serię badań łożyska dla EW Dinorwig. Rozpatrywane jest między innymi zwiększenie twardości PTFE poprzez jego modyfikację w celu ograniczenia zużycia kawitacyjnego. Przed latem 1999 planowane jest ponowne zainstalowanie łożyska w maszynie i poddanie go próbom w eksploatacji.

## DYSKUSJA

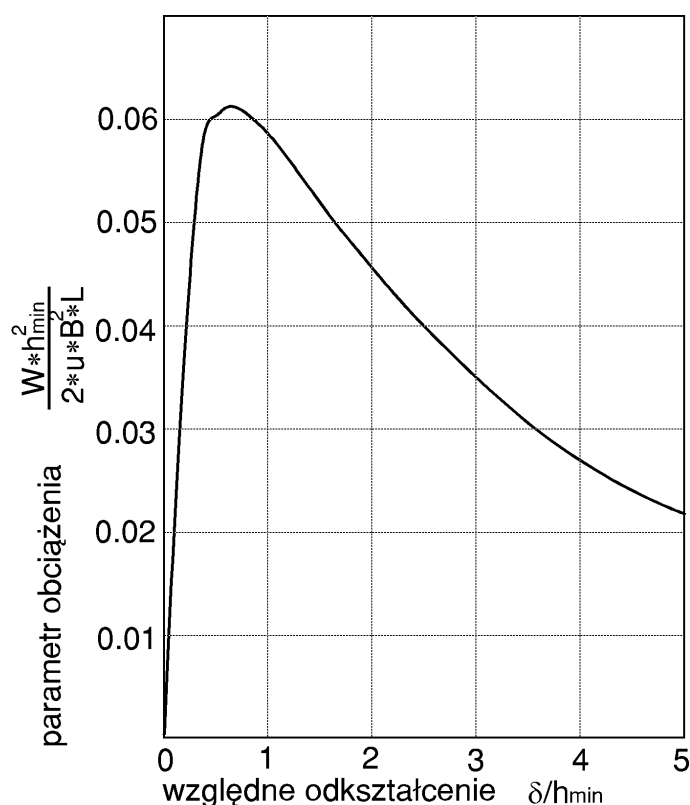
W cytowanych wyżej pracach przedstawione są wyniki badań stanowiskowych i eksploatacyjnych łożysk z pokryciem polimerowym. W pracach rosyjskich lakonicznie omówiono mechanizm pracy łożysk nowej konstrukcji. Podstawową cechą zapewniającą korzystne właściwości łożysk pokrytych kompozytową warstwą ślizgową jest podatność powierzchni ślizgowej w rosyjskiej konstrukcji osiągnięta dzięki starannie dobranej, małej sztywności miedzianej plecionki. Podatność ta powoduje, że pod wpływem ciśnienia hydrodynamicznego powierzchnia ślizgowa odkształca się tworząc w środkowej części, gdzie ciśnienie hydrodynamiczne jest wysokie, zagłębienie, na krawędzi wylotowej i krawędziach bocznych powierzchnia ślizgowa nie ugina się, dzięki czemu powstałe obrzeże ogranicza wypływy boczne przyczyniając się do wzrostu ciśnienia hydrodynamicznego. Na rys. 2 przedstawiono za [3] przekrój przez szczelinę smarową - obwodowy na górnym i promieniowy na dolnym rysunku, poz. 1 oznacza tarczę oporową, poz. 2 i 3 - kompozytowe sprężyste pokrycie segmentu, poz. 4 - stalowe podłoże segmentu. Liczby po lewej stronie opisują grubość szczeliny smarowej w mikrometrach. Profil został wyznaczony obliczeniowo na podstawie pomiaru ciśnień w szczelinie smarowej. Wiele prac teoretycznych z zakresu hydrodynamicznej teorii smarowania (np. [8]) przedstawia podobne profile jako najbardziej korzystne z punktu widzenia maksymalizacji obciążalności łożyska.



Rys. 2. Wyznaczone obliczeniowo odkształcenia powierzchni ślizgowej łożyska

Taki mechanizm tworzenia korzystnego kształtu szczeliny smarowej wydaje się funkcjonować poprawnie w niesymetrycznie podpartym klocku łożyskowym. Inna sytuacja występuje w klockach podpartych symetrycznie, przeznaczonych do pracy dwukierunkowej. Według teorii hydrodynamicznego smarowania główną przyczyną tworzenia ciśnienia hydrodynamicznego w podpartym symetrycznie łożysku są termiczne odkształcenia jego segmentów. W wyniku tych odkształceń tworzy się zbieżna szczelina smarowa. Bardzo istotna dla pracy łożyska jest skala odkształceń i problemem konstruowania takiego łożyska jest uzyskanie w warunkach pracy optymalnych odkształceń.

Na rysunku 3, według pracy Raimondiego [9], przedstawiono bezwymiarowy parametr obciążenia łożyska w funkcji odkształceń odniesionych do minimalnej grubości filmu -  $\delta/h_o$ . Jak wynika z rys. 3 stosunek optymalnej wartości odkształceń do minimalnej grubości filmu w łożysku wynosi ok. (0.7-1). Natomiast dalsze zwiększanie wysokości krzywizny powoduje gwałtowny spadek obciążalności segmentu, która dla  $\delta/h_o=3$  zmniejsza się do 50%, a dla  $\delta/h_o=5$  do 30% maksymalnej wartości. Przebieg krzywej na rysunku wskazuje także, że znacznie bardziej niebezpieczne niż odkształcenia nadmierne są odkształcenia zbyt małe.



**Rys. 3.** Obciążalność centralnie podpartej płytki o kulistej postaci odkształcenia w funkcji względnych odkształceń segmentu wg Raimondiego [9].

W przypadku tradycyjnego łożyska ze stopem łożyskowym odkształcenia giętne klocka wywołane są różnicą temperatur między gorącą częścią klocka od strony powierzchni ślizgowej a chłodną częścią od strony podparcia. W przypadku zastosowania łożyska z pokryciem powierzchni ślizgowej z PTFE segment jest odizolowany od filmu olejowego, w którym generowane jest ciepło, tak więc cała metalowa jego część ma wyrównaną temperaturę zbliżoną do temperatury oleju w wannie. Termiczne giętne odkształcenia takiego klocka będą więc minimalne. Równomierna sztywność sprężysta powierzchni ślizgowej nie daje korzystnego kształtu szczeliny smarowej, a w dodatku w technologii brytyjskiej sztywność ta jest stosunkowo duża, co tłumaczy dotychczasowe niepowodzenia prób w Dinorwig. Planowane powiększenie twardości warstwy ślizgowej raczej nie przyczyni się do poprawy właściwości symetrycznie podpartego łożyska.

## PODSUMOWANIE

Łożyska wzdłużne z wahliwymi klockami z warstwą ślizgową wykonaną z PTFE zbrojonego siatką z miedzi są eksploatowane od ponad 20 lat w elektrowniach wodnych na terenie dawnego ZSRR. Z publikacji w literaturze naukowo technicznej wiadomo także o stosowaniu takich łożysk w Chinach oraz o próbach podejmowanych w Indiach [10], Japonii i Słowacji (gdzie zastosowano znacznie prostszą konstrukcję łożyska). Łożyska te według doświadczeń z eksploatacji przewyższają łożyska z warstwą wysokocynowego stopu łożyskowego pod wieloma względami. Głównymi potwierdzonymi zaletami tych łożysk są:

- wyższa odporność warstwy ślizgowej na temperaturę
- mniejszy współczynnik tarcia przy tarcu mieszanym
- możliwość pracy przy wyższych naciskach
- możliwość pracy bez układu hydrostatycznego zasilania podczas rozruchu i wybiegu

Wydaje się jednak, że dotychczas większość zastosowań dotyczyła łożysk przystosowanych do jednego kierunku obrotów (o niesymetrycznie podpартych klockach). Zdaniem autorów podstawą korzystnych właściwości tych łożysk w warunkach hydrodynamicznego smarowania jest mechanizm odkształcania się elastycznej warstwy ślizgowej, natomiast poprawna praca w warunkach tarcia mieszanego (rozruch, wybieg) jest możliwa dzięki korzystnym właściwościom tribologicznym PTFE. Mechanizm odkształcania warstwy ślizgowej nie będzie prawdopodobnie tak skuteczny w łożyskach o segmentach symetrycznie podpартych. Brak dotychczas doniesień o zainstalowanych łożyskach pracujących w normalnej eksploatacji przy obu kierunkach obrotów, na przykład w elektrowniach szczytowo-pompowych, zdaje się te obawy potwierdzać.

## LITERATURA

- [1] Aleksandrow A. E.: Primienienije w podpjatnikach gidrogeneratorow elstasticznich metaloplastmasowych segmentow c fluoroplastowym pokrytijem powierzchni trenija. Hidroelektrostrojenije 1981, nr 9, str. 12-14
- [2] Gurbanow I. S.: Powyszenie nadzieznosti podpjatnikow agregatow Bratskoj GES putjem wniedrienija elstasticznich metaloplastmasowych segmentow. Eletriczeskije Stancji, 1989, nr 4, str 12-14.
- [3] Baibrodow J. I. i inni: Rezultaty naturnych ispytanij podpjatnika gidroagregata Bratskoj GES s elstasticznymi metaloplastmasowymi segmentami. Hidrotechniczeskoje stroitelstwo, 1982 nr 6, str 42-45
- [4] Baibrodow J. I. i inni: Opyt ekspluatacji elstasticznich metaloplastmasowych segmentow w podpjatnikie gidrogeneratora no 9 Wołżskoj GES imienii W. I. Lenina. Hidrotechniczeskoje stroitelstwo, 1977 nr 10, str 28-31
- [5] Aleksandrow A. E., Płatonow N. G.: Naturnyje issledowanija raboty podpjatnikow s EMP segmentami pri powyszennoj tiemperaturie masła. Hidrotechniczeskoje stroitelstwo, 1990 nr 11, str 20-24
- [6] Simmons J. E. L., Knox R. T., Moss B. O.: PTFE Faced Thrust Bearings: State of the Art and Hydro-Generator Application in the UK. Proceedings of the First World Tribology Congress, London 1997
- [7] Simmons J. E. L., Knox R. T., Moss B. O.: The development of PTFE faced, hydrodynamic thrust bearings for hydro-generator application in the UK. Rękopis w posiadaniu autorów.

- [8] Rohde S. M., McAllister G. T.: On the optimization of fluid film bearings. Proc. Roy. Soc. London. A. 351, 481-497 (1976).
- [9] Raimondi A. A.: The Influence of Transverse and Longitudinal Profile on the Load Capacity of Pivoted Bearings. Trans. ASME, vol. 3 (1960), No 2, pp.265-275.
- [10] Choudhary, T. R. i inni: Experimental investigation into replacement of babbit lining by polymer layers in large thrust bearings. Proceedings of the First World Tribology Congress, London 1997

## **THE APPLICATION OF POLYMER LINING IN FLUID FILM BEARINGS OF HYDROGENERATORS**

### **ABSTRACT**

White metals are, due to their well-recognised advantages, the most frequently used alloys for fluid film bearings in industry and power generation. For several years the use of polymer lining has been observed in the world, not only for self-lubricating bearings or bearings lubricated with water, but also for oil-lubricated fluid film bearings.

The paper presents the literature review on the applications of polymer lined hydrodynamic tilting pad thrust bearings in the world. Current experience in Russia, China and the UK shows that in many aspects polymer lined bearings are superior to babbit lined ones. Main advantages are higher load carrying capacity and lower friction loss. Literature reports do not attempt to explain the reasons of favourable characteristics of the polymer-lined bearings. According to the authors, due to its resilience, a bearing surface deforms under hydrodynamic pressure, forming an oil gap of advantageous profile, similar to an optimum oil gap shape, which is not the case of rigid babbit lined surface of traditional style bearings.

*Recenzent: Jan Burcan*