

**Leszek DĄBROWSKI\***, **Grzegorz ROTTA\*\***,  
**Michał WASILCZUK\*\*\***, **Michał WODTKE\*\*\*\***

## **OCENA WYBRANYCH WŁASNOŚCI MATERIAŁOWYCH POLIMEROWEJ WARSTWY ŚLIZGOWEJ HYDRODYNAMICZNEGO ŁOŻYSKA WZDŁUŻNEGO**

### **AN ESTIMATION OF SELECTED MATERIAL PROPERTIES OF THE HYDRODYNAMIC THRUST BEARING POLYMER LINING**

#### **Słowa kluczowe:**

polimerowa warstwa ślizgowa, własności materiałowe, hydrodynamiczne łożyska wzdluzne

#### **Key-words:**

polymer lining, material properties, hydrodynamic thrust bearings

---

\* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel. (58) 347 25 84, fax: (58) 347 27 42, e-mail: ldabrows@pg.gda.pl

\*\* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel.: (58) 347 25 84, fax: (58) 347 27 42, e-mail: grotta@pg.gda.pl

\*\*\* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel.: (58) 347 25 84, fax: (58) 347 27 42, e-mail: mwasilcz@box43.pl

\*\*\*\* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, tel.: (58) 347 25 84, fax.: (58) 347 27 42, e-mail: mwodtke@pg.gda.pl

## Streszczenie

Materiały polimerowe stosowane są coraz częściej jako warstwy ślizgowe łożysk hydrodynamicznych. Dzieje się tak dlatego, że wykazują one szereg zalet w porównaniu ze zwyczajowo stosowanymi warstwami ślizgowymi ze stopów łożyskowych. Znajomość własności mechanicznych oraz cieplnych zastosowanego kompozytowego tworzywa jest istotna w prowadzeniu badań modelowych łożysk pokrytych materiałem polimerowym, a badania takie są planowane w ramach projektu badawczego prowadzonego przez autorów w Politechnice Gdańskiej.

W referacie zaprezentowano metody pomiaru najważniejszych własności mechanicznych i cieplnych polimerowego pokrycia segmentowego łożyska wzdłużnego, do których zaliczyć należy moduł sprężystości wzdłużnej oraz współczynnik przewodności cieplnej materiału. Dodatkowym utrudnieniem planowanego zadania jest fakt, że próbka do badań dostępna będzie jedynie w formie wycinka z segmentu łożyskowego, z tego powodu nie jest możliwe zastosowanie ogólnie znanych metod wyznaczenia tych wielkości. Do oceny wymienionych własności materiałowych wykorzystano analizy obliczeniowe, za pomocą których odwzorowano planowane proste pomiary stanowiskowe próbki materiału z polimerowym pokryciem. Dokonano szacunkowej oceny spodziewanych wyników i przydatności proponowanych metod.

## WPROWADZENIE

Materiały polimerowe w postaci kompozytów, głównie na bazie PTFE lub PEEK, stosowane są coraz chętniej jako warstwy ślizgowe łożysk hydrodynamicznych. W porównaniu z łożyskami z pokryciem wysokocynowym stopem łożyskowym łożyska z warstwą ślizgową wykonaną z kompozytu charakteryzują się szeregiem zalet. Do najważniejszych z nich, ujawnionych w czasie eksploatacji łożysk, należy zaliczyć: odporność na wysokie temperatury (nawet do 250 [°C], [L. 6]), izolacyjność cieplna, mała wartość współczynnika tarcia w skojarzeniu ze stałą, korzystny wpływ znacznej elastyczności pokrycia na wyrównanie obciążeń przypadających na segmenty łożyska czy też zaobserwowana zwiększona obciążalność łożysk (nawet do  $p_{sr} = 20$  [MPa], [L. 7]). Do najważniejszych wad łożysk tego typu zaliczyć należy silną zależność własności mechanicznych oraz cieplnych pokrycia od temperatury oraz konieczność stosowania specjalnych rozwiązań umożliwiających osadzenie warstwy



ślizgowej na stalowym segmencie z uwagi na ograniczoną adhezję. Mimo niewątpliwych sukcesów eksploatacyjnych, ciągle nierozwiązanym problemem naukowym, dotyczącym łożysk z polimerową warstwą ślizgową wydaje się być prowadzenie symulacji obliczeniowych w celu teoretycznego wyznaczenia ich charakterystyk, w szerokim zakresie stosowanych w praktyce wymuszeń [L. 1]. Zdaniem autorów jedną z przyczyn tych niepowodzeń może być brak rzetelnych informacji o własnościach materiałowych (mechanicznych oraz cieplnych) polimerowych pokryć warstwy ślizgowej, które zwykle nie są ujawniane przez ich producentów, a są niezbędne do prowadzenia pełnych analiz obliczeniowych łożysk tego typu. Spośród zaledwie kilku znanych autorom prac podnoszących problem analiz teoretycznych łożysk z polimerowym pokryciem warstwy ślizgowej, np. [L. 2], tylko w jednej podjęto w ograniczonym zakresie próbę szacunkowego określenia własności materiałowych polimerowego pokrycia [L. 1]. W pozostałych do prowadzonych analiz użyto (najprawdopodobniej) katalogowych danych materiałowych tworzywa. Takie postępowanie miałyoby uzasadnienie tylko w przypadku, gdyby pokrycie łożyska wykonane było z czystego polimeru. W praktyce stosuje się jednak zwykle kompozytowe pokrycia na bazie polimerów z odpowiednimi napełniaczami i dodatkami, które wprowadza się w celu np. zmniejszenia zużycia lub zwiększenia modułu sprężystości wzdłużnej  $E$  materiału. Modyfikacje tego typu mogą wpłynąć na istotną zmianę własności kompozytu w porównaniu z katalogowymi danymi czystego polimeru.

## CEL PRACY

W związku z prowadzonym w Politechnice Gdańskiej projektem badawczym, mającym na celu opracowanie metodyki pozwalającej na analizę teoretyczną łożysk z polimerową warstwą ślizgową oraz planowaną jej weryfikacją doświadczalną, zdecydowano podjąć próbę oceny możliwości wyznaczenia niektórych własności materiałowych pokrycia polimerowego łożyska badawczego. Do realizacji zadania planuje się wykorzystać proste badania doświadczalne próbek pobranych z segmentu łożyska badawczego oraz wyniki symulacji obliczeniowych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych, których zadaniem będzie odwzorowanie warunków pomiarów oraz ułatwienie ich interpretacji.

W referacie zawarto propozycję sposobu oceny wybranych najważniejszych własności mechanicznych i cieplnych polimerowego pokrycia



segmentowego łożyska wzdłużnego (z punktu widzenia modelowania charakterystyk tych łożysk), do których zaliczyć należy moduł sprężystości wzdłużnej  $E$  przy ścisaniu tworzywa oraz współczynnik przewodności cieplnej materiału  $\lambda$ . Uzyskane wyniki obliczeń wykorzystane zostaną do odpowiedniego zaplanowania prostych badań doświadczalnych na próbkach materiału pobranych z segmentów łożyska badanego.

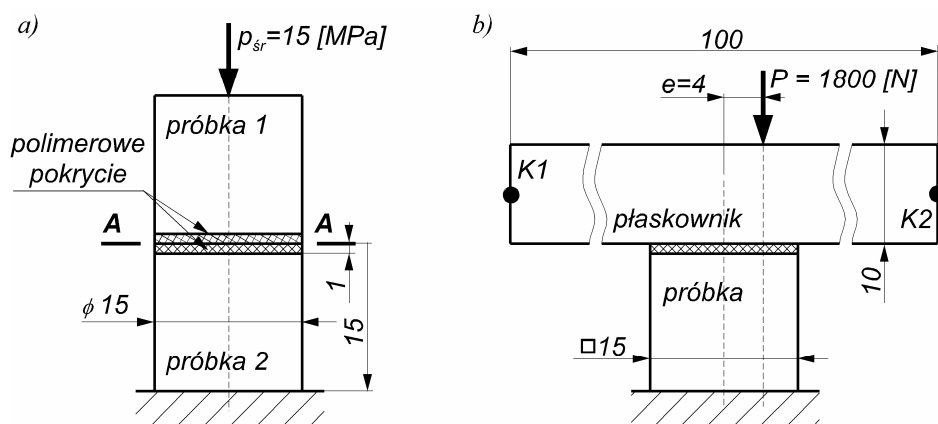
### **MOŻLIWOŚCI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH, DOSTĘPNY KSZTAŁT PRÓBK**

Własności polimerów zarówno mechaniczne, jak i ciepłe zależą silnie od wielu czynników. Wśród nich za najważniejsze uznać należy: szybkość odkształcania materiału, czas trwania i częstotliwość odkształcania próbki, wymiary próbki, technologia wytwarzania, temperatura czy też orientacja struktury wewnętrznej, która wpływa istotnie na anizotropię wielkości mechanicznych i cieplnych polimeru [L. 4, 5]. Z powodu dużej liczby czynników oddziałujących na poszukiwane własności kompozytów polimerowych oraz ich silne nieliniowości, na podstawie wyników planowanych prostych eksperymentów uzupełnionych symulacjami obliczeniowymi, możliwa będzie co najwyżej ocena wartości poszukiwanych wielkości a nie dokładny ich pomiar. Dodatkową komplikacją problemu jest niemożność zastosowania do pomiaru wspomnianych cech materiałowych polimerów, w ramach realiów technicznych prowadzonego projektu, znormalizowanych i powszechnie stosowanych technik i metod badawczych [L. 3, 5]. Dzieje się tak między innymi z uwagi na ograniczoną możliwość kształtowania próbki materiału do badań. Znormalizowane metody badań wymagają bowiem próbek odpowiednich kształtów i rozmiarów, a tych nie da się wykonać z dostępnego autorom materiału w postaci polimerowej powłoki o grubości około 1 [mm], połączonej ze stalowym podłożem segmentu za pośrednictwem warstwy spiekanego brązu. W ramach planowanej analizy, próbki do badań wykonane zostaną w kształcie walca lub graniastosłupa wyciętego z segmentu łożyskowego, i zawierać będą wszystkie wymienione powyżej trzy warstwy materiałów (stal, brąz, kompozyt polimerowy). Z uwagi na wymiary segmentów łożyska badawczego i przyjęte założenie, że z pojedynczego segmentu wykonane zostaną co najmniej cztery próbki, wymiary próbki ustalono na  $b(d) \times h = 15 \times 15$  [mm].



## MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI WZDŁUŻNEJ KOMPOZYTU

Warstwa ślizgowa łożyska hydrodynamicznego w czasie jego eksploatacji poddawana jest działaniu ciśnienia oleju w szczelinie smarowej. W wyniku tego dochodzi do jej ściskania. By rzetelnie oddać charakter zmian geometrii warstwy ślizgowej pod działaniem ciśnienia hydrodynamicznego, poszukiwaną wielkością opisującą zachowanie się kompozytu w trakcie działania łożyska powinna być zależność między odkształceniem kompozytu a działającym na nie obciążeniem w próbie ściskania. Z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić można, że poszukiwana zależność będzie nieliniowa, ale na potrzeby prezentowanych dalej analiz obliczeniowych przyjęto upraszczające założenie o liniowym charakterze tejże funkcji zgodnym z prawem Hooke'a. Jeżeli tak, to wynik próby (mierzone ugięcie kompozytu w funkcji obciążenia) będzie zależny nie tylko od wartości modułu sprężystości wzdluznej  $E$  materiału, ale także od wartości liczby Poissona  $\nu$ .

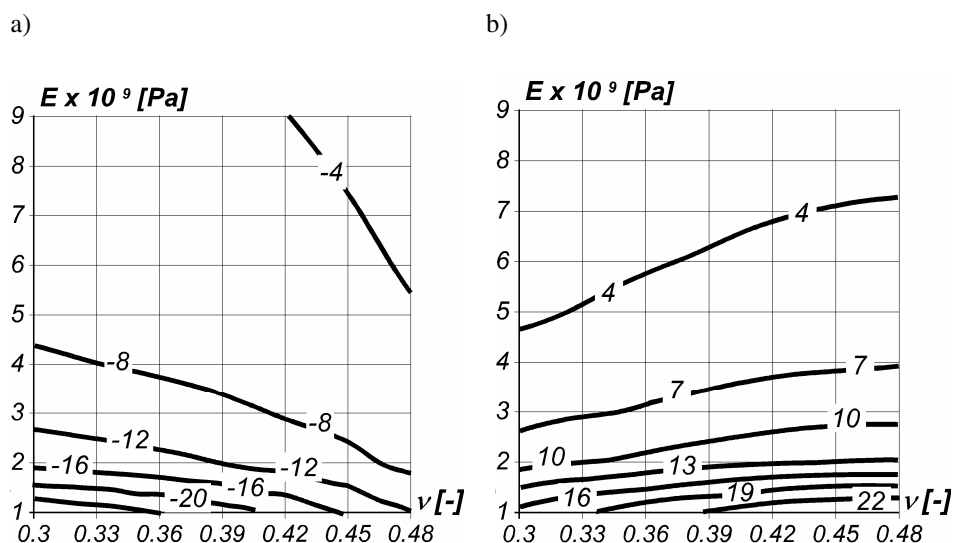


**Rys. 1. Próby ściskania dla których przeprowadzono obliczenia MES; a) ściskanie dwóch próbek, b) ściskanie mimośrodowe próbki**

Fig. 1. Compression tests results simulated with the use of FEM; a) compression of the set of two test pieces, b) eccentric compression of the test piece

Postanowiono przeanalizować **obliczeniowo** dwa rodzaje hipotetycznego ściskania próbek, wariantując podstawiane do obliczeń wartości modułu sprężystości wzdluznej  $E$  oraz liczbę Poissona  $\nu$  tworzywa.

W pierwszym ściskaniu poddawane były jednocześnie dwie próbki walcowe ustawione jedna nad drugą (**Rys. 1a**) w taki sposób, by stykały się one wzajemnie warstwą kompozytowego pokrycia (dzięki temu obserwowane odkształcenia będą dwukrotnie większe). W drugim próbka prostopadłościenna poddana była ściskaniu mimośrodowemu z intencją identyfikacji odkształceń postaciowych warstwy kompozytu (**Rys. 1b**). Próbkę obliczeniowo obciążano poprzez płaskownik o dużej sztywności śledząc przemieszczenia jego końców K1 oraz K2 w funkcji  $E$  i  $v$ . Wybrane wyniki obliczeń przedstawiono na **Rys. 2**.



**Rys. 2.** Wyniki obliczeń MES; a) dla zestawu próbek ściskanych, ugięcie osiowe zestawu próbek [ $\mu\text{m}$ ], b) dla ściskania mimośrodowego próbki, różnica przemieszczeń pionowych końców płaskownika (K1 – K2) [ $\mu\text{m}$ ]

Fig. 2. Results of FEM simulation; a) for the set of two test pieces, axial deflection of the tests set pieces [ $\mu\text{m}$ ], b) for eccentric compression of the test piece, difference of the flat bar ends vertical displacements (K1 – K2) [ $\mu\text{m}$ ]

Wyniki obliczeń wskazują, że w spodziewanym zakresie modułu sprężystości wzdłużnej polimerowego pokrycia ( $E > 3 \times 10^9$  [Pa] dla PEEK) obserwowane ugięcie zestawu próbek będzie stosunkowo niewielkie (rzędu kilku mikrometrów, **Rys. 2a** i mierzalne tylko przy wykorzystaniu bardzo dokładnej aparatury pomiarowej. Z kolei obserwowana różnica przemieszczeń końców płaskownika w przypadku mimośrodowego ściskania próbki wynosić powinna kilkadziesiąt mikrometrów

(**Rys. 2b**). Dla jednoznacznej oceny poszukiwanej wartości  $E$  ( $v$ ) niezbędne będzie porównanie wyników obu eksperymentów z wynikami obliczeń MES. Zakładając, że wynik eksperymentu ściskania zestawu dwóch próbek będzie równy  $-8$  [ $\mu\text{m}$ ], a mimośrodowego ściskania  $50$  [ $\mu\text{m}$ ], nakładając na siebie wykresy z **Rys. 2**, odnajdziemy punkt przecięcia izolinii z obu wyników, o współrzędnych wskazujących poszukiwaną wartość  $E$  oraz  $v$ .

## WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ KOMPOZYTU

Polimerowe materiały stosowane na warstwy ślizgowe łożysk hydrodynamicznych charakteryzują się stosunkowo niewielkim współczynnikiem przewodności cieplnej, nawet około 200 razy mniejszym od stali. Cecha ta jest bardzo ważnym czynnikiem, który istotnie może wpływać na notowane charakterystyki łożyska poprzez podniesienie temperatury w filmie olejowym oraz zmniejszenie strumienia ciepła przepływającego przez segment łożyskowy (obniżenie poziomu jego deformacji termicznych).

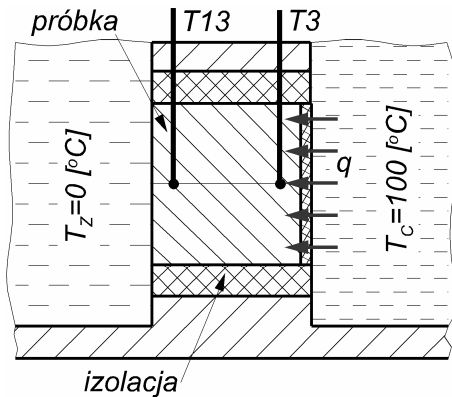
Do wyznaczenia wartości współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  kompozytu polimerowego proponuje się wykorzystać prosty pomiar temperatury w próbce walcowej oraz wyniki obliczeń MES przepływu ciepła odwzorowujące tenże pomiar. W planowanym eksperymencie próbka zostanie umieszczona w specjalnym zbiorniku (**Rys. 3a**) w taki sposób, że jedna jej powierzchnia czołowa omywana będzie przez czynnik o temperaturze  $T_z = 0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] (woda z lodem), druga natomiast przez czynnik o temperaturze  $T_c = 100$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] (gotująca się woda). Pomiar temperatury dokonany będzie z wykorzystaniem dwóch termopar, których końcówki pomiarowe umieszczone zostaną w osi próbki kolejno  $3$  [ $\text{mm}$ ] ( $T_3$ ) oraz  $13$  [ $\text{mm}$ ] ( $T_{13}$ ) pod powierzchnią ślizgową próbki. By uchronić się przed odpływem ciepła poprzez pobocznice walca próbki, powierzchnię tę należy zaizolować cieplnie.

Wyniki obliczeń MES temperatur  $T_3$ ,  $T_{13}$  oraz spadku temperatur między czujnikami  $\Delta T$  w funkcji podstawionej do obliczeń wartości  $\lambda$  polimeru przedstawiono na **Rys. 3b**. Znając wartość pomierzoną temperatur oraz wynik obliczeń, stosunkowo łatwo można odnaleźć szukaną wartość przewodności cieplnej kompozytu polimerowego. W spodziewanym zakresie wartości współczynnika przewodzenia ciepła tworzywa (dla

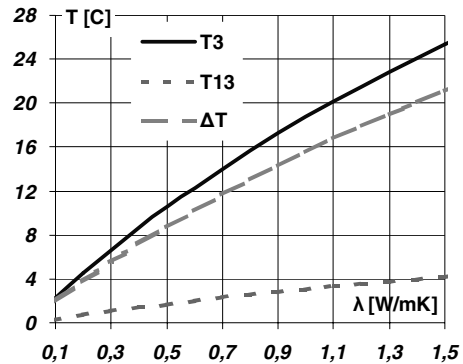


PEEK  $\lambda = \sim 0,5$  [W/mK]) obserwowane temperatury powinny wynosić odpowiednio  $T_3 = 10,5$  [°C] oraz  $T_{13} = 1,7$  [°C] ( $\Delta T = 8,8$  [°C]). Wyniki analiz zależą od wartości przewodności cieplnej stalowej części próbki, którą w podobny sposób można ocenić usuwając do pomiarów jej polimerowe pokrycie.

a)



b)



**Rys. 3. Ocena współczynnika przewodzenia ciepła warstwy polimerowego pokrycia, a) organizacja pomiaru, b) wynik MES temperatur  $T_3$ ,  $T_{13}$  i  $\Delta T$  w funkcji współczynnika przewodzenia ciepła polimeru  $\lambda$  (przyjęte dla stali  $\lambda_s = 50$  [W/mK])**

**Fig. 3. Estimation of the heat conductance coefficient of the polymer lining, a) measurements arrangement, b) FEM result of temperatures  $T_3$ ,  $T_{13}$  and  $\Delta T$  variations as a function of polymer lining heat conductance coefficient  $\lambda$  (for steel assumed  $\lambda_s = 50$  [W/mK])**

## WNIOSKI

W pracy przedstawiono metodykę oceny wartości współczynnika przewodności cieplnej oraz modułu sprężystości wzdłużnej kompozytowego pokrycia segmentów łożysk hydrodynamicznych. Do realizacji celu zaproponowano metodę wykorzystującą wiedzę z prostych eksperymentów pomiarowych oraz wyniki obliczeń numerycznych. Wyniki symulacji przebiegu eksperymentów wskazują, że ich przeprowadzenie jest użyteczne do realizacji celu pracy, jednak uzyskanie wiarygodnych wyników wymaga dużej precyzji prowadzonych pomiarów.



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

## LITERATURA

1. Ettles C.M., Knox R.T., Ferguson J.H., Horner D.: Test result for PTFE-faced thrust pads, with direct comparison against babbitt-faced pads and correlation with analysis. Transactions of the ASME, Journal of Tribology. Vol. 125, (October 2003), s. 814–823.
2. Fillon M., Glavatskih S.: PTFE-faced center pivot thrust pad bearings: Factors affecting TEHD performance. Tribology International, 41 (2008), s. 1219–1225.
3. Piórkowska E., Gałęski A.: Metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła polimerów. Cz. I. Metody Pośrednie, Cz. II. Metody Bezpośrednie. Polimery – Tworzywa Wielkocząsteczkowe, Zeszyt 5 oraz 6, 1985, s. 181–184, s. 219–223.
4. Piórkowska E., Gałęski A.: Przewodność cieplna polimerów. Polimery – Tworzywa Wielkocząsteczkowe, Zeszyt 4, 1985, s. 136–141.
5. Saechtling H.: Tworzywa sztuczne poradnik. Wydanie piąte, WNT Warszawa 2000, s. 75–139.
6. Swann M.K., Watkins J., Bornstein K.R.: Present limits of operation of product lubricated and magnetic bearings in pumps. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Pump Users Symposium, 1996.
7. Yamada Y., Uesato M., Tanaka M.: The tribological performance of PEEK lining bearing. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> EdF/LMS Workshop, Futuroscope, October 2004.

**Recenzent:**  
**Wojciech WIELEBA**

## Summary

**Polymer materials are used more and more frequently for linings in hydrodynamic thrust bearings. The reason for that is that they exhibit many advantages in comparison with traditional bearings with babbitted pads. Relevant data on mechanical and thermal properties of composite materials used as coatings for hydrodynamic bearings seems essential for making successful theoretical investigations focused on predicting reliably their performance.**



**In this paper, original experimental methods for the evaluation of the most important mechanical (modulus of elasticity) and thermal (heat conduction coefficient) properties of polymer lining of fluid film thrust bearings are proposed and discussed. Computer simulation of the tests is used to predict their results and to investigate feasibility of the methods. The difficulties of this research comes from the available shapes of the test pieces, which will be cut out from the bearing pad. Because of this, it will not be possible to use standard methods.**