

Jerzy TARNOWSKI*, **Wacław GAWĘDZKI****,
Dariusz LEPIARCZYK*

BADANIE WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO Z WYKORZYSTANIEM BILANSU CIEPLNEGO

DETERMINATION OF THE SLIDE BEARING FRICTION COEFFICIENT ON THE BASIS OF HEAT BALANCE

Słowa kluczowe:

łożysko ślizgowe, moment tarcia, temperatura pracy, współczynnik tarcia

Key words:

slide bearings, friction torque, operation temperature, kinetic friction coefficient

Streszczenie

W pracy przedstawiono energetyczną metodę wyznaczania współczynnika tarcia dla ślizgowej współpracy czopa i panewki. Głównym parametrem zmian zachodzących w bilansie energetycznym skojarzenia była

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: tarnow@agh.edu.pl.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Metrologii, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: waga@agh.edu.pl.

wartość rezystancji cieplnej jego elementów składowych. Miarą zachodzących zmian cieplnych w skojarzeniu były pomiary przyrostów temperaturowych dla stalowego czopa i panewek. Zamieszczono również mierzone wartości momentów tarcia ułożyskowania wału, dla założonych warunków tarcia technicznie suchego. Wartości temperatur, momentów tarcia oraz rezystancji cieplnych wybranych par trących w ustabilizowanym okresie ich pracy (stały w czasie moment i temperatura), pozwoliły na określenie kinetycznego współczynnika tarcia badanego łożyska.

WPROWADZENIE

Szerokie zastosowanie łożysk ślizgowych w przemyśle uzasadnia potrzebę realizacji nowych badań tribologicznych dotyczących współpracy ślizgowych skojarzeń ciernych. Współpraca czopa i panewki powoduje nagrzewanie się powierzchni ślizgowych oraz ich zwiększone zużycie. Istotne znaczenie przy doborze materiałów na łożyska ślizgowe mają własności tribologiczne współpracujących materiałów, do których należą współczynniki tarcia [L. 3, 4, 5]. Chcąc precyzyjnie dobrać odpowiedni materiał na współpracujące pary ślizgowe, konieczne jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych oceniających ich właściwości tribologiczne w konkretnym rozwiązaniu konstrukcyjnym [L. 5].

Nie zawsze jest to możliwe na drodze rozwiązań mechanicznych. Mając to na uwadze, w pracy przedstawiono weryfikację doświadczalną opracowanego modelu analogu elektrycznego przepływu ciepła w stanie ustalonym określającego współpracę wybranego do badań skojarzenia ślizgowego [L. 5]. Uzyskane wyniki badań oraz opracowany model teoretyczny pozwalają na wyznaczenie kinetycznego współczynnika tarcia skojarzonych materiałów.

CEL PRACY

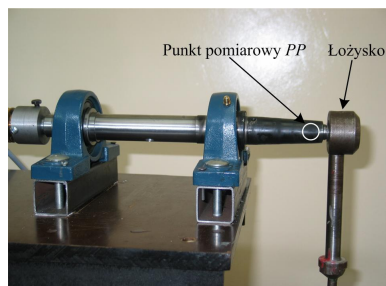
Podstawowym celem pracy było eksperymentalne wyznaczenie wartości współczynnika tarcia dla wybranych skojarzeń ślizgowych. Realizacja tego zadania była możliwa przez dokonanie analizy bilansu energetycznego ciepła emitowanego podczas ustabilizowanego okresu pracy skojarzenia (ustalony w czasie moment tarcia i wartości temperatur). Jednocześnie poddano weryfikacji doświadczalnej opracowany model przepływu ciepła w badanym skojarzeniu ślizgowym. Celem użytkowym pracy było dostarczenie danych przydatnych w projektowaniu, doborze i eksploatacji tribologicznych skojarzeń ślizgowych.

METODA BADAWCZA

Realizacja zakładanych celów pracy przyczyniła się do powstania oryginalnej metody badawczej łożysk i zbudowania stanowiska badawczego. W pracy [L. 5] autorzy przedstawili szczegółowy opis stanowiska, na którym przeprowadzono laboratoryjne badania poprzecznych łożysk ślizgowych oraz zweryfikowano eksperymentalnie opracowaną metodę wyznaczania średniego współczynnika tarcia kinetycznego. Budowę stanowiska do badań łożysk ślizgowych przedstawiono na **Rys. 1**.

W opracowanej metodzie wykorzystano zjawisko przepływu ciepła w układzie pracy łożyska ślizgowego w stanie ustalonym. Wielkości występujące w bilansie cieplnym badanego łożyska zastąpiono analogicznymi wielkościami elektrycznymi. Przyjęto, że źródło prądowe jest analogiem mocy cieplnej Q_L generowanej przez łożysko, źródło napięciowe oraz napięcia są analogiem temperatury T . Rezystancje elektryczne R są analogiem rezystancji cieplnych. W modelu pominięto pojemności cieplne, gdyż układ pracy łożyska analizowany jest w ustalonym stanie pracy.

Podczas obrotu czopa w panwi łożyska wydziela się moc cieplna Q_L , która określa ilość ciepła wytwarzanego w łożysku przez tarcie. Ta moc jest sumą mocy cieplnej pochodzącej od obciążenia łożyska oraz mocy cieplnej generowanej przez moment tarcia.



Rys. 1. Stanowisko do badań łożysk ślizgowych z wykorzystaniem metod energetycznych

Fig. 1. The stand for slide bearings tests on the basis of energetic methods

Wydzielana w łożysku moc cieplna Q_L wywołuje wzrost średniej temperatury na styku czop–panew w odniesieniu do temperatury otoczenia. Ponieważ pomiar średniej temperatury T_L na styku czop–panew oraz wartości rezystancji zastępczej jest trudny w realizacji, dokonuje się po-

miaru temperatury w dostępnym punkcie pomiarowym wybranym na wale w pobliżu czopu łożyska. Wypadkowa rezystancja cieplna R_{PPO} pomiędzy punktem PP pomiaru temperatury i otoczeniem jest parametrem funkcji określającej przemianę wygenerowanej w łożysku mocy cieplnej Q_L na różnicę temperatury wału względem otoczenia. Pomimo braku możliwości dokładnego wyznaczenia wartości temperatury łożyska T_L i rezystancji cieplnej łożyska względem otoczenia, można precyzyjnie wyznaczyć ich iloraz poprzez pośredni pomiar temperatury T_{PP} względem temperatury otoczenia T_{ot} i rezystancji cieplnej R_{PPO} .

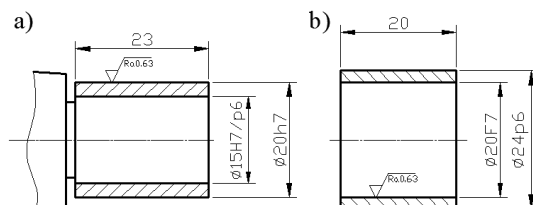
Pomiary temperatury wykonywane są bezstykowo (wirujący wał) za pomocą pirometru. Należy również zauważyć, że ewentualne źródła błędów pomiaru temperatury T_{PP} (np. dobór współczynnika emisyjności, zakłócenia pochodzące od tła temperaturowego, błąd pomiarowy pirometru) są eliminowane przez fakt, iż we wszystkich zależnościach występuje różnica mierzonej temperatury względem temperatury otoczenia $\Delta T_{PP} = T_P - T_{ot}$, a obydwie temperatury są mierzone tym samym przyrządem w tych samych warunkach. Pomiar momentu i prędkości obrotowej realizowany jest za pomocą momentomierza tensometrycznego z bezprzewodowym przekazem sygnałów.

ZAŁOŻENIA I ZAKRES PROWADZONYCH BADAŃ

W badaniach przyjęto jako stałe następujące czynniki:

- rodzaj tarcia – tarcie ślizgowe, technicznie suche,
- obroty wału $n = 1500$ obr./min,
- materiał próbek (nieruchome panewki) – **Rys. 2b**,
 - tarflen (teflon) z dodatkiem 15% grafitu,
 - turcite B (60% sproszkowany brąz o granulacji $30 \mu\text{m}$ z dodatkiem 10% grafitu i teflonu),
- materiał przeciwpróbki (obrotowy czop) – **Rys. 2**,
 - stal C45, o twardości 220 HB i chropowatości powierzchni ślizgowej $R_a = 0,063 \mu\text{m}$.

Jako zmienne stabilizowane przyjęto w poszczególnych eksperymentach wartości obciążeń próbek $P_1 = 0$ N, $P_2 = 0$ N, $P_3 = 52,11$ N, gdzie indeksy oznaczają numery kolejnych eksperymentów. Zawieszany pionowo ciężar P , w połowie szerokości obudowy panewek, stanowi obciążenie łożyska.



Rys. 2. Wymiary czopa łożyska (a) i panewek (b) w badanym skojarzeniu ślizgowym

Fig. 2. Dimensions of the bearing pivot (a) and bushes (b) in the tested slide combination

Opis przeprowadzonych doświadczeń

Przebieg eksperymentów pomiarowych w stanie ustalonej równowagi termodynamicznej układu:

1. Wyznaczenie rezystancji cieplnej R_{PPO}

Eksperyment 1

- panew zdjęta z czopa łożyska ($P_1 = 0$),
- pomiar temperatury otoczenia T_{ot} w punkcie PP ,
- zadanie prędkości obrotowej układu n [obr./min],
- pomiar w stanie ustalonym momentu M_{T1} oporów ruchu obrotowego nieobciążonego wału ($Q_L = 0$).

Eksperyment 2

- panew założona na czop łożyska, odciążona ($P_2 = 0$) oraz unieruchomiona względem czopa,
- zadanie prędkości obrotowej układu n [obr./min],
- pomiar w stanie ustalonym T_{PP2} oraz momentu M_{T2} będącego sumą momentów oporów ruchu nieobciążonego wału i łożyska ślizgowego,
- rezystancję cieplną R_{PPO} wyznaczamy z zależności:

$$R_{PPO} = \frac{\Delta T_{PP2}}{\omega \cdot M_T} = \frac{60 \cdot (T_{PP2} - T_{ot})}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot (M_{T2} - M_{T1})} \quad (1)$$

Wyznaczona wartość rezystancji cieplnej R_{PPO} określa w stanie ustalonym przyrost temperatury w punkcie pomiarowym PP wywołany oddziaływaniem momentu tarcia w łożysku ślizgowym przy zadanej prędkości obrotowej.

2. Wyznaczenie współczynnika tarcia łożyska:

Eksperyment 3

- obciążenie łożyska siłą P_3 prostopadłą do jego osi,
- zadanie prędkości obrotowej układu n [obr/min],
- pomiar w stanie ustalonym T_{PP3} ,
- wyznaczenie współczynnika tarcia wg wzoru:

$$\mu = \frac{\frac{T_{PP3} - T_{ot}}{R_{PPO}} - \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot (M_{T2} - M_{T1})}{P \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot \frac{d}{2}} \quad (2)$$

Występujące we wzorach i **Tabeli 1** symbole oznaczają:

- PP – punkt na wale, w którym mierzona jest temperatura T_{PP} ,
 Q_L – moc cieplna wydzielana w badanym łożysku ślizgowym,
 R_{PPO} – wypadkowa rezystancja cieplna pomiędzy punktem pomiaru temperatury PP i otoczeniem,
 T_{ot} – temperatura otoczenia,
 T_{PP} – temperatura w punkcie pomiarowym na wale,
 n – prędkość obrotowa wału,
 M_T – moment tarcia w łożysku ślizgowym.

WYNIKI BADAŃ

W **Tabeli 1** zestawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów dla dwóch skojarzeń łożysk ślizgowych: czop ze stali C45 oraz panwie z brązu spiekanego i teflonu.

Tabela 1. Wyniki eksperymentów pomiarowych

Table 1. Results of measurement experiments

Skojarzenie materiałowe	Wyniki pomiarów					Wyniki obliczeń	
	T_{ot} °C	M_{T1} Nm	T_{PP2} °C	M_{T2} Nm	T_{PP3} °C	R_{PPO} °C/W	μ
Stal C45-Brąz	22,8	0,220	34,4	0,242	55,3	3,36	0,076
StalC45-Teflon	23,3	0,208	38,8	0,219	59,9	8,97	0,029

PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule algorytm przeprowadzania pomiarów w procedurze wyznaczania współczynnika tarcia kinetycznego na bazie bilansu energetycznego zjawisk cieplnych umożliwił praktyczne zastosowanie opracowanej przez autorów metody wyznaczania współczynnika tarcia kinetycznego łożysk ślizgowych. Zastosowana metoda badawcza umożliwia późniejsze wykorzystanie jej w diagnostyce przemysłowej działających w ruchu ciągłym łożysk ślizgowych oraz pomoże uniknąć strat związanych z nieplanowanymi awariami maszyn i urządzeń mechanicznych.

Opracowany wcześniej model energetycznej współpracy łożyska ślizgowego oraz budowę stanowiska do wyznaczania współczynnika tarcia, przedstawiono w pracy [L. 5].

LITERATURA

1. Gawędzki W.: Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych. Wyd. AGH, Kraków 2010.
2. Sensors and Amplifiers, Hottinger Baldwin Messtechnik, www.hbm.com.
3. Ertuğrul D., Fazlı D.: Tribological and fatigue failure properties of porous P/M bearing. International Journal of Fatigue, Volume 30, Issue 4, April 2008.
4. Szczerek M., Wiśniewski M.: Tribologia i Tribotechnika. Wydawnictwo: Zakład Poligrafii Instytutu Technologii i Eksploatacji. Radom 2000.
5. Lepiarczyk D., Tarnowski J., Gawędzki W.: Stanowisko do badań łożysk ślizgowych z wykorzystaniem bilansu cieplnego. Materiały XI Kongresu Eksploatacji – Radom 2011 (praca w druku).

Recenzent:
Jerzy OSIŃSKI

Summary

In the paper an energetic method of friction coefficient determination in a slide cooperation of a bush and pivot is presented. The main parameter of the sliding pair energetic balance variations was the heat resistance of the pair elements. The measure of the sliding pair heat variations were measurements of temperature increment in the

steel pivot and bushes. At the same time, the friction torque was measured in the assumed conditions of the technical dry friction. Temperature, friction torque, and heat resistance values of selected friction pairs in a steady state operation (steady in time torque and temperature) allowed the researchers to determine the kinetic friction coefficient of the tested bearing. The procedure of the experiment is described, the results of tests are listed in a table, and the final conclusions are formulated.