

Dariusz LEPIARCZYK*, Waclaw GAWĘDZKI*, Jerzy TARNOWSKI*

BADANIA TERMOWIZYJNE ZJAWISK TRIBOLOGICZNYCH W ŁOŻYSKACH ŚLIZGOWYCH

INFRARED STUDIES OF TRIBOLOGICAL PHENOMENA IN SLIDING BEARINGS

Słowa kluczowe:

termografia, łożysko ślizgowe, bilans cieplny, współczynnik tarcia

Key words:

thermography, sliding bearings, heat balance, friction coefficient

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania termowizji w odniesieniu do badań tarciovych łożysk ślizgowych. Wykorzystując kamerę termowizyjną, przedstawiono zjawiska cieplne, jakie zachodzą podczas pracy łożysk. Przedstawiono charakterystyki obrazujące rozkład geometryczny temperatury w łożysku oraz charakterystyki czasowe przedstawiające proces nagrzewania łożyska. Analiza tych zjawisk pozwoliła na stworzenie modelu cieplnego umożliwiającego między innymi wyznaczenie współczynnika tarcia w łożysku.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: ledar@agh.edu.pl, waga@agh.edu.pl, tarnow@agh.edu.pl.

WPROWADZENIE

Termowizja uważana jest obecnie za jedną z najbardziej atrakcyjnych metod diagnostyczno-obszaryjnych w wielu dziedzinach przemysłu [L. 1–3]. Szerokie zastosowanie tej metody wiąże się z możliwością bezstykowego pomiaru badanych obiektów, co w większości zastosowań jest podstawowym kryterium decydującym o wykorzystaniu technik termowizyjnych.

Bezstykowa metoda pomiaru temperatury wykorzystuje zjawisko emisji promieniowania elektromagnetycznego wszystkich ciał, których temperatura jest wyższa od temperatury zera bezwzględnego [L. 4]. Wartość mierzonej temperatury wyznaczana jest na podstawie prawa Stefana-Boltzmann [L. 5, 6], wyrażającego zależność temperatury T od całkowitego natężenia promieniowania M wysłanego przez ciało rzeczywiste:

$$T = \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot M}} \quad (1)$$

gdzie: σ_0 jest stałą promieniowania ciała doskonale czarnego, a ε jest współczynnikiem emisyjności całkowitej ciała rzeczywistego.

Do wyznaczenia temperatury ciała rzeczywistego niezbędna jest, oprócz pomiaru wartości natężenia promieniowania temperaturowego M , znajomość poprawnej wartości emisyjności ε . Niewłaściwe przyjęcie jej wartości prowadzi do błędów w pomiarze temperatury zgodnie z zależnością (1). Nawet ciało wykonane z jednolitego materiału może mieć zmienną emisyjność ze względu na różne właściwości powierzchni (niejednorodności, uszkodzenia, gładkość). Jednym ze sposobów wyeliminowania tego problemu i uzyskania poprawy dokładności pomiaru temperatury metodą bezstykową jest kontrolny pomiar stykowym termometrem odniesienia i taki dobór współczynnika emisyjności, aby uzyskać zgodność wskazań. Do bezstykowego pomiaru temperatury wykorzystywane są pirometry bądź mające o wiele szersze możliwości kamery termowizyjne służące do temperaturowego obrazowania większych powierzchniowo obszarów (termografia).

W termografii podczerwieni można wyróżnić dwie podstawowe grupy metod: tzw. termografię aktywną i bierną [L. 6]. Termografia aktywna polega na oddziaływaniu na badany obiekt czynnikiem zewnętrznym i analizie reakcji obiektu, np. metodą wyznaczania kontrastu temperaturowego podczas stygnięcia. W termografii aktywnej można wyróżnić, ze względu na sposób stymulacji, następujące metody:

- impulsową – polega na analizie procesu stygnięcia badanej powierzchni nagrzewanej krótkotrwałymi impulsami cieplnymi,
- modulacyjną – polega na analizie amplitudowej i fazowej reakcji obiektu na pobudzenie harmoniczne o zadanej częstotliwości zmian mocy grzewczej,
- impulsowo-fazową – polega na analizie fazowej reakcji obiektu na pobudzenie impulsem cieplnym,

- wibrotermograficzną – polega na pobudzaniu badanego obiektu do drgań mechanicznych, których energia wskutek efektów tarcowych w miejscach uszkodzeń ulega zamianie w ciepło.

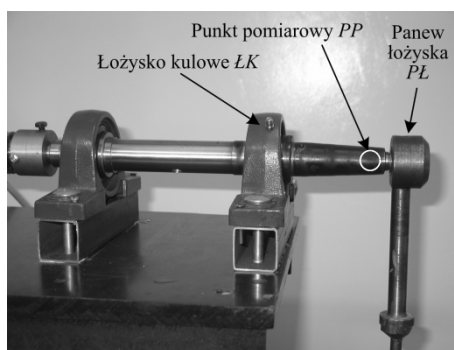
Metody termografii aktywnej wykorzystywane są przede wszystkim do wykrywania uszkodzeń powierzchniowych materiałów.

Termografia bierna wykorzystuje samoistne promieniowanie temperaturowe badanych obiektów bez zewnętrznego, dodatkowego oddziaływania. Umożliwia wyznaczanie rozkładów temperatury, dobrze nadaje się do celów diagnostycznych maszyn i urządzeń, do określania miejsc awarii i stanu izolacji cieplnej, jak również do pomiarów w miejscach trudno dostępnych lub niebezpiecznych. Jednym z obszarów zastosowań termografii biernej w mechanice są badania tribologicznych skojarzeń materiałowych w wybranych węzłach maszyn i urządzeń mechanicznych.

W artykule przedstawiono zastosowanie termografii do analizy zjawisk tarcowych i cieplnych, jakie zachodzą podczas pracy łożysk ślizgowych.

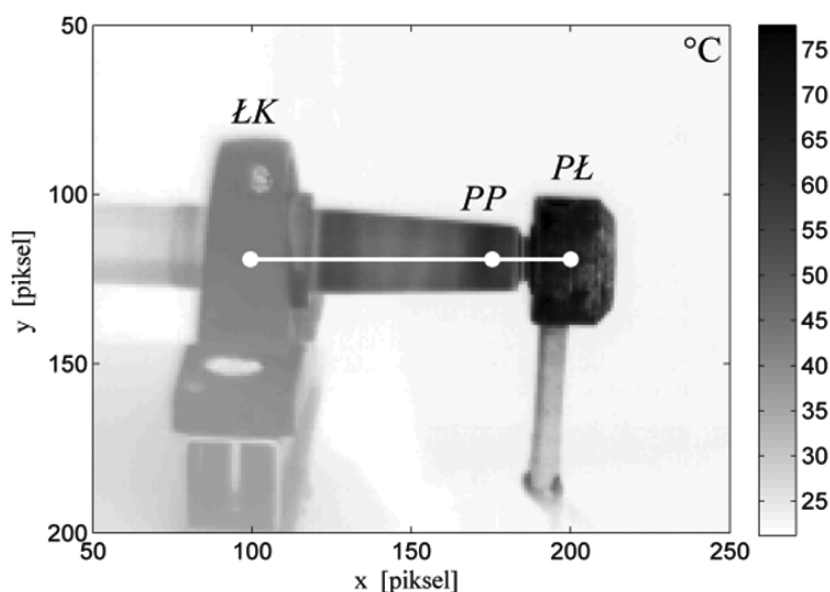
OPIS STANOWISKA I EKSPERYMENTU BADAWCZEGO

Na zdjęciu (**Rys. 1**) przedstawiono część stanowiska badawczego pokazującą sposób montażu łożyska ślizgowego [L. 7]. Kompletnie stanowisko składa się z ramy nośnej, na której wałek został podparty na dwóch łożyskach kulkowych. Wałek jest napędzany przez silnik elektryczny z regulowaną prędkością obrotową. Napęd z silnika przekazywany jest przez sprzęgło mieszkowe na momentomierz tensometryczny, a następnie przez drugie sprzęgło mieszkowe na wał. Na czopie końcowym wału znajduje się głowica badawcza, w obudowie której osadzono ciasno pasowane, wymienne panewki. Na czop wału wciśnięto tulejkę wykonaną ze stali C45. Ruch obrotowy występuje na powierzchni ślizgowej między panewką łożyska i tulejką ślizgową. Obciążenie poprzeczne łożyska ślizgowego jest zadawane przez obciążnik zamocowany na śrubie.



Rys. 1. Stanowisko do termowizyjnych badań łożysk ślizgowych

Fig. 1. The stand for sliding bearings tests on the basis of thermography



Rys. 2. Termograf łożyska ślizgowego z zaznaczonym przekrojem *LK-PL*

Fig. 2. Thermography of the sliding bearing with selected *LK-PL* cross-section

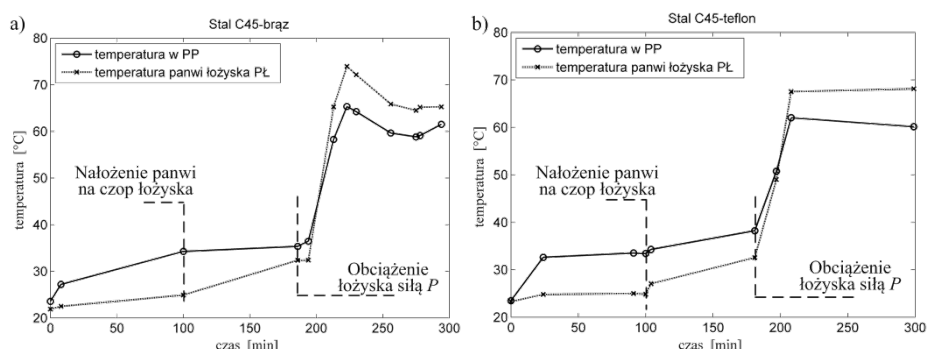
W układzie pomiarowym na stanowisku zastosowano tensometryczny czujnik momentu obrotowego T20WN umożliwiający pomiar w zakresie do 10 Nm z dokładnością 0,2%, a wbudowany w nim optyczny przetwornik prędkości obrotowej, umożliwia pomiar prędkości w zakresie do 3000 obr./min. Do określania rozkładu temperatury zastosowano kamerę termowizyjną o zakresie pomiarowym 0–350°C, rozdzielczości matrycy 320×240 pikseli i dokładności pomiaru temperatury $\pm 2\%$ odczytu lub $\pm 2^\circ\text{C}$ oraz z możliwością regulacji współczynnika emisyjności. Przed eksperymentami wykonano kontrolny pomiar stykowym termometrem odniesienia w punktach *PP* i *PL* w celu ustalenia właściwej wartości emisyjności w kamerze.

W ramach eksperymentów badaniom poddano łożyska ślizgowe (tarcie technicznie suche), w których jako materiał przeciwpróbki (obrotowy czop) zastosowano stal C45 o twardości 220 HB i chropowatości powierzchni ślizgowej $R_a = 0,06 \mu\text{m}$, natomiast jako materiał próbek (nieruchome panewki) zastosowano turcite B (60% sproszkowany brąz o granulacji $30 \mu\text{m}$ z dodatkiem 10% grafitu i teflonu) oraz tarflen (teflon) z dodatkiem 15% grafitu. Pracę łożyska badano w stanie ustalonym przy prędkości obrotowej $n = 1500 \text{ obr./min}$.

Eksperymenty przebiegały w ten sposób, że na pierwszym etapie układ pracował bez łożyska ślizgowego w celu osiągnięcia ustalonego stanu cieplnego pracy łożysk kulkowych, na drugim etapie nałożono panew łożyska na czop wałka i unieruchomiono ją, a układ pracował do osiągnięcia ustalonego stanu cieplnego łożyska, po czym na trzecim etapie obciążono łożysko ślizgowe siłą

$P = 52,11$ N przyłożoną w połowie szerokości obudowy panewek, prostopadle do osi łożyska, a układ znów pracował do osiągnięcia ustalonego stanu cieplnego łożyska. Na **Rys. 2** przedstawiono przykładowy termograf łożyska ślizgowego zarejestrowany po osiągnięciu przez niego stanu równowagi cieplnej. Na **Rys. 3** zaprezentowano dla dwóch skojarzeń materiałowych łożyska: stali C45 z brązem oraz teflonem przebieg zmian temperatury w funkcji czasu pracy łożyska w wybranych punktach *PP* i *PŁ* (zgodnie z **Rys. 1 i 2**).

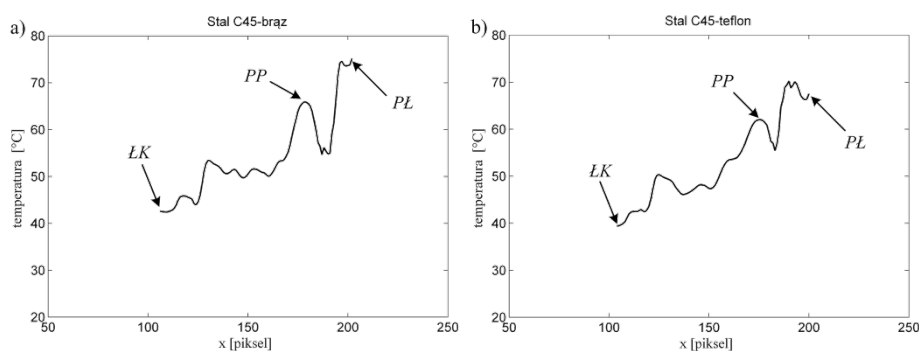
Na wykresach (**Rys. 3**) przedstawiono przedziały czasowe, w których następowało przejście pomiędzy kolejnymi etapami eksperymentu. Przedstawione charakterystyki pokazują sposób osiągania stanu równowagi cieplnej w układzie. Do momentu obciążenia łożyska siłą P temperatura wałka w punkcie pomiarowym *PP* jest wyższa niż temperatura panwi łożyska *PŁ*. Jest to spowodowane oddziaływaniem łożysk kulkowych stanowiących ułożyskowanie wałka. Obciążenie łożyska ślizgowego powoduje generowanie w nim ciepła, co prowadzi do szybkiego wzrostu jego temperatury i w efekcie temperatura panwi łożyska w punkcie *PŁ* rośnie powyżej temperatury wałka w punkcie *PP*. Można zaobserwować, że dla skojarzenia stali z brązem temperatura łożyska rośnie szybko, po czym obniża się w punkcie *PŁ*, a rośnie w *PP*, co jest spowodowane przepływem ciepła z łożyska do wałka.



Rys. 3. Przebiegi temperatury w funkcji czasu pracy łożyska w wybranych punktach *PP* i *PŁ* (zgodnie z Rys. 1 i 2) dla skojarzeń: a) stal C45 – brąz, b) stal C45 – teflon

Fig. 3. Temperature vs time of the bearing operation in selected points *PP* and *PŁ* (acc. Fig. 1 and 2) for pairs: a) steel C45 – bronze, b) steel C45 – PTFE

Na **Rys. 4** przedstawiono rozkład geometryczny temperatury wzdłuż osi wałka i łożyska zgodnie z zaznaczonym na **Rys. 2** przekrojem *LK-PŁ*. Na charakterystykach zaznaczono położenie punktów pomiaru temperatury w układzie. Nierównomierny przebieg charakterystyk jest spowodowany różnymi wartościami współczynnika emisyjności powierzchni poszczególnych elementów wałka i łożyska.



Rys. 4. Rozkład geometryczny temperatury wzdłuż osi wałka i łożyska (wg przekroju $LK-PP$) dla skojarzeń: a) stal C45-brąz, b) stal C45-teflon. Oznaczenia zgodnie z Rys. 2

Rys. 4. Geometrical distribution of temperature along the shaft and the bearing axis due to the $LK-PL$ section for pairs: a) steel C45 – bronze, b) steel C45 – PTFE

MODEL CIEPLNY ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO

W opracowanej metodzie budowy modelu cieplnego wykorzystano zjawisko przepływu ciepła w układzie pracy łożyska ślizgowego w stanie ustalonym. Podczas obrotu czopa w panwi łożyska wydzielana jest moc cieplna Q_L określająca ilość ciepła wytwarzanego w łożysku przez tarcie w jednostkowym czasie [L. 7]:

$$Q_L = P \cdot \mu \cdot \omega \cdot \frac{d}{2} + M_T \cdot \omega \quad (2)$$

przy czym pierwszy składnik sumy określa moc cieplną wydzieloną w łożysku wskutek działania siły nacisku P prostopadle względem osi łożyska, którego czop o średnicy d obraca się względem panwi z prędkością ω , a μ jest współczynnikiem tarcia kinetycznego. Drugi składnik sumy określa moc cieplną wydzieloną w nieobciążonym siłą P łożysku (dla $P = 0$), gdzie M_T jest momentem tarcia w łożysku. Wydzielana w łożysku moc cieplna Q_L wywołuje wzrost średniej temperatury T_L na styku czop–panew oraz średniej temperatury T_{PP} w punkcie PP wału w odniesieniu do temperatury otoczenia T_{ot} .

W [L. 7] wykazano, iż wartość współczynnika tarcia kinetycznego w łożysku ślizgowym można wyznaczyć z zależności:

$$\mu = \frac{\frac{\Delta T_{PP}}{R_{PPO}} - \omega \cdot M_T}{P \cdot \omega \cdot \frac{d}{2}} \quad \text{dla } P \neq 0 \quad (3)$$

gdzie wartość rezystancji cieplnej w punkcie PP względem otoczenia wynosi:

$$R_{PPO} = \frac{\Delta T_{PP}}{Q_L} = \frac{T_{PP} - T_{ot}}{\omega \cdot M_T} \quad \text{dla } P = 0 \quad (4)$$

Podczas wyprowadzania zależności (3) i (4) uzasadniono w [L. 7], że potrzebny, trudny w realizacji pomiar występujących w ilorazie wartości różnicy temperatury łożyska T_L i temperatury otoczenia T_{ot} względem rezystancji cieplnej łożyska w odniesieniu do otoczenia można zastąpić ilorazem wartości różnicy temperatury T_{PP} i temperatury otoczenia T_{ot} względem rezystancji cieplnej wałka w punkcie PP w odniesieniu do otoczenia R_{PPO} .

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów, w sposób omówiony w [L. 7], wyznaczono i zamieszczono w **Tab. 1** wartości współczynników tarcia kinetycznego μ dla dwóch skojarzeń łożysk ślizgowych: czop ze stali C45 oraz panwie z brązu spiekane i teflonu.

Tabela 1. Wyniki eksperymentów pomiarowych ($d = 0,02$ m)

Table 1. Results of measurement experiments ($d = 0.02$ m)

Skojarzenie materiałowe	Wyniki pomiarów				Wyniki obliczeń	
	ω rad/s	M_T dla $P=0$ Nm	ΔT_{PP} dla $P=0$ N °C	ΔT_{PP} dla $P=52,11$ N °C	R_{PPO} °C/W	μ
Stal C45-Braż	$50 \cdot \pi$	0,022	11,6	32,5	3,36	0,076
StalC45-Teflon	$50 \cdot \pi$	0,011	15,5	36,6	8,97	0,029

PODSUMOWANIE

W artykule sklasyfikowano metody stosowane w termografii aktywnej, które wykorzystywane są przede wszystkim do wykrywania uszkodzeń powierzchniowych materiałów. Przedstawiono również zastosowania termografii biernej w pomiarach i diagnostyce. Pokazano przykład zastosowania metody termograficznej do badań i analizy zjawisk tarciovych i cieplnych, jakie zachodzą podczas pracy łożysk ślizgowych. Zobrazowano zjawiska cieplne, jakie zachodzą podczas pracy łożysk, przedstawiono charakterystyki rozkładu geometrycznego temperatury oraz charakterystyki czasowe przedstawiające proces nagrzewania łożyska. Omówiono w skrócie, przedstawiony szczegółowo w pracy [L. 7], model cieplny łożyska ślizgowego umożliwiający wyznaczanie współczynnika tarcia kinetycznego. Zastosowana bezstykowa metoda badawcza bilansu cieplnego umożliwia późniejsze praktyczne zastosowanie jej w diagnostyce przemysłowej działających w ruchu ciągłym łożysk ślizgowych, co pomoże uniknąć strat związanych z nieplanowanymi awariami maszyn i urządzeń mechanicznych.

Opracowana metoda może znaleźć zastosowanie w diagnostyce i eksploatacji praktycznych rozwiązań skojarzeń ślizgowych, gdy klasyczne metody mechaniczne i inne są trudne lub niemożliwe do zastosowania [L. 8, 9].

LITERATURA

1. Więcek B., Mey G.: Termowizja w podczerwieni: podstawy i zastosowania, Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
2. Beier K., Gemperlein H.: Simulation of infrared detection range at fog conditions for Enhanced Vision Systems in civil aviation, *Aerospace Science and Technology* 8 (2004) 63–71.
3. Albatici R., Tonelli A.M.: Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site, *Energy and Buildings* 42 (2010) 2177–2183
4. Kostowski E.: Promieniowanie ciepłe, PWN, Warszawa 1993.
5. Gawędzki W.: Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych. Wyd. AGH, Kraków 2010.
6. Oliferuk W.: Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń. Biuro Gamma, Warszawa 2008.
7. Lepiarczyk D., Tarnowski J., Gawędzki W.: Stanowisko do badań łożysk ślizgowych z wykorzystaniem bilansu cieplnego. *Tribologia* 1/2012, s. 85–91.
8. Szczerek M., Wiśniewski M. (red. nauk.): *Tribologia i Trybotechnika*. Wydawnictwo: Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
9. Marklund P.; Larsson R.: Wet clutch friction characteristics obtained from simplified pin on disc test. *Tribology International* Volume: 41, Issue: 9–10, September, 2008, pp. 824–830.

Summary

The paper presents the possibilities of the application of thermovision methods in studies of sliding bearings operating in friction conditions. Thermal phenomena can be observed in images produced by thermovision during bearing operation. The presented characteristics show the geometrical distribution of temperature in the bearing and the process of its heating during operation. The analysis of observed phenomena made it possible to work out a thermal model that allowed the author to determine the friction coefficient in the sliding bearing.