

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

MODELOWANIE ZJAWISK CIEPLNYCH W PROCESIE TARCIA ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO

MODELING THE THERMAL PHENOMENA IN THE FRICTION PROCESS OF THE SLIDING BEARING

Słowa kluczowe:

łożysko ślizgowe, termowizja, bilans cieplny, temperatura pracy

Key words:

sliding bearing, thermal imaging, heat balance, operating temperature

Streszczenie

Badania termowizyjne umożliwiają precyzyjne zlokalizowanie wadliwie funkcjonujących elementów maszyn i urządzeń. Szczególnie ma to znaczenie w elementach węzłów łożyskowych maszyn, w których względny ruch obrotowy powoduje wydzielanie znacznej ilości ciepła. W opracowaniu przedstawiono możliwości zastosowania termowizji do monitorowania zjawisk zachodzących podczas procesu tarcia. Dla realizacji założonych celów pracy zaprezentowano zbudowane, oryginalne stanowisko diagnostyczne, umożliwiające przeprowadzenie badań oraz rejestracji i zapisu rozkładu temperatury w łożyskach ślizgowych. W pracy zamieszczono wyniki badań w postaci termogramów dla

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

łożyska pracującego pod obciążeniem i nieobciążonego. Zestawiono wyniki testów porównawczych dla łożyska badanego w obecności oleju jako środka smarnego o klasyfikacji lepkości VG46 oraz tarcia technicznie suchego. Do analizy rozkładu temperatur wykorzystano program komputerowy FLIR QuickReport oraz sformułowano wnioski z pracy.

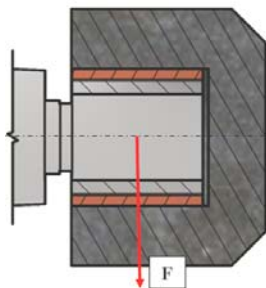
WPROWADZENIE

Umiejętność wyznaczania bilansu cieplnego oraz maksymalnych wartości temperatur pracy urządzeń ma zasadnicze znaczenie dla ich projektowania w różnych dziedzinach przemysłu [L. 1–3]. W szczególności dotyczy to systemu tribologicznego, jakim jest łożysko ślizgowe. Podczas pracy łożyska ślizgowego na powierzchni kontaktu czopa wału i panewki łożyska zachodzą procesy tarciove, w wyniku których powstaje ciepło odprowadzane do otoczenia, tzw. ciepło dyssypacji oraz praca mechaniczna związana z procesem tarcia, zwana pracą dyssypacji mechanicznej [L. 4]. Ciepło dyssypacji i związane z nim zmiany temperatury mają znaczący wpływ na trwałość użytkową systemu tribologicznego, jakim jest łożysko ślizgowe. W szczególności dotyczy to wpływu temperatury na rozszerzalność cieplną materiałów łożyska, zmianę własności smarnych środka smarnego w temperaturze pracy, proces starzenia się smaru, a także na wartości zużycia, w tym także procesy zacierania.

Celem opracowania jest przedstawienie termowizyjnych metod do analizy zjawisk cieplnych związanych z tarciami, jakie zachodzą podczas pracy łożysk ślizgowych przy różnych warunkach smarowania. Wyznaczenie ilości ciepła wytworzonego w obszarze tarcia jest szczególnie istotne dla prawidłowej pracy systemu tribologicznego, jakim jest łożysko ślizgowe.

MODEL PRZEPIYU CIEPŁA

Podczas pracy łożyska ślizgowego przy zadanym obciążeniu zewnętrznym F (Rys. 1) powierzchnia czopa wału ślizga się po powierzchni panewki, występuje tarcie ślizgowe, któremu towarzyszy wydzielanie znacznej ilości ciepła [L. 5–7].



Rys. 1. Model obciążenia łożyska ślizgowego siłą poprzeczną
Fig. 1. Model the sliding bearing load by lateral force

Moc cieplną q_0 wydzieloną podczas pracy łożyska przy zadanych jego parametrach geometrycznych i przyjętym modelowym schemacie obciążenia można wyznaczyć wg zależności:

$$q_0 = p \cdot v \cdot l \cdot d \cdot \mu = F \cdot v \cdot \mu = M_t \cdot \omega \quad (1)$$

gdzie:

p – nacisk średni w łożysku:

$$p = \frac{F}{l \cdot d} \quad (2)$$

F – siła poprzeczna,

M_t – zmierzony moment tarcia w łożysku ślizgowym,

l – długość czopa,

d – średnica czopa,

v – prędkość liniowa wału,

ω – prędkość kąтова wału,

μ – współczynnik tarcia na powierzchni ślizgowej.

Zależność (1) jest umowną miarą ciepła wytworzonego w jednostce czasu w procesie tarcia na powierzchni ślizgowej łożyska w warunkach ustalonej pracy łożyska, dla których cała praca tarcia zamieniana jest na ciepło. Wyznaczenie ilości ciepła wytworzonego w procesie tarcia na powierzchni ślizgowej łożyska jest istotne dla prawidłowej pracy systemu tribologicznego, jakim jest łożysko ślizgowe. Znając geometrię łożyska oraz własności fizyczne materiałów zastosowanych w konstrukcji węzła łożyskowego, możemy z wykorzystaniem technik termowizyjnych wyznaczyć doświadczalnie rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej łożyska, wykorzystując zależność:

$$\Delta T = q_0 \cdot R_c = F \cdot v \cdot \mu = M_t \cdot \omega \quad (3)$$

gdzie: ΔT – temperatura powierzchni łożyska względem temperatury otoczenia,

F – siła obciążająca,

M_t – zmierzony moment tarcia w łożysku ślizgowym,

v – prędkość liniowa poślizgu,

ω – prędkość kąтова wału,

μ – współczynnik tarcia na powierzchni ślizgowej,

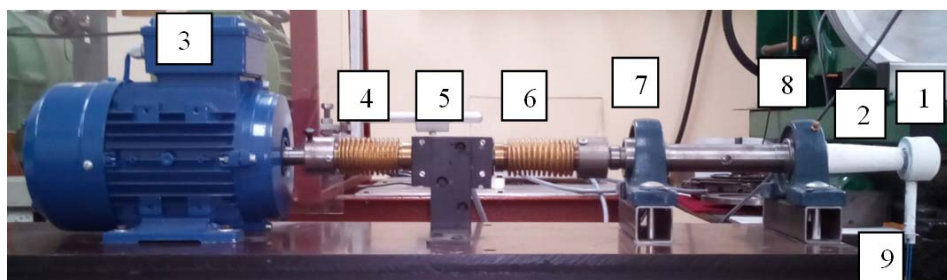
R_c – rezystancja cieplna całkowita uwzględniająca przewodzenie, konwekcję i radiację ciepła z obszaru tarcia.

Zastosowanie pomiaru z wykorzystaniem termowizyjnej techniki pomiarowej umożliwia wyznaczenie temperatury powierzchni łożyska względem otoczenia, która może być zastosowana do określenia poprawnego stanu pracy łożyska, jak i do określenia parametrów pracy łożyska.

W opracowanej metodzie wykorzystywane są mierzalne różnice temperatury panewki łożyska, wału i otoczenia oraz moment tarcia badanego skojarzenia.

STANOWISKO BADAWCZE

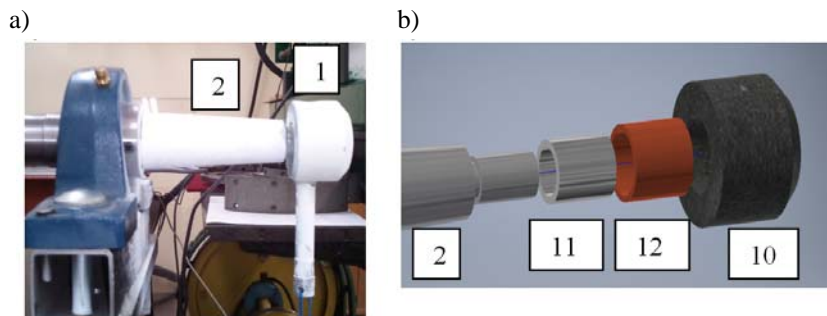
Badania łożysk ślizgowych z wykorzystaniem termowizji były realizowane w warunkach laboratoryjnych na stanowisku badawczym do termowizyjnej diagnostyki łożysk ślizgowych przedstawianym na **Rys. 2**. Oryginalna konstrukcja stanowiska i jego tory pomiarowe stanowią przedmiot patentu [L. 9].



Rys. 2. Stanowisko badawcze do termowizyjnej diagnostyki łożysk ślizgowych

Fig. 2. The test stand for thermal imaging diagnostics of plain bearings

Przedstawione na **Rys. 3** łożysko ślizgowe 1 osadzone na czopie wału 2 stanowią badaną parę tarczą.



Rys. 3. Badane łożysko ślizgowe (a), elementy ułożyskowania (b)

Fig. 3. The slide bearing under test (a), elements of the bearing system (b)

W konstrukcji łożyska ślizgowego zastosowano obudowę 10, w której osadzono ciasno pasowaną, wymienną panewkę 12, wykonaną z brązu o granulacji $30\ \mu\text{m}$ z dodatkiem 10% grafitu. Na czop wału 2 wciśnięto tulejkę 11 wykonaną ze stali C45, o twardości 220 HB i chropowatości powierzchni ślizgowej $R_a = 0,063\ \mu\text{m}$. Ruch obrotowy występuje na powierzchni ślizgowej między tulejką ślizgową 11 i panewką łożyska 12. Obciążenie poprzeczne łożyska

ślizgowego było zadawane przez obciążnik zamocowany na śrubie 9. Wartość masy obciążnika określano na wadze elektronicznej WPT24C z dokładnością do 1 g. Wał był napędzany za pomocą silnika elektrycznego MS80 1,1 kW, sterowanego przetwornicą częstotliwości typu E1000 o mocy 1,5 kW. Prędkość silnika w badaniach była stała i wynosiła 1500 obr./min. Napęd z silnika przekazywany był na badane łożysko ślizgowe przez sprzęgła mieszkowe 4 i 6 oraz przetwornik momentu 5. W celu zapewnienia stabilizacji położenia wału w czasie prowadzonych testów zastosowano dwa łożyska toczne 7 i 8, zamocowane na korpusie stanowiska.

System pomiarowy został zbudowany w oparciu o wzmacniacz pomiarowy oraz oprogramowanie Catman firmy HBM. Deklarowana przez producenta klasa dokładności wzmacniacza wynosi 0,1%. Do pomiaru momentu obrotowego zastosowano przetwornik typu T20WN/10 Nm, który zapewnia możliwość pomiaru momentu w zakresie do 10 Nm z dokładnością 0,2%, przy maksymalnej prędkości obrotowej 10000 obr./min. W czujniku momentu zastosowany jest dodatkowo optyczny przetwornik prędkości obrotowej, umożliwiający pomiar prędkości w zakresie do 3000 obr./min.

Podczas obrotu czopa w panwi łożyska ślizgowego wydziela się moc cieplna, którą określa ilość ciepła wytwarzanego w łożysku pod wpływem obciążenia łożyska oraz ciepła generowanego przez moment tarcia. Wydzielana w łożysku moc cieplna wywołuje wzrost temperatury na styku czop-panew w odniesieniu do temperatury otoczenia. Obrazy termowizyjne powierzchni obudowy łożyska były rejestrowane za pomocą kamery termowizyjnej typu Flir T335. Zakres pomiarowy temperatury wynosił od -20°C do 120°C . Zastosowana w badaniach kamera termowizyjna jest urządzeniem pomiarowym służącym do bezkontaktowego, zdalnego pomiaru temperatury oraz do analizy rozkładów temperaturowych w badanym obiekcie. Zastosowana kamera jest wyposażona w matrycę mikrobolometryczną o rozdzielczości 320x240 pikseli i czułości N.E.T.D. $0,05^{\circ}\text{C}$ oraz posiada obiektyw o kącie widzenia $25^{\circ} \times 18,75^{\circ}$. Dokładność pomiaru temperatury wynosi $\pm 2\%$ wartości odczytu lub $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Do analizy rozkładu temperatur wykorzystano program komputerowy FLIR QuickReport współpracujący z kamerą Flir T335. Posiada on duże możliwości obróbki wykonanych na kamerze zdjęć termowizyjnych, łącznie z możliwością analizowania tylko wybranych przez użytkownika obszarów. Ponadto umożliwia pomiar temperatury w każdym dowolnie wybranym punkcie termogramu.

WYNIKI BADAŃ

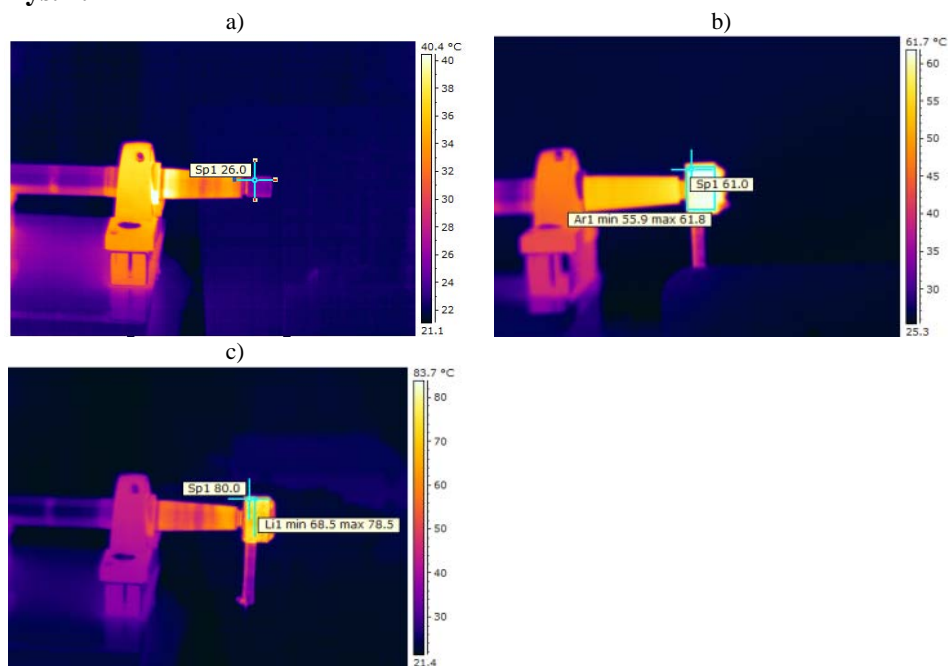
W **Tabeli 1** zamieszczono wyniki pomiarów maksymalnej temperatury pracy badanego łożyska ślizgowego dla przeprowadzanych biegów badawczych.

Tabela 1. Wyniki pomiarów temperatury badanego łożyska ślizgowego

Table 1. Results of measurement temperature testing sliding bearing

Maksymalna temperatura pracy łożyska ślizgowego		
Łożysko nieobciążone	Łożysko obciążone i smarowane olejem VG46	Łożysko obciążone nie smarowane
26°C	61.8°C	80°C

Uzyskane przykładowe termogramy podczas badań termowizyjnych łożyska ślizgowego, pracującego w warunkach tarcia mieszanego przedstawiono **Rys. 4.**



Rys. 4. Termogramy badanego łożyska ślizgowego z zaznaczonymi punktami i obszarami pomiarowymi: a) termogram dla łożyska nieobciążonego, b) termogram dla łożyska obciążonego smarowanego, c) termogram dla łożyska obciążonego niesmarowanego

Fig. 4. Thermograms of the tested slide bearing with the selected measurement points and areas: a) thermogram for unloaded bearing, b) thermogram for the lubricated and loaded bearing, c) thermogram for loaded bearing without lubrication

Do obróbki termogramów otrzymanych z badań wykorzystano narzędzie „punkt pomiarowy” – punkt Sp1 na **Rys. 4a, b, c**, narzędzie „obszar pomiarowy” na **Rys. 4b**, umożliwiające odczyt wartości temperatury wewnątrz zaznaczonego obszaru Ar1 oraz narzędzie „linia pomiarowa” – pomiar wzdłuż wyznaczonej linii na **Rys. 4c**. Pomiar z wykorzystaniem narzędzia „linia pomiarowa” wykonano promieniowo w miejscu osadzenia panewki łożyska na czopie wału, linia Li1 na **Rys. 4c**.

Przykładowy termogram dla łożyska ślizgowego nieobciążonego przedstawiono na **Rys. 4a**. W tym przypadku czop wału obraca się swobodnie w powietrzu bez założonego łożyska ślizgowego. Wzrost temperatury spowodowany jest przepływem ciepła powstałego w wyniku oddziaływania ciepła łożysk tocznych ułożyskowania wałka.

Na **Rys. 4b** przedstawiono termogram pracy łożyska obciążonego własną masą i dodatkowo obciążnikiem 9 (**Rys. 2**). Łożysko było smarowane olejem o klasyfikacji lepkości VG46. Maksymalna temperatura pracy łożyska odczytana na **Rys. 4** wynosiła 61,8°C, a badane łożysko pracowało poprawnie (bez drgań) podczas całego biegu badawczego. Zastosowany środek smarny nie ulegał przyspieszonemu zużyciu, a przebieg próby charakteryzował się w stanie ustalonym stabilną temperaturą i momentem tarcia łożyska.

Na szczególną uwagę zasługują wyniki pomiarów uzyskane za pomocą kamery termowizyjnej dla identycznie jak wyżej obciążonego łożyska, ale skąpo smarowanego lub (co ma miejsce w badanym przypadku) braku takiego smarowania, **Rys. 4c**. Temperatura pracy łożyska osiągnęła wartość 80°C, po czym wystąpiło szybkie przegrzanie łożyska z objawami przebarwienia powierzchni czopa wału. Łożysko uległo uszkodzeniu.

WNIOSKI

Urządzenia termowizyjne są coraz częściej wykorzystywane w celach pomiarowych oraz do kontroli procesu pracy maszyn. Szczególnie dotyczy to diagnostyki występujących w nich węzłów tarcia.

W artykule przedstawiono metodę bilansu cieplnego zastosowaną do analizy zjawisk tarciovych i cieplnych, jakie zachodzą podczas pracy łożysk ślizgowych przy różnych warunkach smarowania. Skuteczność tej metody potwierdzają wyniki badań zamieszczone w pracy dla łożysk smarowanych oraz użytkowanych bez smarowania. Przedstawiona metoda jest szczególnie skuteczna do wstępnej i szybkiej diagnostyki pracy węzłów tarcia. Umożliwia również dokładną analizę temperaturowych stanów pracy w ślizgowych węzłach ułożyskowań maszyn urządzeń. Opracowany analityczny model procesu tarcia w łożysku charakteryzuje się wysokim stopniem adekwatności dla badanych procesów cieplnych. Wymaga jednak dokładnego określenia temperatury powierzchni badanego węzła tarcia, określenia warunków pracy oraz własności mechanicznych i fizycznych materiałów, z jakich wykonano badane łożysko.

LITERATURA

1. 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), pp. 63–71.

2. 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), pp. 2177–2183.
3. Więcek B., Mey G.: *Termowizja w podczerwieni: podstawy i zastosowania*, Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
4. Sadowski J.: *Osobliwości procesów termodynamicznych towarzyszących tarciu metali*, Wydaw. PR, Radom 2001.
5. Skoć A., Spalek J., Markusik S.: *Podstawy konstrukcji maszyn 2. Zarys dynamiki i tribologii, elementy podatne, wały i osie maszynowe, łożyska ślizgowe i toczne, sprzęgła i hamulce*, WNT, Warszawa 2008.
6. Kostowski E.: *Promieniowanie cieplne*, PWN, Warszawa 1993.
7. Wiśniewski S.: *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 1997.
8. Lepiarczyk D., Gawędzki W., Tarnowski J.: *Badania termowizyjne zjawisk tribologicznych w łożyskach ślizgowych*, *Tribologia: teoria i praktyka*, nr 4, 2012, s. 125–132.
9. Lepiarczyk D., Gawędzki W., Tarnowski J.: *Urządzenie do bezstykowego badania tarcia w skojarzeniach ciernych i łożyskach ślizgowych, zgłoszenie wynalazku: PL 397113 A1: Biuletyn Urzędu Patentowego, ISSN 0137-8015, nr 11, s. 48, 2013.*

Summary

Thermal imaging tests allow for precise location of improperly operating elements of machines and devices. This is particularly important in elements of bearing systems where relative rotational movement causes the release of a significant quantity of heat. The study shows the possibility of using thermal imaging to monitor the phenomena occurring during the process of friction. Thermal model of a plain bearing presented in the work may also be used to determine the basic friction characteristics of the bearing. To achieve the assumed tasks, the original diagnostic test stand has been built that enables the registration and recording of temperature distribution in sliding bearings. The stand is presented in the paper along with tests results in the form of thermal images for the bearing operating both as loaded and unloaded. The comparative tests have been made both for bearings lubricated by an oil of viscosity grade VG46 and operating in technically dry friction condition. For the analysis of the temperature distribution was used the computer program FLIR QuickReport. The analysis was a base for specification some conclusions of the work.