

Jerzy NACHIMOWICZ¹, Robert KORBUT²

KINEMATYKA WĘZŁA CIERNEGO NA PRZYKŁADZIE ŁOŻYSKOWANIA IGIEŁKOWEGO

Streszczenie. Niniejszy artykuł dotyczy zjawisk zachodzących w łożyskowaniu igiełkowym. Tarcie generujące moment oporu pracy węzła ciernego jest głównym czynnikiem mającym wpływ na jego zużycie. W łożysku igiełkowym mamy do czynienia z dwoma wiodącymi rodzajami tarcia: tarcie tocznym i tarcie poślizgu, i te właśnie procesy są głównym przedmiotem badań. W pracy przedstawiono wyniki z rejestracji i analizy ruchu wszystkich elementów tocznych w łożyskowaniu. Doświadczenia przeprowadzono na stanowisku badawczym możliwie dokładnie oddającym warunki realnej pracy łożyska. Odpowiednio przygotowana metodyka badań pozwala na pomiar i analizę oporu ruchu łożyska, określenie strefy czynnego przenoszenia obciążenia i wyznaczenie współczynników tarcia.

Słowa kluczowe: łożysko igiełkowe, moment tarcia, współczynniki tarcia

KINEMATICS FRICTION PAIR FOR EXAMPLE NEEDLE BEARINGS

Summary. The present study concerns certain phenomena that take place in the needle roller bearing. The friction that generates the anti-torque of a friction pair is the major factor that influences the needle bearing's wear. In the needle bearing there occur two predominant types of friction: the rolling friction and the sliding friction, and both are subject to examination. The study presents recordings and analysis of the movements of all needle bearing's rolling elements. The examination was carried out on a special examination stand that precisely emulates the real conditions of the needle bearing's work. Carefully prepared examination methods enable recording and analyzing frictions in the bearing, estimating a sphere within which the load is shifted, and calculating the coefficient of friction.

Keywords: needle bearing, anti-torque, coefficients of friction

1. WPROWADZENIE

Łożyska igiełkowe stanowią największą grupę łożysk tocznych pod względem budowy, różnorodności typów oraz zastosowania. Podstawową zaletą wymienionych łożysk jest duża nośność przy niewielkim przekroju; w przypadku gdy igiełki są osadzone w koszyku, a bieżnią wewnętrzną jest bezpośrednio powierzchnia wału, otrzymujemy sztywną

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Białystok University of Technology, Białystok, Poland,
e-mail: j.nachimowicz@pb.edu.pl

² Faculty of Mechanical Engineering, Białystok University of Technology, Białystok, Poland,
e-mail: holden77@wp.pl

konstrukcję zdolną przenosić duże obciążenia. Wadami łożysk igiełkowych są: najwyższy moment tarcia wśród łożysk tocznych oraz powstawanie dużych naprężeń powierzchniowych w strefie kontaktu [1, 4]. Na powstawanie oporów ruchu w pracy łożyska igiełkowego wpływ mają poślizg i mikroślizg spowodowane odkształceniami, geometrią styku, tarcie wewnętrzne w ośrodku smarnym oraz tarcie między koszykiem a elementami tocznymi. Przy uwzględnieniu znacznych wartości generowanego oporu (m.in. przez duże powierzchnie styku w porównaniu z innymi łożyskami) zasadne jest szczególnie poznanie procesu powstawania momentu oporu ruchu i jego wpływu na zużycie.

2. ZJAWISKA W ŁOŻYSKOWANIU

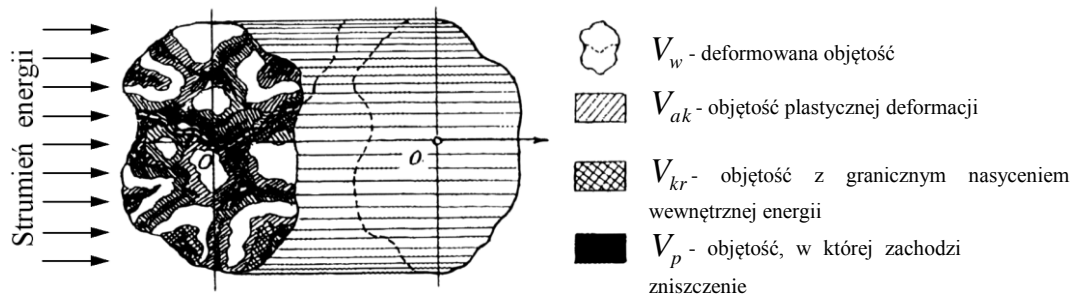
Tarciem nazywany zbiór zjawisk występujących podczas względnego ruchu ciał, którego skutkiem jest siła oporu przeciwna do kierunku ruchu elementu. Tarcie zewnętrzne możemy podzielić na toczne lub ślizgowe, a zarówno jedno, jak i drugie występuje w łożyskowaniu igiełkowym [2].

Według powszechnych hipotez tarcie ślizgowe jest wynikiem odkształcenia materiału w pobliżu powierzchni kontaktu (teoria Kragielskiego), oddziaływania molekularnego spowodowanego koniecznością pokonania sił adhezji atomów powierzchniowych (teoria Tomilsona), pokonania nierówności na powierzchni trących ciał (teoria Dieragina) lub powstawania i zrywania mikrosypin występujących w punktach styku mikronierówności (teoria Bowdena-Tabora). Tarcie toczne natomiast jest spowodowane zjawiskiem ściskania oraz rozdzielania elementów współpracujących (toczących się). Polem kontaktu elementów współpracujących w łożyskowaniu igiełkowym jest figura określona polem kontaktu Hertza; w miejscu tym zachodzi zjawisko odkształcenia obu ciał, a rozkład naprężeń na powierzchni elementów będących w ruchu nie jest symetryczny. Zjawiskiem towarzyszącym toczeniu jest tworzenie się i rozrywanie połączeń mostkowych między ciałami oraz powstawanie nadmiaru materiału przed toczącym się ciałem. Obie sytuacje wymagają dodatkowej pracy ukierunkowanej na kontynuację ruchu elementu tocznego, co bezpośrednio przekłada się na wartość momentu oporu ruchu.

Łożyska igiełkowe w nomenklaturze są sklasyfikowane jako łożyska toczne. Analizując możliwie szeroki zakres pracy łożyskowania igiełkowego (znaczne obciążenia, wysoka prędkość obrotowa), możemy zauważyć, że oprócz toczenia mamy do czynienia z mikroślizgiem (ze względu na różnicę długości łuku styku obu ciał przed obciążeniem i po obciążeniu) oraz czystym poślizgiem.

2.1. Energia w strefie kontaktu elementów tocznych łożyskowania

Równanie zużycia przedstawione w postaci energetycznej opisuje realne procesy przebiegające przy różnych zewnętrznych oddziaływaniach na materiały, prowadzących do ich zniszczenia oraz tworzenia produktów zużycia [3]. Model fizyczny rozdziału energii plastycznej deformacji przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat rozdziału strumienia energii w deformowanej objętości

Fig. 1. The diagram of the division of energy stream within deformed volume

Kryterium odporności na zużycie W_{kr}^* powinno uwzględniać właściwości materiałów (mechaniczne, fizyczne, chemiczne i inne) mające wpływ na zniszczenie w konkretnych warunkach zewnętrznego oddziaływania. Konkretna wartość W_{kr}^* zależy od charakteru obciążenia zewnętrznego i przyjmuje wartości uśrednione w zużytej objętości (* – oznaczenie uśrednienia).

Przedstawiając \mathcal{G}_{kr} w postaci sumy składowych sprężystej i plastycznej deformacji jako odpowiednio \mathcal{G}_{kr}^{spr} i \mathcal{G}_{kr}^{pl} , otrzymamy:

$$W_{kr}^* = \frac{1}{3} E_{y\delta}^* \mathcal{G}_{kr} = \frac{1}{3} E_{y\delta}^* (\mathcal{G}_{kr}^{spr} + \mathcal{G}_{kr}^{pl}). \quad (1)$$

Właściwą energię odkształceń $E_{y\delta}^*$, nieodwracalnie pochłoniętą przez materiał w chwili powstawania produktów zużycia, można wyznaczyć przykładowo wg wykresu wytrzymałości lub twardości jako pole powierzchni pod krzywą $\sigma(e_i)$ lub $H(e_i)$, ograniczoną z prawej strony deformacją zniszczenia e_p , wyznaczoną w konkretnych warunkach zużywania się metodą pomiaru mikrotwardości bezpośrednio na zużytej powierzchni materiału.

Składową sprężystą \mathcal{G}_{kr}^{spr} w wyrażeniu (1) określa się prędkością fali sprężystej deformacji c_0 i sprężystej deformacji e_{spr}

$$\mathcal{G}_{kr}^{spr} = c_0 e_{spr} = \sqrt{\frac{E}{\rho_M}} e_{spr}^2, \quad (2)$$

gdzie: E – moduł sprężystości, ρ_M – gęstość zużywającego się materiału.

Składowa plastyczna \mathcal{G}_{kr}^{pl} w (1) zależy od prędkości fali deformacji plastycznej c_{pl} i skumulowanej przy zużywaniu się sumarycznej deformacji plastycznej.

$$\mathcal{G}_{kr}^{pl} = \int_{e_{spr}}^{e_p} c_{pl} de = \int_{e_{spr}}^{e_p} \left(\frac{d\sigma/de}{\rho_M} \right)^{0.5} de, \quad (3)$$

gdzie: $d\sigma/de$ – lokalne nachylenie stycznej do krzywej rozciągania (ściskania), sporządzonej we współrzędnych naprężenie – odkształcenie ($\sigma - e$).

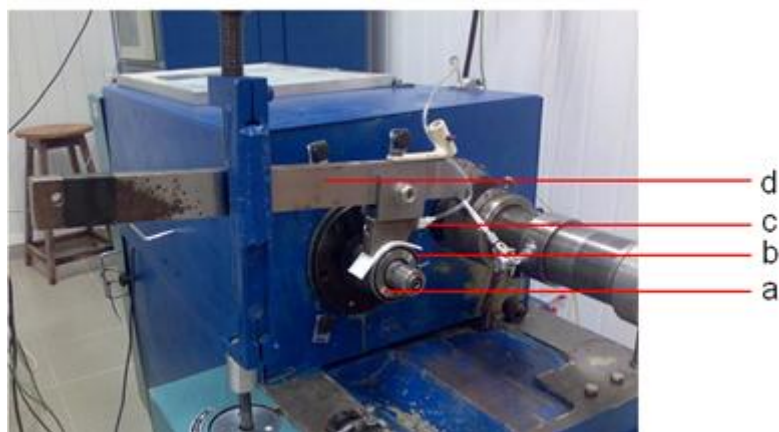
Wyrażając prawe strony wzorów (2) i (3) jako energię kruchego E_{kr} i plastycznego E_{pl} zniszczenia, otrzymamy:

$$g_{kr} = \sqrt{\frac{2E_{kr}}{\rho_M}} + \sqrt{\frac{2E_{pl}}{\rho_M}}, \quad (4)$$

gdzie: $E_{kr} = \sigma_b^2 / 2E$, $E_{pl} = (\sigma_b - \sigma_T)^2 / 2D$, σ_b , σ_T – wytrzymałość materiału i granica plastyczności, D – moduł umocnienia (tg kąta nachylenia stycznej do krzywej $\sigma(e)$ w zakresie deformacji plastycznych, przy liniowym charakterze deformacyjnego umocnienia materiału).

3. METODYKA BADAŃ

Do określenia parametrów pracy łożyska wykorzystano stanowisko badawcze (rys. 2) pozwalające stworzyć warunki zbliżone do występujących w trakcie eksploatacji tych łożysk w podzespołach maszyn. Doświadczenie przeprowadzono na maszynie tarciowej, która zapewnia pomiar momentu oporu ruchu i prędkości obrotowych wszystkich elementów poruszających się w węźle tarciowym [5]. Badania zostały przeprowadzone dla pięciu różnych łożysk o średnicach wewnętrznych od 35 mm do 60 mm w zakresie prędkości obrotowej wałka do 1500 obr/min i obciążeniu do 3000 N.



Rys. 2. Stanowisko badawcze – węzeł tarciowy: a – nakładka na czop wału, b – łożysko, c – iglica dozująca środek smarny, d – ramię, przez które przekazywane jest obciążenie

Fig. 2. The examination stand – the friction assembly: a – the strap on the shaft pin, b – the bearing, c – the lubricant measuring needle, d- the load transmitting arm

W ramach zaproponowanego modelu matematycznego (5) wyodrębniono człony opisujące osobno moment przy niższych i przy wyższych prędkościach wałka. Poniższe równanie zakłada, że łączny moment oporów ruchu składa się z momentu powstałego w wyniku tarcia tocznego przedstawionego jako iloczyn obciążenia N i współczynnika tarcia tocznego f oraz momentu wynikającego z tarcia ślizgowego z uwzględnieniem obciążenia, współczynnika tarcia ślizgowego μ i promienia wałka r .

$$M_{Tc} = N \cdot f + N \cdot \mu \cdot r, \quad (5)$$

Założono, że podczas pracy wałka z prędkością obrotową rzędu 50 obr/min mamy do czynienia tylko z oporem ruchu wywołanym tarcieniem tocznym. Wyniki z odczytu momentomierza wskazują moment tarcia tocznego i pozwalają ustalić wartość współczynnika

f. Następnie przy zwiększeniu obrotów do 1000 obr/min znaczenia nabiera drugi człon równania, a wartość całkowitego momentu zwiększy się o omawiane wcześniej tarcie ślizgowe. Tak przeprowadzone doświadczenie oraz dane obciążenie N i promień wałka r pozwalają określić wartości współczynnika tarcia tocznego i współczynnika tarcia ślizgowego.

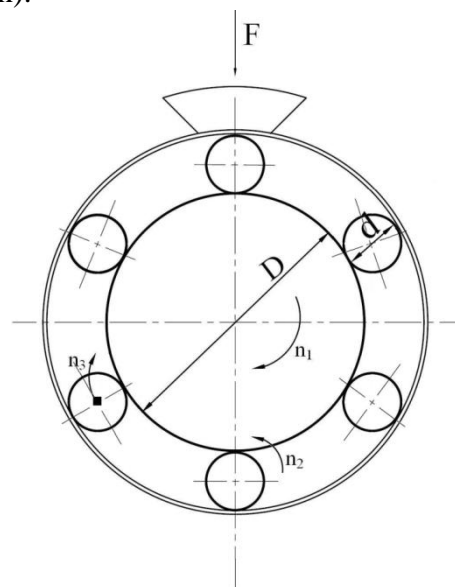
4. WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzone badania można podzielić na trzy etapy. Pierwszy w nich to analiza kinematyki elementów tocznych. Celem jest poznanie ruchu wszystkich elementów względem siebie oraz określenie strefy poślizgu, w której występuje utrata „synchronizacji” pracy elementów wałek – koszyk – igielka. Drugi etap to pomiar momentu oporu ruchu pracy łożyskowania w funkcji zmiennych parametrów, tj.: geometrii układu, obciążenia i prędkości obrotowej. Zebrane w tej próbie wyniki pośrednio posłużyły realizacji trzeciego etapu, czyli wyznaczeniu współczynnika tarcia ślizgowego μ i współczynnika tarcia tocznego f .

4.1. Kinematyka elementów tocznych

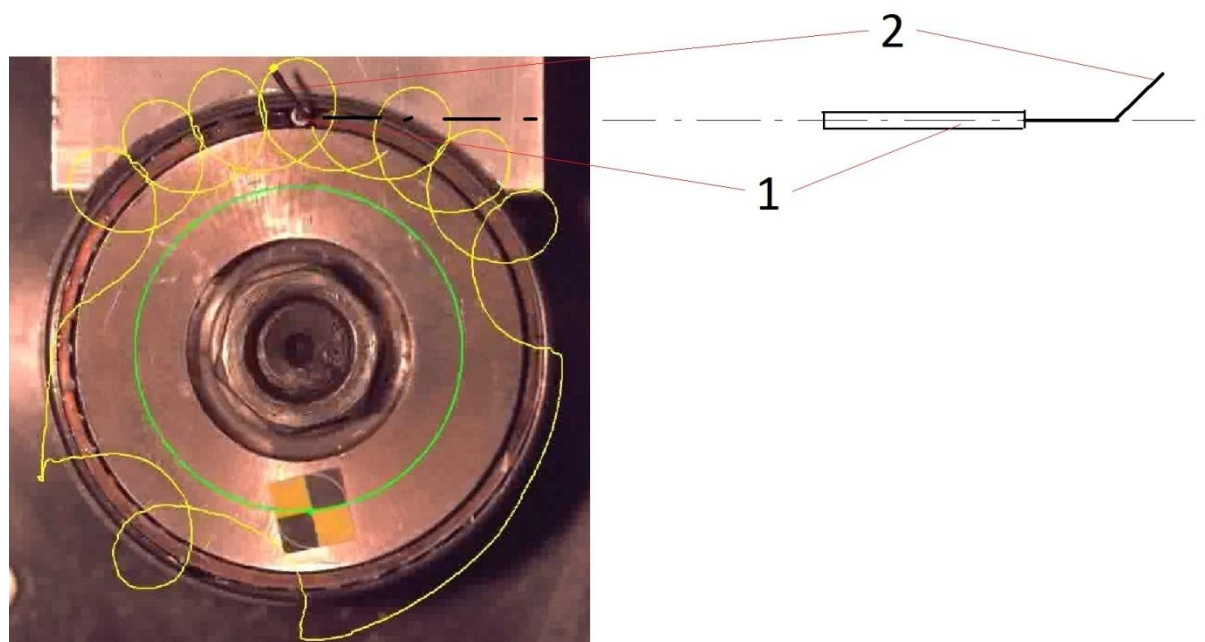
Doświadczenie polegało na rejestracji pracy łożyska szybką kamerą optyczną (Phantom V341 o wydajności do 130 tys. klatek na sekundę) [6] oraz obróbce materiału przy wykorzystaniu programu komputerowego. W doświadczeniu każdy element wykonujący ruch w węźle ciernym został w odpowiedni sposób oznaczony, aby po rejestracji można było ustalić zależności pomiędzy elementami składowymi łożyskowania. W ramach analizy komputerowej określono prędkości n_1 , n_2 , n_3 (rys. 3).

Badanie przeprowadzono dla różnych wartości obciążenia (500 N – 1500 N) i prędkości obrotowych (50 – 800 obr/min).



Rys. 3. Geometria układu: n_1 – obroty wałka, n_2 – obroty igielki względem osi symetrii, n_3 – obroty igielki wokół osi wałka, D – średnica wałka, d – średnica igielki, F – siła obciążająca łożysko

Fig. 3. The geometry of the system: n_1 – the rotation of the roller, n_2 – the rotation of the needle around the symmetry axis, n_3 – the rotation of the needle around the roller axis, D – the diameter of the roller, d – the diameter of the needle, F – the power loading the bearing



Rys. 4. Trajektoria znacznika zespolonego z igiełką łożyska; 1 – igiełka, 2 – znacznik
 Fig. 4. The trajectory of a marker attached to the needle roller; 1 – the needle roller, 2 – the marker

Siła osiowa przekazywana na pierścień zewnętrzny łożyska jest rozkładana stale na kilka igiełek łożyska znajdujących się w strefie obciążenia, a następnie na bieżnię wewnętrzną, czyli czop wałka. Trajektoria znacznika połączonego z igiełką (rys. 4) wskazuje, że obszar, który w sposób czynny przenosi obciążenie, to około 1/3 całej bieżni łożyska. Zestawienie wyników prędkości obrotowych igiełki wokół osi wałka dla różnych obciążeń i różnych prędkości obrotowych wałka przedstawia tabela 1.

Tabela 1

Zestawienie wyników z pomiaru prędkości obrotowej igiełki wokół osi wałka

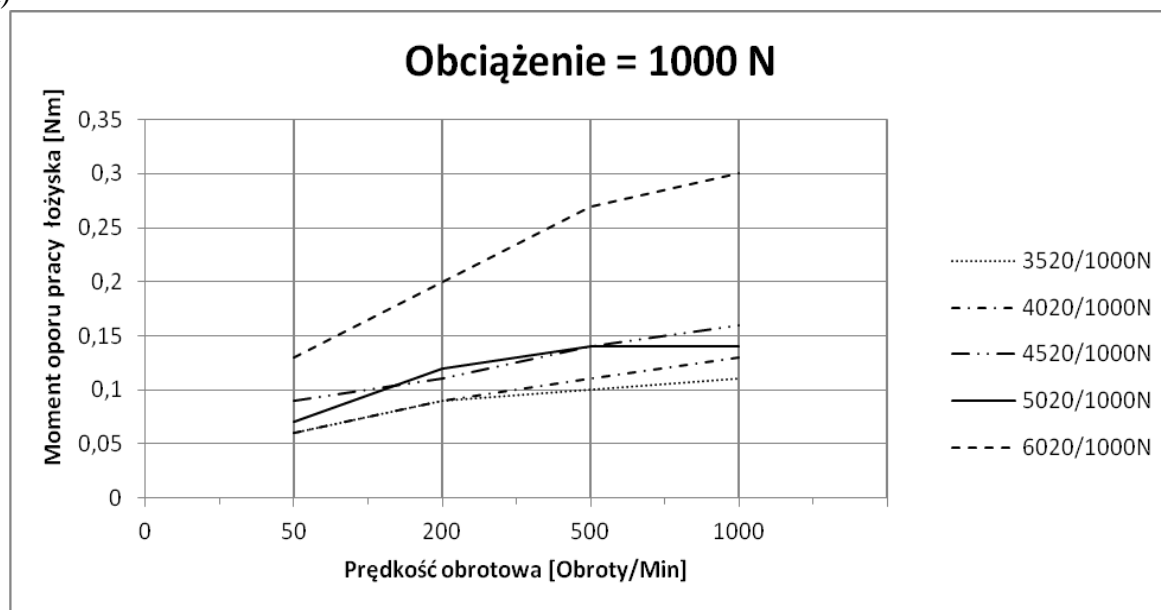
Obciążenie [N]	Prędkość obrotów wałka [obr/min]	Prędkość obrotów igiełki wokół osi wałka [obr/min]
500, 1000, 1500	50	23
500, 1000, 1500	200	92
500, 1000, 1500	400	184
500, 1000, 1500	800	369

Na podstawie zgromadzonych wyników można stwierdzić, że prędkość obrotowa koszyka (która jest zgodna z prędkością igiełki wokół osi wałka) jest stała i daje się opisać stosunkiem 2,17:1; prędkość ta nie zmienia się pod wpływem zmiany obciążenia i prędkości obrotowej. W miejscu oddziaływania siły ciągle obciążenie kilku igiełek pozwala utrzymać stałą prędkość koszyka względem wałka. Poślizg igiełki względem wałka jest zjawiskiem osobliwym i nie ma wpływu na mechanizm ruchu koszyka.

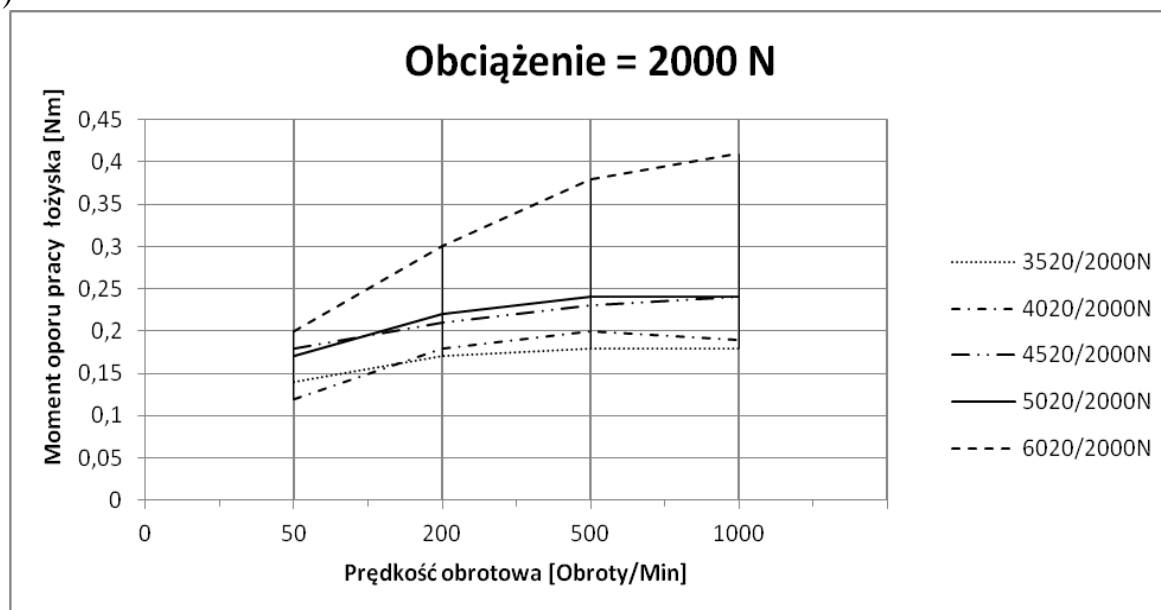
4.2. Moment oporu ruchu łożyskowania igielkowego

Drugi etap badań obejmował pomiar momentu oporu ruchu pięciu łożysk o średnicy wewnętrznej od 35 do 60 mm. Każde z łożysk było poddawane próbie przy dwóch różnych obciążeniach, tj. 1000 N i 2000 N, oraz przy czterech prędkościach obrotowych wałka, kolejno: 50, 200, 500, 1000 obr/min. Środowisko pracy było niezmiennie, łożyska pracowały w tym samym na bieżąco uzupełnianym ośrodku smarnym (olej SAE 5W30) przez około 10 min, czyli przez czas rozruchu służący stabilizacji pracy łożyska. Następnie dokonywany był pomiar momentu przez 15 s z częstotliwością 0,1 s. Zebrane wyniki po analizie statystycznej posłużyły ustaleniu średniej wartości momentu oporu pracy każdego z łożysk.

a)



b)



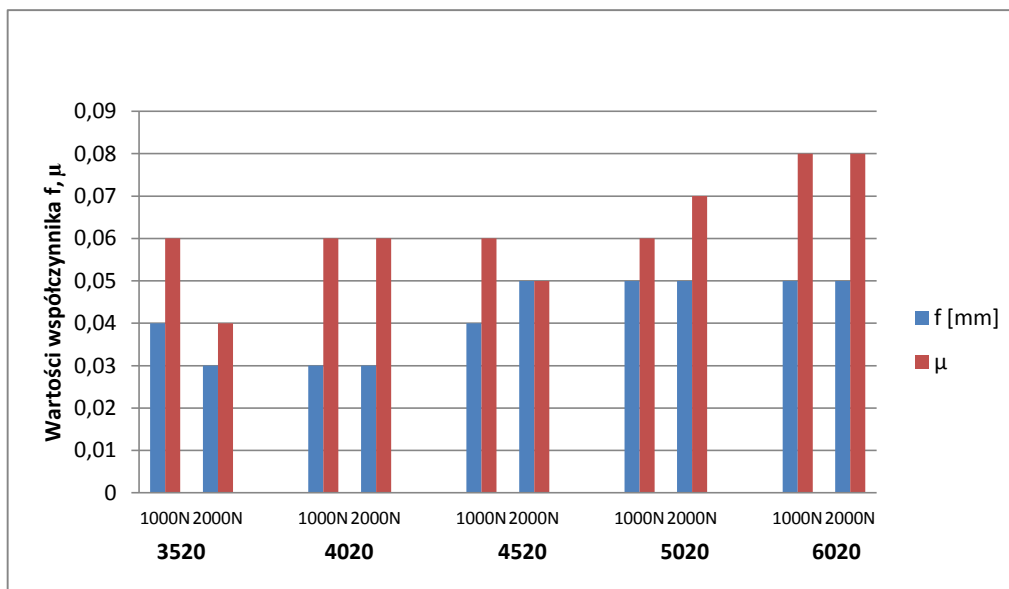
Rys. 5. Moment oporu ruchu łożysk igielkowych w funkcji prędkości obrotowej i obciążenia: a) obciążenie 1000 N, b) obciążenie 2000 N

Fig. 5. The anti-torque of needle bearings in the function of the rotational speed and the load: a) the load 1000 N, b) the load 2000 N

Wykonane pomiary pozwoliły wyznaczyć 40 średnich wartości momentu oporu pracy łożysk. Na podstawie tego sporządzono dwa wykresy – przebieg momentu w funkcji prędkości obrotowej wałka dla pięciu łożysk pod obciążeniem 1000 N (rys. 5a) oraz przebieg momentu dla tych samych zmiennych, lecz pod obciążeniem 2000 N (rys. 5b). Przy prędkościach średnich rzędu 200 obr/min wartość momentu łożyska 5020 przewyższa opór łożyska 4520, a przy wyższych obrotach stabilizuje się i jest stała. Wszystkie próbki charakteryzują się wzrostem momentu wraz ze wzrostem obciążenia, prędkości obrotowej oraz średnicy wałka (przy zbliżonej średnicy igiełki w większym łożysku więcej igiełek jednocześnie przenosi obciążenie). W obu wariantach obciążenia możemy zaobserwować ponaddwukrotny wzrost momentu dla największego łożyska w funkcji prędkości obrotowej i nieco mniejszy dla pozostałych łożysk oraz stabilizację wartości momentu oporu ruchu łożysk przy wyższych prędkościach obrotowych. Nie udało się osiągnąć we wszystkich przypadkach punktu granicznego, w którym wartość momentu jest już stała, z uwagi na ograniczone możliwości aparatury badawczej.

4.3. Wyznaczenie współczynników tarcia f i μ

W odniesieniu do modelu matematycznego (wzór (5)) opisującego łączny moment oporu pracy łożyska oraz na podstawie zebranych wyników z pomiaru momentu wyznaczono współczynniki tarcia tocznego i ślizgowego. Zestawienie wyników przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Zmiana wartości współczynnika tarcia tocznego i tarcia ślizgowego

Fig. 6. The change in the value of the coefficient of rolling friction and sliding friction

W przeprowadzonych próbach wartość współczynnika tarcia tocznego waha się w przedziale 0,03 – 0,05; jest to wynik mieszczący się w górnym przedziale wartości, które można znaleźć w literaturze [1] dla przypadku współpracy walca i bieżni ze stali hartowanej. Jak wcześniej założono, tarcie ślizgowe pojawia się przy wyższych prędkościach pracy łożyska i zależy od obciążenia (dlatego wyniki porównywano w próbach wykonanych przy tym samym obciążeniu), materiału i stanu powierzchni, lecz dwa ostatnie czynniki przyjęto jako niezmiennie i jednakowe dla wszystkich próbek. Zgodnie z wcześniej opisaną metodyką

badan wyszczególniono część momentu oporu pracy związanej z poślizgiem. Na tej podstawie wyznaczono współczynnik tarcia ślizgowego, który w przeprowadzonym doświadczeniu przyjmuje wartości od 0,04 do 0,08.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zjawiska występujące w trakcie normalnej eksploatacji łożysk igiełkowych, które mają największy wpływ na ich zużycie. Tarcie w łożyskowaniu potraktowano jako proces złożony z tarcia tocznego i ślizgowego, natomiast efekt zmęczenia materiału przedstawiono w ujęciu energetycznym. Kolejno przeprowadzone doświadczenia zgodnie z opracowaną metodyką badań są próbą poznania zjawisk zachodzących w łożyskowaniu igiełkowym. Pomiaru przy wykorzystaniu szybkiej kamery optycznej pozwoliły określić strefę czynnego przenoszenia obciążenia oraz ustalić zakres poślizgu, który dotyczy jedynie samej igielki, nie oddziałując na prędkość obrotową koszyka. Zaproponowany model matematyczny zakłada, że w ogólnym bilansie oporu ruchu składowe opisujące moment tarcia tocznego i ślizgowego wzajemnie się uzupełniają. Na tej podstawie i opierając się na zebranych wynikach z pomiaru momentu oporu ruchu łożyska, wyznaczono wartości współczynników tarcia oraz przebieg krzywej momentu oporu ruchu.

Bibliografia

1. Dietrich M. (red.): Podstawy konstrukcji maszyn. T. 2, wyd. 3, Warszawa 2003, s. 391-400.
2. Hebda M., Wachal A.: Trybologia. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980, s. 145-147, 443-446.
3. Нахимович Е., Корбут Р.: Проблеми тертя та зношування Науково – технічний збірник випуск 52, Київ 2010, s. 242-250.
4. Nachimowicz J., Korbut R.: The influence of geometrical parameters on the friction process in the needle bearing. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, Key Engineering Materials, Vol. 490/2012, s. 288-295.
5. Nachimowicz J., Korbut R.: *Stanowisko do modelowania procesu tarcia w łożyskowaniu igielkowym*. Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom XVI, 2011, s. 67-71.
6. <http://www.ects.pl/?page=PStructure&id=19&cid=84&pid=264>.