

Dominik NOLBERT, Zbigniew KUSZNIEREWICZ, Zygmunt RYMUZA

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
INSTYTUT MIKROMECHANIKI I FOTONIKI,
ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

Pomiary tarcia spoczynkowego w miniaturowych łożyskach ślizgowych polimer-polimer

Mgr inż. Dominik NOLBERT

Doktorant Politechniki Warszawskiej. Współpracuje z Instytutem Mikromechaniki i Fotoniki w zakresie prowadzenia badań tarcia materiałów polimerowych, budowy stanowisk do pomiaru tarcia i obróbki danych pomiarowych. Współpracował również z kilkoma firmami w Polsce i za granicą w zakresie budowy precyzyjnych urządzeń pomiarowych dla nanotechnologii. Obecnie jego praca naukowa koncentruje się na technologii Nano Imprint Lithography.



e-mail: dominik@nolbert.pl

Dr inż. Zbigniew KUSZNIEREWICZ

Pracownik Zakładu Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych Instytutu Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej. Ukończył Wydział Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej (specjalność: drobne mechanizmy) i na tym samym wydziale uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Zajmuje się trybologią i mikrotrybologią.



e-mail: z.kusznierewicz@mchtr.pw.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Zygmunt RYMUZA

Pracownik w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się problematyką badań mechanicznych, tribologicznych i adhezyjnych ultracienkich warstw materiałów w skali mikro/ nano. Jest autorem 3 monografii naukowych i znacznej liczby artykułów w czasopiśmie naukowych w kraju i za granicą. Prezentował wyniki prac badawczych na wielu konferencjach naukowych krajowych i zagranicznych.



e-mail: z.rymuza@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

Artykuł prezentuje metodykę i przykładowe wyniki badań tarcia spoczynkowego miniaturowych łożysk ślizgowych polimer-polimer. Przedstawiono parametry badanych łożysk, budowę stanowiska badawczego z uwzględnieniem elementów toru akwizycji danych, metodykę przeprowadzania pomiarów wraz z wartościami zadawanych parametrów wejściowych oraz sposób obróbki danych pomiarowych. W dalszej części przedstawiono wybrane wyniki badań tarcia oraz wnioski z przeprowadzonych eksperymentów.

Słowa kluczowe: współczynnik tarcia statycznego, trybometr, miniaturowe łożysko ślizgowe, polimer.

Static friction measurements in miniature journal bearings

Abstract

This paper presents methodology and selected results for friction test experiments on miniature journal polymer-on-polymer bearings. There is not so much data regarding polymer versus polymer frictional contacts in particular used in miniature devices. In the first paragraph there is introduction followed by second paragraph with test rig design (Fig. 1), tested bearing dimensions (Fig. 2) and all experimental parameters. Step-by-step experiment process, data acquisition and 3-stage data processing is described. The method for experimental estimation of the static friction coefficient is shown. In the third paragraph the discussion of the experimental results is presented. On several plots the selected experimental data are show illustrating influence of particular parameters (sliding speed, bearing load and standstill time under load before starting to slide) on the friction coefficient. The fourth paragraph specifies conclusions from the experiments and the references are listed at the end.

Keywords: static friction coefficient, tribometer, miniature journal bearing, polymer.

1. Wprowadzenie

Miniaturowe polimerowe pary tarcie, w szczególności łożyska ślizgowe, są bardzo często stosowane w budowie drobnych

mechanizmów np. zegarowych. W szczególności całkowicie polimerowe pary tarcie zapewniają znaczne zmniejszenie kosztów produkcji i eksploatacji mechanizmów. Elementy funkcjonalne mogą być masowo produkowane metodą wtrysku a węzły tarcia nie wymagają smarowania. Dobór materiałów na elementy tarcie jest trudnym zadaniem bez przeprowadzenia kosztownych badań trybologicznych. W dostępnej literaturze niewiele informacji można znaleźć o zachowaniu się takich skojarzeń [1-5]. Dlatego postanowiono przeprowadzić systematyczne badania takich par tarcz wybierając jako parę modelową typowe, miniaturowe łożysko ślizgowe o czopie i panewce polimerowej wykonanych metodą wtrysku. Jako materiały na czop i panewkę wybrano najbardziej rozpowszechnione polimery termoplastyczne. Postanowiono zbadać zachowanie się takich łożysk w fazie najbardziej krytycznej, przy przechodzeniu od spoczynku do ruchu kiedy traci się najwięcej energii. Jest to istotne dla mikromechanizmów w urządzeniach precyzyjnych zasilanych z baterii.

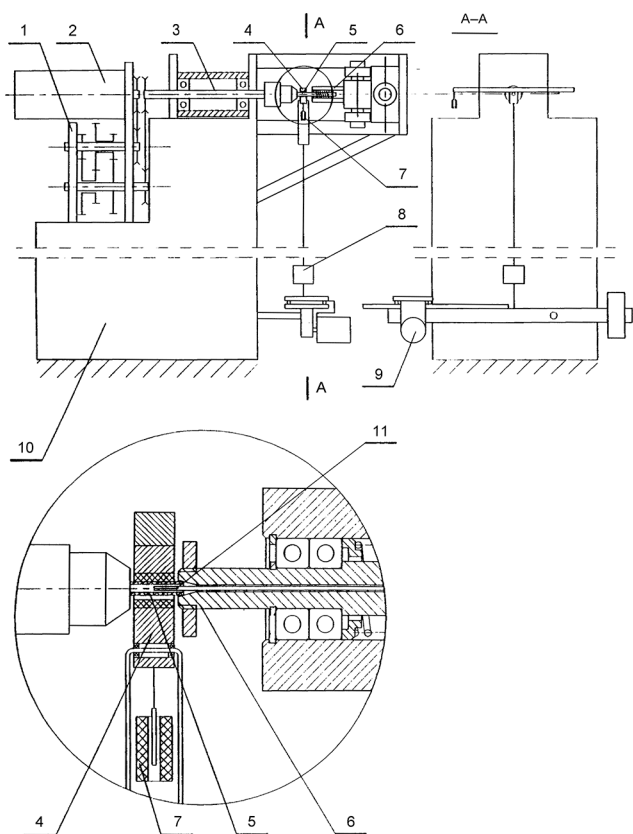
2. Metodyka badań

Badania eksperymentalne były przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej (rys. 1).

Stanowisko zostało zbudowane na masywnej podstawie betonowej (10). Czop badanego łożyska (5) mocowany był w samocentrującym uchwycie wałka (3) napędzanego za pomocą silnika prądu stałego (2) i zestawu przekładni o dużym przełożeniu (1). Drugi koniec czopa łożyska był podpierany obrotowym uchwytem (6) o regulowanym położeniu. Panewka łożyska mocowana była w oprawce o kształcie poziomej belki z otworem (4) obciążanej za pośrednictwem pionowego ciężna układem dźwigniowym (9). Na ciężnie zamocowany był tensometryczny przetwornik obciążenia (8) umożliwiający dokładne zadanie siły obciążającej węzeł tarcia. Przy ramieniu oprawki był zamocowany indukcyjny układ pomiaru przemieszczeń umożliwiający wyznaczenie chwilowego momentu (współczynnika) tarcia badanego łożyska. Odległość pomiędzy osią obrotu łożyska a osią pomiaru przemieszczenia za pomocą układem indukcyjnym może być zmieniana w zależności od prognozowanego badanego momentu tarcia, a jej dokładna wartość jest parametrem niezbędnym do poprawnego wyznaczenia momentu tarcia.

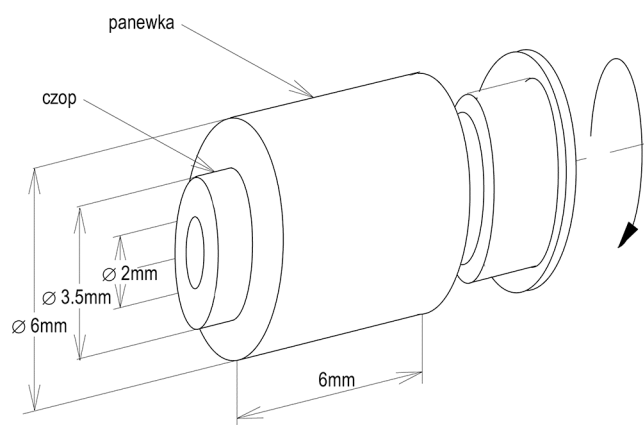
Silnik stanowiska był sterowany za pomocą dedykowanego programu komputerowego, który odpowiadał również za akwizycję danych pomiarowych w trakcie rozruchu węzła tarcia. Na jednym z kół przekładni zamocowany był optoelektroniczny układ mierzący prędkość obrotową, umożliwiający dokładne zadawanie prędkości poślizgu węzła tarcia. Stanowisko było wyposażone w układy elektroniczne pośredniczące w wymianie sygnałów sterujących i danych pomiarowych z komputerem.

Niezależnie były zapisywane dodatkowe parametry jak temperatura otoczenia i subiektywna ocena współpracy danej pary trącej (pojawienie się produktów zużycia, występowanie zjawiska stick-slip). W przypadku części badań po zakończeniu właściwych pomiarów były przeprowadzane dodatkowe testy tarciove metodą alternatywną w celu weryfikacji wyników otrzymanych we właściwym eksperymencie. Szczegółowy opis stanowiska badawczego zawiera publikacja [2].



Rys. 1. Stanowisko do badania tarcia w miniaturowych łożyskach tarcia
Fig. 1. Test rig for investigation of friction in miniature bearings

Badaniom były poddawane miniaturowe łożyska ślizgowe (rys. 2) w całości wykonane z polimerów, pracujące bez udziału materiału smarnego.



Rys. 2. Badane miniaturowe łożysko ślizgowe
Fig. 2. Tested miniature journal bearing

Do badań użyto czopów i panewek wykonywanych z 12 polimerów termoplastycznych: 4 poliamidy (PA) (w tym jeden

wzmacniany włóknem szklanym), 3 poliacetale (POM) (w tym jeden napelmiony teflonem), ABS, poliwęglan (PC), polistyren (PS) i politereftalan etylenu (PETP). Przebadano wszystkie 144 możliwe kombinacje materiałowe z czego część dwukrotnie lub wielokrotnie. Dalej prezentowane są przykładowe wyniki badań dla elementów trących wykonanych z PA11 (Rilsan BMN) i POMh (Delrin 500 NC10).

Surowe dane pomiarowe były wstępnie obrabiane za pomocą specjalnego programu (Small2Cnv; szczegółowy opis programu znajduje się w [3, 4], który umożliwiał wyznaczenie takich wartości jak współczynnik tarcia spoczynkowego, średni współczynnik tarcia kinetycznego po rozruchu i wyświetlenie prostych wykresów obrazujących wyniki badania dla każdej z 648 kombinacji parametrów wejściowych (czas postoju węzła tarcia pod obciążeniem, wartość zadanej obciążenia i prędkość poślizgu).

W każdym badaniu sekwencyjnie zmieniano obciążenie (9 wartości z przedziału od 5 N do 30 N), prędkość poślizgu (9 wartości z przedziału od 4 $\mu\text{m/s}$ do 100 $\mu\text{m/s}$) oraz czas postoju węzła tarcia pod obciążeniem w stanie spoczynku (8 wartości z przedziału od 1 s do 15 min). Daje to 648 cykli pomiarowych w każdym badaniu, których wykonanie zajmowało około 32 godzin nie licząc czasów przygotowawczych i badań porównawczych. W sumie wykonano ponad 300 badań, co daje ogólną liczbą prawie 200 000 jednostkowych pomiarów tarcia.

Przebieg każdego badania był następujący:

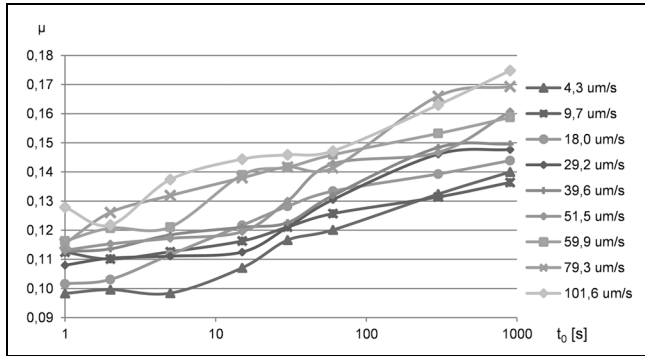
- montaż panewki i czopa łożyska w uchwytach,
- wpisanie parametrów badania w programie sterującym,
- uruchomienie programu,
- ustawienie pierwszej zadanej wartości obciążenia,
- próbny rozruch i zatrzymanie łożyska,
- postój pod obciążeniem przez pierwszy zadany okres czasu,
- uruchomienie łożyska z pierwszą zadaną prędkością,
- rejestracja narastania momentu tarcia, zerwania kontaktu (przy momencie odpowiadającym tarcia statycznemu) i tarcia kinetycznego w początkowym okresie,
- przerwanie akwizycji danych i zatrzymanie silnika,
- wybranie kolejnego zestawu parametrów początkowych i wykonanie kolejnego cyklu pomiarowego poprzez powtórzenie kroków f do i,
- opcjonalny, manualny pomiar tarcia metodą alternatywną dla jednej lub kilku wybranych wartości obciążenia,
- demontaż czopa i panewki łożyska ze stanowiska badawczego.

Do dalszej obróbki wybrano około 160 badań (z 300 wykonanych), a samą obróbkę danych przeprowadzono za pomocą zestawu autorskich programów – makr Visual Basic w Excelu. Umożliwiło to podział dużej ilości danych wejściowych na mniejsze porcje – w plikach według materiału czopa danego łożyska, a następnie na poszczególne arkusze odpowiadające konkretnym zestawieniom materiałów czop-panewka. Uzyskano zatem 12 arkuszy Excela po 12 skoroszytów każdy. Następnie dane były automatycznie organizowane i formatowane w sposób przyjazny dla użytkownika i umożliwiający dalszą analizę. Na tym etapie oznaczane i usuwane były błędne pomiary. Dla każdego cyklu pomiarowego wyznaczano dodatkowe wartości (jak np. czas narastania momentu tarcia oraz jego zmianę przy uruchomieniu łożyska). Dodatkowo dla każdego badanego skojarzenia tworzono automatycznie zestawy wykresów (27 sztuk dla każdego badania) i wyznaczano charakterystyczne, zbiorcze wartości współczynników tarcia (maksymalny, średni, minimalny) i innych wartości wraz z odchyłkami.

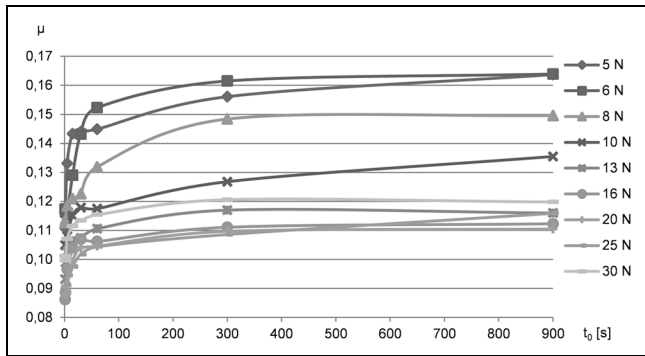
Średnia wartość spoczynkowego współczynnika tarcia μ danej pary materiałowej była wyznaczana, jako średnia arytmetyczna ze współczynników tarcia spoczynkowego dla każdej kombinacji siły obciążającej i prędkości poślizgu, przy najdłuższym badanym czasie postoju (900 s) danego węzła tarcia. W sumie daje to 81 wartości. Na podstawie tych wartości obliczano również odchylenie standardowe współczynnika tarcia w danym badaniu i odchyłkę 3σ , służące ocenie rozrzutu danych.

3. Wyniki badań

Badany współczynnik tarcia spoczynkowego μ nie jest wartością stałą przy zmiennych parametrach pracy węzła tarcia. Jego wartość wzrasta logarytmicznie wraz z czasem postoju węzła tarcia pod obciążeniem (t_0) (rys. 3 i 4), przy czym może to być wzrost nawet dwukrotny w szczególnych przypadkach.

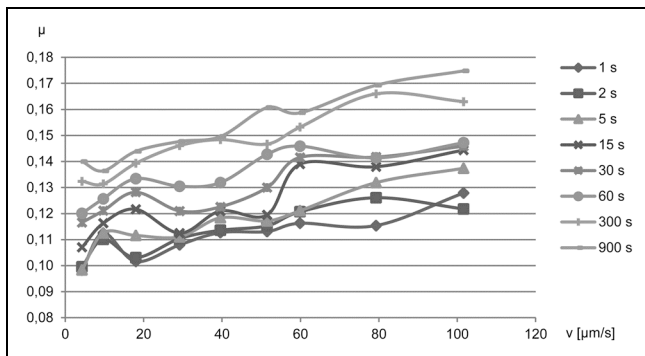


Rys. 3. Zależność $\mu=f(t_0)$ dla łożyska PA11 (czop) – POMh (panewka) od czasu postoju przy stałej sile $P=8\text{ N}$
 Fig. 3. Relationship $\mu=f(t_0)$ for PA11 (journal) – POMh (bearing bush) vs. standstill time at constant force $P=8\text{ N}$

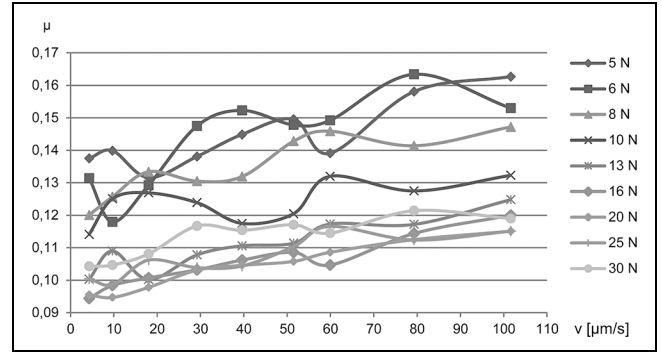


Rys. 4. Zależność $\mu=f(t_0)$ dla łożyska PA11 (czop) – POMh (panewka) w funkcji czasu postoju dla różnych wartości obciążenia i przy stałej prędkości ślizgania $v=39,6\text{ }\mu\text{m/s}$
 Fig. 4. Relationship $\mu=f(t_0)$ for PA11 (journal) – POMh (bearing bush) at different loads and constant sliding speed $v=39,6\text{ }\mu\text{m/s}$

Współczynnik tarcia spoczynkowego zależy również od docelowej prędkości ślizgania (rys. 5 i 6) przy czym nie jest to zależność aż tak silna jak w przypadku czasu postoju.

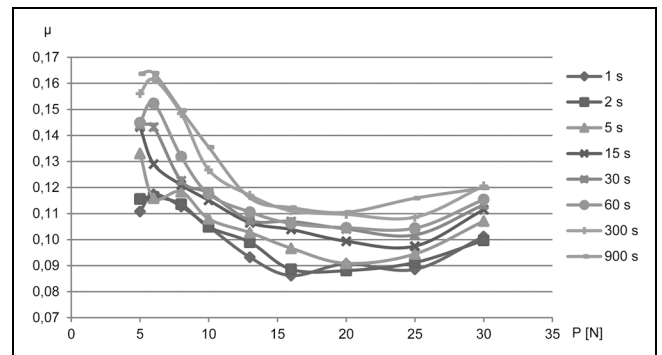


Rys. 5. Zależność $\mu=f(v)$ dla łożyska PA11 (journal) – POMh (bearing bush) od prędkości ślizgania dla różnych wartości czasu postoju łożyska i przy stałym obciążeniu $P=8\text{ N}$
 Fig. 5. Relationship $\mu=f(v)$ for PA11 (journal) – POMh (bearing bush) vs. sliding speed for different standstill times and constant load $P=8\text{ N}$

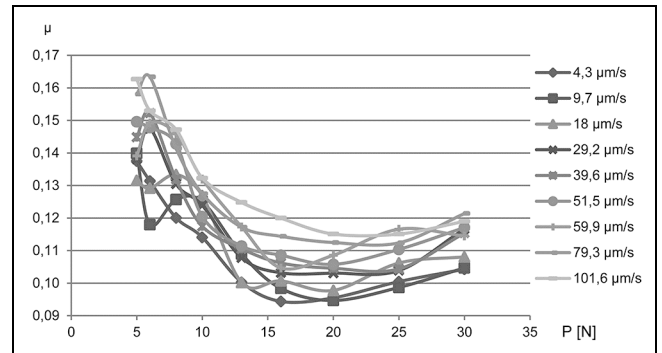


Rys. 6. Zależność $\mu=f(v)$ dla łożyska PA11 (czop) – vPOMh (panewka) dla różnych wartości obciążenia i dla stałego czasu postoju łożyska $t_0=60\text{ s}$
 Fig. 6. Relationship $\mu=f(v)$ for PA11 (journal) – vPOMh (bearing bush) at different loads and constant standstill time $t_0=60\text{ s}$

Zależność współczynnika tarcia spoczynkowego od obciążenia węzła tarcia przy stałej prędkości poślizgu (rys. 7) lub stałym czasie postoju łożyska (rys. 8) ma charakter niecki z wartością minimalną dla obciążeń o średniej wartości, przy czym wartości dla małych sił obciążających łożysko są znacznie większe niż te dla maksymalnych obciążeń.

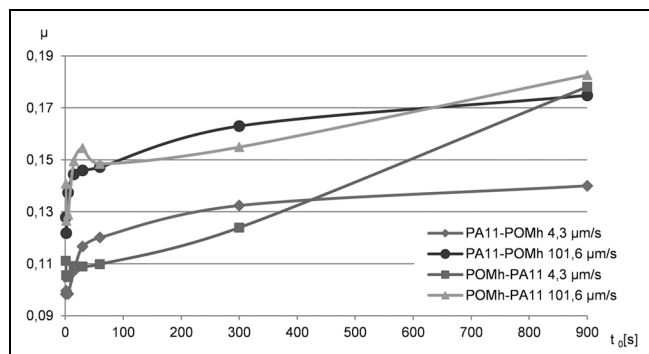


Rys. 7. Zależność $\mu=f(v)$ dla łożyska PA11 (czop) – POMh (panewka) od obciążenia dla różnych wartości czasu postoju łożyska i przy stałej prędkości poślizgu $v=39,6\text{ }\mu\text{m/s}$
 Fig. 7. Relationship $\mu=f(v)$ for PA11 (journal) – POMh (bearing bush) vs. load at different standstill times and constant sliding speed $v=39,6\text{ }\mu\text{m/s}$



Rys. 8. Zależność $\mu=f(P)$ dla łożyska PA11 (czop) – POMh (panewka) od obciążenia dla różnych wartości prędkości poślizgu i stałego czasu postoju łożyska $t_0=60\text{ s}$
 Fig. 8. Relationship $\mu=f(P)$ for PA11 (journal) – POMh (bearing bush) at various sliding speeds and constant standstill time $t_0=60\text{ s}$

Na rys. 9 przedstawiono porównanie wyników badań tarcia dla par odwróconych materiałowo. Zależności współczynnika tarcia dla takich komplementarnych materiałowo par czop-panewka są zbliżone, ale nie tożsame.



Rys. 9. Zależność $\mu=f(t)$ dla łożysk PA11 (czop) – POMh (panewka) i pary odwróconej POMh (czop) – PA11(panewka) w funkcji czasu postoju dla 2 skrajnych wartości prędkości poślizgu i przy stałej sile $P=8$ N

Fig. 9. Relationship $\mu=f(t)$ for PA11 (journal) – POMh (bearing bush) and inverted pair POMh (czop) – PA11(bearing bush) vs. standstill time for 2 outermost sliding speeds and constant load $P=8$ N

Uzyskane wyniki są niezwykle ważne do prognozowania zachowania się miniaturowych węzłów tarcia w drobnych mechanizmach. W szczególności dotyczy mechanizmów np. zegarów kwarcowych gdzie bardzo często dla zmniejszenia kosztów elementy mechanizmu są całkowicie wykonywane z polimerów. Mechanizmy takie pracują start-stopowo czyli przy każdym cyklu pracy konieczne jest zużywanie energii na pokonywanie stosunkowo dużych oporów ruchu przy rozruchu wynikających z tarcia spoczynkowego.

Przeprowadzone badania pozwoliły ustalić jaki jest wpływ kluczowych parametrów pracy węzła tarcia na opory ruchu. W szczególności zbadano wpływ czasu postoju na tarcie. Uzyskane wyniki potwierdzają, że tarcie spoczynkowe jest silnie uzależnione od czasu kontaktu elementów trących podczas spoczynku. Wzrost czasu kontaktu powoduje wzrost współczynnika tarcia co jest zgodne z ogólną teorią tarcia. Przy dłuższym czasie postoju pod obciążeniem wzrasta rzeczywista powierzchnia styku czopa z panewką.

Istotną rolę odgrywa też docelowa prędkość ślizgania elementu trącego. Stwierdzono wzrost współczynnika tarcia przy jej wzroście co potwierdza generalną zależność tarcia od szybkości odkształcania materiału w szczególności polimeru. Dłuższe czasy kontaktu elementów pod obciążeniem przed rozruchem sprzyjają

Zmniejszeniu współczynnika tarcia; materiały kontaktujące się są w mniejszym stopniu podatne wtedy na odkształcenie przy wzroście prędkości poślizgu.

Wpływ obciążenia jest wyraźnie widoczny na wykresach pokazanych na rys.7 i 8. W zakresie odkształceń sprężystych przy wzroście obciążenia współczynnik tarcia maleje zaś rośnie przy odkształceniach plastycznych występujących przy bardzo dużych obciążeniach co jest typową charakterystyką współczynnika tarcia par trących [5].

Zamiana materiałów elementów trących (para odwrócona) ma większy wpływ na tarcie przy małych prędkościach ślizgania i długich czasach postoju pod obciążeniem. Bardziej korzystne jest zastosowanie na czop (element wirujący, ruchomy) materiału o mniejszym module sprężystości niż materiał panewki. Strefa kontaktu czopa z panewką jest wtedy zmienna i można oczekiwać mniejszego udziału składowej mechanicznej siły tarcia w całkowitej sile (momencie) tarcia niż gdy panewka jest wykonana z bardziej miękkiego (elastycznego) materiału. W przypadku badanych materiałów PA11 i POMh uzyskano potwierdzenie tego efektu. Korzystniej jest więc zastosować poliamid na czop a panewkę wykonać z poliacetalu.

4. Wnioski

Z uwagi na brak podobnych opracowań otrzymane wyniki są unikatowe.

Zestawienie wartości współczynnika tarcia dla różnych kombinacji materiałów trących pozwala na optymalny dobór materiałów przy konstruowaniu węzła tarcowego, tak aby dane łożysko cechowało się pożądanym współczynnikiem tarcia. Ponadto poczynione subiektywne obserwacje warunków pracy konkretnych skojarzeń pozwalają w łatwy sposób wykluczyć te pary materiałowe, które przy wzajemnej współpracy zużywają się nadmiernie lub cechują się np. niestabilnością pracy.

Ze względu na czasochłonność procesu nie jest możliwe przeprowadzenie badań wszystkich możliwych kombinacji czop-panewka stosowanych przemysłowo tworzyw sztucznych. Nie jest również możliwe wielokrotne powtarzanie badań przy każdej kombinacji materiałów i parametrów badania w celu przeprowadzenia pełnej analizy statystycznej. Poczyniony wybór popularnych polimerów umożliwia jednak właściwy dobór materiałów w dużej części przypadków, a same badania mogą służyć, jako ważny element porównania, w dalszej perspektywie, badań eksperymentalnych z symulacjami czysto teoretycznymi, które nie podlegają takim ograniczeniom jak badania rzeczywiste.

Wnioski szczegółowe wynikające z przeprowadzonych obszer-nych badań są następujące:

- W węzłach tarcia należy unikać stosowania par materiałów takich samych lub bardzo podobnych, gdyż na skutek zwiększonych oddziaływań adhezyjnych znacznie zwiększa się również spoczynkowy współczynnik tarcia, a stabilność pracy łożyska jest niska. Z tego względu w wielu przypadkach materiały właściwie dobrane będą wzajemnie współpracowały znacznie lepiej niż materiały droższe, choć nieprzystosowane do takiego zadania.
- Współczynnik tarcia spoczynkowego wzrasta logarytmicznie wraz z czasem postoju węzła tarcia pod obciążeniem. W niektórych przypadkach będzie to nawet podwojenie wartości.
- Współczynnik tarcia spoczynkowego wzrasta wraz ze wzrostem prędkości poślizgu, jednakże nie jest to zależność tak silna jak wpływ czasu postoju.
- Dla danego węzła tarcia istnieje optymalna, średnia wartość obciążenia, przy którym wartość współczynnika tarcia będzie minimalna.
- Odwrócenie materiałowe pary trącej może mieć wpływ na uzyskiwany współczynnik tarcia. Korzystniejsze jest wykonanie elementu ruchomego (w naszym przypadku czopa) z materiału bardziej elastycznego (miękkiego) niż materiał z którego wykonana jest panewka jeśli ich własności mechaniczne się różnią.

5. Literatura

- [1] Rymuza Z.: Tribology of polymers. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2007, Vol. VII, No. 4, 175-184.
- [2] Rymuza Z., Kusznierevicz Z., Mańturzyk G.: Testing miniature in particular polymer-polymer journal bearings. Wear 1994, Vol.174, 39-46.
- [3] Kusznierevicz Z., Rymuza Z., Kwacz M.: Minimalizacja strat energetycznych w fazie rozruchu polimerowych mikrowęzłów tarcia. Sprawozdanie z Grantu KBN. Politechnika Warszawska, Warszawa 2002.
- [4] Kwacz M.: Minimalizacja strat energetycznych w fazie rozruchu polimerowych mikrowęzłów tarcia. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2005.
- [5] Lawrowski Z.: Tribologia, PWN, Warszawa 1993.