

Otrzymano: 23 marca 2018 / Zaakceptowano: 22 kwietnia 2018 / Zamieszczono na WWW: 20 grudnia 2018

*opór ruchu, łożyska skośne,
High Speed Cutting*

Mateusz MUSZYŃSKI¹
Jan KOSMOL^{1*}

EKSPERYMENTALNA METODA OKREŚLANIA MOMENTU OPORU RUCHU ŁOŻYSK SKOŚNYCH

W artykule przedstawiona została eksperymentalna metoda określania oporów ruchu łożysk kulkowych skośnych, w tym stanowisko pomiarowe oraz otrzymane wyniki. Badano wpływ zarówno napięcia wstępnego jak i prędkości obrotowej na całkowity moment oporu ruchu łożyska. Przeprowadzone badania mają szczególne odniesienie do łożysk wrzecion obrabiarek High Speed Cutting, które to osiągają bardzo duże prędkości obrotowe.

1. WPROWADZENIE

Cechą współczesnego przemysłu jest dążenie do maksymalizacji wydajności produkcji. Aktualną tendencją mającą na celu zwiększenie wydajności obrabiarek skrawających jest tzw. High Speed Cutting (HSC), który można realizować przez obróbkę z wysokimi prędkościami skrawania (przy zastosowaniu odpowiednich materiałów narzędziowych), stosowanie wysokich posuwów, czy stosowanie wysokich prędkości obrotowych wrzecion (rzędu kilkudziesięciu tysięcy obr/min), ale możliwe są także kombinacje tych sposobów. Bardzo wysokie prędkości obrotowe wrzecion wymagają ich specjalnej konstrukcji, w tym łożyskowania i układów chłodzących. Dobór rodzaju i wielkości łożysk jest niewątpliwie kluczową kwestią, która decyduje przede wszystkim o możliwości osiągnięcia wymaganych prędkości obrotowych, ale i dokładności ruchu wrzeciona czy też możliwości przenoszenia obciążeń zewnętrznych.

Jako napędy ruchu głównego stosowane są obecnie powszechnie elektrowrzeciona – zintegrowane napędy, w których wirnik silnika jest bezpośrednio wałem wrzeciona. Takie rozwiązanie redukuje układ kinematyczny obrabiarki do minimum, pozwalając jednocześnie na uniknięcie niekorzystnego wpływu błędów wykonania poszczególnych elementów układów kinematycznych [1].

Poza wzrostem wydajności obróbki dąży się do poprawiania dokładności wymiarowo-kształtowej i zmniejszenia chropowatości powierzchni. Na dokładność wykonania

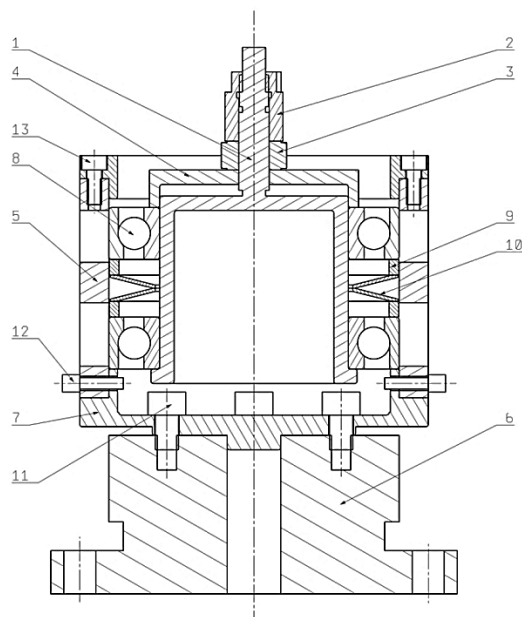
¹ Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice,

* E-mail: Jan.Kosmol@polsl.pl

przedmiotów ma wpływ odkształcenie cieplne wrzeciona (jak wydłużenie wrzeciona), które można wyeliminować przez zastosowanie odpowiedniego systemu chłodzenia wewnętrznego (każde elektrowrzeciono posiada system chłodzenia). Ilość ciepła, które trzeba odprowadzić można określić przez znajomość strat mocy we wrzecionach, jest to istotne dla konstruktorów węzłów łożyskowych projektujących elektrowrzeciona. Źródłami powstawania ciepła w elektrowrzecionach są straty mocy w silniku elektrycznym oraz w parach kinematycznych jakie tworzą łożyska toczne, straty te są nieuniknione. Na cele łożyskowania wrzecion zazwyczaj stosowane są łożyska skośne, których opory ruchu determinują wielkość strat mocy [2].

2. STANOWISKO BADAWCZE

Straty mocy w węzłach łożyskowych można określić dzięki znajomości momentu oporu ruchu napędzanego wału (moc tracona jest iloczynem prędkości kątowej i momentu), dlatego też ideą stanowiska badawczego był pomiar tegoż momentu. Schemat stanowiska przedstawiony został na rysunku 1. Badaniom poddane zostały łożyska kulkowe skośne B7013-E-T-P4S-UL.

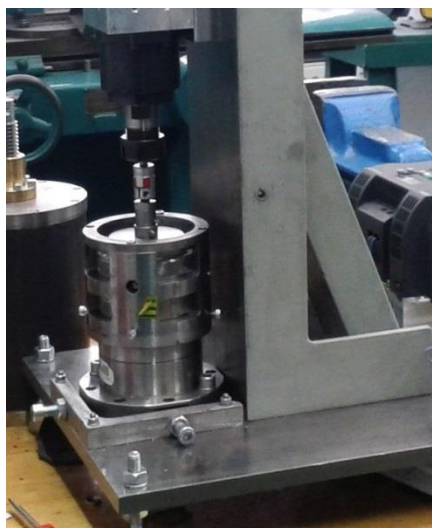


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. Test rig scheme

Do pomiaru wielkości momentu oporu wykorzystany został cztero-składowy siłomierz Kistler 9272 (6), do którego przymocowany został korpus w postaci tulei (5) przez element pośredniczący (7). Mierzona wartość momentu odpowiada oporowi jaki stawiają dwa łożyska kulkowe skośne (8) pracujące w układzie rozbieżnym „O”. Regulacji napięcia wstępnego dokonuje się przy pomocy nakrętki (2) z drobnozwojowym gwintem, umożliwiającym dokładne ustalenie wartości siły napięcia, mierzonej przy pomocy wkładki

piezoelektrycznej (3). Przez zastosowanie dwóch sprężyn talerzowych (10) uzyskano tzw. podatne napięcie wstępne, którego wartość zmienia się w niewielkim zakresie w funkcji prędkości obrotowej, jeśli sztywność osiowa łożysk jest zdecydowanie większa od sztywności pakietu sprężyn. W przypadku tzw. sztywnego napięcia wstępnego jego wartość znacząco rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Stanowisko pomiarowe przedstawione zostało na rysunku 2 [3].

Wszystkie pomiary, które zostały zrealizowane dotyczyły łożysk pracujących bez obecności środka smarnego. Zakładając, że wpływ obecności smaru na opory ruchu jest dostatecznie dobrze rozpoznany (np. zależności przedstawione w [4]), przeprowadzenie pomiarów łożysk niesmarowanych pozwoli na oszacowanie wpływu: sił odśrodkowych, momentu żyroskopowego i tzw. momentu spinu na całkowity moment oporu ruchu łożyska przy dużych prędkościach obrotowych.



Rys. 2. Stanowisko badawcze [3]

Fig. 2. Test rig [3]

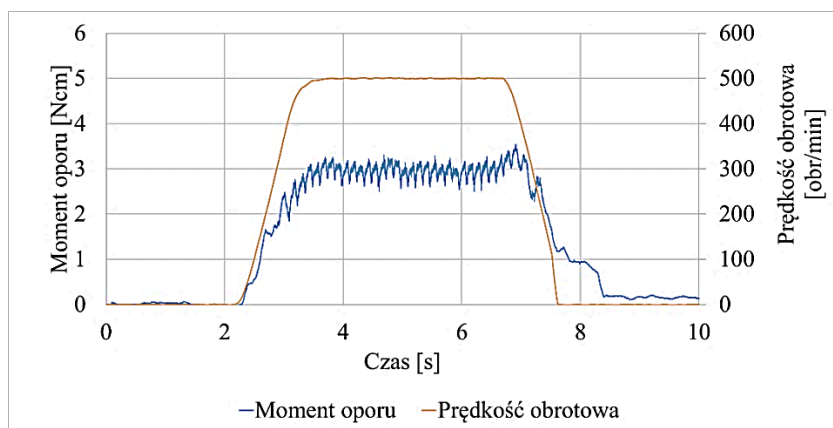
3. PLAN BADAŃ

Plan badań doświadczalnych zakładał określenie wpływu wielkości napięcia wstępnego oraz prędkości obrotowej na sumaryczną wielkość momentu oporu ruchu, przy czym za jego wartość przyjmowano uśredniony wynik uzyskany przy ustalonej prędkości obrotowej.

Badanie podzielone zostały na dwie części, z których pierwsza obejmowała określenie wpływu napięcia wstępnego na opór ruchu dla prędkości obrotowej 500 obr/min. Napięcia wstępne wynosiły odpowiednio: 100 N, 200 N, 300 N, 400 N, 500 N, 600 N, 700 N, 800 N, 900 N i 1000 N. Z kolei druga część polegała na określeniu wpływu prędkości obrotowej na wielkość momentu oporu. Pomiarów dokonano dla następujących prędkości: 500 obr/min, 1000 obr/min, 3000 obr/min, 6000 obr/min, 8000 obr/min oraz 10000 obr/min, dla trzech wartości napięć wstępnych: 100 N, 500 N i 1000 N.

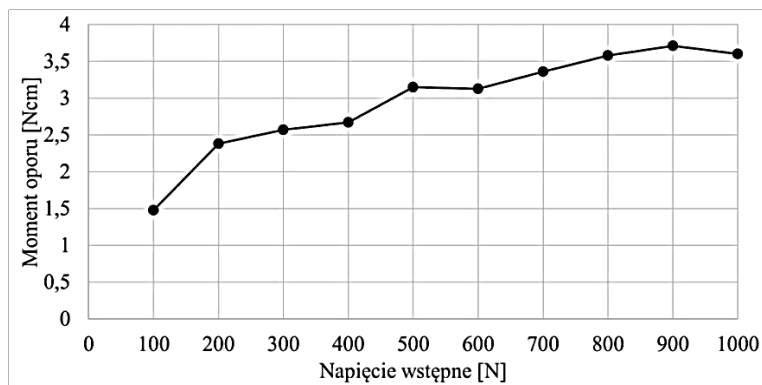
4. UZYSKANE WYNIKI

Efektym badań był szereg czasowych przebiegów momentu oporu ruchu i prędkości obrotowej uzyskanych z każdej przeprowadzonej próby. Jako że mierzone wielkości (zwłaszcza moment obrotowy) charakteryzowały się dużymi wahaniami, zastosowana została metoda średniej ruchomej, która pozwoliła na wygładzenie przebiegów, a tym samym na łatwiejszą interpretację uzyskanych wyników. Przykładowy przebieg przedstawiony został na rysunku 3. Mierzony moment oporu odpowiada oporowi dwóch łożysk. Za wielkość momentu obrotowego przyjmowano uśrednioną wartość uzyskiwaną przy ustalonej prędkości obrotowej dla każdej wykonanej próby.

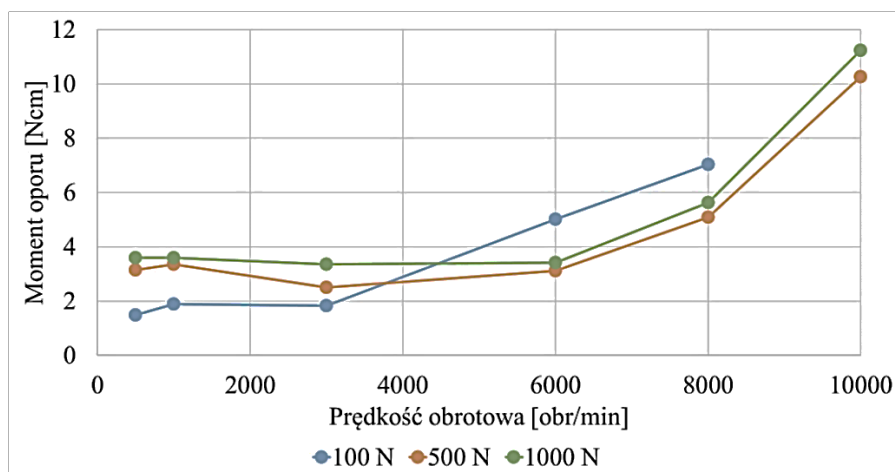


Rys. 3. Przebieg czasowy momentu oporu i prędkości obrotowej – napięcie wstępne 100 N
Fig. 3. Time course of resistance torque and rotational speed – preload 100 N

Na rysunku 4 zamieszczono wyniki uzyskane podczas badania wpływu wielkości napięcia wstępnego na opór ruchu pojedynczego łożyska B7013-E-T-P4S-UL, natomiast rysunek 5 przedstawia wartości uzyskane przy badaniu wpływu prędkości obrotowej na opór ruchu łożyska, dla trzech różnych wartości napięć wstępnych. Wszystkie wyniki zebrane zostały w tabeli 1 oraz tabeli 2. Zestawione w tabelach wyniki odpowiadają momentowi oporu pojedynczego łożyska.



Rys. 4. Zależność oporu ruchu łożyska B7013-E-T-P4S-UL od napięcia wstępnego – 500 obr/min
Fig. 4. Dependence of movement resistance on preload for B7013-E-T-P4S-UL bearing – 500 rpm



Rys. 5. Zależność oporu ruchu łożyska B7013-E-T-P4S-UL od prędkości obrotowej
 Fig. 5. Dependence of movement resistance on rotational speed for B7013-E-T-P4S-UL bearing

Tabela 1. Wyniki badań wpływu napięcia wstępnego na moment oporu – prędkość obrotowa 500 obr/min
 Table 1. Research results of preload impact on torque resistance – 500 rpm rotational speed

Napięcie wstępne [N]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Moment oporu [N·cm]	1,48	2,38	2,57	2,67	3,15	3,13	3,36	3,58	3,71	3,60

Tabela 2. Wyniki badań wpływu prędkości obrotowej na moment oporu
 Table 2. Research results of rotational speed impact on torque resistance

Napięcie wstępne [N]		Moment oporu [N·cm]		
		100	500	1000
Prędkość obrotowa [obr/min]	500	1,48	3,15	3,60
	1000	1,89	3,36	3,60
	3000	1,83	2,50	3,35
	6000	5,02	3,12	3,42
	8000	7,04	5,09	5,63
	10000	-	10,26	11,24

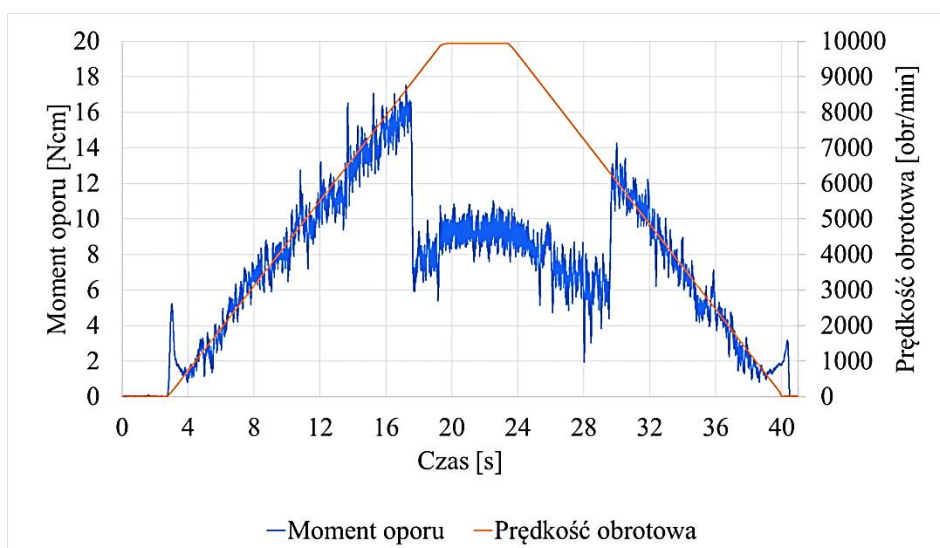
5. INTERPRETACJA WYNIKÓW

Dla badanego łożyska dla prędkości 500 obr/min uzyskano w przybliżeniu liniową zależność całkowitego momentu oporu od wartości napięcia wstępnego, co przedstawione zostało na rysunku 4. Zależność tę można wytłumaczyć tym, że proporcjonalnie do zmiany

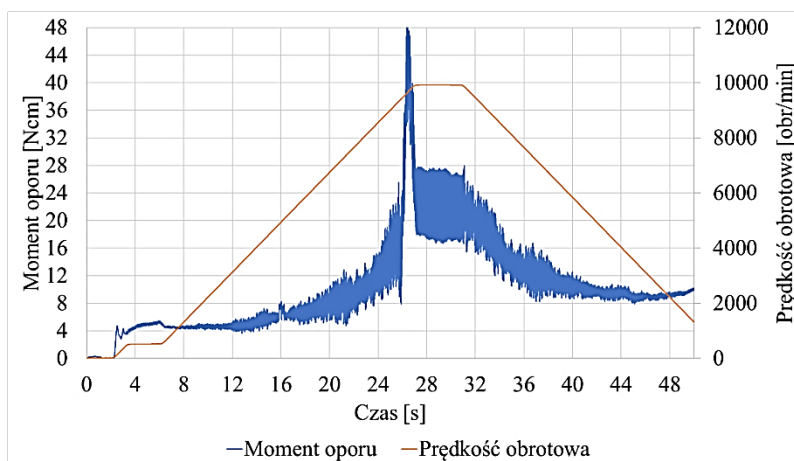
napięcia wstępnego zmieniają się siły oddziaływania pomiędzy poszczególnymi elementami łożyska, co wpływa na wielkość oporu ruchu.

Przedstawione na rysunku 5 wyniki pomiarów momentu oporu charakteryzują się nieliniową zależnością od prędkości obrotowej – przy dużych prędkościach widoczny duży wzrost oporu jest wynikiem wzrastającego wpływu takich zjawisk jak: siły odśrodkowe, moment żyroskopowy i moment spinu, które są nieistotne przy małych prędkościach obrotowych. Działanie sił odśrodkowych powoduje zmianę wewnętrznego stanu obciążeń między poszczególnymi elementami składowymi łożyska. Wzrost prędkości obrotowej łożyska powoduje zwiększanie wielkości sił odśrodkowych wirujących kulek, czego efektem jest wzrost sił oddziaływania między kulkami a bieżnią zewnętrzną łożyska, co w konsekwencji powoduje zwiększone opory ruchu. Wynikiem tzw. spinu w łożysku skośnym jest powstanie dodatkowych oporów związanych ze ślizganiem się kulek po bieżniach pierścieni łożyska. Jest to spowodowane obrotem kulki wokół własnej osi, która jest pochylona w stosunku do osi obrotu łożyska. Zwiększone siły odśrodkowe przyczyniają się do zwiększenia wartości oporów powstałych na skutek zjawiska spinu.

Przy prędkościach 6000 obr/min i 8000 obr/min dla napięcia wstępnego 100 N czasowy przebieg momentu oporu charakteryzował się dużymi wahaniami, co było spowodowane drganiami stanowiska i przyczyniło się do uzyskania zawyżonych wyników w stosunku do tych uzyskanych dla napięć wstępnych 500 N i 1000 N. Próba przeprowadzona przy prędkości 10000 obr/min dla napięcia wstępnego 100 N wykazała, że wartość tego napięcia dla danego typu łożyska i danej prędkości jest zbyt mała (rysunek 6 przedstawia uzyskany przebieg momentu oporu). Wynika to z działania sił odśrodkowych (od ruchu obiegowego kulek) o dużych wartościach, które przy niewielkim napięciu wstępnym powodują ślizganie się kulek po bieżni wewnętrznej. Jest to stan nieprawidłowej pracy łożyska, któremu można zapobiec przez zwiększenie siły napięcia wstępnego. Dla porównania na rysunku 7 zamieszczono uzyskany przebieg momentu oporu przy napięciu wstępnym 1000 N.



Rys. 6. Przebieg czasowy momentu oporu oraz prędkości obrotowej – napięcie wstępne 100 N
Fig. 6. Time course of resistance torque and rotational speed – 100 N preload



Rys. 7. Przebieg czasowy momentu oporu oraz prędkości obrotowej – napięcie wstępne 1000 N
 Fig. 7. Time course of resistance torque and rotational speed – 1000 N preload

6. PODSUMOWANIE

Tendencja w rozwoju obrabiarek, jaką jest zwiększanie prędkości obrotowych wrzecion wymaga stosowania łożysk charakteryzujących się dużą dokładnością wykonania oraz niewielkimi oporami ruchu. Do celów łożyskowania wrzecion powszechnie stosowane są kulkowe łożyska skośne. Oszacowanie strat mocy w węzłach łożyskowych, mających bezpośrednie odzwierciedlenie w ilości powstałego ciepła, jest zagadnieniem mającym swoje uzasadnienie przy konstruowaniu tych węzłów, umożliwiając zaprojektowanie odpowiedniego układu chłodzenia.

Na opór ruchu łożysk skośnych przy dużych prędkościach obrotowych w głównej mierze wpływają czynniki nieuwzględniane przy małych prędkościach. Takimi czynnikami są siły odśrodkowe i tzw. moment spinu, zwiększające siły oddziaływania występujące pomiędzy elementami łożyska. Zasadnym jest szacowanie wpływu tych zjawisk na opory ruchu łożysk pracujących przy prędkościach przekraczających kilka tysięcy obr/min.

W artykule przedstawiona została metoda pozwalająca na doświadczalne wyznaczenie wielkości sumarycznego oporu ruchu jaki stawiają łożyska skośne. Uzyskane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że zarówno napięcie wstępne łożysk jak i ich prędkość obrotowa wpływa na moment oporu, jednakże wpływ prędkości obrotowej jest większy, zwłaszcza przy wysokich prędkościach obrotowych.

LITERATURA

- [1] CIECHANOWSKI M., 2010, *Łożyska do wrzecion optymalny dobór – maksymalna wydajność*, Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, 5/32, 40–42.
- [2] KOSMOL J., LEHRICH K., 2010, *Model cieplny elektrowrzeciona*, Modelowanie Inżynierskie, 39, 119–126.
- [3] MUSZYŃSKI M., 2017, *Badania eksperymentalne oporów ruchu w łożyskach tocznych skośnych na zmodernizowanym stanowisku badawczym*, Praca dyplomowa, Politechnika Śląska, Gliwice.
- [4] PALMGREN A., 1959, *Ball and roller bearing engineering*, wyd. 3, Burbank, Filadelfia.

EXPERIMENTAL METHOD OF DETERMINING TORQUE RESISTANCE OF ANGULAR CONTACT
BALL BEARINGS

The article presents an experimental method of determining the resistance torque of angular contact ball bearings, including test rig and received results. The influence of both preload and rotational speed on the total torque resistance of the bearing has been studied. The research has a special reference to spindle bearings of High Speed Cutting machines, which reaches very high rotational speeds.

Keywords: *resistance torque, angular contact ball bearings, High Speed Cutting*