

Łukasz GORYCKI<sup>1</sup>  
Ryszard DOMAGALSKI<sup>2</sup>  
Paweł ZMARZŁY<sup>3</sup>

## POMIARY MOMENTÓW OPOROWYCH ŁOŻYSK TOCZNYCH W ASPEKTCIE DOKŁADNOŚCI KSZTAŁTOWO – WZMIAROWEJ ELEMENTÓW WSPÓŁPRACUJĄCYCH

W pracy przedstawiono pomiar mający na celu określenie wpływu promienia bieżni na momentu oporowego w łożysk kulkowych. Pomiar przeprowadzono na 3 grupach łożysk o różnej geometrii bieżni. Badania te przeprowadzono momentomierzu STPM, urządzeniu które zostało zaprojektowane i wykonane Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach Wyniki pomiarów pokazały że różnica w wielkości współczynnika opasania w łożyskach ma znaczący wpływ na moment oporowy.

## MEASUREMENT OF FRICTIONAL MOMENT IN ROLLER BEARINGS, IN TERMS OF ACCURACY GEOMETRICALLY – DIMENSIONAL ELEMENTS COOPERATING

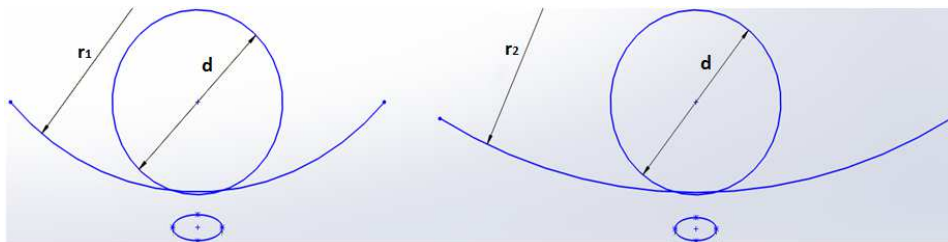
The paper presents a measurement designed to determine the influence of the track radius at the frictional moment in ball bearings. The measurement was performed on three groups of bearing with different raceway geometries. These studies were carried out using a torque meter STPM, the device that has been designed and manufactured at Kielce University of Technology. The results of measurements made it possible that the difference in the size of the curvature ratio has a significant impact on the frictional moment.

### 1. WSTĘP

Zjawisko oporów ruchu jest pojęciem bardzo złożonym. Było ono analizowane już w drugiej połowie XIX wieku przez Reynolds'a. Pomimo tego do czasów współczesnych tematyka dotycząca oporów ruchu nie jest do końca zbadana.

Na moment oporowy w łożyskach tocznych, wpływa duża ilość czynników, których istotność oddziaływania jest zróżnicowana. Czynniki te można podzielić na:

- wynikające z konstrukcji łożysk: rodzaju (typ) łożyska, jego wielkość, konstrukcja wewnętrzna [2, 3] (np. stosunek wielkości promienia bieżni do średnic kulki, określanej w branży łożyskowej jako współczynnik opasania (rys. 1), rodzaj, ilość i dystrybucja środka smarnego, rodzaj kosza, parametry dokładności wykonania bieżni (okrągłość, falistości, chropowatość), materiał z którego wykonano elementy konstrukcji łożyska, itp.,
- wynikające z warunków pracy łożyska: prędkość obrotowa, obciążenie osiowe i promieniowe, temperatura pracy, warunki zabudowy itp.



**Rys. 1.** Zależność powierzchni styku od współczynnika opasania

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechaniki i Budowy Maszyn, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, 25-314, Al. 1000-Lecia Państwa Polskiego 7, e-mail: lgorycki@tu.kielce.pl

<sup>2</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechaniki i Budowy Maszyn, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, 25-314, Al. 1000-Lecia Państwa Polskiego 7. Tel.: + 48 41 34-24-787 e-mail: domagalski@tu.kielce.pl

<sup>3</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechaniki i Budowy Maszyn, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, 25-314, Al. 1000-Lecia Państwa Polskiego 7. e-mail: pzmarzly@tu.kielce.pl

Obecnie wykorzystywane wzory nie uwzględniają części czynników, zakładając małą istotność ich wpływu na moment oporowy lub grupują je w bloki wprowadzane do wzoru w postaci uogólnionych współczynników.

Łożyska toczne powszechnie występują w większości urządzeń mechanicznych (gospodarstwa domowe, transport, urządzenia przemysłowe, medycyna, energetyka i elektronika, czy urządzenia stosowane w przemyśle kosmicznym). W związku z tym dążenie do podnoszenia ich trwałości i niezawodności jest ważnym elementem poprawy własności eksploatacyjnych urządzeń w których są one montowane. Jednym z najważniejszych czynników decydujących o spełnianiu przez łożyska stawianych im wymagań jest moment oporowy. Wiele ośrodków naukowych oraz firm produkujących łożyska prowadzi badania, których celem jest sprostanie rosnącym wymaganiom stawianym przez użytkowników łożysk. Jednym z najistotniejszych elementów tych badań jest poprawa własności eksploatacyjnych łożysk poprzez minimalizację momentu oporowego.

Przy wysokim poziomie aktualnie stosowanych technologii w masowej produkcji łożysk, wprowadzenie modyfikacji, które znacząco wpłynęłyby na poprawę ich parametrów użytkowych jest niełatwym wyzwaniem. Aby mu poddać trzeba dysponować odpowiednim wyposażeniem badawczym, pozwalającym zmierzyć skutki wprowadzanych zmian.

Wiodący producenci łożysk korzystają w dużej mierze z urządzeń konstruowanych przez własne zaplecze badawcze, pozwalające na pomiar momentu oporowego w łożyskach. Jest to najczęściej produkcja jednostkowa przyrządów, które służą do oceny określonych parametrów. Natomiast, gdy pojawiają się wątpliwości w odniesieniu do poprawności uzyskiwanych wyników, do ich weryfikacji mogą posłużyć badania przeprowadzone przez niezależne laboratorium.

Badania opisane w niniejszym artykule mają na celu analizę wpływu parametru, jakim jest współczynnik opasania bieżni (czyli stosunek promienia bieżni do średnicy kulki), na moment oporowy w łożyskach kulkowych. Jakościowa zależność momentu od tego parametru jest znana - mianowicie większemu współczynnikowi opasania, towarzyszy mniejszy moment oporowy. Wynika to stąd, że wartość współczynnika opasania zależy od wielkości powierzchni styku pomiędzy kulką a bieżnią. Im współczynnik opasania jest większy, wówczas powierzchnia styku jest mniejsza. Przekłada się to na mniejszy moment oporowy, ponieważ tocząca się po bieżni kulka ma inną prędkość obwodową w punkcie centralnym styku, niż w punktach położonych dalej od centrum w kierunku krawędzi bieżni. Powoduje to powstawanie podczas toczenia mikropoślizgów pomiędzy kulką a bieżnią, tym większych, im dalej od centrum styku oddalone są te punkty. Zatem im szerokość styku będzie mniejsza (im większy będzie promień profilu bieżni w stosunku do średnicy kulki), tym mniejsze będzie tarcie. Na rysunku 1 przedstawiono dwa łożyska posiadające kulki o tej samej średnicy ale różne promienie bieżni ( $r_1 < r_2$ ). Wynika z niego, że łożysko posiadające mniejszy współczynnik opasania ( $r_{1/d}$ ) powinno mieć większy moment oporowy.

W celu analizy tego zjawiska przeprowadzono pomiary momentu oporowego na wybranych grupach łożysk kulkowych, różniących się między sobą współczynnikiem opasania bieżni. Przy czym inne elementy konstrukcji wewnętrznej, takie jak separujący elementy toczne koszyk, smar i jego dawka są takie same dla wszystkich badanych łożysk. Pomiary dokonano na momentomierzu STPM znajdującym się na wyposażeniu Laboratorium Badań Łożysk Tocznych w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach. Urządzenie to jest przedstawione na rysunku 2.



**Rys. 2.** Momentomierz STPM znajdujący się w na wyposażeniu Laboratorium Badań Łożysk Tocznych w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach: a) głowica badawcza; b) obciążenie osiowe; c) obciążenie promieniowe; d) wrzeciono badawcze; e) system napędowy; f) szafa sterownicza; g) pulpit sterujący; h) zespół zasilania pneumatycznego; i) nadmuch; j) sterowanie oraz zbieranie i analiza danych

### 3. ZALEŻNOŚCI OKREŚLAJĄCE MOMENT TARCIA W ŁÓŻYSKACH TOCZNYCH

Moment oporowy w łożysku tocznym jest spowodowany stratami energii w wyniku tarcia występującego w strefie współpracy elementów tocznych (kulek, stożków, itp.) z bieżnią (mikropoślizgi) i koszykiem, a także stratami wynikającymi z brodzenia elementów tocznych w środkach smarujących.

W przypadku gdy eksploatacja przebiega w warunkach standardowych i stosowane jest dobre smarowanie, to w celu wyznaczenia momentu tarcia można zastosować następujący wzór [7]:

$$M = \frac{P\mu d}{2} \quad (1)$$

gdzie:

- $P$  – równoważne obciążenie dynamiczne łożysk,
- $\mu$  – stały współczynnik tarcia łożysk zależny od rodzaju łożysk,
- $d$  – średnica otworu łożysk.

W sytuacji gdy wymagane jest precyzyjniejsze, teoretyczne wyznaczenie wartości momentu tarcia oraz w sytuacjach gdy warunki pracy odbiegają od standardowych, stosuje się dokładniejszy wzór. W tym wzorze moment tarcia jest podzielony na moment niezależny od obciążenia  $M_0$  i moment zależy od obciążenia  $M_1$  [7]:

$$M = M_0 + M_1 \quad (2)$$

Ogólna zależność na moment  $M_0$  jest następująca:

$$\text{dla } v \cdot n \geq 2000 \quad M_0 = f_0 (v \cdot n)^{\frac{2}{3}} d_m^3 \cdot 10^{-7} \quad (3)$$

$$\text{dla } v \cdot n < 2000 \quad M_0 = 160 f_0 d_m^3 \cdot 10^{-7} \quad (4)$$

Moment tarcia jako funkcja obciążenia:

$$M_1 = f_1 P d_m \quad (5)$$

gdzie:

- $v$  – lepkość kinematyczna oleju [ $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ ],
- $n$  – prędkość obrotowa [ $\text{min}^{-1}$ ],
- $d_m$  – średnica podziałowa łożyska  $(d+D)/2$  [mm],
- $P$  – obciążenie zastępcze (równoważne) [N],
- $f_0$  – współczynnik zależny od rodzaju i wielkości łożysk oraz rodzaju smaru,
- $f_1$  – współczynnik zależny od rodzaju i wielkości łożysk oraz współczynnika dopuszczalnego obciążenia statycznego.

W rzeczywistość pojęcie momentu tarcia jest to bardziej złożone. Tarcie całkowite jest to suma tarcia ślizgowego i tocznego w strefie kontaktu elementów tocznych z bieżnią, na powierzchniach styku elementów tocznych i koszyka, a także powierzchni prowadzących elementów tocznych i koszyka, tarcia występującego w środkach smarujących oraz tarcia ślizgowego uszczelnienia stykowego w łożyskach uszczelnionych. W celu dokładniejszej teoretycznej analizy momentu tarcia niektóre firmy produkujące łożyska sformułowały własne zależności. Są to zależności które bardziej szczegółowo uwzględniają budowę łożysk i warunki ich pracy. Firmy łożyskowe opracowują także wzory empiryczne, uwzględniające odnoszące się do wybranych typów łożysk [4]. Na przykład NSK, które opracowało empiryczną zależność dla łożysk kulkowych wysokoobrotowych pracujących pod obciążeniem osiowym i smarowanych strumieniowo [8].

Inne podejście do teoretycznego wyznaczenia momentu tarcia zastosował SKF [9]. Firma wykorzystuje model matematyczny uwzględniający spory zakres źródeł tarcia jakie mogą występować w łożysku. Model ten jest następujący:

$$M = M_{rr} + M_{st} + M_{seal} + M_{drag} \quad (6)$$

gdzie:

- $M_{rr}$  – moment tarcia tocznego,
- $M_{st}$  – moment tarcia ślizgowego,
- $M_{seal}$  – moment tarcia uszczelnień,
- $M_{drag}$  – moment tarcia wynikającego z systemu smarowania, oporów ruchu w środowisku olejowym, ugniatania smaru, rozbryzgów.

Model ten zakłada że łożysko będzie pracowało przy obciążeniu mniejszym niż zalecane minimalne, przy zastosowaniu smaru stałego lub oleju, oraz że luz roboczy jest normalny (luzem normalnym w łożysku – najczęściej oznaczanym symbolem N - nazywany jest luz standardowo przyjmowany dla określonych wielkości łożysk. Luzy spoza tych wartości – mniejszy lub większy, oznakowywany jest symbolami charakterystycznymi dla określonych producentów. Np.: C1, C2 jako mniejsze od normalnego i C3, C4 jako większe od normalnego).

Model ten daje możliwość oszacowania wpływu poszczególnych składników na całkowity moment tarcia. W celu wyznaczenia poszczególnych składowych należy, za pomocą odpowiednich wzorów, uwzględnić wiele

zmiennych. SKF udostępnia możliwość skorzystania z modułów obliczeniowych. Zawarte są tam potrzebne wzory, tablice oraz wykresy pozwalające na wyznaczenie momentu całkowitego dla danego typu łożysk pracujących w konkretnych warunkach [9].

Wyznaczenie teoretycznego momentu oporowego pozwala uzyskać wartości tylko przybliżone do rzeczywistych. W artykule [4] autorzy przedstawili wyniki swoich badań w których stosowali różne modele matematyczne, pozwalające na wyznaczanie momentu tarcia w łożyskach. Badano łożyska produkowane na skale masową, przeznaczone dla urządzeń AGD, motoryzacji oraz przemysłu maszynowego. Wyniki przedstawione w artykule wykazują, występowanie bardzo istotnych różnic pomiędzy poszczególnymi modelami matematycznymi. Należy zatem przyjąć, że modele matematyczne przeznaczone do wyznaczania całkowitego momentu tarcia pozwalają jedynie na zbliżoną ocenę tego parametru. Do uzyskania wiarygodnych danych o rzeczywistych wartościach momentów oporowych występujących w łożyskach, niezbędne jest prowadzenie badań empirycznych na urządzeniach, które pozwolą odtwarzać realne warunki pracy łożysk, wyposażonych w pełny monitoring tych warunków i pozyskiwanych wyników.

#### 4. PRZEBIEG POMIARÓW

Jak wspomniano wcześniej, pomiary przeprowadzono na momentomierzu znajdującym się na wyposażeniu Laboratorium Badań Łożysk Toczących Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. W badaniach wykorzystano 3 grupy łożysk 6202 o zróżnicowanym promieniu bieżni, ale posiadające ten sam rodzaj koszyka. W sumie w pomiarach wykorzystano 30 łożysk kulkowych. Rodzaj koszyka (jego konstrukcja, masa i materiał, z którego jest wykonany), ma bardzo istotny wpływ na moment, zatem zastosowanie różnych koszyk zniekształciłoby efekt poszukiwań wpływu na moment geometrii bieżni.

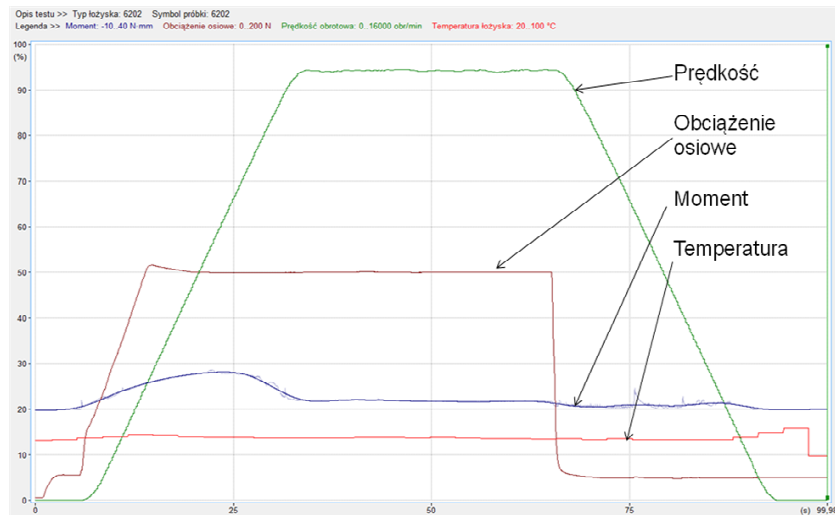
Łożyska smarowano tylko kilkoma kroplami oleju o niskiej lepkości. Nie zastosowano smaru, ponieważ jego wpływ na moment uzależniony jest zbyt wielu czynników, które trudno jest utrzymać na powtarzalnym poziomie. Należą do nich głównie temperatura pracy oraz dawka i dystrybucja smaru w łożysku. Praktycznie jego zastosowanie bardzo zakłóciłoby proces oceny wpływu na moment samej geometrii bieżni. Przy pomiarze małych momentów (od 1 do 10 N mm), a takie wielkości były przewidywane w niniejszym pomiarze, uniemożliwiłoby to praktycznie, badanie wpływu współczynnika opasania na moment oporowy. W celu zabezpieczenia łożysk przed uszkodzeniem przez pracę na sucho, przed każdym pomiarem była do nich dodawana zawsze taka sama niewielka ilość oleju Drosera 10.

Przeprowadzono trzy serie pomiarów przy różnym obciążeniu osiowym, promieniowym oraz prędkości obrotowej:

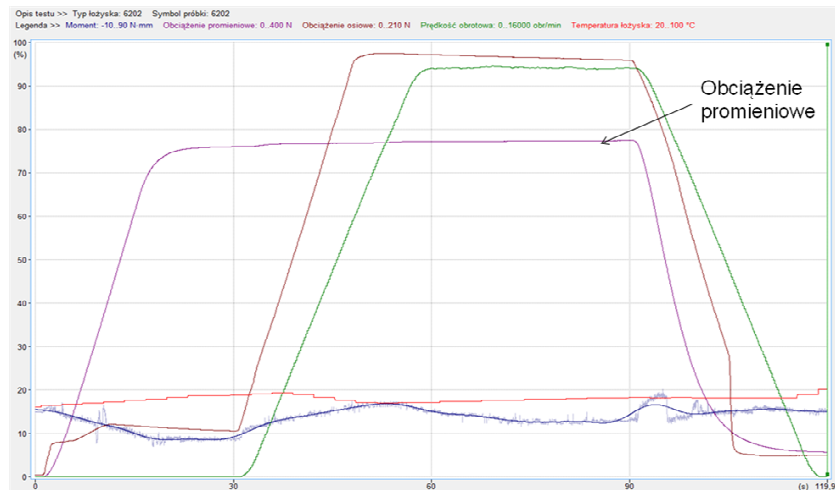
- seria 1:  
obciążenie osiowe            10 [N],  
obciążenie promieniowe    0 [N],  
prędkość obrotowa        15000 [min<sup>-1</sup>]
- seria 2:  
obciążenie osiowe            180 [N],  
obciążenie promieniowe    300 [N],  
prędkość obrotowa        15000 [min<sup>-1</sup>]
- seria 3:  
obciążenie osiowe            180 [N],  
obciążenie promieniowe    400 [N],  
prędkość obrotowa        20000 [min<sup>-1</sup>]

Taka liczba pomiarów pozwoliła na zaobserwowanie, zmian momentu oporowego w zależności od zmian warunków pracy łożysk o różnej geometrii bieżni. Przykładowe wyniki pomiarów, kolejno dla każdej serii, uzyskane przy wykorzystaniu oprogramowania momentomierza, przedstawione są na rysunkach 3, 4 i 5. Do analizy wyników pomiarów zastosowany został filtr o długości fali 10s.

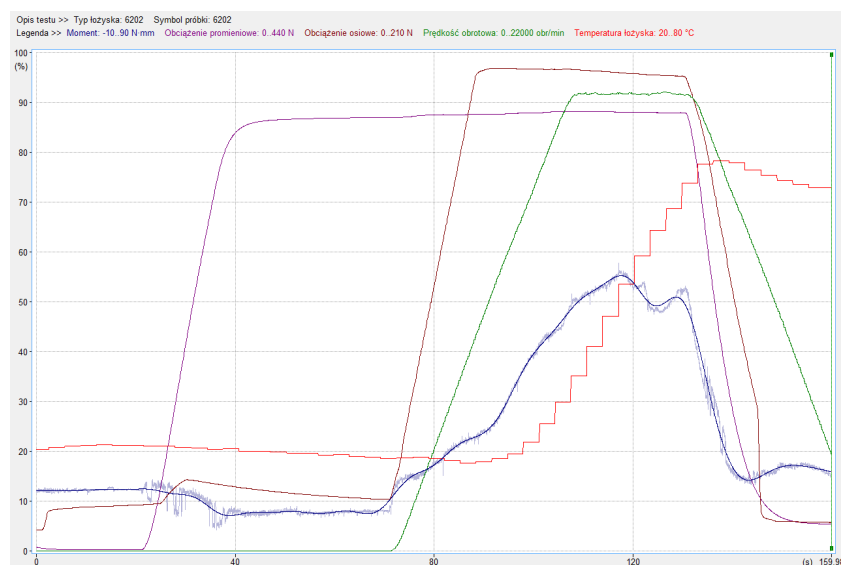
Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 3, 4 i 5 widać, jak zmieniały się parametry badawcze i uzyskiwane wyniki w czasie trwania poszczególnych pomiarów. Odpowiednie kolory odnoszą się do określonych wartości: niebieski – moment oporowy; fioletowy – obciążenie promieniowe; brązowy – obciążenie osiowe; zielony – prędkość obrotowa; czerwony – temperatura. Różnice pomiędzy wykresami wynikają z zastosowania odmiennych parametrów badawczych oraz czasów wykonywania pojedynczych pomiarów. W każdej kolejnej serii pomiary musiały być wykonywane dłużej ze względu na stopniowy wzrost poszczególnych parametrów oraz czas stabilizowania się momentu oporowego. Zbyt krótki okres realizacji pomiaru mógłby negatywnie wpłynąć na wiarygodność wyników, natomiast jego nadmierne wydłużenie mogło wpłynąć na kondycję łożysk ze względu na ich skąpe smarowanie.



Rys. 3. Przykładowy wynik pomiaru momentu łożysk tocznych dla serii 1



Rys. 4. Przykładowy wynik pomiaru momentu łożysk tocznych dla serii 2



Rys. 5. Przykładowy wynik pomiaru momentu łożysk tocznych dla serii 3

Uzyskane wyniki trzech serii dla poszczególnych grup przedstawione są w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki pomiarów momentu [Nmm], dla 3 grup łożysk w danych seriach pomiarowych.

|                | Seria 1 | Seria 2 | Seria 3 |
|----------------|---------|---------|---------|
| <b>Grupa A</b> | 1,4278  | 4,8746  | 8,2011  |
| <b>Grupa B</b> | 1,5575  | 8,2167  | 23,5872 |
| <b>Grupa C</b> | 1,9622  | 16,4447 | 34,4474 |

Po wykonaniu trzech serii pomiarów łożyska zostały zdemontowane, a następnie zmierzone zostały promienie bieżni zewnętrznych  $P_z$ , promienie bieżni wewnętrznych  $P_w$  oraz średnice kulek tych łożysk. Uzyskane wyniki pomiarów współczynników opasania w poszczególnych grupach łożysk przedstawione zostały w tabeli 2.

Podczas testów parametry geometrii bieżni nie ulegają zmianom mogącym w zauważalny (dający się zmierzyć) sposób wpłynąć na wyniki badań.

Tab. 2. Wyniki pomiarów współczynnika opasania dla pierścienia wewnętrznego  $R_{P_w}/d$  i zewnętrznego  $R_{P_z}/d$ , poszczególnych grup łożysk

|                | $R_{P_w}/d$ | $R_{P_z}/d$ |
|----------------|-------------|-------------|
| <b>Grupa A</b> | 0,5177      | 0,5334      |
| <b>Grupa B</b> | 0,5087      | 0,5260      |
| <b>Grupa C</b> | 0,5081      | 0,5201      |

## 5. ANALIZA WYNIKÓW

Uzyskane wyniki pozwalają zaobserwować, jak istotny wpływ na wielkość zmian momentu mają warunki badawcze. Łożyska badane w łagodniejszych warunkach wykazują znacznie mniejsze różnice w momencie oporowym w zależności od współczynnika opasania (grupa A: 1,4278; 4,8746; 8,2011 [Nmm] natomiast grupa C: 1,9622; 16,4447; 34,4474 [Nmm]). Wskazuje to na potrzebę prowadzenia badań w możliwie jak najtrudniejszych warunkach.

Różnice w charakterze styku elementu tocznego z bieżniami pierścienia wewnętrznego i zewnętrznego (zewnątrzna powierzchnia toroidu bieżni jest w kierunku obwodowym wklęsła, a wewnętrzna wypukła), skutkują mniejszą powierzchnią styku, a w konsekwencji powstawaniem większych naprężeń Hertza na bieżni pierścienia wewnętrznego. Powoduje to modyfikację promienia bieżni  $P_z$ , co jest bezpieczniejsze dla łożyska. Dlatego w praktyce producenci łożysk tocznych, poddają modyfikacji promień bieżni, chcąc przysposobić łożysko do wymagań konkretnych warunków jego pracy. Zwiększanie promienia bieżni  $P_w$ , z uwagi na znaczący wpływ tego zabiegu na zwiększenie naprężeń Hertza, stosuje się wyłącznie dla łożysk specjalnych przeznaczonych do pracy przy bardzo małych obciążeniach i wysokich obrotach.

## 6. WNIOSKI

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawionych w niniejszym artykule potwierdzają znaczący wpływ współczynnika opasania bieżni na moment oporowy generowany przez łożysko podczas pracy. Nawet nieduża różnica współczynnika opasania (0,5260 a 0,5201) w określonych warunkach eksploatacji łożyska powoduje dwukrotne zwiększenie momentu oporowego (8,2167 a 16,4447 [Nmm]).

Wyniki są całkowicie zbieżne z teoretycznymi założeniami wskazującymi na to, że zwiększenie promienia bieżni w stosunku do średnicy kulki zmniejszy moment oporowy w łożysku.

Przeprowadzone testy wykazały, że odpowiednio przygotowany i przeprowadzony program badań łożysk tocznych o zróżnicowanych promieniach bieżni, stworzy możliwość eksperymentalnego wyznaczenia ilościowych zależności momentu od współczynnika opasania. Umożliwi to wzbogacenie aktualnie stosowanych zależności i zwiększenie dokładności teoretycznego wyznaczania momentu oporowego w łożyskach tocznych.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Styp-Rekowski M.: *Opory ruchu w łożyskach tocznych*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. 2002 (37), nr 1, s 7-20.
- [2] Raczyński A.: *Wpływ mikrogeometrii na parametry pracy łożysk stożkowych*. Tribologia. 2000. nr 1, s. 90-100.
- [3] Kowal A.: *Wpływ kształtu bieżni na opory ruchu tocznego kulki*. Materiały V Międzynarodowej Konferencji: Zastosowanie Mechaniki w Górnictwie. Dzierżno k. Gliwic 14-15.04.2005.
- [4] Adamczak S. Domagalski R. Sender E.: *Moment oporowy w łożyskach tocznych – metody i urządzenia badawcze*. Tribologia, 2011, nr 6, s 19-28.
- [5] Adamczak S. Domagalski R. Galant M. Kolczyński H.: *Urządzenie do badania statycznych i dynamicznych momentów oporowych w łożyskach tocznych i sposób pomiaru momentu oporowego w łożyskach tocznych obciążonych poprzecznie*. Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Polska. Opis patentowy. PL 214217 B1. Opubl. 23.12.2011r.
- [6] Adamczak S. Domagalski R. Sender E.: *Metody badań łożysk tocznych w aspekcie współczesnych wymagań wyrobów o wyższych parametrach eksploatacyjnych*. Tribologia, 2011, nr 6, s 11-18.
- [7] Krzemiński-Frede H.: *Łożyska toczne*. Warszawa, PWN.
- [8] Motion &Control, NSK, Technical Report, 2005.
- [9] Katalog produkcyjny SKF, 2011.