

# **PROBLEMY NIEKONWENCJOWALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH**

**Łódź 15-16 maja 1997 roku**

Jadwiga Janowska

*Politechnika Warszawska*

## **WPLYW METODY BADAWCZEJ NA WYNIKI WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK TARCIA MINIATUROWYCH ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH**

### **SŁOWA KLUCZOWE**

Łożysko ślizgowe poprzeczne, metody badań tarcia, charakterystyki tarcia, krzywe Stribeck

### **STRESZCZENIE**

W pracy przedstawiono klasyfikację metod wyznaczania krzywych Stribeck oraz ocenę wpływu metody wyznaczania krzywych Stribeck na ich przebieg. Sformułowano zalecenia metodyczne dotyczące wyznaczania oporów ruchu w miniaturowych łożyskach ślizgowych.

### **WPROWADZENIE**

Analizę oporów ruchu oraz ocenę i porównanie parametrów użytkowych łożysk ślizgowych przeprowadza się na podstawie charakterystyk tarcia. Są one sporządzanych zwykle metodą pomiarów dyskretnych. Najczęściej, przy przyjętych wartościach nacisku, mierzony jest moment tarcia w łożysku ślizgowym dla kolejnych, ustalonych wartości prędkości poślizgu. Ta powszechnie stosowana metoda sporządzania charakterystyk tarcia jest bardzo pracochłonna. Wymaga dokonywania pomiaru, po ustaleniu się warunków pracy elementów trących, dla kolejnych punktów krzywej.

Wraz z rozwojem techniki, dla zmniejszenia błędów i pracochłonności badań oraz w zależności od zastosowania i specyfiki pracy danego łożyska (węzła), modyfikowano metody wyznaczania charakterystyk tarcia. Powstało pytanie, czy charakterystyki otrzymywane różnymi metodami są porównywalne.

Celem prezentowanej pracy jest ocena wpływu metody pomiarowej na przebieg charakterystyk tarcia, przedstawianych zwykle w postaci krzywych Stribecka oraz sformułowanie zaleceń metodycznych dotyczących wyznaczania oporów ruchu w miniaturowych łożyskach ślizgowych.

Realizacja postawionego celu wymagała:

- opracowania metod wyznaczania przebiegów krzywych Stribecka;
- zbudowania systemu badawczego umożliwiającego ocenę wpływu zmiennych w czasie prędkości poślizgu lub/i obciążeń na tarcie i zjawiska towarzyszące w miniaturowych łożyskach ślizgowych [ 1, 3 ];
- przeprowadzenia badań miniaturowych łożysk ślizgowych w obecności lub bez udziału materiału smarnego [3, 4];
- dokonania oceny wpływu metody wyznaczania krzywych Stribecka na ich przebieg [2, 3];
- podjęcia próby wyjaśnienia mechanizmów powodujących zależność przebiegu krzywej Stribecka od sposobu i charakteru zmian liczby Herseya;
- opracowania zaleceń metodycznych dotyczących wyznaczania oporów ruchu w miniaturowych łożyskach ślizgowych.

Wyniki pracy są kierowane przede wszystkim do badaczy, konstruktorów i producentów materiałów ślizgowych, materiałów smarnych, badawczych maszyn tribologicznych (tribometrów), wskazując zalecane sposoby wyznaczania oporów ruchu w miniaturowych łożyskach ślizgowych i własności smarnych olejów.

## METODY WYZNACZANIA KRZYWYCH STRIBECKA

Charakterystyki tarcia miniaturowych łożysk ślizgowych przedstawia się zwykle w postaci krzywych Stribecka:

$$\mu = f(\kappa) \quad (1)$$

$$\kappa = \eta \cdot \omega / p \quad (2)$$

gdzie:  $\mu$  - współczynnik tarcia w łożysku,  $K$  - liczba Herseya,  $\eta$  - lepkość dynamiczna oleju,  $\omega$  prędkość kątowa,  $p$  - nacisk obliczeniowy w łożysku.

Zmianę wartości liczby Herseya można otrzymać poprzez zmianę wartości lepkości dynamicznej oleju  $\eta$  lub/i prędkości kątowej w lub/i nacisku  $p$ . Zrealizowanie zaprogramowanych zmian lepkości dynamicznej oleju  $\eta$  w czasie procesu badawczego miniaturowych łożysk ślizgowych jest bardzo trudne. Tym bardziej, że smarowane miniaturowe łożyska ślizgowe pracują głównie w warunkach tarcia granicznego i mieszanego. Przyjęto więc, jak to robi większość badaczy, że badane łożysko ślizgowe pracuje w obecności czynnika smarującego o określonej lepkości dynamicznej  $\eta$ , stałej podczas pomiarów.

Na podstawie rozważań własnych, jak też przeprowadzonych studiów literaturowych, uznano prędkość poślizgu i obciążenie (nacisk) oraz charakter ich zmian za główne czynniki wpływające na działanie miniaturowego łożyska ślizgowego. Dla łożyska o określonej postaci konstrukcyjnej i wymiarach, jak też warunkach smarowania zależność (2) przyjmuje postać:

$$\kappa = A \cdot v / p \quad (3)$$

gdzie:  $A = 2 \cdot \eta / d$ ,  $K$  - liczba Herseya,  $v$  - prędkość poślizgu,  $p$  - nacisk obliczeniowy w łożysku,  $A$  - parametr,  $\eta$  - lepkość dynamiczna oleju,  $d$  - średnica nominalna otworu łożyskowego.

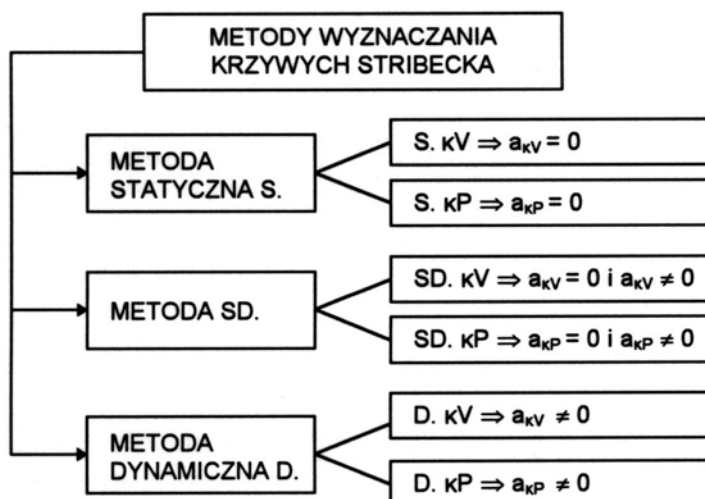
W pracy zaproponowano wyznaczanie krzywych Stribecka dla miniaturowych łożysk ślizgowych pracujących bez udziału materiału smarnego. W przypadku tarcia technicznie suchego stykające się powierzchnie łożyska pokryte są warstewkami skondensowanej pary wodnej, tlenków, siarczków i innych substancji stałych, ciekłych lub lotnych. Jeżeli przyjąć, że występuje wtedy smarowanie np. tlenkami lub produktami zużycia, to analogicznie jak dla łożysk smarowanych można i w tym przypadku wyznaczyć krzywe Stribecka. Będą one geometryczną interpretacją zależności współczynnika tarcia od umownej liczby Herseya  $\kappa_1$  dla tarcia technicznie suchego:

$$\mu = f_1(\kappa_1) \quad (4)$$

$$\kappa_1 = A_1 \cdot v/p \quad (5)$$

gdzie:  $A_1 = 2 \cdot \eta_1/d$ ,  $\mu$  - współczynnik tarcia w łożysku,  $\kappa_1$  - umowna liczba Herseya,  $v$  - prędkość poślizgu,  $p$  - nacisk obliczeniowy w łożysku,  $A_1$ - parametr,  $\eta_1$ - umowna lepkość dynamiczna dla tarcia technicznie suchego,  $d$  - średnica nominalna otworu łożyskowego.

- Metody wyznaczania przebiegów krzywych Stribecka związane są ze sposobem, charakterem i szybkością zmian wymuszenia tj. liczby Herseya ( $\kappa$  lub  $\kappa_1$ ) - rys. 1.



Rys. 1. Klasyfikacja metod wyznaczenia krzywych Stribecka

- S.κV** - metoda statyczna wyznaczania krzywych Stribecka (różne, stałe wartości liczby Herseya zadawane są poprzez zmianę prędkości poślizgu  $v$  przy stałych wartościach nacisku  $p$ );
- S. κP** - metoda statyczna wyznaczania krzywych Stribecka (różne, stałe wartości liczby Herseya zadawane są poprzez zmianę nacisku  $p$  przy stałych wartościach prędkości poślizgu  $v$ );
- SD.κV** - połączenie metody statycznej i dynamicznej wyznaczania krzywych Stribecka (różne wartości liczby Herseya zadawane są poprzez zmianę prędkości poślizgu  $v$  przy stałych wartościach nacisku  $p$ );
- SD.κP**- połączenie metody statycznej i dynamicznej wyznaczania krzywych Stribecka (różne wartości liczby Herseya zadawane są poprzez zmianę nacisku  $p$  przy stałych wartościach prędkości poślizgu  $v$ );
- D.κV** - metoda dynamiczna wyznaczania krzywych Stribecka: zmiana liczby Herseya z szybkością zmian  $a_{kV}$  poprzez zmianę prędkości poślizgu  $v$  z przyspieszeniem  $a_v$  ( $p = \text{const}$ );
- D.κP** - metoda dynamiczna wyznaczania krzywych Stribecka: zmiana liczby Herseya z szybkością zmian  $a_{kP}$  poprzez zmianę nacisku  $p$  z szybkością zmian  $a_p$  ( $v = \text{const}$ ).

W pracy zaproponowano realizację zmian wartości liczby Herseya poprzez wpływanie na wartość prędkości poślizgu  $v$  lub nacisku  $p$ . Umożliwia to wyznaczanie krzywych Stribeck dla różnych wartości liczby Herseya ( $\kappa$  lub  $\kappa_1$ ) uzyskiwanych poprzez zmiany:

- • prędkości poślizgu  $v$ , przy stałych wartościach nacisku  $p$  - **metoda .  $\kappa V$** ,
- • nacisku  $p$ , przy stałych wartościach prędkości poślizgu  $v$  - **metoda .  $\kappa P$** .

Charakter wymuszenia występującego podczas badań, czyli sposób zmian w czasie liczby Herseya, może być podstawą do wyróżnienia metody **statycznej S** i **metody dynamicznej D** wyznaczania krzywych Stribeck.

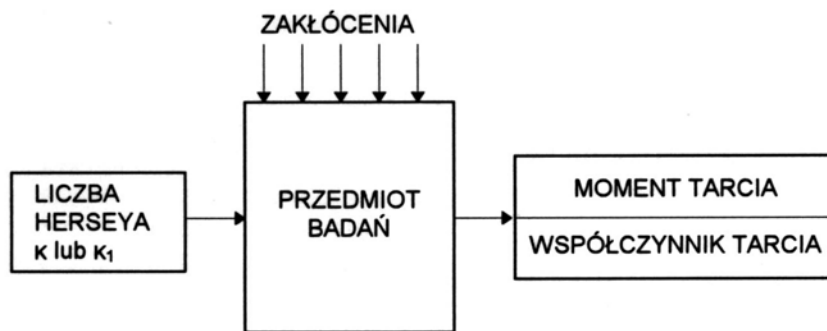
**Metoda statyczna S**. (punktowa) wyznaczania krzywych Stribeck realizowana jest poprzez zadawanie ustalonych wartości liczby Herseya ( $\kappa$  lub  $\kappa_1$ ). Jest to, wcześniej omawiana, powszechnie stosowana metoda pomiarów dyskretnych.

**Metoda dynamiczna D**. (ciągła) wyznaczania krzywych Stribeck realizowana jest poprzez zadawanie liczby Herseya ( $\kappa$  lub  $\kappa_1$ ) według określonego przebiegu zmienianego w funkcji czasu (zmiana wartości prędkości poślizgu  $v$  lub nacisku  $p$  według przebiegów: liniowo narastającego, trójkątnego, prostokątnego lub sinusoidalnego). Szybkość lub częstotliwość zmian wartości liczby Herseya jest różna od zera.

**Metoda SD**. jest połączeniem metody statycznej i dynamicznej wyznaczania krzywych Stribeck. Służy ona do porównania charakterystyk wyznaczonych w stanach ustalonych i metodą dynamiczną.

## MODEL BADAŃ SYSTEMOWYCH WYZNACZENIA KRZYWYCH STRIBECKA

Ocena wpływu metody badawczej na opory ruchu w łożyskach ślizgowych, przy obecnym poziomie wiedzy, może być dokonana tylko na drodze eksperymentalnej. Wyznaczanie krzywych Stribeck jest formą identyfikacji badanego obiektu - łożyska ślizgowego. Podczas badań obiekt pobudzany jest wymuszeniami  $x(t)$ , które wraz z odpowiedziami typu  $y(t)$  podlegają rejestracji. Model układu badań systemowych pozwalających na dokonanie oceny wpływu metody wyznaczania krzywych Stribeck na ich przebieg został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Model układu badań systemowych wyznaczania krzywych Stribeck

Wielkości wejściowe związane są z realizacją zmian liczby Herseya. Liczba Herseya ( $\kappa$  lub  $\kappa_1$ ) określana jest przez: wartość, sposób zmian (poprzez zmianę prędkości poślizgu  $v$  przy  $p=\text{const}$  lub zmianę nacisku  $p$  przy  $v=\text{const}$ ), oraz charakter i szybkość zmian wartości jej czynników (prędkości poślizgu  $v$  i nacisku  $p$ ).

Zakłócenia rozumiane są jako wszystkie losowe niejednorodności materiałów, zmiany mikrokontaktu, zmienne oddziaływanie otoczenia.

Parametr wyjścia - moment tarcia  $M$ , przeliczany na współczynnik tarcia  $\sim$ , pozwala na wiarygodne porównanie wpływu poszczególnych czynników wejściowych.

## WYKONANIE BADAŃ I ICH ANALIZA

Sformułowane zadanie dotyczy sytuacji, w której rozpatrywany jest wpływ metody badawczej na wyznaczenie charakterystyki obiektu o ustalonej strukturze. Wyznaczenie przebiegu krzywej Stribeck, dla łożyska ślizgowego o panewce wykonanej z mosiądzu i stalowym czopie, potraktowane zostało jako przykładowy proces badawczy.

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone zgodnie z przyjętymi programami badań.

Przeprowadzono badania miniaturowych łożysk ślizgowych smarowanych olejem zegarmistrzowskim Moebius 8030 i pracujących w warunkach tarcia technicznie suchego.

Do oceny wpływu metody wyznaczania krzywych Stribeck na ich przebieg a więc istotności wpływ sposobu zmian liczby Herseya ( $\kappa$  lub  $\kappa_i$ ), charakteru i szybkości zmian wartości jej czynników (prędkość poślizgu  $v$  i nacisk  $p$ ) oraz wartości ustalonego dla danego pomiaru parametru na wartość współczynnika tarcia  $\mu$ , zastosowano metodę analizy wariancji opracowaną przez Fishera i Snedecora.

## WNIOSKI DOTYCZĄCE WPLYWU METODY WYZNACZANIA KRZYWYCH STRIBECKA NA ICH PRZEBIEG

Przebieg prac i uzyskane wyniki wykazały wpływ metody wyznaczania krzywych Stribeck, tj. wpływ wartości liczby Herseya, sposobu jej zmian, a także charakteru i szybkości zmian jej czynników, na przebieg tych krzywych oraz pozwoliły na sformułowanie wniosków, z których ważniejsze przedstawiono niżej.

1. Wykazano, że przebieg doświadczalnie wyznaczonych krzywych Stribeck, zarówno dla łożysk ślizgowych pracujących w warunkach tarcia technicznie suchego jak też granicznego i mieszanego, zależy od charakteru wymuszenia tzn. od tego, czy zmiana wymuszenia dokonywana jest w stanach ustalonych (metoda statyczna), czy metodą dynamiczną:

- przebieg krzywej Stribeck wyznaczonej metodą SD. $\kappa V$  zależy od tego, czy zmiana liczby Herseya uzyskana poprzez zmianę wartości prędkości poślizgu  $v$  dokonywana jest w stanach ustalonych (szybkość zmian liczby Herseya  $a_{\kappa V} = 0$ ), czy metodą dynamiczną

( $a_{\kappa V} \neq 0$ ),

- przebieg krzywej Stribeck wyznaczonej metodą SD.  $\kappa P$  zależy od tego czy zmiana liczby Herseya uzyskana poprzez zmianę wartości nacisku  $p$  dokonywana jest w stanach ustalonych (szybkość zmian liczby Herseya  $a_{\kappa P} = 0$ ) czy metodą dynamiczną ( $a_{\kappa P} \neq 0$ ).

Różnice między otrzymanymi wartościami współczynnika tarcia, wyznaczonymi metodą dynamiczną a statyczną są duże (rys. 3 i 4).

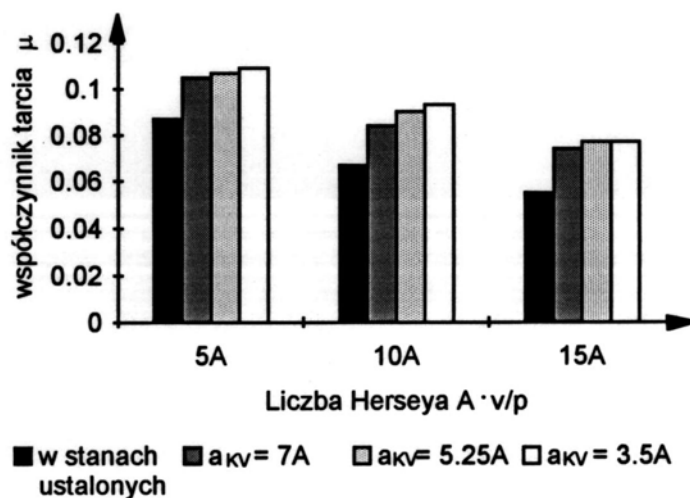
2. Udowodniono, że przebieg doświadczalnie wyznaczonych krzywych Stribeck, dla łożysk ślizgowych pracujących w warunkach tarcia technicznie suchego, zależy od szybkości zmian wymuszenia:

- przebieg krzywej Stribeck wyznaczonej metodą D. $\kappa V$  poprzez zmianę wartości prędkości poślizgu  $v$  zależy od wartości szybkości zmian liczby Herseya  $a_{\kappa V}$ ,

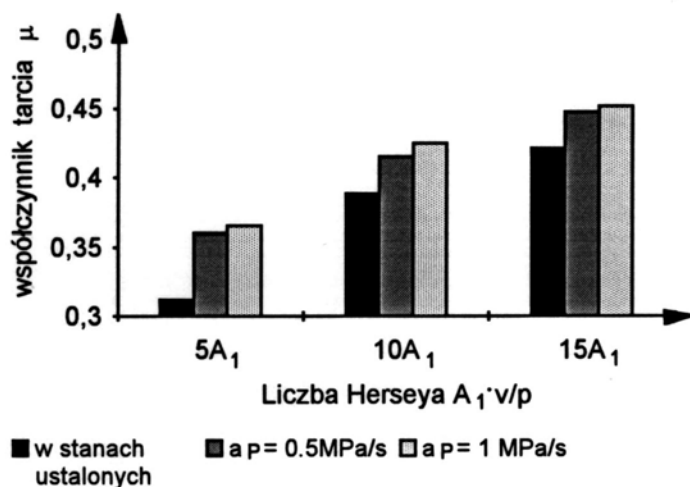
- przebieg krzywej Stribeck wyznaczonej metodą D. $\kappa P$  poprzez zmianę wartości nacisku  $p$  zależy od wartości szybkości zmian liczby Herseya  $a_{\kappa P}$ .

Różnice między wartościami współczynnika tarcia, wyznaczonymi dla różnych szybkości zmian liczby Herseya są mniejsze niż różnice między wartościami współczynnika tarcia wyznaczonymi metodą dynamiczną i statyczną (rys. 3 i 4).

3. Wartości współczynnika tarcia, wyznaczone przy badaniach dynamicznych, są w każdym przypadku większe niż wyznaczone przy pomiarze w warunkach ustalonych. Oznacza to, że badane łożysko ślizgowe zachowuje się jak układ inercyjny i reaguje na zmiany warunków pracy z pewnym opóźnieniem.



Rys. 3. Wartość współczynnika tarcia  $\mu$  dla liczby Herseya zmienianej z szybkością  $a_{\kappa V}$  przy  $p = \text{const} = 1 \text{ MPa}$  - metoda SD.  $\kappa V$ , łożysko smarowane - olej zegarmistrzowski Moebius 8030



Rys. 4. Wartość współczynnika tarcia  $\mu$  dla liczby Herseya zmienianej z szybkością  $a_p$  przy  $v = \text{const} = 10 \text{ mm/s}$  - metoda SD.  $\kappa p$ , łożysko niesmarowane

#### UWAGI KOŃCOWE

W zależnościach (1) i (2), opisujących krzywe Stribeck, nie występuje zmienna czasowa. Można by więc sądzić, że szybkość zmian liczby Herseya nie wpływa na charakter przebiegu tych krzywych. Takiemu wnioskowi przeczą jednak wyniki przeprowadzonych badań. Z analizy różniczki zupełnej, danej zależnością (1), wynika, że przy niestalej wartości chociaż jednej z trzech wielkości: lepkości dynamicznej oleju, prędkości kątowej czy nacisku muszą

nastąpić zmiany współczynnika tarcia w funkcji czasu. Jest to całkowicie zgodne z otrzymanymi wynikami badań.

$$d\mu = \left( \frac{df}{d\kappa} \cdot \frac{d\kappa}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{dt} + \frac{df}{d\kappa} \cdot \frac{d\kappa}{d\omega} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{df}{d\kappa} \cdot \frac{d\kappa}{dp} \cdot \frac{dp}{dt} \right) \cdot dt =$$

$$= \frac{\eta \cdot \omega}{p} \cdot \frac{df}{d\kappa} \cdot \left( \frac{1}{\eta} \cdot \frac{d\eta}{dt} + \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\omega}{dt} - \frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{dt} \right) \cdot dt \quad (6)$$

2. Różnice przebiegu krzywych Stribeck'a otrzymanego różnymi metodami dowodzą, że przy publikowaniu wyników badań eksperymentalnych powinna być precyzowana metoda pomiaru. Krzywe Stribeck'a, niezbędne do oceny i porównywania parametrów użytkowych łożysk ślizgowych, powinny być wyznaczone przy zmienności liczby Herseya według funkcji o znormalizowanym przebiegu i w ściśle określony sposób (zmienność  $v$  lub  $i$  p). Taka procedura postępowania pozwoliłaby zmniejszyć pracochłonność badań, a także umożliwiła porównywanie wyników otrzymywanych przez różnych badaczy na różnych stanowiskach. Rodzaj przebiegu, a także decyzja, który z czynników liczby Herseya byłby zmieniany (przy innych ustalonych) zależałaby od zastosowania i specyfiki pracy danego łożyska (węzła). Przykładowo, przy badaniach urządzeń nadążnych, w których charakterystyczna jest zmiana prędkości poślizgu, krzywe Stribeck'a należałoby wyznaczać utyskując zmiany wartości liczby Herseya poprzez zmianę prędkości poślizgu.

## LITERATURA

1. Janowska J.: Method and Investigation system enabling estimation of the effect of variable vs. time sliding speed and/or load on friction and accompanying phenomena in miniature journal bearings. Proceedings of 6 th International Congress on Tribology Eurotrib' 93, Budapeszt, 1993, referat plakatowy w grupie Coatings, s. 365 - 370
2. Janowska J.: Analiza metrologiczna wyników badań na przykładzie łożysk ślizgowych. Konferencja Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych, Łódź, 1995, Materiały konferencyjne s. 28-32
3. Janowska J.: Wpływ metody wyznaczania krzywych Stribeck'a na ich przebieg w badaniach miniaturowych łożysk ślizgowych. Praca doktorska, Warszawa 1996
4. Janowska J.: Einfluß der Untersuchungsmethode auf die Bestimmung der Reibungskennlinie von Miniaturgleitlagern. 41 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau, 1996, Tagungsband s. 506-511

## THE INFLUENCE OF INVESTIGATION METHOD ON THE RESULTS OF DETERMINING FRICTION CHARACTERISTICS OF MINIATURE JOURNAL BEARINGS

### Summary

The paper contains the systematics of the methods of Stribeck's characteristics determination, and evaluation of the influence of the method on the results of characteristics determination. Methodological proposals for determining friction torque in miniature journal bearings are presented.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Burcan