

Krzysztof WIERZCHOLSKI*

KSZTAŁTY NANOROWKÓW I ŻEBEREK NA POWIERZCHNIACH MIKROŁOŻYSK

SHAPES OF NANO-GROOVES AND RIDGE SHAPES ON MICRO-BEARING SURFACES

Słowa kluczowe:

mikrołożyska, nanorowki, nanożeberka, szczeliny, wzory

Key-words:

micro-bearings, nano-grooves, ridges, gaps, formulae

Streszczenie

Inteligentne cechy mikrołożysk o średnicach wału około 1 milimetra oraz o wysokościach szczeliny często mniejszych od jednego mikrometra osiągamy poprzez nacięcia rowków o średniej głębokości około 100 nm o różnym kształcie i różnym usytuowaniu po kierunku kąta opasania, a także w kierunku wzdłużnym na współpracujących powierzchniach warstw wierzchnich czopa i panewki o różnych kształtach.

Takie rowki zmieniają wysokości supercienkiej szczeliny mikrołożyska o różnej geometrii czopa. Zarówno kształty rowków, jak też

* Politechnika Koszalińska, Instytut Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej, 75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15/17; krzysztof.wierzcholski@wp.pl

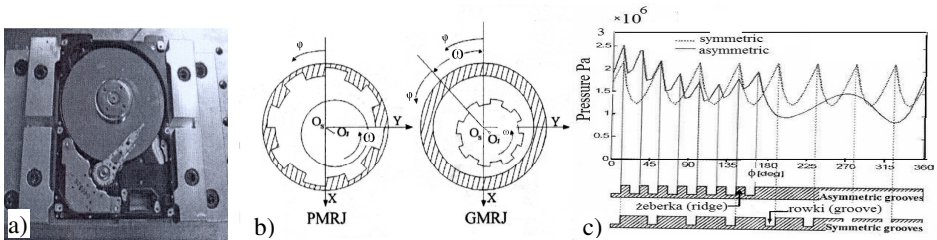
kształty czopów walcowych, stożkowych, parabolicznych, hiperbolicznych wpływają istotnie na rozkłady wartości ciśnień hydrodynamicznych oraz na wartości sił tarcia. W niniejszej pracy ograniczymy się do czopów walcowych.

Dla umożliwienia obliczeń numerycznych rozkładów ciśnienia hydrodynamicznego, sił nośnych, sił tarcia w mikrołożyskach niniejsza praca przy wykorzystaniu jednostkowych funkcji Heaviside'a oraz rozwinięć funkcji w szeregi Fouriera, przedstawia formuły analityczne opisu różnych kształtów rowków i żeberk na powierzchniach czopa i panewki.

Żeberkowane oraz rowkowane czopy mają zastosowanie w mikrołożyskach dla HDD.

WSTĘP

Mikrołożyska występujące w wiertarkach medycznych, twardych dyskach komputerowych, których średnica czopa jest mniejsza od 1 mm, mogą mieć wysokość szczeliny smarnej znacznie mniejszą od 1 mikrometra [L. 1, 2]. **Rysunek 1a** przedstawia 2,5-calowy twardy dysk komputerowy. Na **Rys. 1b** widoczne są żeberka oraz rowki na powierzchni czopa lub panewki mikrołożyska zastosowanego w HDD.



Rys. 1. Zastosowania mikrołożyska: a) HDD, b) mikrołożyska z żeberkami i rowkami na czopie lub panewce, c) rozkłady ciśnienia hydrodynamicznego w szczeliny mikrołożyska

Fig. 1. Micro-bearing applications: a) HDD, b) micro-bearings with ridges and grooves on the journal or sleeve, c) pressure distributions

Rysunek 1c przedstawia szkic wartości ciśnienia hydrodynamicznego na podstawie wstępnych obliczeń w mikrołożysku z rowkami i żeberkami na czopie oraz panewce [L. 3–6].

Różnaita geometria rowków, a także żeberk i ich usytuowań ma istotny wpływ na wartość ciśnienia hydrodynamicznego, na rozkłady sił

nośnych oraz wartości sił tarcia mikrołożysk, a także na ich inteligentne właściwości cechujące się zdolnością do zapamiętywania określonych obciążeń oraz wywoływanych sił nośnych. Takie łożyska zapewniają prawidłowe funkcjonowanie twardych dysków komputerowych. Ten fakt udowadnia się w badaniach eksperymentalnych oraz w wynikach badań numerycznych.

Odpowiednia częstotliwość zmian wartości ciśnienia hydrodynamicznego mikrołożyska zależy jednocześnie od kształtów geometrycznych czopów oraz od konfiguracji rowków i żeberk o głębokości około 100 nanometrów wykształconych w warstewce wierzchniej czopa i panewki oraz usytuowanych w kierunku obwodowym kąta opasania łożyska, jak również w kierunku wzdłużnym. Problem hydrodynamicznego smarowania takich łożysk ślizgowych odbiega znacznie od typowych klasycznych przypadków.

Badania numeryczne wymagają opracowania formuł analitycznych opisujących wysokości supercienkich szczelin mikrołożyska z uwzględnieniem nanorowków oraz nanozeberk na powierzchniach czopa i panewki. Tak więc tematem niniejszej publikacji jest przedstawienie związków analitycznych i numerycznych obliczeń wysokości szczelin mikrołożyska z uwzględnieniem różnych kształtów rowków oraz żeberk przy wykorzystaniu funkcji jednostkowej Heaviside'a oraz rozwinięć funkcji w szeregi Fouriera.

ROWKI I ŻEBERKA NA POWIERZCHNI CZOPA WALCOWEGO

Żeberka na powierzchni czopa walcowego o bezwymiarowej wysokości ϵ_{g1} we współrzędnych walcowych (r, φ, z) opiszemy najpierw za pomocą jednostkowej funkcji Heaviside'a, którą definiujemy wzorem [L. 4]:

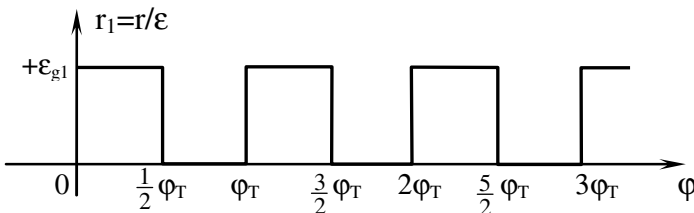
$$H_{\eta}(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < 0 \\ 1/2 & \text{dla } x = 0 \\ +1 & \text{dla } x > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Wysokość szczeliny poprzecznego, ślizgowego łożyska walcowego z rowkami prostokątnymi w kierunku wzdłużnym z oraz w kierunku obwodowym φ pokazują kolejno wzory (2), (3):

$$\varepsilon_T(\varphi, z, t) = \varepsilon \left[1 + \lambda_{cy}(z, t) \cos \varphi + \varepsilon_{g1} \sum_{n=0}^k (-1)^n H_\eta(\varphi - 0,5n\varphi_T) \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_T(\varphi, z, t) = \varepsilon \left[1 + \lambda_{cy}(z, t) \cos \varphi + \varepsilon_{g1} \sum_{n=0}^j (-1)^n H_\eta(z + 0,25z_{T1} - 0,5nz_{T1}) \right] \quad (3)$$

Przyjęto następujące oznaczenia: ε – luz promieniowy, λ_{cy} – mimośrodowość względna zależna od przekoszenia czopa w kierunku wzdłużnym z , φ – kąt opasania, φ_T – okres bezwymiarowy w radianach po kierunku kąta opasania w przedziale $0 \leq \varphi < 2\pi$ dla żeberk wzdłużnych, z_{T1} – okres bezwymiarowy po kierunku wzdłużnym w przedziale $-b \leq z \leq +b$, $(-1 \leq z_1 \leq +1)$ dla żeberk obwodowych, k – liczba pełnych okresów powtarzania się żeberk po obwodzie w przedziale $0 \leq \varphi < 2\pi$, j – liczba pełnych okresów powtarzania się żeberk po długości czopa w przedziale $-b \leq z \leq +b$, t – czas, H_η – funkcja jednostkowa Heaviside'a, ε_{g1} – bezwymiarowa wysokość żeberka, ε_T – całkowita wysokość szczeliny. Przekrój poprzeczny żeberk wzdłużnych opisany drugim członem wzoru (2) dla wysokości szczeliny przedstawia **Rys. 2**. Przekrój poprzeczny żeberk obwodowych opisany drugim członem wzoru (3) dla wysokości szczeliny przedstawia **Rys. 3**.



Rys. 2. Żeberka o wysokości bezwymiarowej ε_{g1} biegnące wzdłuż czopa i rozmieszczone na czopie poprzecznego walcowego hydrodynamicznego mikrołożyska, powtarzające się po obwodzie w bezwymiarowym okresie φ_T w przedziale kąta opasania $0 \leq \varphi < 2\pi$

Fig. 2. The ridges of the dimensionless height ε_{g1} going along the journal length, lying on the cylindrical microbearing surface, repeated in the dimensionless period φ_T inside the interval $0 \leq \varphi < 2\pi$ in circumferential direction

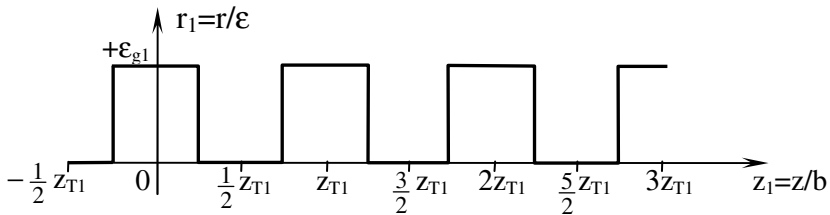
Żeberka na powierzchni czopa walcowego o bezwymiarowej wysokości $0,5\varepsilon_{g1}$ oraz jednocześnie rowki na powierzchni czopa walcowego

o bezwymiarowej głębokości $-0,5\varepsilon_{g1}$ we współrzędnych walcowych (r,φ,z) opiszemy również przy pomocy jednostkowej funkcji Heaviside'a zdefiniowanej wzorem (1). Wysokość szczeliny poprzecznego, ślizgowego łożyska walcowego z żeberkami oraz jednocześnie rowkami prostokątnymi w kierunku wzdłużnym z oraz w kierunku obwodowym φ pokazują kolejno wzory (4), (5):

$$\varepsilon_T(\varphi, z, t) = \varepsilon \left\{ 1 + \lambda_{cy}(z, t) \cos \varphi + \varepsilon_{g1} \left[-\frac{1}{2} + \sum_{n=0}^k (-1)^n H_{\eta}(\varphi - 0,5n\varphi_T) \right] \right\} \quad (4)$$

$$\varepsilon_T(\varphi, z, t) = \varepsilon \left\{ 1 + \lambda_{cy}(z, t) \cos \varphi + \varepsilon_{g1} \left[-\frac{1}{2} + \sum_{n=0}^j (-1)^n H_{\eta}(z + 0,25z_{T1} - 0,5nz_{T1}) \right] \right\} \quad (5)$$

Przyjęto następujące przedziały zmiennych: $0 \leq \varphi < 2\pi$, $-b \leq z \leq +b$, $(-1 \leq z_1 \leq +1)$. Wysokość bezwymiarowa żeberka wynosi $+0,5 \varepsilon_{g1}$, natomiast prostokątny rowek ma głębokość $-0,5 \varepsilon_{g1}$.

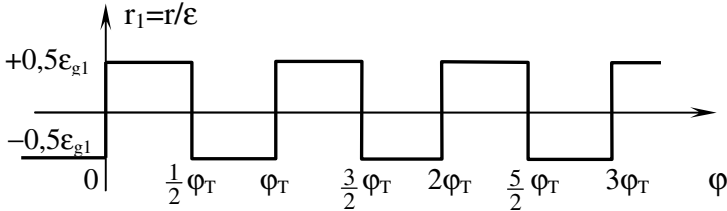


Rys. 3. Żeberka o wysokości bezwymiarowej ε_{g1} biegnące po obwodzie czopa φ rozmieszczone na czopie poprzecznego walcowego hydrodynamicznego mikrołożyska, powtarzające się po kierunku wzdłużnym w bezwymiarowym okresie z_{T1} w przedziale długości czopa $-b \leq z \leq +b$

Fig. 3. The ridges of the dimensionless height ε_{g1} going along the circumferential direction, lying on the cylindrical microbearing surface, repeated in the dimensionless period z_{T1} inside the interval $-b \leq z \leq +b$ in longitudinal direction

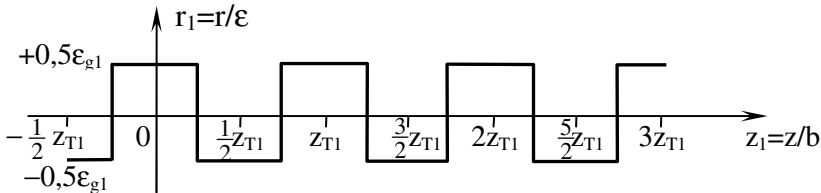
Przekrój poprzeczny żeberek oraz rowków wzdłużnych zawarty w nawiasie kwadratowym wzoru (4) opisującego wysokość szczeliny przedstawia **Rys. 4** w postaci funkcji sinus prostokątny. Przekrój poprzeczny żeberek oraz rowków obwodowych zawarty w nawiasie kwa-

dratowym wzoru (5) opisującego wysokość szczeliny przedstawia **Rys. 5** w postaci funkcji cosinus prostokątnej.



Rys. 4. Żeberka oraz rowki o wysokości i głębokości bezwymiarowej $\pm 0,5\epsilon_{g1}$ biegnące wzdłuż czopa z rozmieszczone na czopie poprzecznego walcowego hydrodynamicznego mikrołożyska, powtarzające się po obwodzie w bezwymiarowym okresie φ_T w przedziale kąta opasania $0 \leq \varphi < 2\pi$

Fig. 4. The ridges and grooves of the dimensionless height and depth $\pm 0,5\epsilon_{g1}$ going along the journal length, lying on the cylindrical microbearing surface, repeated in the dimensionless period φ_T inside the interval $0 \leq \varphi < 2\pi$ in circumferential direction



Rys. 5. Żeberka i rowki o wysokości i głębokości bezwymiarowej $\pm 0,5\epsilon_{g1}$ biegnące po obwodzie czopa φ rozmieszczone na czopie poprzecznego walcowego hydrodynamicznego mikrołożyska, powtarzające się po kierunku wzdłużnym w bezwymiarowym okresie z_{T1} w przedziale długości czopa $-b \leq z \leq +b$

Fig. 5. The ridges and grooves of the dimensionless height and depth $\pm 0,5\epsilon_{g1}$ going along the circumferential direction, lying on the cylindrical microbearing surface, repeated in the dimensionless period z_{T1} inside the interval $-b \leq z \leq +b$ in longitudinal direction

Funkcje sinusa oraz cosinusa prostokątnej opisujące żeberka oraz rowki o bezwymiarowej wysokości (głębokości) $+\epsilon_{g1}$ ($-\epsilon_{g1}$) na powierzchni czopa walcowego, przedstawione **Rys. 4** i **5** oraz zapisane w nawiasie kwadratowym we wzorach (4), (5) za pomocą funkcji jednostkowej Heaviside'a, można również przedstawić poprzez rozwinięcia

w szereg Fouriera. Wtedy wzory opisujące wysokość szczeliny z rowkami i żeberkami przedstawimy w następującej postaci:

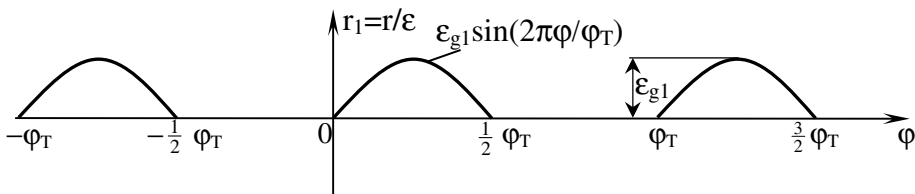
$$\varepsilon_T(\varphi, z, t) = \varepsilon \left\{ 1 + \lambda_{cy}(z, t) \cos \varphi + \frac{2\varepsilon_{g1}}{\pi} \left[\sin\left(\frac{2\pi\varphi}{\varphi_T}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{6\pi\varphi}{\varphi_T}\right) + \frac{1}{5} \sin\left(\frac{10\pi\varphi}{\varphi_T}\right) + \dots \right] \right\} \quad (6)$$

$$\varepsilon_T(\varphi, z, t) = \varepsilon \left\{ 1 + \lambda_{cy}(z, t) \cos \varphi + \frac{2\varepsilon_{g1}}{\pi} \left[\cos\left(\frac{2\pi z}{z_T}\right) - \frac{1}{3} \cos\left(\frac{6\pi z}{z_T}\right) + \frac{1}{5} \sin\left(\frac{10\pi z}{z_T}\right) - \dots \right] \right\} \quad (7)$$

Żeberka oraz rowki wzdłużne o okresie powtarzania φ_T opisuje człon w nawiasie kwadratowym wzoru (6). Żeberka oraz rowki obwodowe o okresie powtarzania z_T opisuje człon w nawiasie kwadratowym wzoru (7).

Wysokość szczeliny łożyska walcowego z żeberkami sinusoidalnymi o bezwymiarowej wysokości ε_{g1} o okresie powtarzania φ_T po kącie opasania oraz biegnące w kierunku wzdłużnym przedstawiono wzorem (8) oraz pokazano na **Rys. 6**.

$$\varepsilon_T(\varphi, z, t) = \varepsilon \left\{ 1 + \lambda_{cy}(z, t) \cos \varphi + \frac{2\varepsilon_{g1}}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \sin\left(\frac{2\pi\varphi}{\varphi_T}\right) - \frac{1}{1.3} \cos\left(\frac{4\pi\varphi}{\varphi_T}\right) - \frac{1}{3.5} \cos\left(\frac{8\pi\varphi}{\varphi_T}\right) - \frac{1}{5.7} \cos\left(\frac{12\pi\varphi}{\varphi_T}\right) - \dots \right] \right\} \quad (8)$$

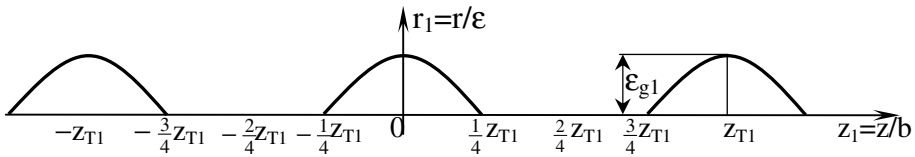


Rys. 6. Żeberka o wysokości bezwymiarowej ε_{g1} biegnące wzdłuż czopa z rozmieszczone na czopie poprzecznego walcowego hydrodynamicznego mikrołożyska, powtarzające się po obwodzie w bezwymiarowym okresie φ_T w przedziale kąta opasania $0 \leq \varphi < 2\pi$

Fig. 6. The ridges of the dimensionless height ε_{g1} going along the journal length, lying on the cylindrical microbearing surface, repeated in the dimensionless period φ_T inside the interval $0 \leq \varphi < 2\pi$ in circumferential direction

Wysokość szczeliny łożyska walcowego z żeberkami kosinusoidalnymi o bezwymiarowej wysokości ε_{g1} o okresie powtarzania z_T w kierunku wzdłużnym oraz biegnące po kącie opasania przedstawiono wzorem (9) oraz pokazano na **Rys. 7**.

$$\varepsilon_T(\varphi, z, t) = \varepsilon \left\{ 1 + \lambda_{cy}(z, t) \cos \varphi + \frac{2\varepsilon_{g1}}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \left(\frac{2\pi z}{z_T} \right) - \frac{1}{1 \cdot 3} \cos \left(\frac{4\pi z}{z_T} \right) - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos \left(\frac{8\pi z}{z_T} \right) + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos \left(\frac{12\pi z}{z_T} \right) - \dots \right] \right\} \quad (9)$$



Rys. 7. Żeberka o wysokości bezwymiarowej ε_{g1} biegnące po obwodzie czopa φ rozmieszczone na czopie poprzecznego walcowego hydrodynamicznego mikrołożyska, powtarzające się po kierunku wzdłużnym w bezwymiarowym okresie z_{T1} w przedziale długości czopa $-b \leq z \leq +b$

Fig. 7. The ridges of the dimensionless height ε_{g1} going along the circumferential direction, lying on the cylindrical microbearing surface, repeated in the dimensionless period z_{T1} inside the interval $-b \leq z \leq +b$ in longitudinal direction

WNIOSKI

Według wstępnych badań numerycznych kształt żeberek i rowków jest bardzo istotny w uzyskaniu właściwych częstotliwości zmian wartości ciśnienia hydrodynamicznego.

1. Żeberka na czopie powodują mniejsze wiry niż żeberka na panewce.
2. Piki rozkładów ciśnienia znajdują się przy przejściu od rowka do żeberka, gdy żeberka są na panewce.
3. Piki rozkładów ciśnienia znajdują się przy przejściu od żeberka do rowka gdy żeberka są na czopie

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2012 jako projekt badawczy nr 3475/B/T02/2009/36.

LITERATURA

1. Sadik Unlu B., Atik E.: Determination of friction coefficient in journal bearings. Elsevier, Material & Design, 28, 2007, pp. 973–977.
2. Bhushan B.: Nano-tribology and nanomechanics of MEMS/NEMS and BioMEMS, BioNEMS materials and devices. Microelectronic Eng. 84, 2007, pp. 387–412.
3. Jang G.H., Lee S.H., Kim H.W., Kim C.S.: Dynamic analysis of a HDD spindle system with FDBs due to the bearing width and asymmetric grooves of journal bearing. Microsystems Technologies, 11, 2005, pp. 499–505.
4. Wierzcholski K.: A new concept of the changes of memory capacity of fluid dynamics HDD micro-bearings. Tribologia, 2008,4(220), pp. 267–274.
5. Wierzcholski K., Miszczak A.: Load Carrying Capacity of Microbearings with Parabolic Journal. Solid State Phenomena, Trans. Tech. Public., Switzerland, Vols. 147–149, 2009, pp. 542–547.
6. Wierzcholski K.: Bio and slide bearings; their lubrication by non-Newtonian fluids and application in non-conventional systems. Vol. III, Monograph. Gdańsk University of Tech., 2007.

Recenzent:
Stanisław PYTKO

Summary

In micro-bearings, where journal diameter has values up to 1 millimetre and the height of the micro-bearing gap has the largest value 1 micrometer, the intelligent features are attained by the groove and ridges on the sleeve and journal surfaces. The average groove depth and ridge height has a value of about 100 nm. The grooves have various geometrical shapes and are lying on the superficial layer of the sleeve and on the journal and are situated in circumferential and longitudinal directions of the cooperating bearing surfaces. The journals have additionally various geometrical shapes; however, in this paper, we are restricted to the cylindrical bearings only.

Such grooves and ridges change in real form the height of the super thin, micro-bearing gap where the journal has various shapes. The geometrical shapes of the grooves and the cylindrical, conical, parabolic, hyperbolic geometry of the bearing journal has substantial influence on the hydrodynamic pressure distribution values and friction forces.

Using the unit Heaviside`a function and Fourier series expansions, the present paper shows the various formulae for an analytical description of the various shapes of grooves, which enables one to perform the numerical calculations of the hydrodynamic pressure, carrying capacities, and friction forces.

The grooved and ridged gaps have applications in Computer Hard Discs Drivers (HDD) microbearings.