

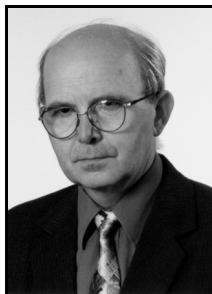
Ludwik KANIA

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, INSTYTUT MECHANIKI I PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN

Modelowanie korekcji cięciwowo-łukowej w wałeczkach łożysk tocznych wieńcowych

Dr hab. inż. Ludwik KANIA

Jest profesorem nadzwyczajnym w Instytucie Mechaniki i PKM Politechniki Częstochowskiej. Jest autorem licznych publikacji z zakresu projektowania łożysk tocznych wieńcowych. Współpracuje z firmą ZAFAMA, czołowym producentem łożysk wieńcowych w Polsce. Zajmuje się problematyką CAD, podstaw konstrukcji maszyn oraz optymalizacji. Jest autorem kilku podręczników akademickich.



e-mail: ludwik@imipkm.pcz.czest.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę korekcji cięciwowo-łukowej stosowanej w wałeczkach łożysk tocznych wieńcowych. Analizę przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych. Przedstawiono model obliczeniowy strefy styku. Wykonano obliczenia rozkładu nacisków wzdłuż tworzącej wałeczka dla różnych wartości parametrów analizowanej korekcji w sprężystym i sprężysto-plastycznym stanie materiałów bieżni i wałeczka. Przedstawiona metoda pozwala na dobór poprawnych parametrów korekcji dla specyfiki łożysk wieńcowych.

Słowa kluczowe: łożyska toczne wieńcowe, strefa styku, MES.

Modelling of cylindrical crowned correction of roller generator in slewing bearing

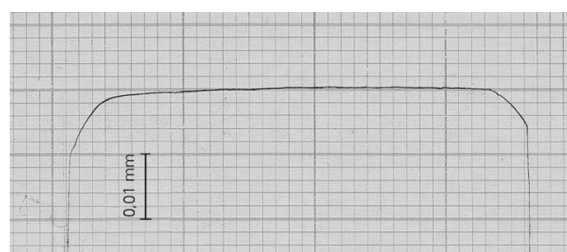
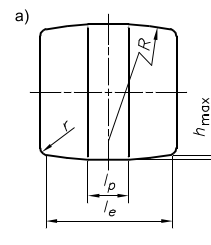
Abstract

In the paper the analysis of cylindrical crowned correction applied for rollers in slewing bearings has been presented. The analysis has been executed with the help a finite element method. Numerical model of contact zone has been presented. Computations of the normal traction across the contact line of the roller with bearing race for different correction parameters at elastic and elastic-plastic state of materials of rollers and bearing rings has been performed. Analysis method presented in paper allows for selection of correct parameters of rollers correction for specific to slewing bearings.

Keywords: slewing bearings, contact zone, FEM.

1. Wprowadzenie

Na krawędziach wałeczka łożyskowego o prostoliniowej tworzącej dochodzi do znacznej koncentracji naprężeń i nacisków na powierzchni styku wałeczka z bieżnią [1]. Jest to zjawisko wysoce niekorzystne, najczęściej zapobiega mu się przez stosowanie korekcji tworzącej wałeczka. Istnieje wiele rodzajów korekcji, najpopularniejsze z nich to korekcja logarymiczna stosowana szeroko w zwykłych łożyskach tocznych [2] pozwalająca na względnie duże możliwości modyfikacji tworzącej wałeczka i korekcja cięciwowo łukowa (ZB) wyróżniająca się stosunkowo prostą technologią wykonania (rys. 1a). Ta ostatnia jest bardzo często stosowana w wałeczkach łożysk tocznych wieńcowych [3] (niejednokrotnie stosowane są w tych łożyskach nawet wałeczki niekorygowane). Oczywiście jest, że spiętrzenie nacisków na krawędziach wałeczków, zwykle przekraczające kilkakrotnie średnie wartości nacisków, jest jedną z przyczyn przedwczesnego zużycia bieżni łożysk wieńcowych. Jeżeli parametry stosowanej korekcji są nieodpowiednie, to mimo jej stosowania zmniejszenie koncentracji nacisków może być niewystarczające. Przykładem tego jest korekcja stosowana w łożyskach wieńcowych przez firmę ZAFAMA. Na rysunku 1b przedstawiono profilogram tworzącej wałeczka o średnicy 20 mm z korekcją ZB.



Rys. 1. Parametry korekcji ZB (a) i profilogram tworzącej wałeczka ($d = 20$ mm)

z korekcją ZB stosowaną w łożyskach wieńcowych firmy ZAFAMA (b)

Fig. 1. Parameters of ZB correction (a) and profilogram of roller generator ($d = 20$ mm) with ZB correction applied in slewing bearing from ZAFAMA (b)

Podstawowym parametrem korekcji wałeczka jest strzałka profilu, tj. maksymalne odchylenie profilu od tworzącej prostoliniowej. W korekcji wałeczka z rysunku 1b strzałka profilu wynosi $h_{\max} = 11,3 \mu\text{m}$. W korekcji wałeczków wielkością odniesienia jest tzw. strzałka Lundberga h_L obliczana wg zależności z pracy [4] na podstawie wartości średnich nacisków p w strefie styku, czynnej długości tworzącej wałeczka l_e i sumy krzywizn stykających się ciał w punkcie styku $\Sigma\rho$:

$$h_L = \frac{4p^2}{E'^2 \Sigma\rho} \left[0,5 - \ln \frac{4p}{E' l_e \Sigma\rho} \right], \quad (1)$$

gdzie E' jest zastępczym modułem sprężystości stykających się ciał.

W pracy [5] Krzemiński-Freda stwierdził, że wyliczona ze wzoru (1) wartość strzałki profilu jest zbyt mała i nie powoduje dostatecznego odciążenia krawędzi wałeczka, w praktyce projektowania zwykłych łożysk tocznych stosuje się wartości znacznie ją przekraczające. W tabeli 1 zamieszczono wartości strzałki Lundberga wyliczone dla granicznego obciążenia wałeczków P_{dop} , jakie dopuszcza się w łożyskach wieńcowych przy założonej twardości bieżni; wartości tego obciążenia obliczono wg zaleceń sformułowanych w [6]. Za wartości nacisku średniego przyjęto wartości nacisków Hertza obliczonych wg [7].

Tab. 1. Wartości obciążenia dopuszczalnego, nacisków Hertza i strzałki Lundberga dla typowych twardości bieżni w łożyskach wieńcowych

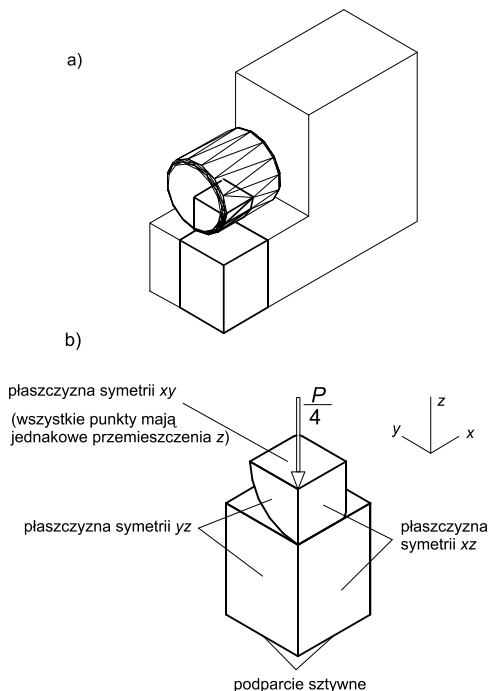
Tab. 1. Results of limited loads, Hertz pressures and Lundberg deviation for typical hardness of races at slewing bearings

twardość bieżni HRC	52	53	54	55	56
siła graniczna P_{dop} [kN]	26,511	27,779	29,151	30,631	32,138
naciski Hertza p_H [MPa]	2317,0	2371,8	2429,6	2490,5	2551,1
strzałka Lundb. h_L [mm]	0,0212	0,0221	0,0230	0,0241	0,0251

Z rezultatów powyższych obliczeń wynika, że stosowana w wałeczku z rysunku 1b strzałka profilu jest zdecydowanie za mała. Niniejsza praca jest poświęcona rozszerzonej analizie korekcji ZB w celu ustalenia wytycznych do doboru jej parametrów w łożyskach wieńcowych, dla których warunki pracy odbiegają od łożysk ogólnego stosowania. W analizie łożysk wieńcowych przyjmuje się, że parametrem opisującym obciążenie wałeczków jest twardość bieżni [3]. Wynika stąd konieczność doboru korekcji uzależnionej od twardości bieżni łożyska wieńcowego.

2. Model obliczeniowy

Obliczenia numeryczne wykonano, stosując metodę elementów skończonych. W celu ich przeprowadzenia wykorzystano bazowy model obliczeniowy MES strefy styku wałeczka z bieżnią łożyska wieńcowego trzyczęściowego, który m.in. był wykorzystany do obliczania charakterystyk zastępczych wałeczków łożyskowych w pracach [3, 8]. W modelu tym poddano dyskretyzacji fragment pierścienia łożyska wieńcowego trzyczęściowego i odpowiedni fragment wałeczka łożyskowego nakładając stosowne więzy przede wszystkim wynikające z symetrii modelu, co pokazano na rysunku 2.

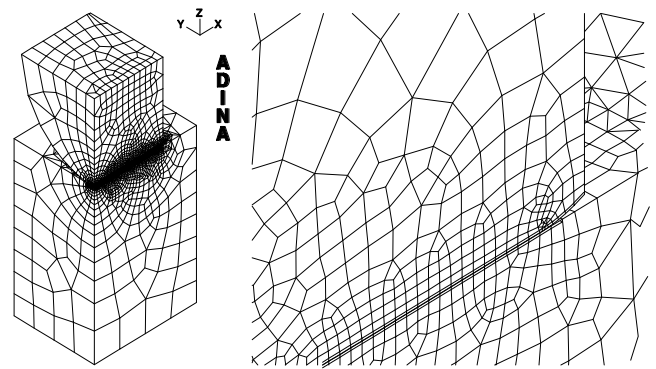


Rys. 2. Segment pierścienia łożyska z wyróżnionym obszarem dyskretyzacji, warunki brzegowe modelu [8]

Fig. 2. Segment of bearing ring with marked zone of digitalization and boundary conditions of model [8]

W bezpośredniej strefie styku wyodrębniono powierzchnie kontaktu o szerokości ok. 0,1 promienia wałeczka wzdłuż całej linii styku. Powierzchnie te podzielono na segmenty o rozmiarach boków ok. 0,01 promienia wałeczka, co pozwala w rozsądnym czasie obliczeń uzyskać zadowalający obraz rozkładu nacisków wzdłuż linii styku wałeczka z bieżnią łożyska. Dyskretyzacje modelu obliczeniowego i obliczenia numeryczne wykonano korzystając z programu ADINA [9]. Przykład siatki modelu pokazano na rys. 3.

Obliczenia wykonano na modelu wałeczka o średnicy $d = 20$ mm i czynnej długości $l_e = 18$ mm. Wałeczki mają krawędzie zaokrąglone promieniem 1 mm, co z uwagi na duże różnice krzywizn zaokrąglenia i profilu korygowanego nie ma wpływu na rozkład nacisków. Przyjęty model obliczeniowy pozwala na użycie dowolnej krzywej jako tworzącej wałeczka, w szczególności profilu korekcji ZB.



Rys. 3. Siatka modelu wałeczka i bieżni z powiększeniem bezpośredniej strefy styku [8]

Fig. 3. The mesh of FE model of roller and raceway with enlargement of the mesh in the direct contact zone [8]

Na podstawie modelu bazowego zbudowano szereg modeli obliczeniowych dla różnych parametrów korekcji. W tabeli 2 zamieszczono parametry korekcji ZB przy założeniu długości prostopolodowej części tworzącej $l_p = 12,5$ mm, obliczenia wykonywano dla dwóch typowych twardości bieżni łożysk wieńcowych 52 HRC i 56 HRC. Zasadniczym celem korekcji jest likwidacja spiężeń nacisków na końcach wałeczka, w pierwszej kolejności poszukiwano dostatecznie wielkiej wartości strzałki profilu zapewniającej zapewnienie tego warunku. Najlepiej jest, by krawędź wałeczka była zupełnie odciążona, zmniejsza to wprowadzenie nieco długość czynną strefy styku, ale daje w zamian pewną rezerwę na nieoczekiwane przeciążenia. Zadanie to można względnie szybko rozwiązać, przyjmując sprężysty stan materiałów stykających się elementów. Natomiast rozszerzona analiza zjawisk wymaga zastosowania materiału sprężysto-plastycznego. Z uwagi na stosunkowo niewielkie odkształcenia plastyczne wystarcza użycie materiału dwuliniowego. W tym celu wykorzystano materiał sprężysto-plastyczny z pracy [7], w której omówiono szczegółowe założenia określające modelową granicę sprężystości materiału i jej wartości liczbowe.

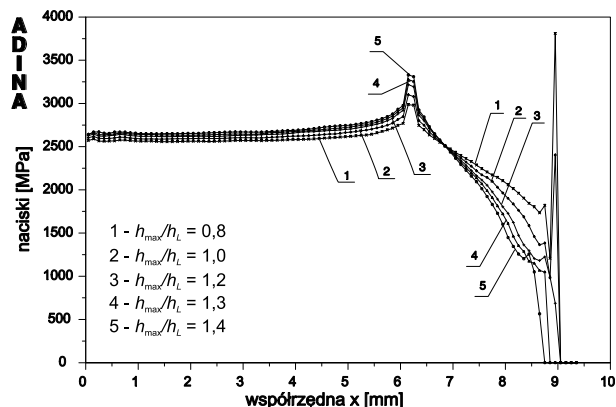
Tab. 2. Analizowane wartości parametrów korekcji ZB
Tab. 2. Analyzed values of parameters of ZB correction

h_{max}/h_L	52 HRC		56 HRC	
	h_{max} [mm]	R [mm]	h_{max} [mm]	R [mm]
0,8	0,0170	1255	0,0201	1059
0,9	0,0191	1115	0,0226	942
1,0	0,0212	1004	0,0251	848
1,1	0,0233	913	0,0276	771
1,2	0,0254	837	0,0301	706
1,3	0,0276	772	0,0326	652
1,4	0,0297	717	0,0352	605

3. Wyniki obliczeń

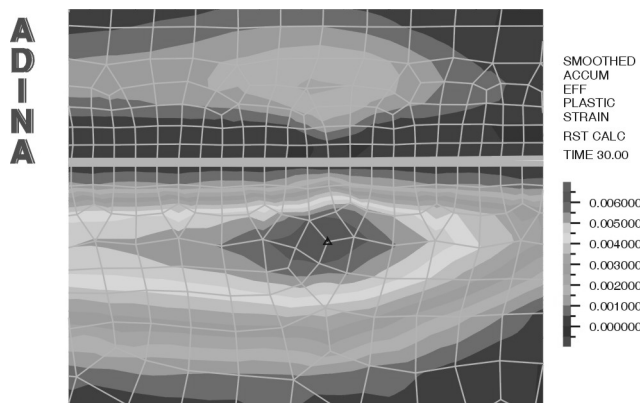
Wykonane obliczenia pozwoliły na uzyskanie wykresów przebiegu zmian nacisków wzdłuż tworzącej wałeczka dla parametrów korekcji z tablicy 2 przy odpowiednim obciążeniu z tablicy 1. Na rysunku 4 przedstawiono wybrane wykresy rozkładu nacisków uzyskane dla materiału w stanie sprężystym przy twardości 56 HRC.

Widoczne są koncentracje nacisków na krawędzi wałeczka (które zanikają przy odpowiednio dużej wartości strzałki profilu) oraz znaczny wzrost nacisków w punkcie przejścia pomiędzy liniowym i łukowym fragmentem profilu wałeczka. Naciski w tym punkcie rosną ze wzrostem strzałki profilu.



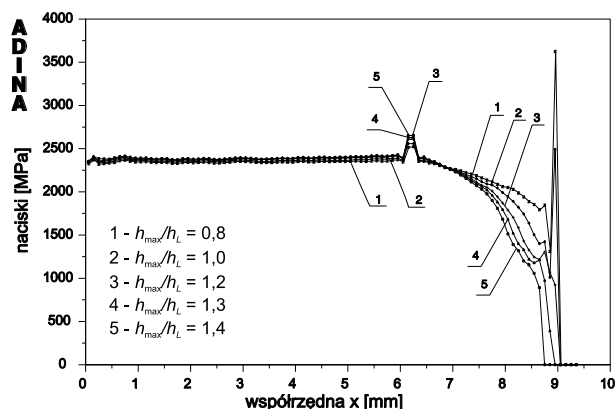
Rys. 4. Wybrane rozkłady nacisków wzdłuż tworzącej wałeczka przy twardości bieźni 56 HRC w sprężystym stanie materiału
 Fig. 4. Selected pressure distributions across roller generator for raceway hardness 56 HRC with elastic state of material

Ponieważ obciążenie wałeczka obliczane dla średnich wartości nacisków z założenia wywołuje w strefie styku niewielkie odkształcenia plastyczne, należy się spodziewać znacznego wzrostu odkształceń plastycznych w otoczeniu tego punktu. Potwierdza to obraz odkształceń plastycznych przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Obraz odkształceń plastycznych w strefie zmiany krzywizny profilu wałeczka
 Fig. 5. Depiction of plastic strain at zone of curvature change of roller generator

Na rysunku 6 przedstawiono odpowiednie rozkłady nacisków uzyskane w wyniku analizy w sprężysto-plastycznym stanie materiału.



Rys. 6. Wybrane rozkłady nacisków wzdłuż tworzącej wałeczka przy twardości bieźni 56 HRC w sprężysto-plastycznym stanie materiału
 Fig. 6. Selected pressure distributions across roller generator for raceway hardness 56 HRC with elastic-plastic state of material

W tabeli 3 zamieszczono wskaźniki wzrostu nacisków na krawędzi wałeczka p_e oraz w punkcie zmiany krzywizny w odniesieniu do nacisków Hertza oraz dodatkowo dla obliczeń w stanie sprężysto-plastycznym wskaźniki wzrostu nacisków w punkcie zmiany krzywizny p_p w odniesieniu do średniego nacisku w części prostoliniowej zarysu p_{sr} . Widoczne zmniejszenie wskaźników wzrostu nacisków w stanie sprężysto-plastycznym w odniesieniu do nacisków Hertza jest spowodowane tym, że analizowany jest statyczny przypadek kontaktu, dlatego lepszą informację przekazuje wskaźnik odniesiony do średnich nacisków na prostoliniowej części profilu p_p/p_{sr} .

Z analizy wyników obliczeń wynika, że całkowite odciążenie krawędzi wałeczka występuje dopiero przy wartości strzałki profilu równej 1,3 strzałki Lundberga, wydaje się jednak, że zalecana wartością strzałki profilu powinna być wartość 1,4 h_L .

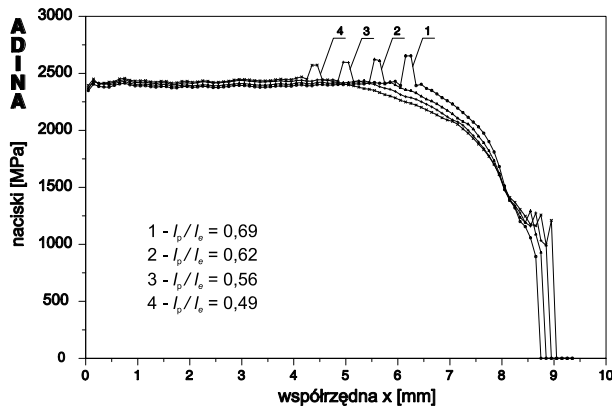
Tab. 3. Wskaźniki wzrostu nacisków
 Tab. 3. Growth indexes of pressure

		stan sprężysty				
h_{max}/h_L	52 HRC		56 HRC			
	p_p/p_H	p_e/p_H	p_p/p_H	p_e/p_H		
0,8	1,141	1,371	1,171	1,493		
0,9	1,174	1,178	1,194	1,171		
1,0	1,194	0,956	1,215	0,942		
1,1	1,218	0,862	1,238	0,841		
1,2	1,239	0,303	1,261	0,269		
1,3	1,259	—	1,284	—		
1,4	1,280	—	1,305	—		
		stan sprężysto-plastyczny				
h_{max}/h_L	52 HRC		56 HRC			
	p_p/p_H	p_e/p_H	p_p/p_{sr}	p_p/p_H	p_e/p_H	p_p/p_{sr}
0,8	0,971	1,382	1,069	0,989	1,421	1,075
0,9	0,991	1,175	1,084	0,996	1,164	1,078
1,0	0,998	0,998	1,090	1,003	0,977	1,083
1,1	1,008	0,952	1,096	1,012	0,916	1,090
1,2	1,016	0,430	1,102	1,022	0,361	1,095
1,3	1,025	—	1,107	1,031	—	1,103
1,4	1,033	—	1,113	1,040	—	1,109

Słabą stroną korekcji ZB jest wspomniana już koncentracja nacisków w punkcie zmiany profilu. Przy zalecanej wartości strzałki profilu naciski w tym punkcie obliczone dla materiału w stanie sprężysto-plastycznym są o ponad 10% wyższe od nacisków średnich. Odkształcenia plastyczne w strefie zmiany profilu powodują niewielką zmianę kształtu tworzącej wałeczka w jej części prostoliniowej i w efekcie obniżenie nacisków, ale nie prowadzi to do profilu sugerowanej niekiedy korekcji dwuukowej ZBB [1].

Zbadano również możliwość zmniejszenia spiętrzenia nacisków w punkcie przejściowym poprzez zmniejszenie długości prostoliniowej części profilu. W tym celu zbudowano modele o długości części prostoliniowej l_p wynoszącej 0,62, 0,56 i 0,49 l_e (w modelu bazowym iloraz l_p/l_e wynosi 0,69). Rozkłady nacisków pokazano na rysunku 7, a w tabeli 4 podano wartości wskaźników wzrostu nacisków.

Przy niezmiennym wartości strzałki profilu zmniejszenie długości l_e powoduje wzrost promienia łukowej części profilu R i w efekcie zmniejszenie spiętrzenia nacisków w punkcie zmiany krzywizny profilu. Jednak skutkiem takiego postępowania jest zmniejszenie strefy całkowitego odciążenia, przy najmniejszej z analizowanych wartości l_p nie dochodzi do odciążenia krawędzi wałeczka. Odpowiada to orientacyjnie przypadkowi $h_{max}/h_L = 1,2$ w modelu wyjściowym, uzyskuje się wszakże mniejsze spiętrzenie nacisków w punkcie przejścia.



Rys. 7. Rozkłady nacisków wzdłuż tworzącej wałeczka przy twardości bieźni 56 HRC dla różnych długości prostoliniowej części profilu wałeczka
Fig. 7. Selected pressure distributions across roller generator for raceway hardness 56 HRC for different lengths of straight section of roller profile

Tab. 4. Wskaźniki wzrostu nacisków dla $h_{\max} = 1,4 h_L$ przy zmianie długości l_p
Tab. 4. Growth indexes of pressure for $h_{\max} = 1,4 h_L$ at change of length l_p

l_p/l_e	0,69	0,62	0,56	0,49
R [mm]	605	722	797	864
p_p/p_{sr}	1,109	1,090	1,072	1,056
p_e/p_{sr}	—	—	—	0,497

Chcąc uzyskać pełne odciążenie krawędzi należy zwiększyć wartość strzałki profilu, co spowoduje zmniejszenie promienia łukowej części profilu i w konsekwencji pewien wzrost spiętrzenia nacisków w punkcie przejścia. Dla przypadku $l_p/l_e = 0,49$ pełne odciążenie otrzymano przy strzałce profilu o wartości $1,6 h_L$, wskaźnik spiętrzenia nacisków w punkcie zmiany profilu wynosi wtedy $p_p/p_{sr} = 1,063$, dodatkowy przyrost spiętrzenia nacisków jest zatem niewielki. Należy mieć jednak na uwadze, że skrócenie prostoliniowej części profilu pociąga za sobą niewielki wzrost średnich nacisków w tej części wałeczka o ok. 2%.

4. Uwagi końcowe

Model bazowy analizy strefy styku, zastosowany w niniejszym opracowaniu może być z powodzeniem wykorzystany do analizy korekcji wałeczków łożyskowych. Modele szczegółowe poszczególnych przypadków korekcji można względnie łatwo wykonywać

wykorzystując dobrze funkcjonujący mechanizm makroinstrukcji programu ADINA.

Otrzymane wyniki potwierdzają, że aktualnie stosowana w łożyskach wieńcowych korekcja wałeczków jest zbyt mała by zapewnić odciążenie krawędzi wałeczka. W przypadku korzystania z korekcją ZB można zaproponować pewne zalecenia co do wartości strzałki korekcji: od 1,4 strzałki Lundberga przy $l_p/l_e \approx 0,7$ do 1,6 strzałki Lundberga przy $l_p/l_e \approx 0,5$. Przy zmniejszaniu długości prostoliniowej części tworzącej wymagana wartość strzałki profilu rośnie.

Wzrost wartości strzałki profilu pociąga za sobą niekorzystne zjawisko wzrostu nacisków w punkcie przejścia profilu wałeczka z części prostoliniowej w łukową. Jest to ujemna cecha korekcji ZB. Zmniejszenie spiętrzenia nacisków w tym punkcie profilu można uzyskać poprzez skrócenie prostoliniowej części profilu, jednak kosztem niewielkiego wzrostu średniej wartości nacisków. Omawiane zjawisko nie występuje w przypadku zastosowania korekcji logarytmicznej.

5. Literatura

- [1] Krzemiński-Freda H.: Łożyska toczne. PWN, Warszawa 1989.
- [2] Reusner H.: The logarithmic roller profile – the key to superior performance of cylindrical and taper roller bearings. Ball Bearing Journal, (1988) 230: 2–10.
- [3] Kania L.: Analiza obciążenia wewnętrznego łożysk tocznych wieńcowych w aspekcie ich nośności statycznej. Seria monografie, nr 111. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2005.
- [4] Lundberg G.: Elastische Berührung zweier Halbraume. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. 10 (1939), 5: 201–211.
- [5] Krzemiński-Freda H.: Nośność styku korygowanego metodami przybliżonymi w wałeczkowych łożyskach tocznych. Tribologia, 13 (1992), 6: 140–147.
- [6] Eschmann P., Hasbergen L., Weigand K.: Die Wälzlagerpraxis. Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen. Oldenbourg Verlag – Wien, München 1987.
- [7] Kania L.: Wyznaczenie dopuszczalnego obciążenia wałeczków w łożyskach wieńcowych. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, 40 (2007): 135–142.
- [8] Kania L.: Modelling of rollers in slewing bearing calculations with the use of finite elements. Mechanism and Machine Theory, 41 (2006): 11, 1359–1376.
- [9] ADINA. Theory and Modeling Guide. Volume 1: ADINA. ADINA R&D, Inc., Watertown 2006.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do prenumeraty czasopisma PAK w 2008 roku

Cena prenumeraty rocznej: 192,00 zł netto/1 egz.

Prenumeratę i kolportaż prowadzą:

WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
ul. Świątokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa, tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b, tel./fax: 032 237 19 45,
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl, www.pak.info.pl