

## DOLOČITEV MALOCIKLIČNE NOSILNOSTI KOTALNEGA STIKA

### DETERMINATION OF LOW CYCLE CARRYING CAPACITY OF ROLLING CONTACT

**Robert Kunc<sup>1</sup>, Ivan Prebil<sup>1</sup>, Matjaž Torkar<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, SI-1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, SI-1000 Ljubljana

*Prejem rokopisa – received: 1998-11-10; sprejem za objavo – accepted for publications: 1998-12-03*

Nosilnost velikih aksialnih ležajev s površinsko utrjeno tečino je navadno določena z največjo dopustno stično silo na najbolj obremenjenem kotalnem elementu. Kriterij za dopustno plastično deformacijo tečine in dopustno podpovršinsko napetost na meji kaljene plasti dajeta za dovoljeno nosilnost kotalnega stika zelo različne vrednosti. Pri modelih ležajnih tečin smo določili za jekli C45 in 42CrMo4 ciklične krivulje (sila-raztezek), mejo, pri kateri začne naraščati gradient deformacije (elastično-plastična) in velikost stične površine. Kontrola podpovršinskih napetosti je bila izvedena z uporabo identičnega modela MKE istočasno z eksperimentom. Pri vrednotenju je bila upoštevana nelinearnost materiala.

Ključne besede: aksialni ležaj velikih dimenzij, kotalni stik, utrjena tečina, nosilnost

The carrying capacity of large axial bearings with surface hardened raceway is usually given with the maximal permissible force on the rolling element with the highest load. The established criteria of the maximal permissible plastic deformation of the raceway, and the maximal allowed subsurface stress on the hardened layer boundary give widely varying values for the carrying capacity of the rolling contact. On the models of bearing raceways from 42CrMo4 and C45 steels we have determined the cyclic curves (force – deformation), the limit of fast increase in (elastic and plastic) deformation gradient, and the size of the contact surface. The sub surface stresses were simultaneously checked using a FEM model and considering the material nonlinearities.

Key words: large axial rolling bearings, rolling contact, hardened raceway, carrying capacity

## 1 UVOD

Za določitev nosilnosti aksialnega ležaja velikih dimenzij je potrebno poznati realno porazdelitev obremenitve na kotalnih elementih ležaja<sup>1,2</sup>, saj je dejanska nosilnost določena z največjo dopustno stično silo na najbolj obremenjenem kotalnem elementu.

Poškodbe, ki se pojavijo pri velikih počasi tekočih ležajih, so v glavnem odvisne od velikosti statične obremenitve in utrujanja materiala<sup>3,4</sup>. Zaradi prevelikih obremenitev nastanejo plastične deformacije teles v stiku (kotalni element in tečina), ki več ne omogočajo enakomernega gibanja vrtljive zveze.

Za oceno zagotavljanja normalnega delovanja počasi tekoče vrtljive zveze v času predpisane uporabnosti se za določanje statične nosilnosti aksialnega ležaja velikih dimenzij uporabljata merila dopustne trajne deformacije<sup>5,6,7</sup> in dopustne strižne napetosti na meji kaljene plasti<sup>8</sup>. Vendar pogoji za uporabo merila dopustne trajne deformacije in merila dopustne podpovršinske napetosti v primeru kotalnih ležajev velikih dimenzij niso izpolnjeni v celoti zaradi same tehnologije izdelave<sup>9</sup>.

## 2 DOLOČANJE NOSILNOSTI KONTAKTA

Zaradi neustreznosti do sedaj uporabljenih meril želimo eksperimentalno in na osnovi modela določiti kritično kontaktno silo. Pri tem moramo:

- raziskati malociklične lastnosti materiala C45 in 42CrMo4 pri različnih toplotnih obdelavah

- eksperimentalno določiti nosilnost stika ter
- izračunati podpovršinske napetosti na meji kaljene plasti z uporabo modela MKE.

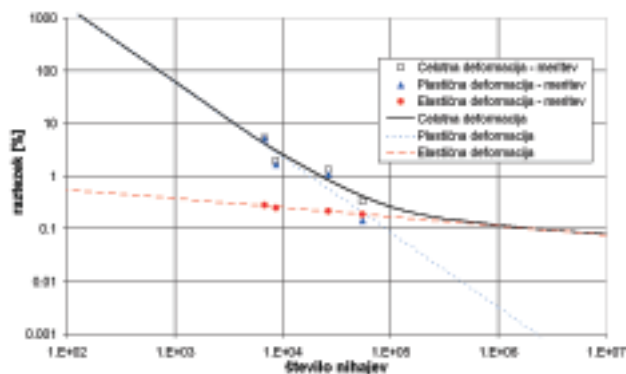
### 2.1 Določanje malocikličnih lastnosti materiala

Za določanje realne nosilnosti stika (eksperimentalno in numerično) je treba poznati malociklično lastnost materiala na prerezu induktivno kaljene tečine. Poznati moramo Wöhlerjevo in  $\sigma$ - $\epsilon$  krivuljo. Določanje malocikličnih lastnosti materiala smo izvedli s kontrolo obremenitve. Obremenjevali smo sinusno med konstantno maksimalno in minimalno obremenitvijo s frekvenco 5Hz, kar je realni obremenitveni kolektiv kotalnega stika. Spremljali smo spremembo deformacije. Pri tem smo dobili malociklične koeficiente za lastnosti materiala, ki dosegajo za normalizirano jeklo C45 naslednje vrednosti:

- $b = -0,147$  naklon elastičnega raztezka
- $c = -1,223$  naklon plastičnega raztezka
- $n' = 0,121$  eksponent utrjevanja in
- $K' = 941,4$  koeficient utrjevanja [ $N/mm^2$ ].

Na osnovi malocikličnih koeficientov lahko z enačbo (1) izračunamo odvisnost skupnega raztezka od števila nihajev -  $\epsilon_{a,t} = f(N)$ , torej Wöhlerjevo krivuljo (**slika 1**), in z enačbo (2) odvisnost skupnega raztezka od napetosti -  $\epsilon_{a,t} = f(\sigma)$ , torej  $\sigma$ - $\epsilon$  krivuljo (**slika 2**)<sup>10</sup>:

$$\epsilon_{a,t} = (\sigma_f/E)N^b + \epsilon_f N^c = \epsilon_{a,el} + \epsilon_{a,pl} \quad (1)$$



Slika 1: Wöhlerjeva krivulja za normalizirano jeklo C45  
Figure 1: Wöhler curve for the normalized steel C45

$$\epsilon_{a,t} = (\sigma_a / E) + (\sigma_a / K')^{1/n'} \quad (2)$$

$\epsilon_{a,el}$  – elastična amplituda raztezka

$\epsilon_{a,pl}$  – plastična amplituda raztezka

$\sigma_a$  – amplituda napetosti

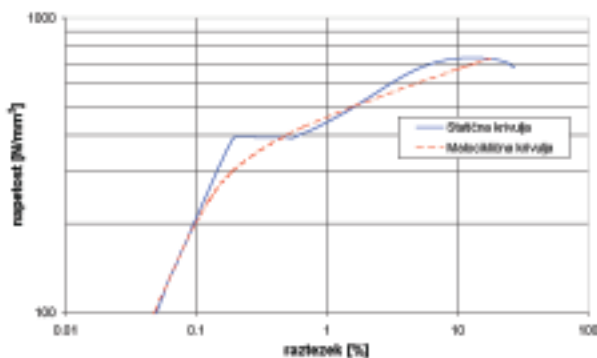
E – elastični modul

N – število nihajev

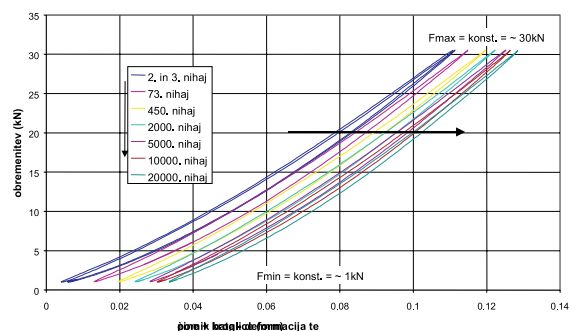
### 2.2 Eksperimentalno določanje nosilnosti stika

Spremljali smo velikost in hitrost rasti deformacije kotalnega stika v odvisnosti od obremenitve in utrujanja – števila nihajev<sup>9,11</sup>. Pri manjših obremenitvah se je skupna stična deformacija po razbremenitvi v celoti povrnila v začetno stanje. Preseganje elastične meje materiala se je kazalo z večanjem plastične deformacije stika, kar pomeni kritično obremenitev  $Q_{kr}$ . V območju utrjevanja materiala je bila plastična deformacija bolj ali manj konstantna, nato pa se je začela progresivno večati, kar je dejansko maksimalna obremenitev kotalnega stika  $Q_{max}$ .

Pri konstantni amplitudni sili v odvisnosti od števila nihajev je bilo opaziti večanje plastične deformacije - potovanje histereze - ter zaradi povečevanja stične površine in utrjevanja materiala zmanjševanje prirastka plastične deformacije (slika 3). Kritično ( $Q_{kr}$ ) in



Slika 2: Malociklična  $\sigma - \epsilon$  krivulja za normalizirano jeklo C 45  
Figure 2: Low cycle  $\sigma - \epsilon$  curve for the normalized steel C45



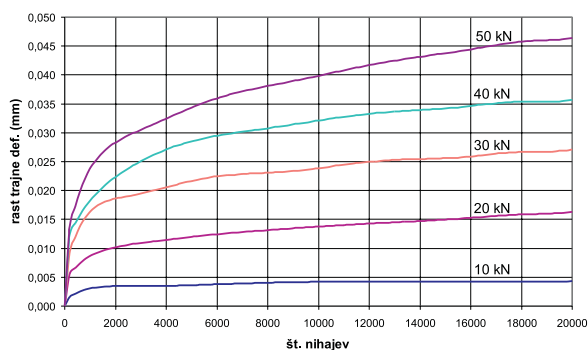
Slika 3: Diagram obremenjevanja (rast deformacije) za  $F_{MAX} = 30kN$   
Figure 3: Load graph (increase of deformation) for  $F_{MAX} = 30kN$

maksimalno obremenitev ( $Q_{max}$ ) kotalnega stika smo določili iz prirastka trajne deformacije v odvisnosti od obremenitve in števila nihajev (slika 4). Predvsem nas je zanimalo, pri kateri obremenitvi je prirastek trajne deformacije še zanemarljiv.

Napetosti, ki se pojavijo pri nekoliko večjih trajnih deformacijah, ne vplivajo na samo nosilnost kotalnega ležaja, pač pa na dobo uporabnosti pri ponavljajočem obremenjevanju. V določeni globini pod kaljeno površino ( $z = \check{c} 0.7$ krajša polos stične elipse) lahko nastanejo napetosti, ki presegajo mejo plastičnosti materiala in na tem mestu povzročijo lokalno plastično deformacijo. Po razbremenitvi se pojavijo zaostale napetosti, ki pri naslednjem obremenitvenem ciklu delujejo proti napetostim zaradi zunanje aktivne obremenitve stika. Če so te napetosti manjše od zaostalih, se področje plastičnega tečenja v tem ciklu zmanjša, v nasprotnem primeru pa napreduje do vidne poškodbe, v končni fazi do porušitve.

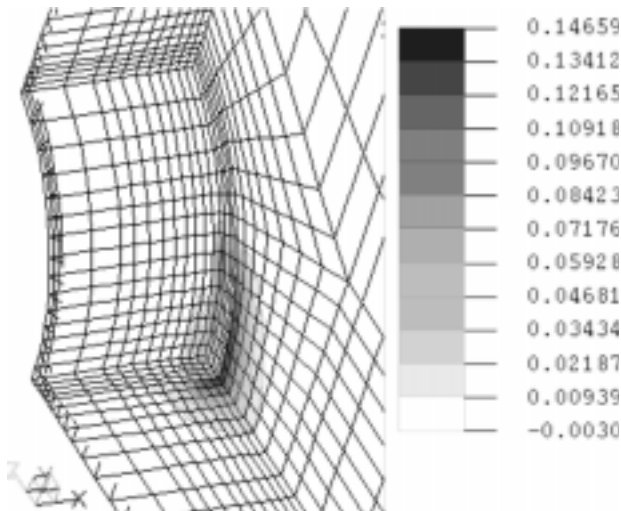
### 2.3 Preverjanje strižnih napetosti

Težava nastane pri merjenju napetosti na meji kaljene plasti in pri določevanju nastanka poškodbe pod površino. To pomanjkljivost nadomestimo z numeričnim modelom (MKE) kotalnega stika, s katerim se istočasno

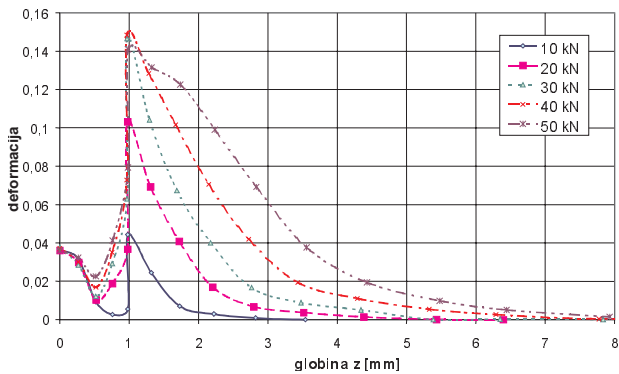


Slika 4: Diagram rasti trajne deformacije stika v odvisnosti od števila obremenitev

Figure 4: Increase of permanent deformation in the contact as a function of load cycles



Slika 5: Model – plastični raztezki (30 kN)  
Figure 5: Model – plastic strain (30 kN)



Slika 6: Plastični raztezki  
Figure 6: Plastic strain

določa velikost deformacije teles v stiku in napetosti po globini kaljene plasti tečine.

Na **sliki 5** je prikazan numerični model s plastičnimi raztezki obremenitvenega primera ( $F_{\max} = 30$  kN). Napetosti in s tem raztezki v znatnem območju stika pod kaljeno površino presežejo mejo plastičnosti  $R_{p0.2}$  (**slika 6**). Zaradi tega se predvideva, da bo poškodba nastala na

meji kaljene plasti in se bo širila proti površini. Take poškodbe so značilne za ležaje s površinsko kaljenimi tečinami, ki imajo premehko jedro oziroma pretanko kaljeno plast.

### 3 SKLEP

Podana metodologija dela in dobljeni rezultati so del obsežnejših meritev, ki jih dopolnjujemo z analitičnim preračunom podpovršinskih napetosti (MKE).

Določanje nosilnosti kotalnega stika je osnova pri ugotavljanju dejanske nosilnosti in dobe uporabnosti aksialnih kotalnih ležajev velikih dimenzij z majhno vrtilno hitrostjo.

V nadaljnjem delu bo treba pri poizkusih in preračunu podpovršinskih napetosti upoštevati še vpliv nakotaljevanja, pri preračunu podpovršinskih napetosti pa kroglico obravnavati kot deformabilno telo.

### 4 LITERATURA

- <sup>1</sup> Brändlein, J.: Lastübertragung durch Großwälzlager bei elastischen Ringträgern als Unter und Oberkonstruktion, *Fordern und Heben*, 30 (1980)
- <sup>2</sup> Prebil, I.; Zupan, S.; Lučič, P.: Lastverteilung auf Wälzkörper von Drehverbindungen, *Konstruktion*, 47 (1995) 11
- <sup>3</sup> Eschman, P.; Hasbargen, L.; Weigand, K.: Ball and Roller Bearings, John Wiley & Sons Inc., New York, 1985
- <sup>4</sup> Harris, T. A.: Rolling Bearing Analysis - 3rd edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991
- <sup>5</sup> Palmgren, A.: Ball and Rolling Bearing Engineering, 3rd Edition, Burbank, Philadelphia, 1959
- <sup>6</sup> ISO 76, Rolling bearings - Static load ratings, 1987
- <sup>7</sup> Yhland, E.: Static load carrying capacity, *Ball Bearing Journal*, 211 (1982)
- <sup>8</sup> Pallini, R. A.; Sague, J. E.: Computing Core-Yield Limits for Case-Hardened Rolling Bearings, *ASLE Trans.*, 28 (1985) 1, 91-96
- <sup>9</sup> Kunc, R., Prebil, I., Torkar, M., Malociklična nosilnost pri ležajih z utrjeno kotalno površino = Low cycle carrying capacity of bearings with hardened rolling layer. *Kovine zlit. tehnol.*, 32 (1998) 3-4, 181-184. [COBISS-ID 51114]
- <sup>10</sup> Reik, W.: Zum Wechselverformungsverhalten des Edelmetalles Ck45 im Normalisierten Zustand, *Dissertation*, 1978
- <sup>11</sup> Kunc, R., Zupan, S., Prebil, I., Merilni sistem za določanje malociklične nosilnosti kotalnega stika. V: *Enodnevna tehnična konferenca o virtualni instrumentaciji*, Ljubljana, 23.10.1997. *NIDays-Europe 97: virtual technologies: a world without barriers*. Ljubljana, 1997, str. IX-1 - IX-5. [COBISS-ID 2395675]