

# MALOCIKLI^NA NOSILNOST PRI LE@AJIH Z UTRJENO KOTALNO POVR[INO

## LOW CYCLE CARRYING CAPACITY OF BEARINGS WITH HARDENED ROLLING LAYER

**ROBERT KUNC<sup>1</sup>, I. PREBIL<sup>1</sup>, M. TORKAR<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, A{ker-eva 6, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>In{titut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Lubljana

*Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19*

V prispevku je obravnavan problem dejanske nosilnosti kotalnega stika pri velikih aksialnih le'ajih s povr{insko utrjeno te-ino. Nosilnost takih le'ajev je navadno dolo-ena z najve-jo dopustno sti-no silo na najbolj obremenjenem kotalnem elementu. Znani merili za dopustno plasti-no deformacijo te-ine in dopustno podpovr{insko napetost na meji kaljene plasti podajata zelo razli-ne vrednosti za dovoljeno nosilnost kotalnega stika. Z namenom, da ugotovimo dejansko nosilnost kotalnega stika pri aksialnih le'ajih z majhno vrtilno hitrostjo, -e je upo{tevana lastnost osnovnega materiala, trdota in debelina kaljene plasti ter geometrija kotalnega stika, smo izvedli meritve na modelih le'ajnih te-in iz materiala 42CrMo4 in C45. Obremenjevanje stika je bilo stati-no in malocikli-no. Ugotovljene so bile ciklične krivulje (sila-raztezek), meja, pri kateri za-ne nara{ati gradient deformacije (elasti-no-plasti-na), in velikost sti-ne povr{ine. Kontrolno podpovr{inskih napetosti smo opravili isto-asno z eksperimentom na identi-nem modelu MKE, ki upo{teva nelinearnost materiala. Na osnovi rezultatov meritev in izra-una modela MKE 'elimo izpeljati poenostavljeno matemati-no zvezo, ki ob upo{tevanju lastnosti utrjenega in osnovnega materiala ter geometrijskega modela kotalnega stika poda dopustno sti-no silo.

Klju-ne besede: te-ina, kotalni stik, nosilnost, le'aj

The paper deals with the problem of the actual carrying capacity of a rolling contact in large axial bearings with surface hardened raceway. The carrying capacity of such bearings is usually given with the maximal permissible force on the rolling element with the highest load. The established criteria of 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. In order to determine the actual carrying capacity of the rolling contact in axial bearings with low speed of rotation, considering base material properties, hardness and thickness of the hardened layer, and the geometry of the contact, we have measured the models of bearing raceways made of 42CrMo4 and C45 materials. The loads were static and low cycle dynamic. We have determined the cyclic curves (force - deformation), limit of fast increase in (elastic and plastic) deformation gradient, and the size of the contact surface. Simultaneously with the experiment, we have checked the sub surface stresses using a FEM model, considering the material nonlinearities. On the basis of the measurement results and the FEM model we would like to set up a simplified mathematical relation that gives the permissible contact force considering the base and hardened material properties, and the geometric model of the rolling contact.

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

## 1 PREDSTAVITEV

Dejanska nosilnost aksialnega le'aja velikih dimenzij je dolo-ena z najve-jo dopustno sti-no silo na najbolj obremenjenem kotalnem elementu. Na{ namen je dolo-iti dejansko nosilnost stika kotalnega elementa in te-ine z realnimi geometrijskimi lastnostmi ( $d$  - premer kotalnega elementa,  $S$  - razmerje velikosti kotalnega elementa in te-ine,  $k$  - razmerje velikosti polosi sti-ne elipse), materialnimi lastnostmi ( $d$  - premer kotalnega elementa,  $S$  - razmerje velikosti kotalnega elementa in te-ine,  $k$  - razmerje velikosti polosi sti-ne elipse) in obremenitvami ( $Q_{\max}$  velikost obremenitve in  $N$  - {tevilo nihajev).

Osnovna teorija stika dveh teles v dotiku je bila postavljena 'e leta 1882<sup>1</sup>. Na osnovi Hertzove teorije, ki je omejena na idealno elasti-ni telesi in dotik brez trenja, so bili z razvojem mehanike za potrebe hitro razvijajo-e se industrije in transporta postavljeni {tevilni uporabni modeli<sup>2,3,4</sup>.

Modeli za izra-un porazdelitve obremenitve po kotalnih elementih pri enakomerno pritrjenih obro-ih le'a-

ja<sup>5,6,7</sup>, ki temeljijo na predpostavki togih zgornjih in spodnjih konstrukcij, ka'ejo na porazdelitev sile po kotalnih elementih po obodu le'aja v obliki kosinune funkcije. Ta predpostavka se je pri aksialnih le'ajih velikih dimenzij pokazala za preve~ poenostavljeno<sup>8,9</sup>, saj realna porazdelitev obremenitve zaradi elasti-nosti konstrukcij lahko bistveno odstopa od idealne (kosinusna funkcija) tako po njeni obliki kot tudi po velikosti sti-nih sil.

## 2 UGOTOVITEV NOSILNOSTI KOTALNEGA STIKA

Po{kodbe, ki se pojavijo pri velikih, po~asi teko~ih le'ajih, so v glavnem odvisne od velikosti stati-ne obremenitve in utrujanja materiala<sup>5,6</sup>. Zaradi prevelikih stati-nih obremenitev v mirovanju nastopijo plasti-ne deformacije teles v stiku (kotalnega elementa in te-ine), ki ne omogo~ajo ve~ enakomernega gibanja vrtiljive zveze.

Da bi zagotovili normalno delovanje po~asi teko~e vrtiljive zveze v ~asu predpisane 'ivljenjske dobe, sta se

za dolo~itev stati~ne nosilnosti aksialnega le^aja velikih dimenzij uveljavila merila:

- dopustne trajne deformacije<sup>10,11,12</sup> in
- dopustne stri~ne napetosti na meji kaljene plasti<sup>13</sup>.

Vendar pogoji za uporabo merila dopustne trajne deformacije in dopustne podpovršinske napetosti pri kotalnih le^ajih velikih dimenzij zaradi same tehnologije izdelave niso izpolnjeni v celoti. Merilo dopustne trajne deformacije predpostavlja prekaljen prerez jeklenega le^ajnega obro~a z izredno visoko površinsko trdoto - nad 63 HRC. Glavna pomanjkljivost merila dopustne stri~ne napetosti na meji površinsko utrjene plasti je v omejitvi izra~una podpovršinskih napetosti po Hertzu, to je v elasti~nem obmo~ju materiala in s tem neupoštevanjem plasti~nega utrjevanja materiala.

Tehnologija izdelave le^ajnih obro~ev zahteva uporabo jekel v mehkem stanju, ki se dobro mehansko obdelujejo (podevtektoidna jekla za poboljšanje: C45, 42 CrMo4 - ISO 683/1). Ve~jo površinsko nosilnost te~ine dose~emo z ustrezno toplotno obdelavo, to je s površinskim kaljenjem te~ine. Poškodbe, ki so posledica prevelikih podpovršinskih napetosti pri katerih se pojavijo razpoke v osnovnem materialu pod kaljeno površino in rastejo proti površini, so značilne za le^aje s površinsko kaljenimi te~inami, ki imajo premehkno jedro oziroma pretanko kaljeno plast.

Napetosti, ki se pojavijo pri nekoliko ve~jih trajnih deformacijah, ne vplivajo na samo nosilnost kotalnega le^aja, pa~ pa na ~ivljensko dobo pri ponavljajo~em obremenjevanju. V dolo~eni globini pod kaljeno površino ( $z = P \cdot 0,7 \cdot \sqrt{\text{krajša polos sti~ne elipse}}$ ) lahko nastopijo napetosti, ki presegajo mejo plasti~nosti materiala in na tem mestu povzro~ijo lokalno plasti~no deformacijo. Po razbremenitvi se pojavijo zaostale napetosti, ki pri naslednjem obremenitvenem ciklu delujejo proti napetostim zaradi zunanje aktivne obremenitve stika. ^e

so te napetosti manjše od zaostalih, se podro~je plasti~nega te~enja v tem ciklu zmanjša, v nasprotnem primeru pa napreduje do vidne poškodbe, v kon~ni fazi do poru~itve. Samo ciklično obremenjevanje, ki nastane pri normalnem vrtenju vrtljive zveze, in napetosti, ki pri tem nastajajo pod površino stika, imenujemo ciklično utrujanje. Mejo, pri kateri pride do plasti~nega utrjevanja, imenujemo mejo utrujanja materiala<sup>14,15</sup>. Ugotovitev te meje je zelo zahtevno delo. Odvisna je od lastnosti materiala, geometrije obeh teles v stiku ter porazdelitve napetosti na površini stika in pod njo.

### 3 SMERNICE ZA DOLO^ITEV NOSILNOSTI KONTAKTA

Ker na~teta merila ne ustrezajo popolnoma, ~elimos dobiti izkustveni izraz za kritično kontaktno silo na osnovi naslednjih korakov (postopkov):

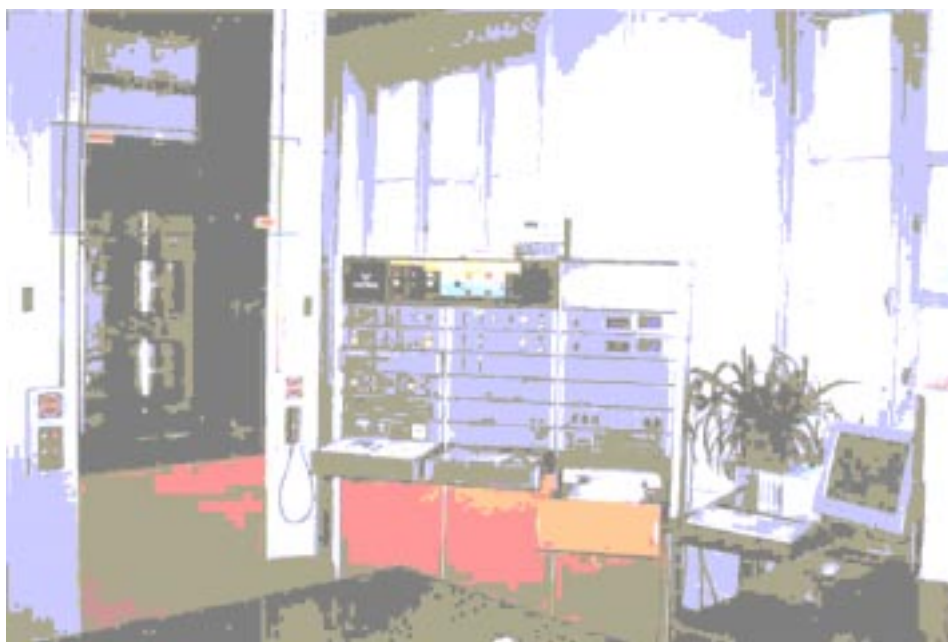
- eksperimentalna dolo~itev nosilnosti stika
- izra~un podpovršinskih napetosti z modelom MKE.

#### 3.1 Eksperimentalna dolo~itev nosilnosti stika

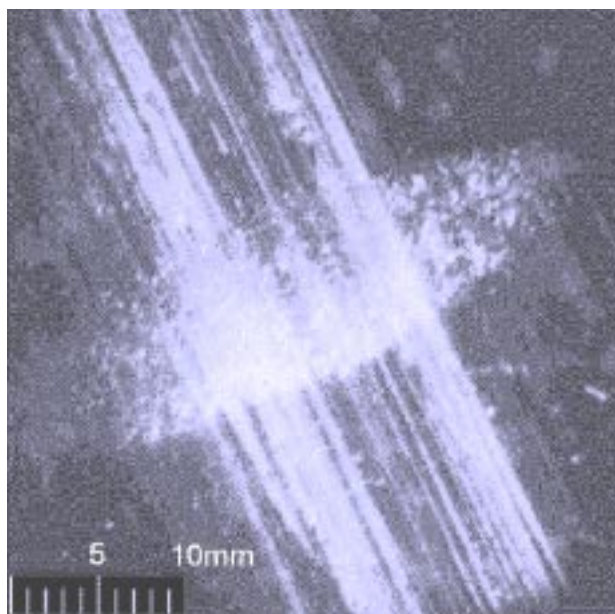
Merilni sistem:

- INSTRON (Load Cell : Labow 500 kN, ekstenziometer Instron 12,5 mm); (**slika 1**)
- zajemanje in obdelava podatkov iz INSTRON-a z moduli SCXI ter I/O kartico National Instruments in programsko opremo LabVIEW

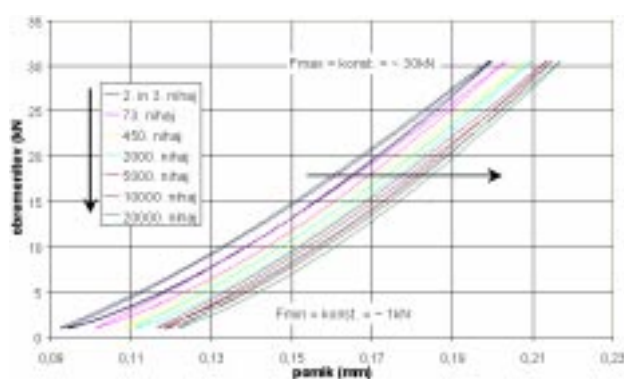
Spremljali smo velikost in hitrost rasti deformacije ter sti~ne površine v odvisnosti od obremenitve in utrujanja - {tevila nihajev (malociklično -  $N \leq 5 \cdot 10^4$ ). Pri manjših obremenitvah se skupna sti~na deformacija po razbremenitvi v celoti povrne v za~etno stanje. Preseganje elasti~ne meje materiala se ka~e z ve~anjem plasti~ne deformacije stika, kar je kritična obremenitev



**Slika 1:** Merilni sistem  
**Figure 1:** Measurement system

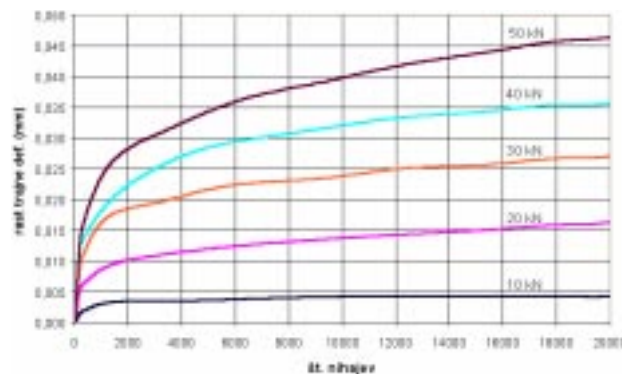


**Slika 2:** Velikost sti-ne povr{ine  
**Figure 2:** Contact surface size



**Slika 3:** Diagram obremenjevanja (rast deformacije)  
**Figure 3:** Load graph (increase of deformation)

$Q_{kr}$ . V obmo-ju utrjevanja materiala je plasti-na deformacija bolj ali manj konstantna, nato pa se za-ne na meji maksimalna sila  $Q_{max}$  progresivno ve-at.



**Slika 4:** Diagram rasti trajne deformacije stika v odvisnosti od {tevila obremenitev

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

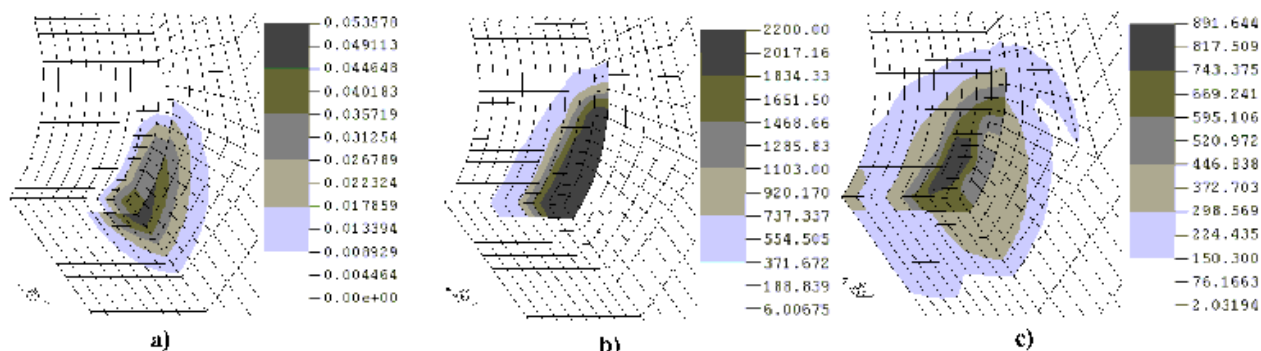
Pri konstantni amplitudni sili v odvisnosti od {tevila nihajev je opaziti ve-anje plasti-ne deformacije - potovanje histereze - in zaradi pove-evanja sti-ne povr{ine in utrjevanja materiala zmanj{evanje prirastka plasti-ne deformacije (**slika 5**). Kriti-no in maksimalno obremenitev kotalnega stika ugotovimo iz prirastka trajne deformacije v odvisnosti od obremenitve in {tevila nihajev (**slika 6**). Predvsem nas zanima, pri kateri obremenitvi je prirastek trajne deformacije {e zanemarljiv.

Velikost sti-ne povr{ine je bila ugotovljena po kon-ni razbremenitvi. Pri tem smo uporabili metodo z indikatorskim sredstvom, ki vsebuje trde delce mikrometrskih velikosti<sup>16</sup> (**slika 2**).

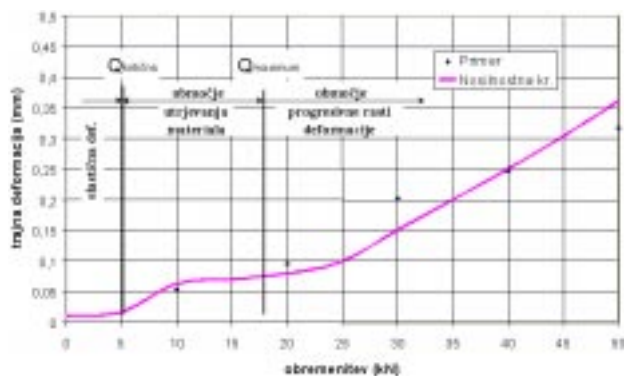
### 3.2 Preverjanje stri'nih napetosti

Te'ava nastane pri merjenju napetosti na meji kaljene plasti in pri dolo-evanju nastanka po{kodbe pod povr{ino. To pomanjkljivost nadomestimo z numeri-nim modelom kotalnega stika (MKE), s katerim smo isto-asno dolo-ali velikost deformacije teles v stiku in napetosti po globini kaljene plasti te-ine.

Na **sliki 5a** je prikazan obremenitveni cikel ( $F_{max} = 50$  kN,  $F_{min} = 1$  kN,  $f = 5$  Hz), kjer napetosti v znatnem obmo-ju stika prese'ejo mejo plasti-nosti  $\sigma_{0.2}$ . Zaradi tega predvidevamo, da bo po{kodba nastala na meji



**Slika 5:** Primerjalne (Von Mises) napetosti (N/mm<sup>2</sup>) in raztezki  
**Figure 5:** Equivalent (Mises) stress (N/mm<sup>2</sup>) and plastic strain



Slika 6: Nosilnostna krivulja

Figure 6: Carrying capacity curve

kaljene plasti in se bo {irila proti povr{ini (po{kodba nastane zaradi pretanke kaljene plasti). Na **sliki 5c** so prikazane primerjalne napetosti po razbremenitvi (1 kN). Na robu plastificiranega podro-ja, tj. na robu kontaktne povr{ine, pride do koncentracije napetosti zaradi trajne deformacije te-ine.

#### 4 SKLEP

@elimo zapisati izkustveno ena~bo za maksimalno obremenitev cikla, ki bo vsebovala vse materialne in geometrijske lastnosti teles v stiku, s katerimi bi ugotovili dovoljeno obremenitev kontakta (**slika 6**).

Podana metodologija dela in dobljeni rezultati so del obse'nej{ih meritev, ki bo po na{i oceni potrdil na-in dolo~evanja nosilnosti kontakta z eksperimentalno ugotovljenimi ena~bami, ki jih dopoljujemo z analiti~nim prera~unom podpov{inskih napetosti (MKE).

Dolo~itev nosilnosti kontakta je samo podsklop pri ugotavljanju dejanske nosilnosti in 'ivljenjske dobe ak-

sialnih kotalnih le'ajev velikih dimenzij z majhno vrtilno hitrostjo.

#### 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper, *J. für die reine und angewandte Mathematik*, Leipzig (1881) 156-171
- <sup>2</sup> Thomas, H. R., Hoersch, V. A.: Stresses due to the Pressure of one elastic Solid upon Another, University of Illinois, Bull. 212, 1930
- <sup>3</sup> Lundberg, G., Sjövall, H.: Stresses and Deformation in Elastic Contacts, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1958
- <sup>4</sup> Gupta, P. K., Walowit, J. A., Finkin, E. F.: Strees Distributions in Plain Strain Layered Elastic Solids Subjected to Arbitrary Boundary Loading, *Trans. of ASME, J. of Lubrication Technology*, October (1973) 427-433
- <sup>5</sup> Eschman, P., Hasbargen, L., Weigand, K.: Ball and Roller Bearings, John Wiley & Sons Inc., New York, 1985
- <sup>6</sup> Harris, T. A.: Rolling Bearing Analysis - 3rd edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991
- <sup>7</sup> Mathias, K.: Berechnung der Wälzkörperkräfte in Grosswälzlageren, *Fordern und Heben*, 29 (1979)
- <sup>8</sup> Brändlein, J.: Lastübertragung durch Grosswälzlager bei elastischen Ringträgern als Unter und Oberkonstruktion, *Fordern und Heben*, 30 (1980)
- <sup>9</sup> Prebil, I., Zupan, S., Lu-i-, P.: Lastverteilung auf Wälzkörper von Drehverbindungen, *Konstruktion*, 47 (1995) 11
- <sup>10</sup> Palmgren, A.: Ball and Rolling Bearing Engineering, 3rd Edition, Burbank, Philadelphia, 1959
- <sup>11</sup> ISO 76, Rolling bearings - Static load ratings, 1987
- <sup>12</sup> Yhland, E.: Static load carrying capacity, *Ball Bearing Journal*, 211 (1982)
- <sup>13</sup> Pallini, R. A., Sague, J. E.: Computing Core-Yeild Limits for Case-Hardened Rolling Bearings, *ASLE Trans.*, 28 (1985) 1, 91-96
- <sup>14</sup> Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1986
- <sup>15</sup> Ioannides, E., Jacobson, B., Tripp, J. H.: Prediction of Rolling Bearing Life under Practical Operating Conditions, Tribological Design of Machine Elements, Tribology Series 14, Elsevier Science Publisher B.V., 1989
- <sup>16</sup> Grabec, I., Prebil, I.: Postopek ugotavljanja naleganja sti-nih povr{in, *Patent {t. 9200323*, Ljubljana, 1994