

MATERIALI IN NOSILNOST VELIKIH KOTALNIH LEŽAJEV

MATERIALS AND CARRYING CAPACITY OF LARGE ROLLING BEARINGS

Robert Kunc¹, Ivan Prebil¹, Matjaž Torkar²

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Institut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1999-11-12; sprejem za objavo - accepted for publication: 1999-12-20

Za določitev nosilnosti kotalnega stika velikih aksialnih ležajev z majhno vrtilno hitrostjo so bile izvedene meritve na modelih ležajnih tečin, izdelanih iz materiala 42CrMo4 in C45 (ISO 683/1). Upoštevana je bila lastnost osnovnega materiala ležajnega obroča, trdota in globina kaljene plasti tečine ter geometrija stika. Obremenjevanje stika je bilo malociklično. Določene so bile malociklične krivulje ter meja in gradient rasti deformacije stika. Istočasno z eksperimentom je bilo numerično, z metodo končnih elementov preverjen potek podpovršinskih napetosti. Upoštevane so bile eksperimentalno določene malociklične materialne lastnosti ležajnih obročev.

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

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, have been measured on the models of bearing raceways made of 42CrMo4 and C45 materials (ISO 683/1). The loads were low cycle dynamic. The low cyclic curves and limit of fast increase in deformation gradient have been determined. Simultaneously with the experiment, were checked the sub surface stresses using a FEM model, considering the low cycle material nonlinearities, determined by the experiment.

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

1 UVOD

Počasi tekoči kotalni ležaji velikih dimenzij se od manjših ne razlikujejo le po svoji velikosti in hitrosti vrtenja med obratovanjem, temveč tudi po geometrijski obliki in vrsti materiala^{1,2}. Velikost in oblika ležajnih obročev, ki je dopolnjena še z ozobjem za pogon in izvrtinami za pritrdiritev na konstrukcijo, zahtevata material, ki ga je mogoče kriviti, zavariti in mehansko obdelati. Uporablajo se jekla za poboljšanje (42CrMo4 in C45 - ISO 683/1). Zaradi zahtevane površinske trdote, ki preprečuje vtiskanje kotalnih elementov v tečino, je le-ta površinsko zakaljena. Dovolj trda in debela površinsko kaljena plast na tečini in boku zoba daje odpornost proti obrabi, vtiskanju in utrujanju. Pri tem ostane jedro obroča mehko.

Standardizirano merilo, ki se uporablja za določevanje nosilnosti kotalnega stika, je dopustna trajna deformacija^{3,4}, ki določa največjo dovoljeno trajno deformacijo ležajne tečine δ_{dop} :

$$\delta_{dop} \leq 0,01\% \quad (1)$$

Vendar analiza poškodb, ki se pojavljajo pri površinsko kaljenih kotalnih ležajih, kaže na nujnost drugačnega pristopa pri določevanju njihove nosilnosti. Tako vtiskanje tanke kaljene plasti pod kotalnimi elementi v mehek osnovni material, ki se pojavlja predvsem pri zelo visokih statičnih obremenitvah, kot tudi pojav razpok in odstopanje kaljene plasti zaradi še

vedno sorazmerno visokih stičnih obremenitev pri počasnem teku, sta posledica premajhne podpore jedra oziroma prevelike podpovršinske strižne napetosti. Le-ta preseže mejo plastičnosti jedra in se v začetni fazni kaže v poševnih podpovršinskih deformacijskih črtah v smeri glavnih strižnih napetosti⁵.

Priporočilo, ki temelji na zahtevi po ustrezni debelini in trdoti kaljene površinske plasti, pravi, da se poškodbe ne bodo pojavile, če primerjalna podpovršinska napetost po hipotezi največjih strižnih napetosti na meji plasti in jedra ne bo presegla napetosti tečenja jedra⁵. Meja kaljene plasti je določena z razdaljo od površine, na kateri trdota kaljene plasti pada pod 50 HRC. Napetost tečenja jedra pa se določa na globini trikratne debeline kaljene plasti pod površino ali na geometrijskem središču ležajnega obroča.

Porazdelitev normirane primerjalne napetosti po hipotezi največjih strižnih napetosti S_s pod površino mora biti takšna, da je njen maksimum v območju kaljene plasti, sama vrednost napetosti na določeni meji kaljene plasti pa manjša ali enaka napetosti tečenja jedra (2). Določi se z razmerjem primerjalne napetosti po hipotezi največjih strižnih napetosti σ_s in največjo normalno napetostjo na stični površini p_0 oziroma je enaka maksimalni razliki normiranih napetosti S_1 in S_3 .

$$S_s = \frac{\sigma_s}{p_0} = |S_1 - S_3|; S_s (\text{pri trdoti } 50 \text{ HRc}) \leq \frac{Rp_{0,2 \text{ jedra}}}{p_0} \quad (2)$$

Neustreznost merila dopustne strižne napetosti na meji kaljene plasti je v preračunavanju pod površinske napetosti samo v elastičnem območju materiala in s tem neupoštevanje plastičnega utrjevanja.

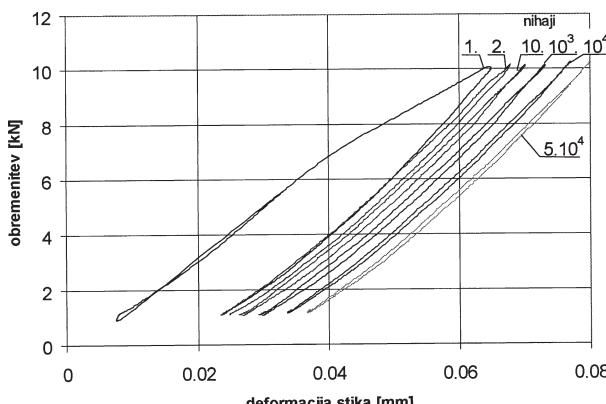
2 EKSPERIMENTALNO PREVERJANJE MALOCIKLIČNE NOSILNOSTI KOTALNEGA STIKA

Preizkušanci ležajnih tečin so bili izdelani iz jekel 42CrMo4 in C45. Jekli sta normalizirani ali poboljšani. Katalna površina - tečina pa je indukcijsko kaljena. Določena je bila malociklična nosilnost oziroma odpornost proti vtiskovanju katalnega elementa v površinsko utrjeno tečino.

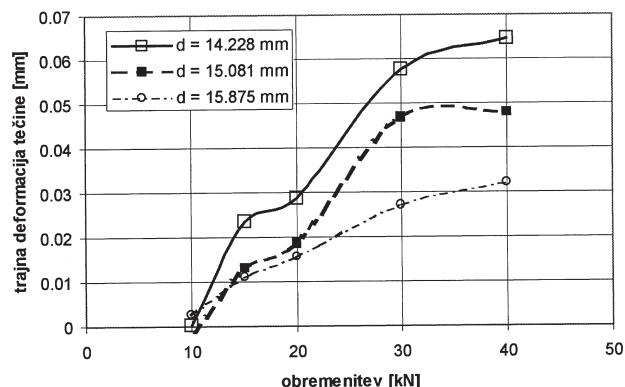
Meritev deformacije stika je potekala v malocikličnem področju (do $5 \cdot 10^4$ nihajev) z obremenitvenim kolektivom kontrole sile (maksimum in minimum amplitudo obremenitve sta konstantna; frekvenca sinusnih nihajev je 5 Hz). Rezultati so prikazani za preizkušanec iz poboljšanega jekla 42CrMo4; radij tečine $r_t = 8,13$ mm in premer katalnega elementa $d = 14,228$ mm⁶.

Raziskava je pokazala, da se pretežni del deformacije stika zgodi v prvih desetih nihajih. Že pri prvem nihaju nastopi večina plastične deformacije stika, kar je vidno v zelo izraziti histerezi oziroma spremembni naklona deformacije pri 6,5 kN (slika 1). Nato se deformacija bolj ali manj stabilizira oziroma se spremembna deformacija med posameznimi nihaji zmanjša. Samo utrjevanje ali mehčanje stika pa se kaže v "potovanju" in obliku histerezne zanke v F-x diagramu.

Kljub povečanju obremenitve ostaja deformacija bolj ali manj konstantna (slika 2). Vzrok zmanjšanja rasti deformacije je v utrjevanju osnovnega materiala pod kaljeno plastjo, ki je že utrpel plastično deformacijo. Ob nadalnjem povečanju stične sile se rast deformacije



Slika 1: Potelek histerez deformacije stika preizkušanca
Figure 1: Hysteresis function - Specimen contact displacement



Slika 2: Potelek trajne deformacije stika pri različnih velikosti katalnega elementa

Figure 2: Permanent displacement of the contact at different rolling element size

zopet povečuje s podobno intenzivnostjo kot na začetku pojava trajne deformacije.

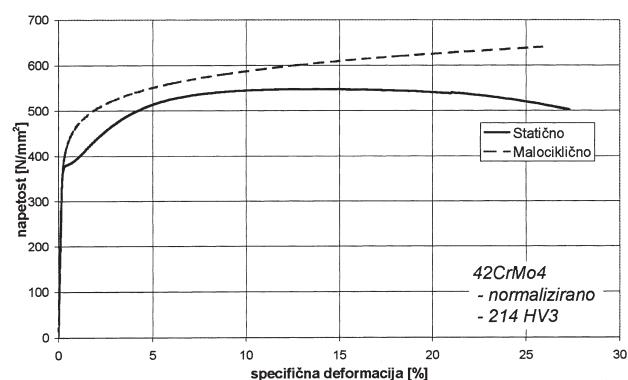
3 PRERAČUN PODPOVRŠINSKIH NAPETOSTI

Zaradi poškodb kaljenih katalnih ležajev, ki se pojavljajo kot razpoke in odstopanje utrjene tečine zaradi premajhne podpore jedra oziroma prevelike pod površinske strižne napetosti, je nujen preračun poteka pod površinskih napetosti stika.

Za preračun pod površinskih napetosti stika je bila uporabljena metoda končnih elementov (ANSYS 5.3). Pri preračunu je bil upoštevan 3D kontaktni problem, spremiranje malocikličnih lastnosti materiala po globini površinsko utrjene tečine in nelinearnost materiala. Numerični model katalnega stika zajema realne geometrijske in materialne lastnosti modelov ležajnih tečin⁶.

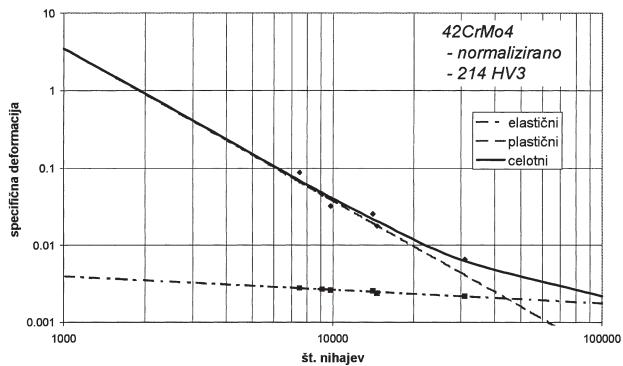
3.1 Malociklično določevanje materialnih lastnosti ležajnih obročev

Malociklično določevanje materialnih lastnosti⁷, ki zajema določitev malociklične krivulje σ - ϵ in Wöhlerje-

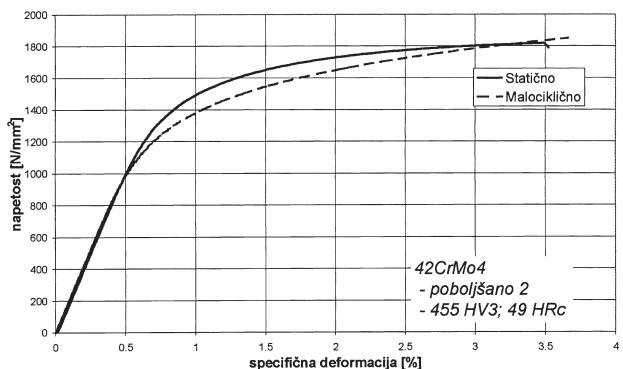


Slika 3: Malociklični diagram σ - ϵ za 42CrMo4 v normaliziranem stanju

Figure 3: Low cycle σ - ϵ curve for the normalised steel 42CrMo4



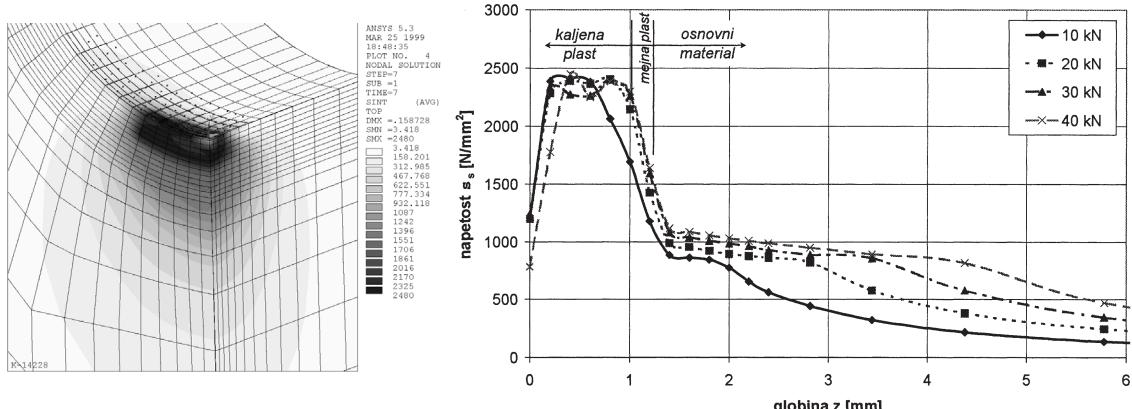
Slika 4: Wöhlerjeva krivulja za 42CrMo4 v normaliziranem stanju
Figure 4: Wöhler curve for the normalised steel 42CrMo4



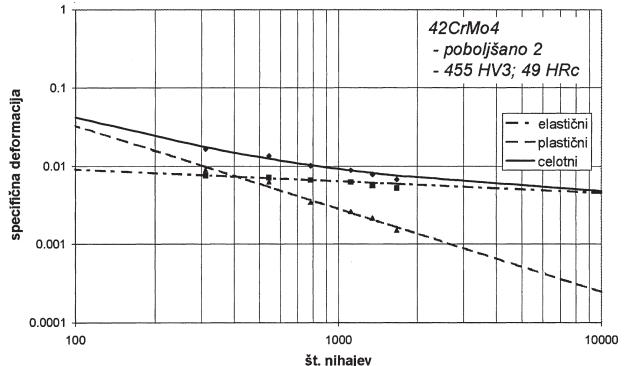
Slika 5: Malociklična krivulja σ - ϵ za poboljšano jeklo 42CrMo4
Figure 5: Low cycle σ - ϵ curve for the hardened steel 42CrMo4

ve krivulje materiala različnih topotnih obdelav, je potekalo pri identičnih obremenitvenih parametrih stika.

V malocikličnem področju je opazno utrjevanje materiala v normaliziranem stanju, kar je vidno z dvigom malociklične krivulje σ - ϵ nad statično (slika 3, 4). Pri poboljšanem jeklu pa je malociklična krivulja σ - ϵ nižja od statične krivulje materiala. Pri cikličnem obremenjevanju topotno obdelanega jekla se opazi znižanje napetosti tečenja $R_{p,0,2}$ (slika 5, 6).



Slika 7: Potez primerjalne napetosti σ_s pri a) MKE pri $F = 50$ kN in b) v odvisnosti od obremenitve
Figure 7: Reference stress function σ_s a) FEM at $F = 50$ kN and b) as a function of load



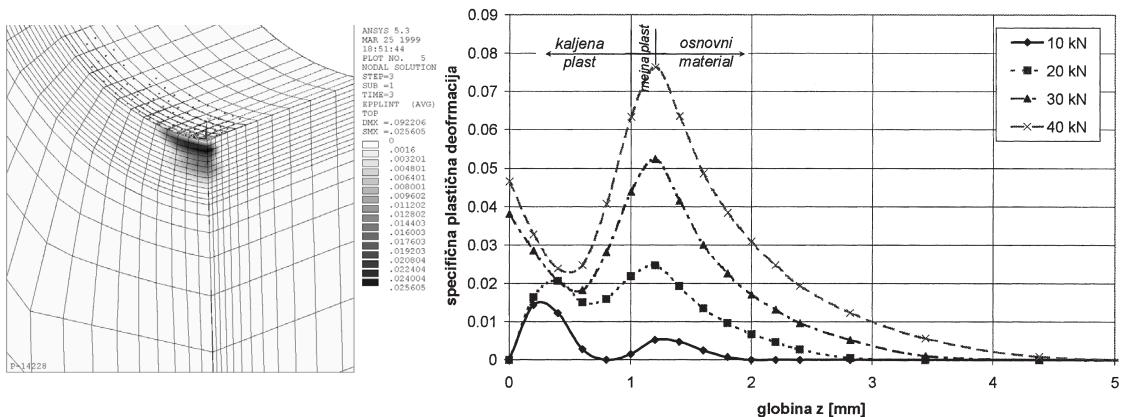
Slika 6: Wöhlerjeva krivulja za poboljšano jeklo 42CrMo4
Figure 6: Wöhler curve for the hardened steel 42CrMo4

3.2 Rezultati preračuna

Rezultati numeričnega preračuna pod površinskih napetosti pred plastično deformacijo materiala kažejo vse značilnosti porazdelitve pod površinskih napetosti, kot to določa razširjena Hertzova teorija (maksimum glavnih normalnih napetosti na površini in njihovo padanje z globino ter pojav maksima primerjalne napetosti po hipotezi največjih strižnih napetosti σ_s pod površino kontakta na globini do 1 mm) (slika 7).

Z večanjem obremenitve in s tem napetosti preko meje elastičnosti se pojavi plastična deformacija materiala:

- Zaradi pretanke kaljene plasti se plastična deformacija najprej pojavi v osnovnem materialu na meji kaljene plasti. Narastek napetosti preko meje elastičnosti in s tem utrjevanje ali lezenje materiala se vidi v skoraj konstantni primerjalni napetosti in v povečanju specifične plastične deformacije (slika 8).
- Pri dovolj debeli kaljeni plasti je širše območje maksima napetosti v kaljeni plasti. Zato se plastična deformacija pojavi le v utrjeni plasti tečine. V nasprotnem primeru pa se plastična deformacija

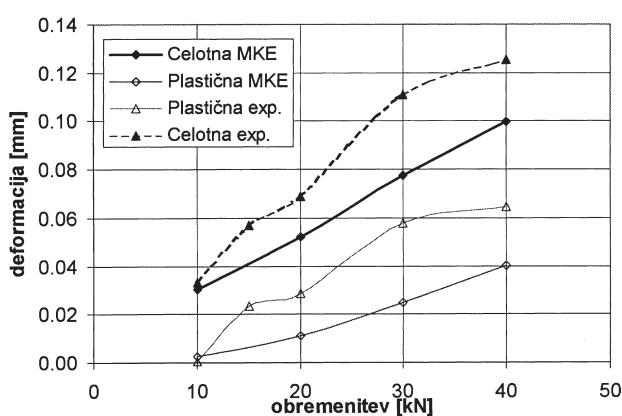


Slika 8: Potek specifične plastične deformacije pri a) MKE pri $F = 20$ kN in b) v odvisnosti od obremenitve
Figure 8: Plastic deformation σ_p a) FEM at $F = 20$ kN and b) as a function of load

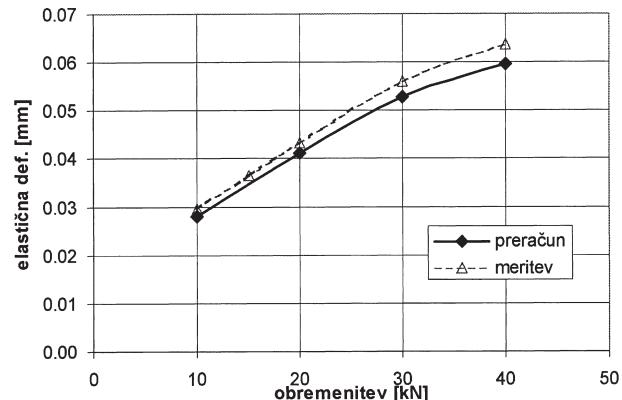
pojavi izključno in mnogo hitreje v osnovnem materialu ter se zelo hitro povečuje in širi v globino.

4 PRIMERJAVA REZULTATOV

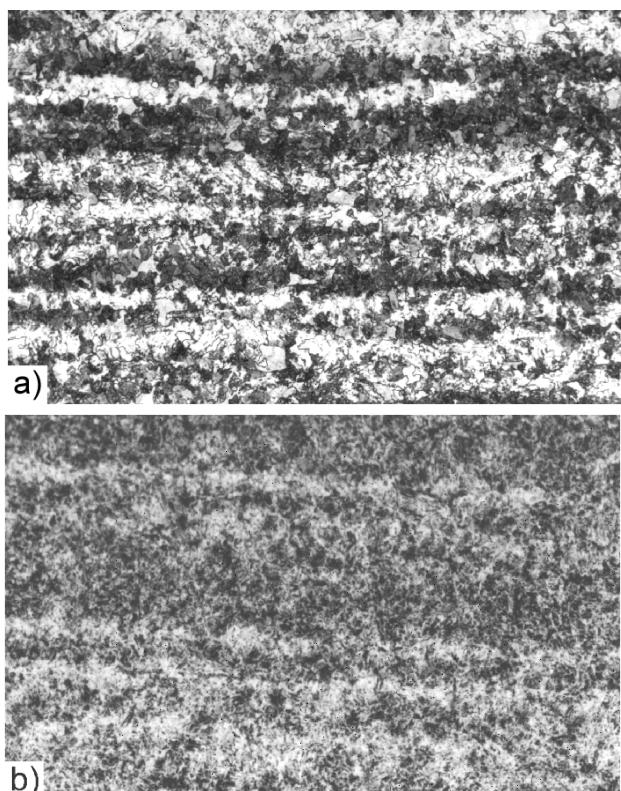
Pri meritvi pomeni začetek rasti trajne deformacije začetek plastične deformacije tečine. Po začetni strmi rasti trajne deformacije se kasneje rast v večini primerov umiri. Kljub povečanju obremenitve stika ostaja trajna in tudi celotna deformacija bolj ali manj konstantna. Vzrok zmanjšanja rasti deformacije je v utrjevanju osnovnega materiala pod kaljeno plastjo, ki je že utrpelo plastično



Slika 9: Primerjava deformacije tečine med numeričnim preračunom in preizkusom
Figure 9: Comparison between experiment and calculation for contact displacement



Slika 10: Primerjava elastične deformacije tečine med numeričnim preračunom in preizkusom
Figure 10: Comparison between experiment and calculation for elastic contact displacement



Slika 11: Mikrostruktura a) normaliziranega in b) kaljenega jekla 42CrMo4 (povečava 100-krat)
Figure 11: Microstructure for a) normalised and b) hardened steel 42CrMo4 (enlargement 100 times)

deformacijo, ko je napetost presegla mejo elastičnosti. Ob nadalnjem povečevanju stične sile se rast deformacije zopet povečuje s podobno intenziteto kot na začetku pojava trajne deformacije (**slika 2**).

Numerični preračun poda skoraj linearno odvisnost rasti celotne deformacije od obremenitev (**slika 9**). Rast trajne deformacije se začne s plastično deformacijo podpovršinskih plasti materiala tečine.

Rezultati meritev in numeričnega preračuna kotalnega stika se na prvi pogled zelo razlikujejo. Razlika med trajnimi deformacijami meritve in preračuna stika je tudi do 100%. Razlika elastične deformacije med meritvijo in preračunom pa je zanemarljiva (**slika 10**). Glavna razlika deformacije med meritvijo in preračunom nastane ravno na začetku njene rasti (**slika 9**).

Vzroki za razliko rezultatov med preizkusom in numeričnim preračunom oziroma za začetno intenzivno rast plastične deformacije pri preizkusu so lahko:

- trakovost zaradi izcej legirnih elementov in ogljika v jeklu ležajnih preizkušancev (**slika 11**),
- nepravilno vrednotenje plastične deformacije na mikronivoju oziroma posedanja hrupave površine tečine in
- neupoštevanje zaostalih napetosti, nastalih pri kaljenju⁸.

5 SKLEP

Določanje nosilnosti kotalnega stika je osnova pri ugotavljanju dejanske nosilnosti in dobe uporabnosti aksialnih kotalnih ležajev velikih dimenzijs z majhno vrtilno hitrostjo. Za določanje dopustne stične sile oziroma za določanje minimalnih geometrijskih karakteristik kotalnega stika bi lahko ob poznanem obremenitvenem kolektivu zanemarili vpliv maksimumov obremenitev ob predpostavki, da je število le-teh sorazmerno majhno. Pri tem maksimumi obremenitev povzročijo le nastanek začetkov razpok, ki pa se ob kasnejših manjših obremenitvah ne širijo, ker je material na konici duktilen.

Zato je nujno potrebno poznati realno porazdelitev podpovršinskih napetosti stika tudi nad mejo elastičnosti materiala, kar pa merilo dopustne strižne napetosti ne upošteva. Merilo dopustne trajne deformacije dovoljuje prevelike dopustne stične sile, saj ne upošteva padca trdote skozi sorazmerno tanko kaljeno plast.

Sele ko dosegajo minimalne debeline kaljene plasti tečine vrednosti 0,2-d premera kotalnega elementa, so vrednosti dopustnih stičnih sil preračunane po obeh merilih podobnih vrednosti. Pri teh debelinah kaljene plasti se podpovršinske napetosti v osnovnem materialu že toliko zmanjšajo, da se plastična deformacija osnovnega materiala na meji kaljene plasti ne pojavi več.

V nadalnjem delu naj bi v numeričnem preračunu natančneje popisali malociklične lastnosti materiala oziroma njegovo utrjevanje. S tem bi bilo mogoče bolj realno določiti potek podpovršinskih napetosti in deformacije stika tudi potem, ko napetosti presežejo mejo proporcionalnosti materiala, ter bi omogočilo določevati čas, mesto in rast razpok na meji kaljene plasti ležajne tečine.

6 LITERATURA

- ¹ Prebil, I.; Zupan, S.; Lučič, P.: Lastverteilung auf Wälzkörper von Drehverbindungen, *Konstrukcija*, 47 (1995) 11
- ² Kunc, Robert, Prebil, Ivan, Torkar, Matjaž. Low cycle carrying capacity of bearings with hardened rolling layer. *Kovine zlit. tehnol.*, 33 (1999) 1-2, 125-127
- ³ ISO 76, Rolling bearings - Static load ratings, 1987
- ⁴ Yhland, E.: Static load carrying capacity, *Ball Bearing Journal*, 211 (1982) 1-8
- ⁵ Pallini, R. A.; Sague, J. E.: Computing Core-Yield Limits for Case-Hardened Rolling Bearings, *ASLE Trans.*, 28 (1985) 1, 91-96
- ⁶ Kunc, R.: Carrying capacity criteria for bearings with hardened rolling surface; Master's degree, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, 1999
- ⁷ Raske, D. T.; Morrow, J. D.: Mechanical of Materials in Low Cycle Fatigue Testing, In: STP 465: Manual on Low Cycle Fatigue Testing, ASTM, Philadelphia, 1995
- ⁸ Grum, J.; Ferlan, D.: Residual Internal Stresses After Induction Hardening and Grinding, In: Heat Treating, 17th ASM Heat Treating Society Conference Proceedings, ASM International, United States of America, 1998, 629-639