

Vpliv toplotne obdelave na statično nosilnost kotalnega stika

The Influence of Heat Treatment on Static Load Carrying Capacity of Rolling Contact

K. Drobnič, MGA Nazarje
I. Prebil, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-11-22

Utrjevanje tečine kotalnega ležaja vrtljive zveze zvišuje odpornost tečine proti obrabi in vtiskovanju kotalnih elementov vanjo. Glede na tehnološki postopek izdelave ležajnih obročev tečino primerno utrdimo z lokalno toplotno obdelavo. S tem dosežemo po preseku ležajnega obroča takšno mikrostrukturo materiala, ki zagotavlja na površini tečine visoko statično nosilnost kotalnega stika, hkrati pa se ohrani globalna elastičnost in lastnost dobre mehanske obdelovalnosti materiala vrtljive zveze. Na zakaljenih ležajnih obročih iz ogljikovega in krom-molibdenovega legiranega jekla sta bili hkrati analizirana mikrostruktura in preverjena nosilnost kotalnega stika. Rezultati analize materialov in meritev nosilnosti potrjujejo smiselnost uporabe tehnologije indukcijskega kaljenja pri utrjevanju tečine, kot tudi opozarjajo na možne napake, ki pri tem nastanejo. Kalilne razpoke, zgornji bainit, podhlajeni avstenit in pretanka kaljena plast zmanjšujejo nosilnost tečine. Končna porušitev tečine se izrazi s površinskimi razpokami in vsedom kaljene plasti v mehkejši osnovni material.

Ključne besede: vrtljiva zveza, kotalni stik, kotalni element, površinsko utrjena tečina, statična nosilnost kotalnega stika, kaljenje, martenzitna mikrostruktura, trdota kaljene plasti, globina kaljene plasti

Hardening of the rotational connection bearing raceway increases the resistance of the bearing against wear and impression of the rolling elements. The raceway is hardened using heat treatment locally, considering the technological process of the bearing ring manufacture. In this way the ring surface has a microstructure providing a high static carrying capacity of the rolling contact, and in the same time retaining the global elasticity and good machining properties of the rotational connection material. The microstructure analysis and carrying capacity of the rolling contact have been carried out on hardened bearing rings made of carbon and chrome-molybdenum alloyed steel. The results of the material analysis and carrying capacity measurements confirm the suitability of the use of induction hardening for the raceway hardening, and also show the possible errors that can emerge in the process. Hardening cracks, upper bainite, supercooled austenite, and excessively thin hardened layer decrease the carrying capacity of the raceway. The final breakdown of the raceway shows as surface cracks, and deep impressions of the hardened layer in the softer base material.

Key words: rotational connection, rolling contact, rolling element, surface hardened raceway, static carrying capacity of the rolling contact, hardening, martensitic microstructure, hardness of the hardened layer, depth of the hardened layer

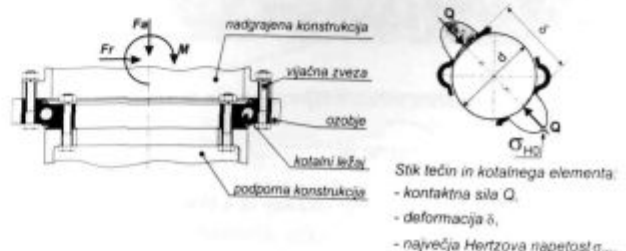
1 Uvod

Vrtljiva zveza je strojni sestav, ki omogoča relativno vrtenje dveh konstrukcijskih sklopov in prenaša rezultirajočo kombinacijo zunanjih obremenitev (aksialne in radialne sile ter prevrtni moment). Osnovni elementi sestava (slika 1) so: kotalni ležaj, vijajna zveza in pogosto ozobje, ki je integrirano na zunanjem ali notranjem obroču kotalnega ležaja.

Material za izdelavo vrtljive zveze mora imeti zato takšno mikrostrukturo in mehanske lastnosti, ki omogočajo krivljenje in varjenje gredic v obroč, mehansko obdelavo tečine, ozobja in pritrtilnih izvrtin in ki z ustrezno lokalno toplotno obdelavo tečine daje zadostno nosilnost in odpornost materiala proti vtiskovanju kotalnih elementov v tečino. Lastnosti primernih materialov odstopajo od lastnosti standardnih ležajnih jekel^{1,2}, za katere so bili v preteklosti določeni in standardizirani parametri nosilnosti kotalnih stikov^{3,4}. Zaradi tega so določitev teh parametrov in preverjanje meril za nosilnost možni le na osnovi preizkušanja.

2 Priprava in analiza preizkušancev

Na temelju zahtev po tehnoloških in mehanskih lastnostih sta bili za izdelavo preizkušancev izbrani podevtektoidni jekli za poboljšanje: ogljikovo C45 ter s kromom in molibdenom legirano jeklo 42CrMo4. Iz gredic sta bila s krivljenjem in varjenjem izdelana ležajna obroča. Polkrožna ležajna tečina je bila po obodu obroča odsekoma indukcijsko zakaljena⁵ s spremenljivimi parametri kaljenja (frekvenca generatorja, gostota moči, čas segrevanja, oddaljenost induktorja od površine kaljenja, vrsta hladilnega sredstva, hitrost ohlajanja,...). Vzrok za enakomerno kaljenje po odsekih je bil v iskanju vpliva

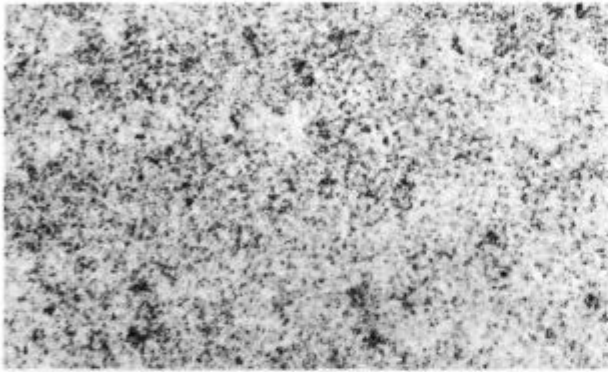


Slika 1: Elementi vrtljive zveze in kotalni stik
Figure 1: Elements of the rotational connection and rolling contact

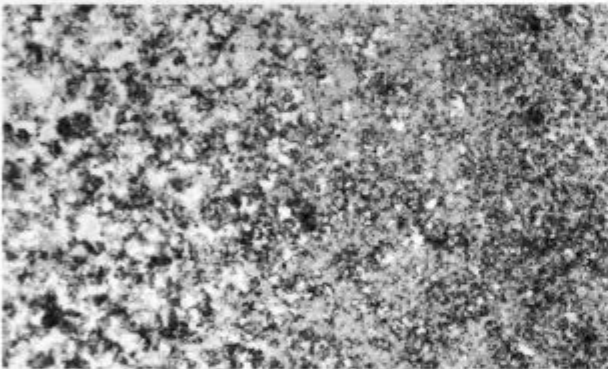
¹ Mag. Katarina DROBNIČ, dipl.inž.
Mali gospodinjinski aparati d.o.o.
3331 Nazarje, Savinjska c. 30

posameznih parametrov kaljenja pri danem materialu na debelino in trdoto kaljene plasti tečine ter od tega odvisno nosilnost statične točkovne obremenitve tečine in kotalnega elementa kroglice. Analiza mikrostrukture tečine obeh obročev po indukcijskem kaljenju je dala pričakovane rezultate (slika 2): na površini martenzit, ki z globino prehaja v bainit in v osnovno žarjeno mikrostrukturo jekla.

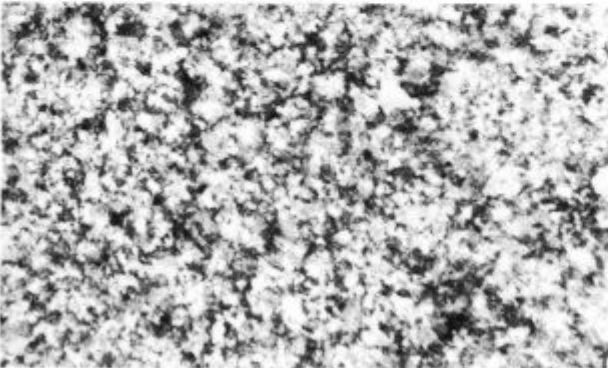
Pri analizi mikrostrukture so bile na posameznih mestih opažene značilne in najpogostejše napake kalje-



a



b



c

Slika 2: Mikrostruktura tečine ležajnega obroča iz 42CrMo4

- a) martenzit
 - b) prehod iz bainita v osnovo in
 - c) osnovno žarjeno jeklo
- Figure 2: Microstructure of the raceway of a bearing ring made from 42CrMo4
- a) martensite
 - b) transition from bainite to basic steel
 - c) basic heat treated steel

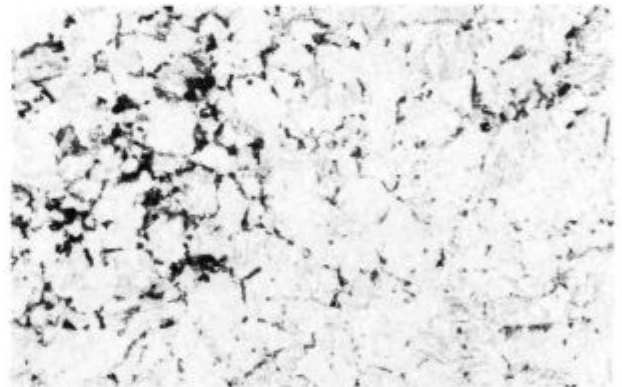
nja, ki so posledica prehitrega ohlajanja (slika 3). Zgornji bainit, ki se izloča na kristalnih mejah martenzita, povečuje krhkost materiala. Kalilna razpoka, ki poteka s površine tečine v jedro ležajnega obroča po mejah kristalov, pomeni začetno razpoko v materialu⁶.

3 Preizkušanje statične nosilnosti kotalnega stika

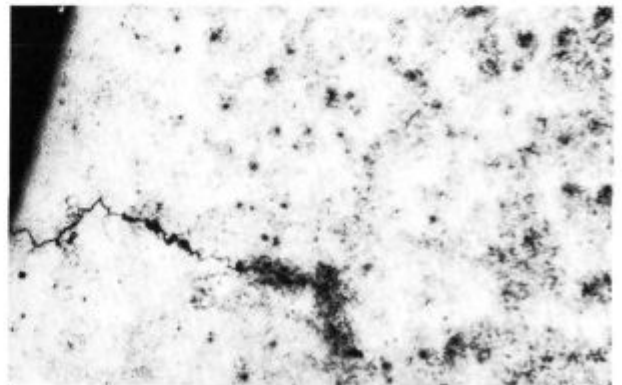
Vzrok za nastanek poškodb na ležajnih tečinah pri vrtljivih zvezah so v večini primerov prevelike statične obremenitve in utrujanje materiala^{7,8}. Prevelike statične obremenitve v mirovanju povzročajo plastične deformacije teles v stiku, zlasti tečine, kar pa ne zagotavlja več enakomernega gibanja kotalnega elementa po njej. Poškodbe, ki so posledica preplitvo in premeško kaljenih ležajnih tečin, se kažejo s podpovršinskimi razpokami v osnovnem materialu pod utrjeno plastjo in pri obratovanju vrtljive zveze rastejo proti površini tečine. Na osnovi spremljanja oblik poškodb sta bili postavljeni glavni merili za določanje statične nosilnosti kotalnega stika.

3.1 Merilo dopustne plastične deformacije

Merilo dopustne plastične deformacije^{4,9} določa dopustno velikost statične obremenitve na mirujočem leža-



a



b

Slika 3: Napake kaljenja zaradi nepravilnega hlajenja

- a) nastanek zgornjega bainita pri C45
 - b) kalilna razpoka na tečini
- Figure 3: Hardening faults caused by incorrect cooling
- a) emergence of upper bainite in C45
 - b) hardening crack on the raceway

ju, to je na njegovem najbolj obremenjenem kotalnem elementu, z obremenitvijo, pri kateri se v stiku pojavi plastična deformacija velikosti 0,01% premera kotalnega elementa (1). Merilo velja predvsem za prekaljene ležajne obročje iz standardnega ležajnega jekla z visoko površinsko trdoto tečine (nad 63,5 HRC) in upošteva plastično utrjanje materiala.

$$\delta_{\text{all}} = 10^{-4}d \quad (1)$$

δ_{all} - skupna deformacija kontakta (mm)
 d - premer kotalnega elementa (mm)

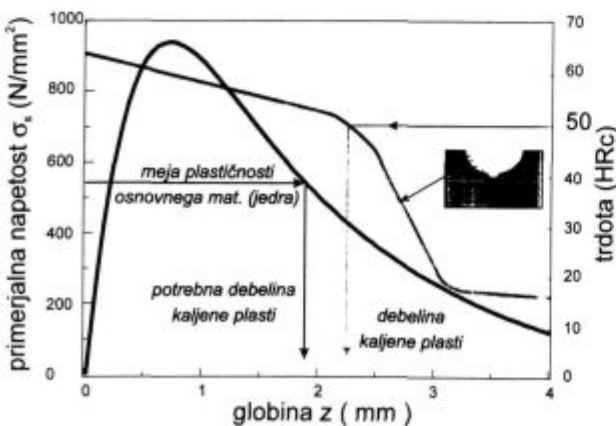
3.2 Merilo dopustne podpovršinske napetosti na meji kaljene plasti

Merilo dopustne podpovršinske napetosti na meji kaljene plasti³ zahteva, da primerjalna podpovršinska napetost po hipotezi največjih strižnih napetosti na meji kaljene plasti ne preseže meje plastičnosti osnovnega materiala - jedra, da se torej poškodbe ne bodo pojavile (slika 4). Meja kaljene plasti je določena z razdaljo od površine tečine, na kateri se trdota kaljene plasti ne zmanjša pod 50 HRC. To pomeni, da mora biti kaljena plast za zahtevano obremenitev ustrezno debela in trda. Pomanjkljivost tega merila je v omejitvi izračuna po Hertzju v elastičnem območju homogenega in izotropnega materiala in neupoštevanju plastičnega utrjevanja materiala^{10,11,12}.

3.3 Preizkušanje in analiza rezultatov

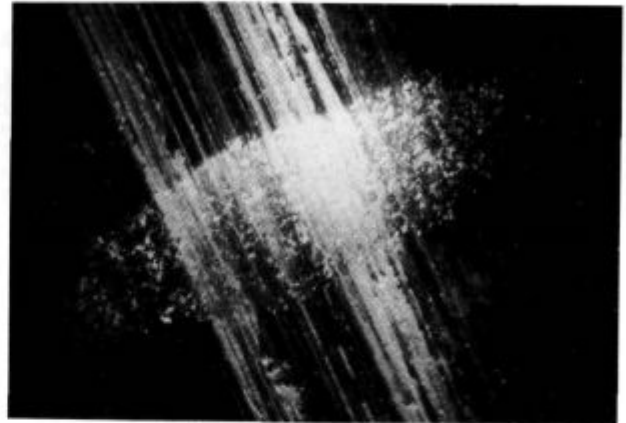
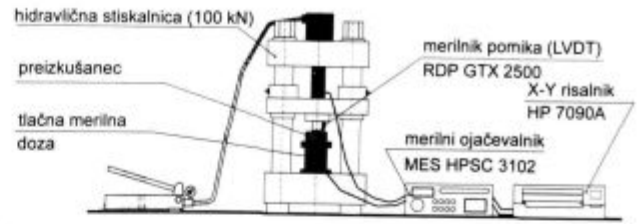
Na osnovi teh spoznanj so bile pri znanih lastnostih kaljene plasti na preizkuševališču (slika 5), ki je omogočalo osnosimetrično obremenjevanje in sočasno spremljanje deformacije stika, izvedene meritve odvisnosti deformacije stika od obremenitve preizkušanja.

Po opravljenih meritvah na odseku enakomerno zakaljene tečine z zaporednimi, stopenjsko rastočimi obremenitvami je bil narisana diagram spreminjanja velikosti deformacije od obremenitve. Na sliki 6 sta pred-



Slika 4: Padec trdote v kaljeni plasti in primerjalna podpovršinska napetost pri Hertzovem stiku

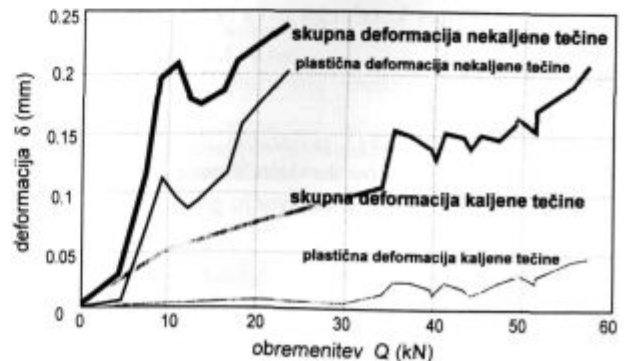
Figure 4: Decrease of hardness in the hardened layer and comparative sub-surface stress in the Hertz contact



Slika 5: Preizkuševališče za določanje nosilnosti kotalnega stika in fotografija naležne površine

Figure 5: Test stand for the determination of the rolling contact carrying capacity and a photograph of the contact surface

stavljena skrajna primera: obremenjevanje nekaljene, surove tečine in toplotno obdelane, kaljene tečine. Diagrama sta v obeh primerih podobna: pri manjših obremenitvah skupna deformacija stika s silo raste in se po razbremenitvi v celoti povrne v začetno stanje. Preseganje elastične meje materiala se kaže z naraščanjem plastične deformacije stika. V območju utrjevanja materiala rast plastične deformacije nekoliko zastane, nato pa začne progresivno rasti. Glede na takšno obliko rasti trajne deformacije je bila na mestu, kjer krivulja prehaja iz elastičnega območja deformacije v plastično utrjevanje materiala, določena kritična sila statičnega obremen-



Slika 6: Diagram deformacije stika v odvisnosti od obremenitve in lastnosti kaljene plasti pri 42CrMo4

Figure 6: Contact deformation as a function of load and hardened layer properties in 42CrMo4

jevanja za posamezno kvaliteto kaljene plasti. Primerjava krivulj velikosti trajne deformacije pri posamezni obremenitvi, pri kateri nastopi plastično utrjevanje materiala, kaže vpliv kaljene plasti na dopustno obremenitev. Dopustna meja obremenjevanja pri enakih trajnih deformacijah je višja, če je tečina površinsko globlje toplotno utrjena.

Na osnovi meritev odvisnosti deformacije stika in velikosti stične površine¹³ od obremenitve sta bila z numeričnim programom GoldHorn¹⁴ izpeljana preleminarna izkustvena izraza za velikost stične površine (2) in kritično statično obremenitev kotalnega stika (3), ki upoštevata lastnosti osnovnega materiala (E , ν in $\sigma_{0.2}$), lastnosti kaljene plasti tečine (h in HV) in geometrijo kotalnega stika (d , S , k):

$$a = e^{-4.504} \left(\frac{E}{E_n}\right)^{-0.168} \left(\frac{\nu}{\nu_n}\right)^{-1.7 \cdot 10^{-13}} \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.2n}}\right)^{20.359} \left(\frac{HV}{HV_n}\right)^{0.018} h^{-0.039} \left(\frac{d}{d_n}\right)^{13.045} S^{-11.181} k^{0.573} Q^{0.286} \quad (2)$$

in

$$Q_{kr} = e^{1.549} \left(\frac{E}{E_n}\right)^{0.058} \left(\frac{\nu}{\nu_n}\right)^{-9.7 \cdot 10^{-13}} \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.2n}}\right)^{-3.645} \left(\frac{HV}{HV_n}\right)^{-0.029} h^{-0.141} \left(\frac{d}{d_n}\right)^{-18.702} S^{14.091} k^{1.7} \quad (3)$$

Spremenljivke in njihove normirne vrednosti so:

- a - velikost polosi kontaktne elipse (mm)
- e - osnova naravnega logaritma
- E - elastični modul materiala; $E_n = 2,1 \cdot 10^5$ (N/mm²)
- ν - Poissonov koeficient materiala; $\nu_n = 0.3$ (l)
- $\sigma_{0.2}$ - elastična meja materiala; $\sigma_{0.2n} = 300$ (N/mm²)
- HV - trdota tečine po Vickersu; $HV_n = 517$
- h - debelina kaljene plasti (mm)
- d - velikost kotalnega elementa; $d_n = 20$ (mm)
- S - razmerje velikosti kotalnega elementa in tečine (l)
- k - razmerje polosi kontaktne elipse (l)
- Q - obremenitev kotalnega stika (kN)

4 Sklep

Namen zastavljenega programa meritev je iskanje enostavnejših postopkov za določevanje statične nosilnosti kotalnega stika ob upoštevanju geometrije in dejan-

skih lastnosti materiala površinsko kaljene tečine ležaja vrtljive zveze.

Obe uveljavljeni merili za določitev statične nosilnosti kotalnega stika veljata pri določenih pogojih, ki v našem primeru niso bili izpolnjeni v celoti. V prispevku opisani postopek določevanja dopustne statične sile stika, ki je podobno kot merilo dopustne plastične deformacije določeno s preizkusi, ni omejen le na elastično območje materiala, saj je meja dopustnega obremenjevanja določena z rastjo plastične deformacije. Poleg tega upošteva nehomogenost in anizotropnost materiala tečine z globino zaradi površinsko kaljene plasti, ki ima drugačne mehanske lastnosti kot osnovni material.

Analize kaljenja obeh ležajnih obročev so pokazale na pomembnost pravilno izbranih tehnoloških parametrov kaljenja. Prevelika oddaljenost induktorja od tečine in prenizka temperatura segrevanja se kažeta z nepopolno zakalitvijo oboda tečine, prehitro ohlajanje pa s pojavom zgornjega bainita v martenzitu in kalilnimi razpokami. Slednje že pomenijo mehansko poškodbo materiala - porušitev.

5 Literatura

- ¹ Otto, W., in Schaening, K., *Internationaler Vergleich von Standard Werkstoffe*, 3. Auflage, Beuth Verlag GmbH Berlin, Koeln, 1985
- ² ISO 683/1, *Direct-hardening Unalloyed and Low-alloyed Wrought Steel in Form of Black Products*, 1978
- ³ Pallini, R. A., in Sague, J. E., *Computing Core-Yield Limits for Case-Hardened Rolling Bearings*, *ASLE Trans.*, 28, 1985, 1, 91-96
- ⁴ Yhland, E., *Static load carrying capacity*, *Ball Bearing Journal*, 211, 1982
- ⁵ Atkins, M., *Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels*, American Society for Metals, Reised U.S. edition, 1980
- ⁶ Buxbaum, O., *Betriebsfestigkeit*, Verlag Stahleisen GmbH, Duesseldorf, 1996
- ⁷ Palmgren, A., *Ball and Rolling Bearing Engineering*, 3rd Edition, Burbank, Philadelphia, 1959
- ⁸ Harris, T. A., *Rolling Bearing Analysis* - 3rd edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991
- ⁹ ISO 76, *Rolling bearings - Static load ratings*, 1987
- ¹⁰ Hertz, H., *Über die Berührung fester elastischer Körper*, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Leipzig, 92, 1881, 2, 156-171
- ¹¹ Lundberg, G., in Sjoval, H., *Stresses and Deformation in Elastic Contacts*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1958
- ¹² Gupta, P. K., in Walowit, J. A., *Contact Stresses Between an Elastic Cylinder and a Layered Elastic Solid*, *Transactions of ASME, Journal of Lubrication Technology*, Series F, 96, 1974, 2, 250-257
- ¹³ Grabec, I., in Prebil, I., *Postopek ugotavljanja naleganja stičnih površin*, *Patent No. 9200323*, Ljubljana, 1994
- ¹⁴ Križman, V., *Obravnavanje šumnih podatkov pri avtomatskem modeliranju dinamičnih sistemov*, *magistrska naloga*, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1993