

PRESKU[ANJE MATERIALOV NA ODPORNOST PROTI UTRUJANJU PRI KOTALJENJU ROLLING CONTACT FATIGUE TESTING

MITJAN KALIN, J. VI@INTIN

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Bogovičeva 8, 1000 Ljubljana

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

Naprave za preskušanje materialov na odpornost proti utrujanju pri kotaljenju lahko razdelimo na industrijska in modelna preizkuševališča. Zaradi rotacijskega gibanja, zahtevne kontaktne geometrije preizkušancev in velikih hitrosti, ki zahtevajo ostre tolerančne pogoje, sta obe vrsti preizkuševališč dragi. V prispevku je predstavljena nova naprava lastne konstrukcije, namenjena preskušanju materialov na odpornost proti utrujanju pri kotaljenju. V nasprotju z doslej znanimi podobnimi napravami se obremenitveni del naprave giblje izmenično linearno, tako da kotali kroglico po preizkušancu v obliki plošice. Zaradi bistveno enostavnejše kontaktne geometrije in gibanja naprave ter standardnih in poceni preizkušancev so naprava in preskusi znatno cenejši od doslej znanih.

ključne besede: kotaljenje, utrujanje, preskušanje, preizkuševališča

Rolling contact fatigue testers could be classified into bench and model devices. Due to rotational movement, complex contact geometry, high speeds, and high tolerances both types of devices are expensive. In this paper new own-designed RCF tester is presented. In contrast to most of today's similar devices, loading part in the new tester moves linearly reciprocatingly and rolls the ball over the flat specimen. Simple testing principle and specimens geometry make RCF testing with the new tester less expensive than with comparative devices.

Key words: rolling, fatigue, testing, test devices

1 UVOD

Trajnost strojnih elementov ima v industriji izjemen pomen zaradi zanesljivosti obratovanja in ekonomičnosti. To velja tudi za kotalne ležaje, ki sodijo med najpogostejše strojne elemente. Ob predpostavki, da so ležaji ustrezno mazani in zaščiteni pred vdorom ne-istoter da se torna toplota uspešno odvaja, je njihova trajnost omejena predvsem s površinskimi utrujenostnimi poškodbami jamičenja. Za zagotovitev potrebne zanesljivosti delovanja in drugih visokih zahtev sodobne tehnike so za ležaje ključnega pomena nosilni kontakti, ki zmorejo delovati pri visokih hitrostih, v agresivnih okoljih, pri velikih obremenitvah na enoto površine ter slabih razmerah mazanja¹.

Med najbolj obetavne kombinacije materialov za kotalne ležaje sodijo keramika-keramika², jeklo-keramika³ ter kombinacije različnih prevlek⁴. Uporaba novih, sodobnih materialov v praktičnih aplikacijah je odvisna predvsem od načina poškodbe⁵ ter zagotovitve določene kvalitete. Edini način za ugotovitev teh lastnosti pa so eksperimentalno pridobljeni rezultati.

Preizkuševališča in naprav za preskušanje materialov na odpornost proti utrujanju pri kotaljenju je več. Razdelimo jih lahko na industrijska in modelna, njihova skupna značilnost pa je, da vsaj del naprave, ki rabi hkrati kot preizkušavec ali protipreizkušavec, opravlja rotacijsko gibanje. Zaradi tega so tolerančni pogoji same naprave in preizkušancev zelo ostri, od tega pa je odvisna tudi njihova cena. Le-ta je visoka tudi zaradi posebnih oblik in velikosti preizkušancev. Omenjena problematika pride do izraza še posebej pri novih materi-

alih, npr. keramiki, pri katerih je cena mehanske obdelave izjemno visoka⁶, tako da so obsejne raziskave in spoznanja omejeni v veliki meri prav s finančnimi sredstvi.

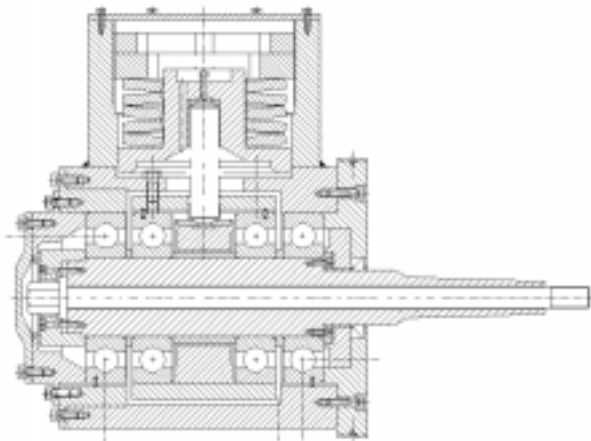
V prispevku so predstavljene osnovne izvedbe obstoječih naprav za preskušanje materialov na odpornost proti utrujanju pri kotaljenju ter nova naprava lastne konstrukcije⁷, ki zaradi bistveno enostavnejše kontaktne geometrije in gibanja naprave ter standardnih in poceni preizkušancev omogoča znatno cenejše preskušanje od doslej znanih.

2 INDUSTRIJSKA PREIZKUŠEVALIŠČA

Preizkuševališča za izdelke - ležaje, dajejo edina dokončen odgovor in dokaz o preskušancem materialu. Tovrstna preizkuševališča uporabljajo vsi proizvajalci kotalnih ležajev, pa tudi druge raziskovalne organizacije, posamezne izvedbe pa se razlikujejo glede na potrebe uporabnika. Njihova slabost je, da terjajo nakup preizkuševališča velika finančna sredstva, poleg tega pa so draga tudi sama preskušanja in analize. Dodatna slabost je dolgotrajnost preskusov ter komplicirane analize, saj je priprava površin za analize zahtevnejša zaradi kompleksnejše geometrije ležaja. Zgled obremenitvene enote takega preizkuševališča⁸ prikazuje **slika 1**.

3 MODELNA PREIZKUŠEVALIŠČA

Modelna preizkuševališča temeljijo na kotalnem obremenjevanju v tokovnih ali linijskih dotikih. ^eprav



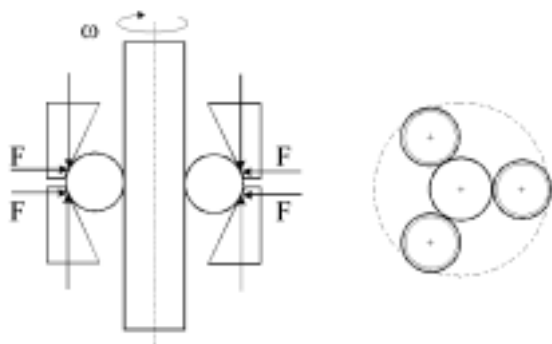
Slika 1: Obremenitvena enota preizkuševalca za kotalne ležaje CTD-ML1

Figure 1: Loading unit of the rolling bearings test machine CTD-ML1

je različno veliko, je pri vseh teh napravah znano, da vsaj del ležaja, ki se rabi hkrati kot preizkušanec ali protipreizkušanec, opravlja rotacijsko gibanje. Zaradi dobro znanih težav, ki spremljajo rotacijske naprave (uravnoveženost, vibracije), morajo biti tolerančni pogoji vrtenih delov zelo ostri. Pri napravah z linijskim kontaktom nastopa še dodatna težava zaradi točnega naleganja površin in zarezni uvoznikov. Znanost preizkusov utrujanja materialov je veliko število obremenitvenih ciklov, ki so odvisni od dolgotrajnosti preskusov. Prav zato so vrtilne hitrosti pri teh napravah velike, s čimer se trajanje preizkusov skrajša. To še dodatno pogojuje in zaostre tolerančne pogoje. V nadaljevanju so predstavljene nekatere najpogostejše uporabljane različice.

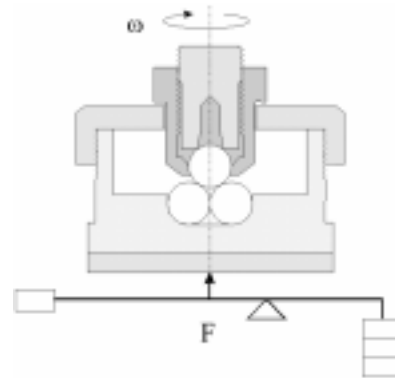
3.1 Naprava "kroglice na valju"

Rotirajoči preizkušanec v obliki valja je obremenjen preko treh kroglic, ki so medsebojno ločene s kletko, **slika 2**. Kroglice se prosto kotalijo med dvema teinama stožastega ležaja, ki sta v aksialni smeri stisnjena eden proti drugemu s tremi vzmetmi. Na ta način se regulira silo, s katero kroglice obremenjujejo valj. Silo je potre-



Slika 2: Naprava "kroglice na valju"

Figure 2: Ball-on-rod machine



Slika 3: Modificirana "tirikrogli-na" naprava

Figure 3: Modified four-ball machine

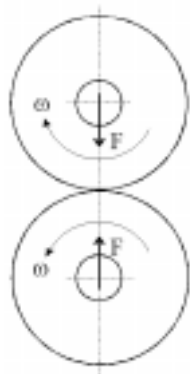
bnou preračunati glede na kot stožasteh tein, dimenzije preizkušanca in kroglic ter karakteristike vzmeti. Kroglice so standardne iz jekla AISI 52100 s površinsko obdelavo, boljčo od $0,013 \mu\text{m}$. Material testnega cilindra se seveda spreminja, geometrija pa mora zadostiti še tolerancam krožnosti ($0,6 \mu\text{m}$) in hrapavosti (N2-N4). Prav zahtevna in draga obdelava preizkušancev pomeni eno glavnih slabosti te naprave. Podrobnosti o konstrukciji, tolerancah in preskušanju so opisane v literaturi⁹.

3.2 Modificirana "tirikrogli-na" naprava

[tirikrogli-na naprava¹⁰, shematično prikazana na **sliki 3**, simulira razmere v kroglicnem ležaju z globokim utorom. Zgornja kroglica, vpeta v vreteno, predstavlja notranji obroben ležaj. Pri tem kotali tri kroglice po kolutu z 'lebo, ki je enak teini v aksialnem kroglicnem ležaju z globokim utorom. Silo, ki jo dovedemo z uteži po vzvodu na koluto z 'lebo, je potrebno preračunati glede na kot dotika in velikost kroglic, vendar se za določeno konstrukcijo te naprave navadno uporablja dimenzijsko enake kroglice in teino koluto, tako da je sila podana kar tabelarno. Preizkušanec v tej napravi je zgornja kroglica, ki je podvržena največjemu številu obremenitvenih ciklov, s čimer se skrajša čas preskusa. Princip delovanja zahteva zelo natančno vodenje vretena, s tem pa se naprava podraži.

3.3 Naprava "disk na disku"

Naprava disk na disku, prikazana na **sliki 4**, nastopa podobno kot druge v več različicah¹⁰. Je ena izmed najpogostejše uporabljanih preizkuševalcev za preskušanje materialov na odpornost proti utrujanju pri kotaljenju. Njena največja prednost je, da je mogoče kontrolirati razmerje med zdrsom in kotaljenjem. Sestavljena je iz dveh preskusnih diskov, ki sta ločena s dvema elektromotorjema. Slabost tega preizkuševalca pa je predvsem težko doseganje soosnosti obeh diskov in s tem točnost naleganja obeh površin v linijskem kontaktu. Dodatna težava je tudi velikost preizkušancev ter



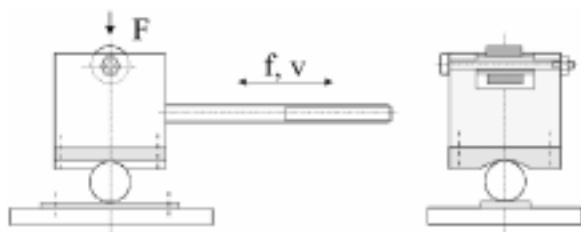
Slika 4: Naprava "disk na disku"
Figure 4: Disc-on-disc machine

doseganje krovnosti in drugih toleranc, kar podraži izdelavo preizkušancev ali pa poslabša kvaliteto preizkušanja.

4 NAPRAVA Z LINEARNIM GIBANJEM OBREMITVENE ENOTE CTD-ROL1

Napravo z linearnim gibanjem obremenitvene enote CTD-ROL1, prikazano na sliki 5, v osnovi sestavljajo obremenitvena enota, kroglica ter preizkušavec. Obremenitvena enota je z navojnim drogom povezana s pogonskim sklopom, ki izvaja izmenično linearno gibanje. Lahko je različnih izvedb, npr. ro-i-ni mehanizem. Enoto z vrha obremenimo z vlečno silo preko jarma z utežjo. Gibanje med jarmom in obremenitveno enoto omogoča vlečno. Obremenitev se preko kroglice, ki se kotlji pod vplivom gibanja in sile obremenitvene enote, prenese na preizkušavec. Obremenitvena enota ima na spodnji strani vlečno, ki zagotavlja, da se kroglica kotlji vedno po istem tiru. Na ta način utrpi preizkušavec pri vsakem ciklu ro-i-nega mehanizma dva kotalna obremenitvena cikla. Za pravilno delovanje naprave je potrebno zagotoviti, da kroglica ne zdrsuje. Le-to se doseže s primerno kombinacijo frekvence gibanja mehanizma in normalne sile ob upoštevanju mehanskih lastnosti materialov v kontaktu.

Preizkušanci v obliki ploščic so lahko, glede na predmet raziskave, iz različnih materialov ter različno toplotno in mehansko obdelani. Najpomembnejša prednost



Slika 5: Naprava z linearnim gibanjem obremenitvene enote CTD-ROL1
Figure 5: Machine with linear movement of loading unit CTD-ROL1

take geometrije je, da so preizkušanci majhni in je njihova izdelava enostavna. To je še posebej pomembno pri preizkušanju materialov, ki jih težko mehansko obdelujemo ali pa je njihova cena zaradi tega visoka (keramika). Kroglice, ki se uporabljajo za prenos kotalne obremenitve, so standardne velikosti in ne pomenijo velik strošek. Obremenitvena enota je sestavljena iz dveh delov, tako da se spodnji del, ki tudi utrpi kotalno utrujanje, lahko po določenem številu obremenitev zamenja z novim, zgornji del pa ostane isti. Zaradi vlečne na spodnjem delu je površina kontakta precej večja kot na preizkušancu, tako da so obremenitve vlečne manjše, s tem pa tudi vplivi utrujanja in poškodbe. Tako ni potrebno menjanje ploščic z vlečbo po vsakem preizkusu, zato se dodatno poceni preizkušanje, pa tudi sicer je cena ploščic nizka zaradi enostavne geometrije.

5 SKLEP

Naprava z linearnim gibanjem obremenitvene enote CTD-ROL1 omogoča nov način preizkušanja materialov na odpornost proti utrujanju pri kotaljenju. Glede na doslej znane naprave z enakim namenom ima prednost predvsem v enostavnosti principa gibanja, iz tega pa izhaja še vrsta drugih prednosti. Predvsem se pocenijo preizkušanci zaradi velikosti, načina obdelave in oblike izdelave. Tudi drugi deli, ki so v kontaktu pri preizkušanju, so enostavni in poceni. Samo napravo je mogoče prigraditi na več obstoječih strojih z ro-i-nim mehanizmom, kot je primer pri naši napravi. To pomeni, da v nasprotju s podobnimi preizkuševalnimi ni potrebno posebej kupovati celotne naprave za kotalno utrujanje, kar poceni preizkušanje tudi v smislu investicij v napravo. Iz doslej opravljenih preskusov je bilo ugotovljeno, da omogoča predstavljena naprava zanesljivo in ponovljivo preizkušanje. [Število obremenitvenih ciklov v časovni enoti pa je poleg frekvence gibanja ro-i-nega mehanizma odvisno predvsem od lastnosti preskusnih materialov in normalne sile. Teoretično izražun je pokazal, da bi lahko dosegali nekajkrat večje število obremenitvenih ciklov, kot pri drugih podobnih napravah, vendar zaradi postopnosti pri spoznavanju lastnosti same naprave tega še nismo preverili.

6 LITERATURA

- ¹ B. Bhushan, B. L. Sibley, Silicon nitride rolling bearings for extreme operating conditions, *ASLE Transactions*, 25 (1981) 4, 417-428
- ² J. F. Chudecki, Silicon Nitride for High - Performance Bearings, *Cer. Bull.*, 69 (1990) 1113-1115
- ³ Y. P. Chiu, P. K. Pearson, M. Dezzani, H. Daveiro, Fatigue Life and Performance Testing of Hybrid Ceramic Ball Bearings, *Lubrication Engineering*, March 1996, 1978-204
- ⁴ G. B. Hopple, J. E. Keem, S. H. Loewenthal, Development of fracture resistant, multilayer films for precision ball bearings, *Wear*, 162-164 (1993) 919-924
- ⁵ M. Hadfield, T. A. Stolarski, R. T. Cundill, S. Horton, Failure modes of ceramic in rolling contact, *Proc. Roy. Soc. A.*, 443 (1993) 607-621

⁶ R. Allor, S. Jahanmir, Current problems and future directions for ceramic machining, *American Ceramic Society Bulletin*, 75 (1996) 40-43

⁷ J. Višintin, M. Kalin, Patentna prijava, P-9700054, 1997

⁸ M. Kalin, J. Višintin, Preizkuševalnice za kotalne ležaje in maziva, *Strojniški vestnik*, 43 (1997) 5-6, 239-247

⁹ D. Glover, A Ball-Rod Rolling Contact Fatigue Tester, ASTM STP 771, J. J. Hoo, Ed., American Society for Testing and Materials, 1982, 107-124

¹⁰ ASLE Friction and wear devices, 2nd ed., 1976