

Vplyv vysokej prevádzkovej teploty na funkčnosť ložísk

Elena Kantoríková, Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

E-mail: elena.kantorikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2763

The effect of high operating temperature on the functionality of bearings

Abstract: Rolling bearings are among the most important parts of machines and equipment. Many malfunctions in operation can be prevented by the correct choice of bearing, regular inspection and maintenance. The failure rate of the bearing is affected by many factors such as inappropriate storage, incorrect assembly, intrusion of foreign particles into the bearing spaces, inappropriately selected lubricant, or incorrect handling, transportation, etc. If damage or other deficiencies occur in rolling bearings, it is important to determine the cause of the damage so that appropriate measures can be taken to prevent their recurrence. Incipient damage to the bearing is reflected in the operation of the bearing, usually by a rise in temperature, or an increase in noise and stronger vibrations.

Keywords: bearings, temperature, deformations

ÚVOD

Valivé ložiská patria medzi najdôležitejšie časti strojov a zariadení. Sú neodmysliteľnou súčasťou všetkých rotačných mechanizmov. S rastúcimi požiadavkami, spoľahlivosť a predĺženie bez údržbového chodu strojných zariadení sa zákonite musí predlžovať aj životnosť ložísk samotných. U nápravových ložísk železničných vagónov sú kladené vysoké požiadavky na bezpečnosť prevádzky. Preto je potrebné spoľahlivé určenie ich životnosti. Existuje veľké množstvo faktorov ktoré vplývajú na životnosť ložiska. Podľa pôvodu vzniku ich môžeme rozdeliť do troch základných skupín. V prvej skupine sú to faktory súvisiace priamo z výrobou ložísk. Tu môžeme zaradiť vlastnosti samotného materiálu (*mikročistota, mikroštruktúra tvrdosť*), hodnoty rozmerových a geometrických parametrov, drsnosť funkčných plôch. Do druhej skupiny patria skladovacie podmienky a montáž. Nevhodným skladovaním ložísk môže dôjsť ku vzniku korózie na funkčných plochách prípadne ku znehodnoteniu maziva. Nesprávne vykonanou montážou môže vzniknúť poškodenie funkčných plôch (ryhy, alebo otlacky na obežných dráhach, valivých telieskach). Taktiež môže dôjsť k vniknutiu cudzích častíc do priestorov ložiska a pod. Do tretej skupiny faktorov, ktoré vplývajú na životnosť ložiska patria samotné prevádzkové podmienky.

Pre výrobu ložiskových krúžkov a valivých telies sa najčastejšie používajú *celokaliteľné chrómové ocele*. Obsah uhlíka pri týchto oceliach je cca 1 % a obsah chrómu cca 1,5 %. Najčastejšie sa kalia na tvrdosť

58 HRC až 65 HRC. Pri tvrdosti menšej než 60 HRC klesá dynamická únosnosť s každým stupňom HRC o 4 % až 8 % a statická únosnosť o 6 % až 9 %. Tieto ocele predstavujú optimálnu rovnovahu medzi výrobnými a prevádzkovými nákladmi.

Začínajúce poškodenie ložiska sa prejaví na chode ložiska, a to spravidla stúpaním teploty, alebo zvýšením hlučnosti a silnejšími vibráciami. Teplo vznikajúce v ložisku môže viesť k uvoľneniu presahu na čape, a tým k pootočeniu krúžku. Ohrevom dôjde k vymedzeniu vôle, a tým k obmedzeniu až vylúčeniu axiálneho posuvu krúžku voľného ložiska v telese. Preto na tento faktor kladieme pri navrhovaní uložení veľký dôraz [1, 2].

1 ZÁKLADNÉ PORUCHY POŠKODENIA VALIVÝCH LOŽÍSK

1.1 Pitting

Cyklické namáhanie obežných dráh krúžkov a valivých telies má za následok únavu materiálu. Normálna únavu sa prejavuje vznikom trhliniek a odlupovaním materiálu valivých plôch takzvaný *pitting*. Pri pokračujúcom namáhaní môže nastať i náhle nalomenie krúžku.

Poškodenie obežnej dráhy spôsobené nešetrnou montážou a priehlbiny v obežnej dráhe vzniknuté zavalcovaním tvrdých nečistôt počas prevádzky ložiska. Obe poškodenia sú neprípustného rozsahu a môžu byť zdrojom rozvoja únavového poškodenia - *pittingu*. Poškodenie obežných dráh vzniknuté nesprávnym postupom pri montáži sú z pravidla

ľahko rozpoznateľné, pretože ležia v rozstupoch valivých telies. Nebezpečné sú aj otlaky vzniknuté preťažením v stacionárnom stave, alebo vibráciami zariadení pri jeho transporte na veľké vzdialenosti, napríklad pri lodnej preprave [3].

1.2 Spalling a brinelling

K tvorbe *spallingu* dochádza najmä u povrchovo vytvrdzovaných súčastí. Vysoké kontaktné tlaky vyvolávajú v povrchových vrstvách šmykové napätia, ktoré spôsobujú vznik podpovrchových trhlín. Vetvenie trhlín má za následok oslabenie povrchovej vrstvy a odlúpnutie časti povrchu. Poškodený povrch potom pôsobí ako vrub a môže vyvolať prasknutie ložiskového krúžku.

Najčastejšou príčinou vzniku *spallingu* je nedostatočné mazanie, ktoré spôsobí vytvorenie nesúvislého mazacieho filmu na kontaktných plochách. Ďalšou príčinou môže byť vniknutie tvrdých častíc do ložiska alebo nesprávna montáž ložiska. Napríklad pri montáži jednoradových valčekových ložísk sa často odoberateľný krúžok násilím nasúva na krúžok s valčekmi, čím dochádza k poškodeniu funkčných plôch. Pri ložiskách sa často môžeme stretnúť s *brinellingom*, ktorý sa vyskytuje v dvoch modifikáciách, ako pravý (*true brinelling*) a falošný (*false brinelling*). Falošný *brinelling* sa často vyskytuje v ložiskách, ktoré sú v klúde, ale v blízkosti sa nachádzajú zariadenia, ktoré vyvolávajú vo svojej blízkosti vibrácie. Tieto vibrácie často vznikajú aj pri preprave ložísk, čomu je možné zabrániť oddelením vonkajších a vnútorných krúžkov ložiska, alebo fixáciou hriadeľa. Tento typ poškodenia sa môže vyskytnúť aj v prípade použitia maziva s vyššou viskozitou. Ak sa nevytvorí mazacia vrstva medzi valivými telieskami a obežnými dráhami ložiska, dochádza k priamemu kovovému styku valivých teliesok a krúžkov a ich vzájomnému pohybu. Gulôčky vytvárajú na povrchu jamky, valivé telieska s čiarovým stykom vytvárajú drážky. Veľmi často je *brinelling* sprevádzaný vytváraním *oxidických* zlúčenín, ktoré sa ukladajú na dne drážok vo forme jemnej červenohnedej vrstvy.

Pravý *brinelling* je zapríčinený plastickou deformáciou, keď je ložisko opakovane namáhané extrémnym zaťažením, vyšším než je jeho povolená únosnosť. Na tento druh poškodenia sú náchylnejšie ložiská s čiarovým stykom [4].

1.3 Korózia

Korózia vzniká vniknutím vody do maziva prípadne kondenzáciou pár a kapilárnou *eleváciou*. Korózia sa prejaví po dlhšom odstavení dvomi stopami po stranách valivých teliesok v zaťaženom mieste pod cca troma až piatimi telieskami. V niektorých prípadoch dochádza ku *transkryštalickej korózii*, čo

vedie ku neodstrániteľnému poškodeniu.

2 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIA ZABEZPEČUJÚCE OPTIMÁLNU PREVÁDZKOVÚ TEPLotu

2.1 Uloženie a zaťaženie

Vlastnosti ložísk sú naplno využité iba vtedy, keď sú ložiskové krúžky podopreté po celom obvode a celej šírke obežných dráh. Pevná oporná plocha môže mať valcový alebo kužeľový tvar, pri axiálnych ložiskách ide o rovinnú plochu. Oporné plochy musia byť vyrobené v odpovedajúcich presnostiach a nesmú na nich byť drážky, otvory a podobne. Okrem toho musia byť ložiskové krúžky spoľahlivo zaistené, aby sa pri zaťažení neotáčali v telese, alebo na hriadeli. Vhodné radiálne zaistenie a zodpovedajúce podoprenie sa dosiahne iba vtedy, ak sú ložiskové krúžky namontované s presahom. Ak sa však požaduje jednoduchá montáž a demontáž, prípadne axiálny posuv voľného ložiska v axiálnom smere, nie je možné voliť pevné uloženie oboch krúžkov.

Rotujúci hriadeľ alebo iná súčiastka uložená vo valivých ložiskách je nimi vedená v radiálnom aj axiálnom smere tak, aby bola splnená základná podmienka jednoznačnosti jeho pohybu. Súčiastka má byť, pokiaľ možno, staticky určite uložená, t. j. podoprená na dvoch miestach radiálne a v jednom mieste axiálne [5, 6].

Zaťaženie má priamy vplyv na voľbu veľkosti presahu v uložení. Čím je väčšie zaťaženie ložiska, tým sa musí voliť väčší presah v uložení. Obzvlášť to platí pre prípady rázového a vibračného zaťaženia ložiska. Pevné uloženie na čape, alebo v diere telesa vyvolá deformáciu krúžku, a tým dôjde k zmenšeniu radiálnej vôle. Aby bola v prípade pevného uloženia zabezpečená potrebná radiálna vôľa, je treba niekedy použiť ložiská so zväčšenou radiálnou vôľou. Výsledná vôľa po zmontovaní je závislá na type a veľkosti ložiska. Preto je nutné zvažovať veľkosť potrebného presahu uloženého krúžku podľa typu a veľkosti ložiska. Pre ložiska menších rozmerov sa volí menší presah a naopak. Ložisko sa upevňuje v radiálnom smere na lícovanej valcovej ploche čapu a diery v telese. V niektorých prípadoch sa pri upevňovaní na čap používa upínacie, alebo sťahovacie puzdro, prípadne možno ložisko upevniť priamo na kužeľový čap.

Správne radiálne upevnenie ložiska na čape a v telese má značný vplyv na využitie jeho únosnosti a na správnu funkciu uloženia. V zásadne by mali byť oba ložiskové krúžky uložené pevne, pretože iba tak sa dosiahne ich spoľahlivého podoprenia po celom obvode a radiálne upevnenie proti pretáčaniu. Pre uľahčenie montáže a demontáže, alebo na posúvanie voľného ložiska je dovolené posuvné uloženie jedného z krúžkov.

Pri voľbe správneho radiálneho upevnenia ložiska posudzujeme a zohľadňujeme vplyv spôsobu otáčania a veľkosť zaťaženia. Presnosť úložných plôch z hľadiska tolerancie a geometrických tvarou je dôležitá, preto že sa môže prenášať na obežné dráhy ložiskových krúžkov. Predovšetkým je to dôležité zohľadniť v návrhu uložení, u ktorých je kladený veľký dôraz na presnosť chodu [5, 6].

3 VPLYV TEPLoty NA ROZMEROVÚ STÁLOSŤ LOŽISK

Pri ochladiení ložiskových ocelí z *austenitizačnej* teploty rýchlosťou väčšou než kritická, je výsledná štruktúra tvorená martenzitom, *karbidickou fázou* a zvyškovým *austenitom*. Zvyškový *austenit* je v zakalenej ložiskovej oceli nežiaducou štruktúrnou fázou, lebo od určitého obsahu znižuje tvrdosť a jeho rozpad je príčinou rozmerovej nestability zakalených ložiskových súčastí. Rozmerová nestabilita je zapríčinená väčším merným objemom martenzitu ktorý vzniká pri rozpade zvyškového *austenitu*. K rozpadu zvyškového *austenitu* môže dôjsť počas montáže za tepla. Montáž za tepla je výhodná pre ložiská s valcovou dierou. Vyhovujúce rozťahnutie krúžkov pre ľahké nasunutie ložiska sa dosiahne zohriatím na 70 °C až 80 °C. Vyššie teploty nad 100 °C, znižujú tvrdosť ložiska a jeho trvanlivosť a môžu zmeniť aj jeho rozmery (okrem ložísk stabilizovaných pre prevádzku pri vyššej teplote) [7]. Ložiská určené pre vyššie prevádzkové teploty nad 120 °C sa označujú S0 – S5. Pri týchto ložiskách má obsah zvyškového *austenitu* výrazný vplyv na ich rozmerovú stálosť. Vysoké prevádzkové teploty by mali za následok rozpad zvyškového *austenitu*, preto je potrebné, aby bol jeho obsah pri týchto ložiskách (S0 – S5) minimálny. Jednou z možností je popúšťanie pri vyšších teplotách. Popúšťanie je možné rozdeliť podľa teplôt do štyroch štádií. V druhom štádiu 200 °C ÷ 300 °C je charakteristickým procesom premena zvyškového *austenitu*. Táto premena prebieha priamo a výsledkom rozpadu je štruktúra, ktorá by vznikla premenou podchladeného *austenitu* pri danej teplote. Kinetika premeny zvyškového *austenitu* pri popúšťaní je odlišná od premeny primárneho *austenitu* a je kontrolovaná difúziou uhlíka v *austenite*. Vzrastá pri nej merný objem, menia sa magnetické vlastnosti a uvoľňuje sa teplo. V tomto štádiu pokračujú premeny charakteristické pre prvé štádium, koherentná precipitácia ε-karbidu, resp. jeho obmedzený rast, zníženie presýtenosti uhlíka v martenzite na 0,1 %, zmena v stave dislokácií, reakcie atómov uhlíka s dislokáciami [8, 9].

Ďalšou možnosťou odstránenia zvyškového *austenitu* je kalenie so zmrazovaním. Používa sa vtedy ak teplota *martenzit finish* leží pod 0 °C, potom na dosiahnutie čo najväčšieho rozpadu zvyškového

austenitu na *martenzit* sa súčiastka ďalej chladí v zmrazovacích prostrediach. Kalit' sa môže priamo do zmrazovacieho kúpeľa. Toto má za následok vznik vysokých vnútorných napätí, deformácií a výskyt trhlin. Preto sa kalí do vody (oleja) a následne do zmrazovacieho kúpeľa. Zväčša stačí zmrazovať na teplotu -80 °C v kúpeli zo zmesi liehu a tuhého oxidu uhličitého. Pri *vysokolegovaných oceliach* sa na zmrazovanie používa tekutý dusík [10].

Tab. 1. Kritická teplota pre vznik teplotných zvyškových ťahových napätí.

Materiál	Teplota [°C]
Oceľ 11 600 (E335)	260
Oceľ 14 209 (100CrMn6)	240
Zliatina titánu VT3-1	910

Zvyškové napätia v povrchovej vrstve závisia od rozdelenia teplôt, tepelno-fyzikálnych parametrov obrábaného materiálu, jeho mechanických vlastností a spôsobu upevnenia súčiastky pri obrábaní. Pri následných operáciách, napríklad pri brúsení, sa tieto superponujú a menia znamienko. Ich konečné rozloženie v súčiastke sa stabilizuje až v prevádzke súčiastky v zariadení [11]. Tento jav by sme mohli nazvať dedičnosť zvyškových napätí. Doterajšie úvahy ukazujú, že pri procesoch obrábania, kde je intenzívna plastická deformácia pri nízkych teplotách (sústruženie, frézovanie...), vznikajú v povrchovej vrstve priority tlakové napätia. Naopak, ak dochádza k intenzívnemu ohrevu povrchovej vrstvy (brúsenie), vznikajú na povrchu ťahové napätia. Z predchádzajúceho možno konštatovať, že teplotné zvyškové napätia v ťahu môžu vznikáť v povrchovej vrstve obrobku len v tom prípade, ak vnútorné napätie vzniknuté pri ohreve prevýši medzu sklzu obrábaného materiálu a nastane v ňom plastická deformácia. Táto podmienka sa dá vyjadriť vzťahom:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot (\theta_2 - \theta_1) \geq R_e, \quad (1)$$

kde R_e je medza sklzu obrábaného materiálu s uvažovaním deformačného spevnenia.

Ak zanedbáme teplotu θ_1 pre jej malú hodnotu, možno z predchádzajúceho vzťahu napísať:

$$\theta = \frac{R_e}{\alpha \cdot E}, \quad (2)$$

kde θ je teplota ohrevu povrchovej vrstvy kovu, pri ktorej prekročení vznikajú teplotné zvyškové napätia [12].

Ohrev kalenej ocele môže viesť k rozpadu zvyškového *austenitu*, transformácii tetragonálneho martenzitu na kubický, alebo vytváraniu *feriticko-perlitickej* štruktúry (*troostit*, *sorbit*). Okrem toho takýto ohrev pri obrábaní vysokými reznými rýchlosťami môže vyvolať popustenie a miestne sekundárne zakalenie v dôsledku rýchleho odvodu

tepla do vnútra materiálu (pri obrábaní bez chladenia), alebo chladiacim prostredím (vzduch, kvapalina). Jednou z možností tepelnej úpravy je spôsob tepelného spracovania - umelé starnutie. Umelé starnutie sa vykonáva za účelom odstránenia vnútorných pnutí vyvolaných hrubým brúsením jednotlivých plôch na lož. súčiastiach. Proces umelého starnutia spočíva ohriatím lož. súčasti na predpísanú teplotu a výdržou na tejto teplote. Ložiskové krúžky nesmú byť znečistené od brúsneho kalu a povrch musí byť bez korózie [13, 14].

ZÁVER

Prevádzková teplota vplyva na životnosť valivých ložísk, preto je dôležité identifikovať príčiny vzniku deformácií a predvídať ich výskyt. Zvyškový *austenit* je nestabilná štruktúrna zložka, ktorá sa pôsobením tepla a napätí počas prevádzky alebo montáže za tepla rozpadá. Produkty rozpadu majú iný merný objem ako zvyškový *austenit*, tým dochádza k rozmerovým a geometrickým zmenám komponentov ložiska čo má za následok skrátenie životnosti ložiska.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená projektom KEGA 022ŽU-4/2021 Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky.

LITERATÚRA

- [1] ŽMINDÁK, M. - PALKECH, J. (2011): *Modelovanie vývinu tepla vo valčekových valivých ložiskách*. Tribotechnika.
- [2] ZAHRADNÍČEK, R. et al. (2015): *Materiály a komponenty*. Košice, ISBN 978-80-553-2019-9.
- [3] ORAVČÍK, V. (2018): *Poruchy valivých ložísk*. [Online].

[4] VASILKO, K. (2007): *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov: Tlačiareň COFIN, Prešov, s. 395-398, ISBN 978-80-8073-759-7.

[5] VÁCLAV, L. et al. (2009): *Trenie ložiska a ich mazanie*, [Online].

[6] LIŠČÍČ, B. et al. (2010): *Quenching Theory and Technology*. 2nd Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC, s. 97, ISBN 978-0-8493-9279-5.

[7] JECH, J. (1968): *Oceli na valivá ložiska a jejich tepelné zpracování*. Praha: SNTL, s. 280, ISBN 04-404-68.

[8] FABIÁN, P. - KEČKOVÁ, E. - BETÁK, P. (2007): *Tepelné spracovanie kovov*. Žilina: Tlačiareň Svidnícka, s.r.o., s. 93, ISBN 978-80-969592-7-3.

[9] BRUSILOVÁ, A. - GÁBRIŠOVÁ Z. (2012): *Najčastejšie príčiny porušenia valivých ložísk*. Tribotechnika.

[10] BEARING CORPORATION (2017): *Bearing failure*. [Online]. Dostupné na: <http://www.bearingcorporation.com/bearing-failure/>

[11] KINEX (2016): *Montáž, demontáž a poruchy valivých ložísk*. Dostupné na: http://www.kinex.sk/files/Servis_montaz_demontaz_a_poruchy_valivych_lozisk.pdf

[12] PSL (2011): *Technická príručka valivé ložiská*. [Online]. Dostupné na: http://www.psl.sk/downloads/27_2011_tp_vl_s.pdf.

[13] SEMRAD, K. (2018). *Mechanizmy a časti*. [Online]. Dostupné na: <http://web.tuke.sk/lf-kli/Semrad%20Karol/Mechanizmy%20a%20casti/05-Capy%20a%20loziska.pdf>.

[14] ZVL SLOVAKIA (2018): *Použitie, montáž a demontáž ložísk*. [Online]. Dostupné na: <https://www.zvlslovakia.sk/PDF/Pouzivanie-montaz-a-demontaz-lozisk.pdf>.