

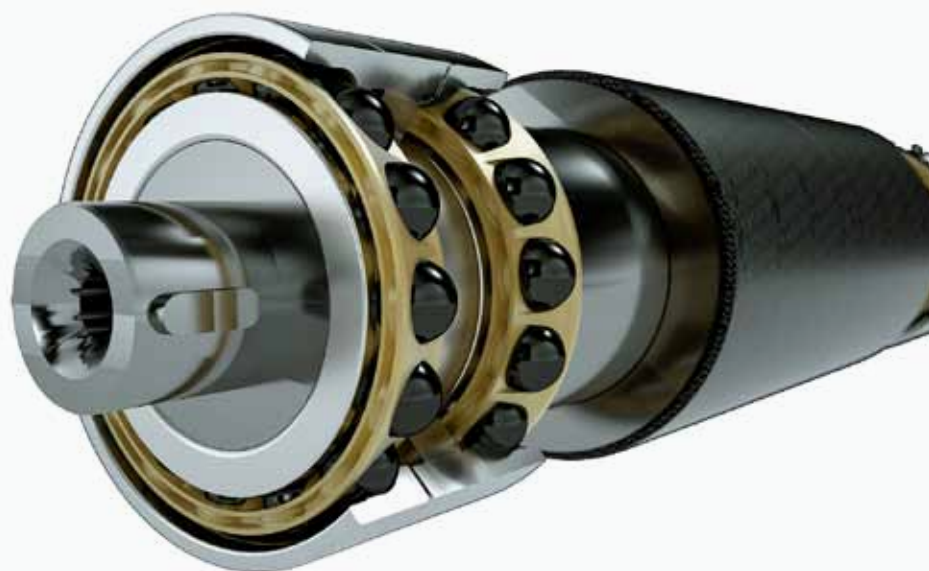
TECHNIKA

21 Tribologie v praxi

Díky kombinaci znalostí tribologie a vyspělých materiálů nabízí SKF vysoce výkonná řešení pro extrémně náročné aplikace s válečkovými ložisky s čárovým stykem

28 Všestrannější těsnění pro náročné podmínky

Sortiment kuličkových ložisek SKF Explorer pro těžké provozní podmínky s těsněním RSH byl rozšířen.



Uložení odstředivého kompresoru s hybridními ložisky

Výhody hybridních ložisek v náročných provozních podmínkách

Hybridní ložiska vykazují dobrou výkonnost při nedostatečném mazání a ve znečištěném prostředí. Zatím však nevíme, jaké mechanismy k tomu přispívají a jakým způsobem ovlivňují jejich výkonnost. Speciálně navržené pokusy a modely umožnily společnosti SKF získat podrobnější poznatky o tribologii hybridních ložisek.

HYBRIDNÍ LOŽISKA, tzn. ložiska s ocelovými kroužky a valivými tělesy z nitridu křemíku ložiskové kvality (Si_3N_4), nacházejí stále větší uplatnění v zařízeních navržených pro náročné podmínky [1-4] – např. ve vysokootáčkových bezolejových kompresorech klimatizačních a chladicích zařízení, všeobecných fluidních zařízeních, elektrických strojích a převodovkách. V některých z uvedených aplikací pracují ložiska v podmínkách mezního nebo smíšeného mazání, které spolu s pevnými částicemi nečistot ovlivňují jejich výkonnost. V režimu mezního nebo smíšeného mazání může dojít v závislosti na provozních podmínkách, součiniteli tření a chování při opotřebení →

stykových ploch k předčasnému porušení povrchu oběžných drah a ke vzniku únavových trhlin na povrchu [5,6]. Riziko vzniku poruchy na povrchu oběžných drah vzrůstá v důsledku kumulace únavového poškození. Ve znečištěném prostředí způsobí pevné částice zachycené v místě valivého styku vtisky se zvýšenými okraji. Okraje mohou porušit mazivový film, přestože ložisko pracuje za podmínek souvislého mazivového filmu. Tyto větší, avšak místní vtisky na povrchu způsobují předčasné únavové poškození povrchu [7, 8]. Speciálně navržené pokusy a modely, jejichž výsledky jsou zde představeny, porovnávají fyzikální mechanismy a výkonnost hybridních ložisek s celooceľovými ložisky. Zaměřují se především na typické povrchy ložisek v oblasti mazání tenkým mazivovým filmem a dále na vlastnosti větších vtisků

Chování povrchu v podmínkách nedostatečného mazání

Experimenty ukazují výrazné výhody, jaké nabízejí hybridní ložiska v podmínkách mezního nebo smíšeného mazání [1-4], a to včetně lepší odolnosti proti vzniku

porušení povrchu [3]. Na chování v místě hybridního valivého styku při nedostatečném mazání [6] se zaměřily pokusy, které podrobně zkoumaly únavové poškození ložisek, a kombinovaný model porušení povrchu a opotřebení (který je popisován v [5]). Výzkum rovněž zjistil, že výrazné zlepšení odolnosti proti vzniku únavového poškození povrchu v místě hybridního styku nelze vysvětlit pouze normálními rozdíly některých parametrů drsnosti v místech styku v celooceľových a hybridních ložiskách. Je třeba vzít v úvahu výrazné snížení (dvojnásobné) efektivního součinitele mezního tření v místě hybridního styku ve srovnání s celooceľovým ložiskem, jak ukázaly speciálně navržené testy [6].

Testy byly provedeny na svislém zařízení na zkoušení tření (obr. 1) za podmínek uvedených v tabulce 1 s axiálními válečkovými ložisky s oceľovými valivými tělesy (u nichž dochází k vyššímu cyklickému namáhání a rychlejšímu vývoji porušení povrchu než na ložiskových kroužcích) a kroužky z oceli nebo Si_3N_4 . Tato ložiska byla určena ke zkoumání celooceľového, resp. hybridního styku. Při testech byl používán rovný ložiskový

kroužek s leštěným povrchem, aby nedošlo k opotřebení valivých těles keramickým kroužkem s příliš velkou drsností povrchu. S tím lze souhlasit, protože typická drsnost povrchu keramických valivých těles hybridního ložiska je velmi nízká. Do numerických simulací byla zahrnuta rozdílná drsnost povrchu oceľového a keramického kroužku. Celooceľová ložiska a hybridní ložiska byla podrobena vždy čtyřem zkouškám v celkové délce šest hodin (s přestávkou po dvou a čtyřech hodinách). Poté byla testovaná valivá tělesa změřena optickým profilometrem (WYKO) a ke kvantifikaci plochy porušeného povrchu byl použit vlastní speciálně vyvinutý software. Jelikož po šestihodinové zkoušce nebylo zjištěno zřetelné poškození povrchu oceľového valivého tělesa, které se odvalovalo po keramickém kroužku, byly provedeny také delší zkoušky v délce 97 hodin (s přestávkou po 37 a 60 hodinách).

Obr. 2 ukazuje hlavní výsledek korelace mezi měřeními a numerickou simulací (modelem založeným na vzniku únavového poškození [6] a kombinovaným modelem únavového poškození a opotřebení [5]) plochy porušeného povrchu v místě hybridního nebo celooceľového styku za výše uvedených podmínek. Zcela zřetelně lze pozorovat postupnou kumulaci porušení povrchu v závislosti na čase v místě celooceľového styku, zatímco hybridní ložisko v podstatě nevýkazovalo porušení povrchu. Dále je patrné, že výsledky kombinovaného modelu porušení povrchu/ opotřebení s rychlostmi opotřebení

Max. tlak, hybridní/celooceľové	Otáčky ložiska	Provozní teplota	Označení ložiska	Stav mazání	Mazivo	Počet cyklů
GPa	min^{-1}	$^{\circ}\text{C}$		kappa		milióny
1,96 / 1,75	500	60	81108 TN	0,46	Minerální olej Turbo Shell T32	0,5, 1,0, 1,5; 9,25, 15, 24,25

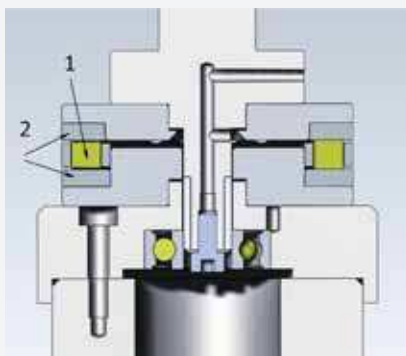
Tabulka 1: Zařízení na testování ložisek – zkušební podmínky

typickými pro hybridní styk (modré křivky) odpovídají experimentálním datům poněkud lépe než výsledky modelu, který nezahrnuje opotřebení (černé křivky).

Korelace mezi numerickou simulací a měřením plochy poškozené mikropittingem v místě hybridního a celoocelového styku ukazuje, že součinitel tření v místě celoocelového styku je v průměru dvakrát vyšší ve srovnání s hybridním stykem, což částečně vysvětluje vyšší odolnost hybridních ložisek proti porušení povrchu. Tento průměrný poměr byl rovněž zjištěn v předcházejících experimentech [7, 8]. Kromě nižšího součinitele mezního tření lze jako další důvody vyšší odolnosti místa hybridního styku proti porušení povrchu uvést nižší drsnost a výraznější zápornou šikmost drsnosti (tzn. že hluboké prohlubně převažují nad vysokými vrcholy) dílů z Si_3N_4 ve srovnání s celoocelovými ložisky.

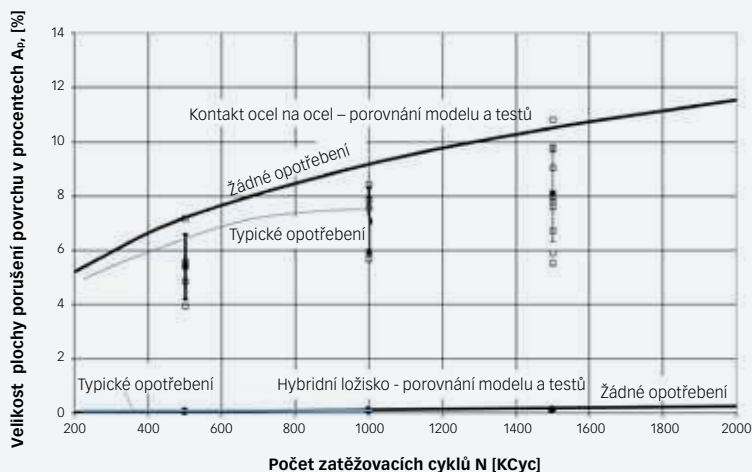
Samoobnovovací vlastnosti povrchu ve znečištěném prostředí

Přestože se většina prací zaměřuje na celoocelová ložiska, hlavním problémem při studiu mechanismu vývoje poškození a únavy povrchu v souvislosti s vtisky zůstává náhodná povaha vzniku vtisku. Kontrola počtu, geometrického tvaru a polohy vtisků představuje nadále velký problém. Z toho důvodu byly v mnoha studiích zavedeny umělé vtisky. Tyto vtisky provedené Rockwellovým tvrdoměrem s kuličkovým hrotem na oběžných drahách byly využity ke studiu zkrácení únavové trvanlivosti

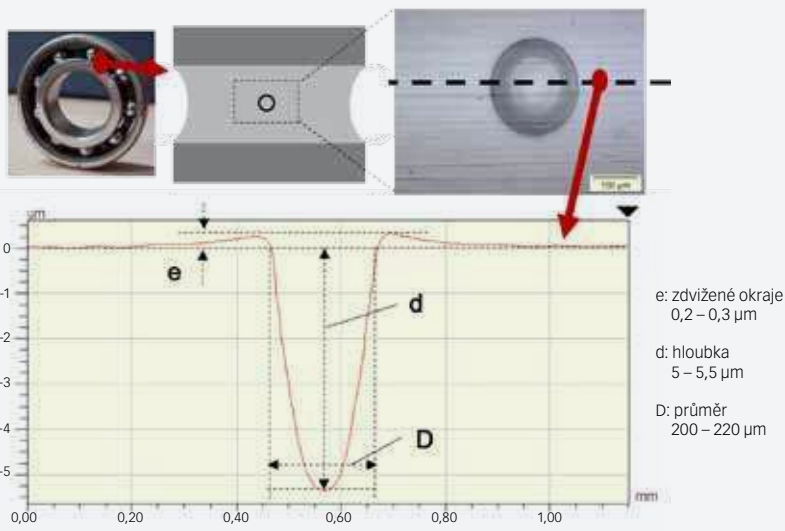


1. Zkušební vzorek:
Ocelový váleček
(celkem tři)
2. Kroužky ložiska:
Keramické nebo ocelové

Obr. 1: Schématický obrázek zařízení na testování ložisek



Obr. 2: Experimentální údaje (čtverečky) v porovnání s numerickými simulacemi (nepřerušovaná křivka) kumulace na ploše porušeného povrchu při rostoucím počtu cyklů za provozních podmínek uvedených v tabulce 1.

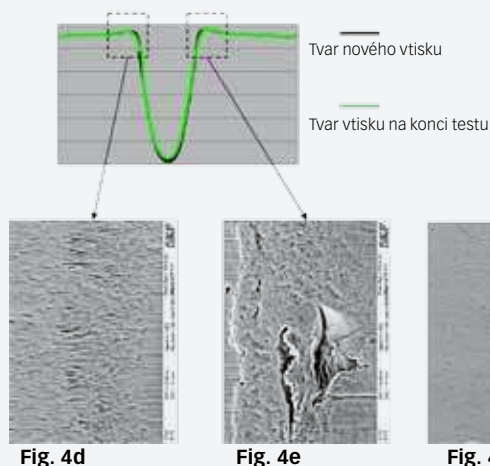


Obr. 3: Obrázek umělého vtisku na oběžné dráze vnitřního kroužku kuličkového ložiska a geometrie v řezu [9].

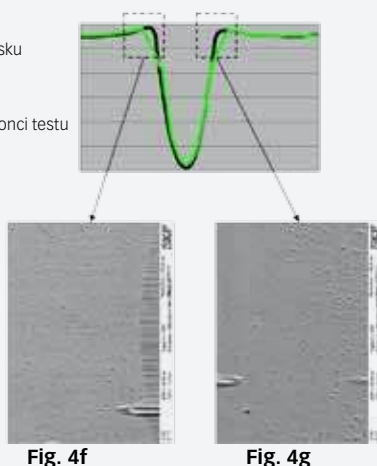


Obr. 4: a) Vývoj vzhledu vtisku v závislosti na době běhu

Obr. 4: b) Oběžná dráha vnitřního kroužku celooceťového ložíška



Obr. 4: c) Oběžná dráha vnitřního kroužku hybridního ložíška



Obr. 4: a) Vývoj vzhledu umělého vtisku v závislosti na době chodu, b) v celooceťovém ložíšku a související měření profilu vtisku, c) v hybridním ložíšku a související měření profilu vtisku. Detaily povrchu hran vtisku na zadní a přední straně v celooceťovém ložíšku, d) a e) a v hybridním ložíšku f) a g) [6].

a průběhu vývoje poškození při odvalování/prokluzování v celooceťových ložiskách. Na zadní hraně vtisku vzhledem ke směru odvalování bylo zjištěno odlupování. Větší prokluzování nebo vyšší povrchová třecí trakce by vznik povrchových trhlin urychlily. Šíření trhlin podporuje maximální ortogonální smykové napětí, které vzniká v blízkosti pod povrchem pod zadní hranou vtisku [7, 8]. Velikost těchto napětí závisí na geometrickém tvaru

vtisku, kvalitě maziva, jmenovitým tlaku v místě styku a velikosti poměru odvalování/prokluzování. Dále bylo modelováno porušení mazivového filmu na přední hraně vtisku ve spojení s opotřebením a jiným poškozením povrchu. Velmi málo publikovaných prací se zabývá chováním hybridních ložisek ve znečištěném prostředí. Průkopnická práce [3] prokázala vynikající odolnost hybridních ložisek proti opotřebení v případě mazání silně

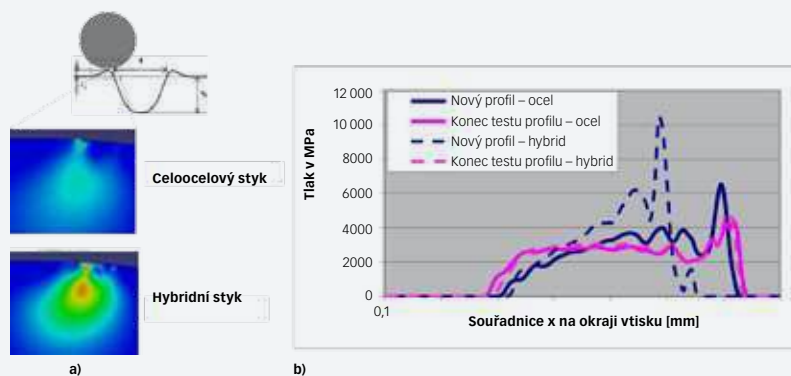
znečištěným olejem. Podle této práce působí „samoobnovovací mechanismus“, který souvisí s vyšším Youngovým modulem a tvrdostí Si_3N_4 . Tento mechanismus vyvolává plastickou deformaci zdvižených okrajů vtisků na ocelovém dílu, a tedy zabraňuje porušení povrchu, odlupování a destruktivnímu opotřebení.

Podrobnější objasnění a kvantifikace tohoto jevu si vyžádaly přímé porovnání experimentů s modelem umělých vtisků na oběžných drahách ocelových kroužků, přes něž se převalovala ocelová valivá tělesa a tělesa z Si_3N_4 [9]. Vtisky byly vytvořeny na vnitřním kroužku celooceťových a hybridních kuličkových ložisek (obr. 3). Ložiska byla následně testována za stejných provozních podmínek. Příklad na obr. 4 představuje provozní podmínky s velmi dobrým mazáním (souvislý mazivový film) a středně vysokým tlakem v místě styku. Jestliže vezmeme v úvahu Youngův modul kuliček z Si_3N_4 , znamená to, že v místě hybridního styku je za provozu poněkud vyšší jmenovitý tlak (viz např. tabulka 1). Při pravidelném přerušení testů kvůli prohlídce a měření byl zjištěn výrazný rozdíl ve stavu povrchu a změnách zdvižených okrajů vtisku mezi celooceťovými ložisky a hybridními ložisky (obr. 4a).

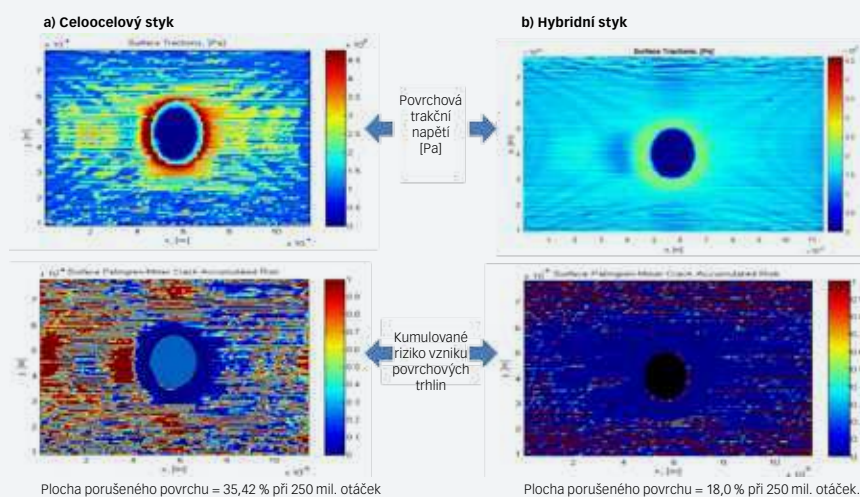
V celooceťovém ložíšku došlo k omezené plastické deformaci a změně tvaru zdvižených okrajů vtisku (obr. 4b). Toto omezené přetváření zajišťuje určitou úroveň rozdělení místního tlaku při převalování valivého tělesa přes zdvižené okraje vtisku, jak ukazuje obr. 5b. Navíc bylo zjištěno naprosto zřejmé poškození povrchu. Na přední hraně vtisku (obr. 4d), kde lze předpokládat porušení mazivového

filmu, byly pozorovány dva mechanismy: Určité povrchové adhezní opotřebení a povrchová plastická deformace vyvolané vrcholky nerovností, které způsobily mikrovrtisky, protože při převalování přes vtisk docházelo rovněž ke zdrsnění povrchu ocelových kuliček. Na zadní hraně vtisku, kde lze předpokládat vyšší koncentraci napětí, byly u celooceľového ložiska zjištěny povrchové plastické deformace způsobené vrcholky nerovností, které vytvořily mikrovrtisky na zdvižených okrajích vtisku. V závislosti na době běhu je materiál deformován a vtlačován do vtisku (obr. 4e). Současně vzniká malá povrchová trhlinka, která se pomalu šíří při dalším běhu ložiska. Model porušení povrchu [6, 7] ukazuje lokální kruh vysokého povrchového trakčního napětí a porušení (obr. 6a). V průběhu testů bylo rovněž zaznamenáno riziko vzniku trhliny odpovídající specifické poloze.

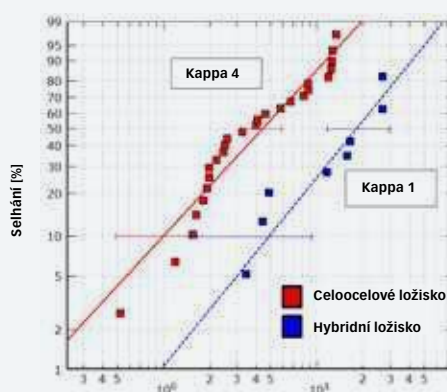
Nedlouho po uvedení do chodu vznikly v hybridním ložisku větší a plošší hrany vtisku (obr. 4a a 4c). Od samotného začátku bylo možné pozorovat na přední hraně, že mírné opotřebení odstranilo stopy po dokončovacím obrábění a udržovalo velmi hladký povrch (obr. 4f). Povrch kuliček z Si_3N_4 zůstal v dobrém stavu a kuličky si zachovaly původní drsnost. Předčasné sesednutí (plastická stabilizace) doprovázené vtlačováním materiálu do vtisku vysvětlila simulace elastoplastického napětí metodou konečných prvků (obr. 5a), která ukázala vyšší napětí, a tedy i vyšší místní deformaci v místě hybridního styku. Po další době chodu bylo rovněž zjištěno mírné opotřebení (obr. 4g) na zadní hraně. Toto rychlé mírné opotřebení, které přetváří hrany vtisku a mění jejich sklon



Obr. 5: a) Elastoplastický model 2D rovinné deformace suchého místa s oblastí vysokého von Misesova napětí pod zdviženými okraji. b) Porovnání místního rozložení tlaku při pružné deformaci zdviženého okraje při převalování v celooceľovém a hybridním ložisku – porovnání tvaru nového vtisku a vtisku po určité provozní době [6].



Obr. 6: Model porušení povrchu pro kumulované únavové poškození pro nový vtisk a simulace po 250 mil. otáček. Přední hrana se nachází vždy na pravé straně každého obrázku, zadní hrana na levé straně [6].



Obr. 7: Relativní trvanlivost celooceľového a hybridního ložiska po vzniku vtisku za stejných zatěžovacích podmínek; Mazací poměr (kappa) celooceľových a hybridních ložisek činila 4.

(obr. 4a), se v průběhu doby chodu stabilizuje a tvar vtisku se již dále nemění. Tlaky jsou dostatečně nízké, aby se mechanismus mírného opotřebení zastavil.

Ačkoli místní tlaky byly zpočátku v hybridních ložiskách vyšší, přetváření tvaru vtisku se projevilo poklesem místního tlaku na úroveň srovnatelnou s celoocelovým ložiskem (obr. 5b) při těchto zkušebních podmínkách. Kromě tohoto snížení místního tlaku ukázal model porušení povrchu [9, 10] pokles tlakového gradientu na hranách vtisku. Co je však ještě důležitější především z hlediska stavu tenkého mazivového filmu v místě hrany vtisku, model vzniku porušení povrchu ukazuje nižší povrchové trakční napětí a nižší kumulaci únavy neboli riziko vzniku trhliny (obr. 6b). Je to způsobeno nižším součinitelem mezního tření v místě hybridního styku [6].

Trvanlivost celoocelového a hybridního ložiska po vzniku vtisku byla stanovena při stejném zatížení obou ložisek (obr. 3). Hybridní ložisko, které pracuje s vyšším maximálním tlakem v místě styku a tenčím mazivovým filmem, dosahuje delší trvanlivosti po vzniku vtisku než celoocelové ložisko, které pracuje s nižším maximálním tlakem v místě styku a souvislým mazivovým filmem (obr. 7).

Může se zdát, že tato zjištění

jsou v rozporu s intuicí, avšak ilustrují výhody hybridních ložisek v případě nedostatečného mazání, působení vrcholků nerovností na povrchu a třecích napětí bez ohledu na to, zda jsou způsobena vtiskem nebo všeobecně nedostatečným mazáním. Popisovaný mechanismus kompenzuje případně hlubší vtisk v místě hybridního styku, který byl způsoben převládáním přes zachycenou částici za podmínek čistě valivého styku [11]. Tyto přednosti výrazně kompenzují vyšší tlak v hybridních ložiskách v určitém rozsahu zatěžovacích podmínek. Ve výjimečných případech, kdy v uloženích působí velmi vysoký tlak v místě styků, může být uvedený jev nepříznivě ovlivněn nebo potlačen. ●

Autoři:

C. Vieillard,

samostatný technolog zaměřený na keramické materiály,

V. Brizmer,

samostatný výzkumný pracovník,

Y. Kadin,

samostatný výzkumný pracovník,

G.E. Morales-Espejel,

vedoucí vědecký pracovník,

A. Gabelli,

samostatný vědecký pracovník, všichni autoři pracují ve výzkumném a vývojovém středisku SKF Engineering & Research Centre v nizozemském Nieuwegeinu.

Shrnutí

V hybridních ložiskách dochází k porušení povrchu v mnohem menší míře než v celoocelových ložiskách. Důvodem je nižší součinitel mezního tření a příznivější topografie drsnosti nitridu křemíku v ložiskové kvalitě.

V hybridních ložiskách dochází k mírnému opotřebení pouze ocelového dílu, zatímco keramický díl zůstává v podstatě beze změny.

Ve znečištěném prostředí přispívá mírné opotřebení, plastická deformace a zachování hladkých povrchů na hranách vtisku ke snížení místních napětí v hybridních ložiskách.

Dobrá odolnost proti porušení povrchu a poškození způsobenému při běhu za podmínek mezního mazání okolo vtisku, kde došlo k porušení mazivového filmu, prokazatelně přispěly k delší trvanlivosti hybridních ložisek po vzniku vtisku.

Odkazy

- [1] Lewinschal, L., "Bearings for high speed operation", SKF Evolution, č. 2 1994, str. 22-26. <http://evolution.skf.com/bearings-for-high-speed-operations/>
- [2] Hultman, A., Weimarck, A. K., "Ceramics stand up to harsh realities", SKF Evolution, č. 4 1998, str. 25-26. <http://evolution.skf.com/ceramics-stand-up-to-harsh-realities/>
- [3] Gabelli, A., Kahlman, L., "Bearings that heal themselves", SKF Evolution č. 3 1999, str. 26-28. <http://evolution.skf.com/bearings-that-heal-themselves-2/>
- [4] Morales Espejel, G. E., Hauleitner, R., Wallin, H. H., "Pure refrigerant lubrication technology in oil-free centrifugal compressors", SKF Evolution, č. 1 2017, str. 26-30. <http://evolution.skf.com/pure-refrigerant-lubrication-technology-in-oil-free-centrifugal-compressors/>
- [5] Morales-Espejel, G.E., and Brizmer, V. (2011), "Micropitting Modelling in Rolling-Sliding Contacts: Application to Rolling Bearings", Tribol. Trans., 54(4), str. 625-643.
- [6] Brizmer, V., Gabelli, A., Vieillard, C., and Morales-Espejel, G.E. (2015), "An Experimental and Theoretical Study of Hybrid Bearing Micropitting Performance under Reduced Lubrication", Tribology Transactions, 58, str. 829-835.
- [7] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., "The behaviour of indentation marks in rolling-sliding elastohydrodynamically lubricated contacts", Tribology Transactions, 54, str. 589-606, 2011.
- [8] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., "The progression of surface rolling contact fatigue damage of rolling bearing with artificial dents", Tribology Transactions, 58, str. 418-431, 2015.
- [9] C. Vieillard, Y. Kadin, G.E. Morales-Espejel, A. Gabelli (2016), "An experimental and theoretical study of surface rolling contact fatigue damage progression in hybrid bearings with artificial dents", Wear, str. 364-365, str. 211-223.
- [10] Morales-Espejel, G. E., Brizmer, V., Stadler, K., "Understanding and preventing surface distress", SKF Evolution, č. 4 2011, str. 26-31. <http://evolution.skf.com/understanding-and-preventing-surface-distress/>
- [11] V. Strubel, N. Fillot, F. Ville, J. Cavoret, P. Vergne, A. Mondelin, Y. Maheo., "Particle entrapment in hybrid lubricated point contacts", Tribology Transactions 2016, vyd. 59, č. 4, str. 768-779.