



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV NÁPLNĚ PLASTICKÉHO MAZIVA NA PROVOZNÍ PARAMETRY VALIVÉHO LOŽISKA

INFLUENCE OF GREASE FILLING ON THE OPERATING PARAMETERS OF ROLLING BEARING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Gímeš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Martin Gímeš**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv náplně plastického maziva na provozní parametry valivého ložiska

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studie naznačují, že počáteční procento plnění ložiska mazivem lze razantně snížit. Objemový tok plastického maziva nebo ztráty uvolněného oleje z vytvořených rezervoárů tak nemusejí mít vliv na správný provoz ložiska. V současné době není optimální hodnota plnění známá, ložiska tak mohou být zbytečně přeplněna nepotřebným množstvím plastického maziva, což může způsobovat např. ztráty ve tření. Stanovení optimální dávky plastického maziva, která by byla nižší, než v současnosti standardně používaná by mohlo ušetřit značné náklady vzhledem k počtu vyráběných ložisek.

Typ práce: výzkumná
Výstup práce: publikační výsledek (J, D)
Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je zjistit, jaký vliv má úroveň počáteční náplně plastického maziva ve valivém ložisku na jeho provozní podmínky.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled v oblasti mazání valivých ložisek plastickými mazivy,
- navrhnout úpravu současného zařízení pro pozorování a měření,
- realizovat experimenty, zjistit vliv plnění na provozní podmínky,
- interpretovat výsledky a sepsat výstupy práce.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SHETTY, Pramod, 2024. On the film thickness in grease lubricated deep groove ball bearings. Online. 2024-05-29. Dostupné z: <https://doi.org/10.3990/1.9789036561679>.

SHETTY, Pramod, Robert Jan MEIJER, Jude A. OSARA, Rihard PASARIBU a Piet M. LUGT. Effect of Grease Filling on the Film Thickness in Deep-Groove Ball Bearings. Tribology Transactions [online]. 2024, 67(1). ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2023.2282632.

DE LAURENTIS, Nicola, Amir KADIRIC, Piet LUGT a Philippa CANN. The influence of bearing grease composition on friction in rolling/sliding concentrated contacts. Tribology International [online]. 2016, 94. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2015.10.012.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá vplyvom úrovne plnenia plastického maziva na prevádzkové parametre kuželikového valivého ložiska. Pozornosť je venovaná predovšetkým teplotnému správaniu ložiska, priebehu zábehovej fázy a úniku maziva pri rôznych úrovniach plnenia. Experimentálne merania boli realizované na upravenom skúšobnom zariadení umožňujúcom opakovateľné testovanie pri definovaných podmienkach. Porovnávané boli rôzne úrovne plnenia plastického maziva a sledovaný ich vplyv na správanie ložiska. Vyhodnotenie bolo vykonané na základe merania prevádzkovej teploty a množstva uniknutého maziva. Výsledky ukázali, že úroveň plnenia plastického maziva ovplyvňuje prevádzkové správanie ložiska predovšetkým počas zábehovej fázy. Pri vyšších úrovniach plnenia bol pozorovaný nárast prevádzkovej teploty aj množstva uniknutého maziva. V skúmaných podmienkach sa ako najvhodnejšie ukázalo plnenie približne 30 % voľného objemu ložiska, pri ktorom bol dosiahnutý priaznivý kompromis medzi prevádzkovou teplotou a veľkosťou úniku maziva. Výsledky práce rozširujú experimentálne poznatky o mazaní valivých ložísk plastickými mazivami a vytvárajú základ pre ďalší výskum pri odlišných prevádzkových podmienkach a dlhodobom testovaní.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

kuželikové valivé ložisko, plastické mazivo, úroveň plnenia, prevádzková teplota, únik maziva

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the influence of grease fill level on the operating parameters of a tapered roller bearing. Attention is primarily focused on the thermal behaviour of the bearing, churning behaviour, and grease leakage at different filling levels. Experimental measurements were carried out using a modified test rig enabling repeatable testing under defined conditions. Different grease filling levels were compared, and their influence on bearing behaviour was evaluated. The assessment was based on measurements of operating temperature and the amount of leaked grease. The results showed that grease filling level affects bearing operating behaviour, particularly during the churning phase. Higher filling levels resulted in greater grease leakage, while operating temperature did not show a clear dependence on grease quantity. Under the investigated conditions, a filling level of approximately 30 % of the free bearing volume provided the most favourable compromise between operating temperature and grease leakage. The results extend experimental knowledge of grease lubricated rolling bearings and create a basis for further research under different operating conditions and long term testing.

KEYWORDS

tapered roller bearing, grease lubrication, fill level, operating temperature, grease leakage

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

GÍMEŠ, Martin. *Vliv náplně plastického maziva na provozní parametry valivého ložiska*. Brno, 2026, 94 s. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/239596>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som rád poďakoval vedúcemu mojej diplomovej práce, doc. Ing. Petrovi Svobodovi, Ph.D., za odborné vedenie, cenné rady, trpezlivosť a podporu počas celého spracovania diplomovej práce. Jeho odborné pripomienky, ochota konzultovať jednotlivé časti práce a cenné odporúčania významne prispeli k úspešnému dokončeniu tejto práce.

Ďalej by som chcel poďakovať všetkým, ktorí mi poskytli odbornú, technickú alebo materiálnu podporu počas realizácie experimentálnej časti práce a pri spracovaní získaných výsledkov.

Osobitné poďakovanie patrí mojej rodine a blízkym za ich trpezlivosť, podporu a povzbudenie počas celého štúdia. Ich porozumenie a motivácia boli dôležitou oporou pri vypracovaní tejto diplomovej práce.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Vyhlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobodu, Ph.D. Zároveň vyhlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

Pri spracovaní práce bol využitý nástroj generatívnej umelej inteligencie ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) v asistenčnej úlohe v rozsahu povolenom pravidlami VUT a pokynmi vedúceho práce, najmä pri jazykovej korektúre, štylistických úpravách a konzultácii štruktúry textu.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	14
2.1	Rešeršné metódy	14
2.2	Kritická rešerš	16
2.2.1	Elastohydrodynamické podmienky kontaktu vo valivých ložiskách	16
2.2.2	Prevádzkové fázy plastického maziva vo valivom ložisku	18
2.2.3	Úroveň náplne plastickým mazivom	21
2.2.4	Zloženie plastických mazív	25
2.2.5	Vplyv prevádzkových podmienok a veľkosti ložiska	28
2.3	Zhrnutie hlavných zistení	31
2.4	Medzera v poznaní	32
3	CIELE PRÁCE	34
3.1	Ciele výskumu	34
3.2	Výskumné otázky	34
3.3	Hypotézy	35
4	MATERIÁL A METÓDY	36
4.1	Metodika	36
4.2	Experimentálne zariadenie a prístrojové vybavenie	37
4.2.1	Zostava experimentálneho zariadenia	37
4.3	Materiál a testovacie podmienky	41
4.3.1	Ložisko	41
4.3.2	Mazivá	42
4.3.3	Testovacie podmienky a testované kombinácie	43
4.4	Metódy	45
4.4.1	Príprava valivých ložísk	45
4.4.2	Skúšobný postup	46
4.4.3	Spracovanie získaných dát	48
4.5	Testované predikcie	51
5	VÝSLEDKY	52
5.1	Konštrukčná úprava testovacieho zariadenia	52

5.2	Teplotné charakteristiky	57
5.2.1	Mazivo SHC100	58
5.2.2	Mazivo SHC220	61
5.2.3	Mazivo XHP222	64
5.3	Únik plastického maziva	67
5.3.1	Mazivo SHC100	67
5.3.2	Mazivo SHC220	68
5.3.3	Mazivo XHP222	68
5.4	Separovaný olej	69
6	DISKUSIA	71
6.1	Interpretácia výsledkov	71
6.1.1	Variabilita meraní	71
6.1.2	Teplotné charakteristiky	72
6.1.3	Únik a distribúcia plastického maziva	76
6.1.4	Prenositelnosť výsledkov	79
6.2	Vyhodnotenie výskumných otázok a hypotéz	80
6.3	Odporúčania pre úroveň plnenia	82
7	ZÁVER	83
8	VÝSLEDKY VÝSKUMU PODĽA RIV	85
9	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	86
10	ZOZNAM POUŽITÝCH ZKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	89
11	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	91
12	ZOZNAM TABULIEK	94

1 ÚVOD

Valivé ložiská patria medzi základné súčasti rotačných strojov a ich prevádzková spoľahlivosť výrazne ovplyvňuje životnosť aj energetickú efektivitu technických zariadení. Približne 80 až 90 % valivých ložísk je mazaných plastickými mazivami, a to najmä vďaka jednoduchšej aplikácii, nízkym prevádzkovým nárokom a schopnosti zotrvať v ložisku počas prevádzky. Časť ložísk býva naplnená na celú prevádzkovú životnosť, zatiaľ čo iné sú počas prevádzky pravidelne domazávané. Množstvo plastického maziva preto predstavuje významný parameter ovplyvňujúci prevádzkové vlastnosti ložiska.

Tradične bývajú ložiská často plnené väčším množstvom plastického maziva s cieľom zabezpečiť dostatočné mazanie kontaktov počas prevádzky. Novšie experimentálne štúdie však naznačujú, že nadmerné množstvo maziva nemusí vždy viesť k priaznivejším prevádzkovým podmienkam. Vyššie plnenie môže viesť k zvýšeniu objemu plastického maziva v pohybe, nárastu prevádzkovej teploty alebo vyšším energetickým stratám. Súčasne dochádza k väčšiemu úniku maziva mimo pracovnú oblasť, čo predstavuje zníženie efektivity využitia maziva. Naopak nižšie úrovne plnenia môžu v určitých prípadoch viesť k priaznivejším prevádzkovým podmienkam pri zachovaní dostatočného mazania kontaktov. Optimálne množstvo plastického maziva však závisí od viacerých faktorov, medzi ktoré patria typ ložiska, prevádzkové zaťaženie, otáčky alebo vlastnosti použitého maziva.

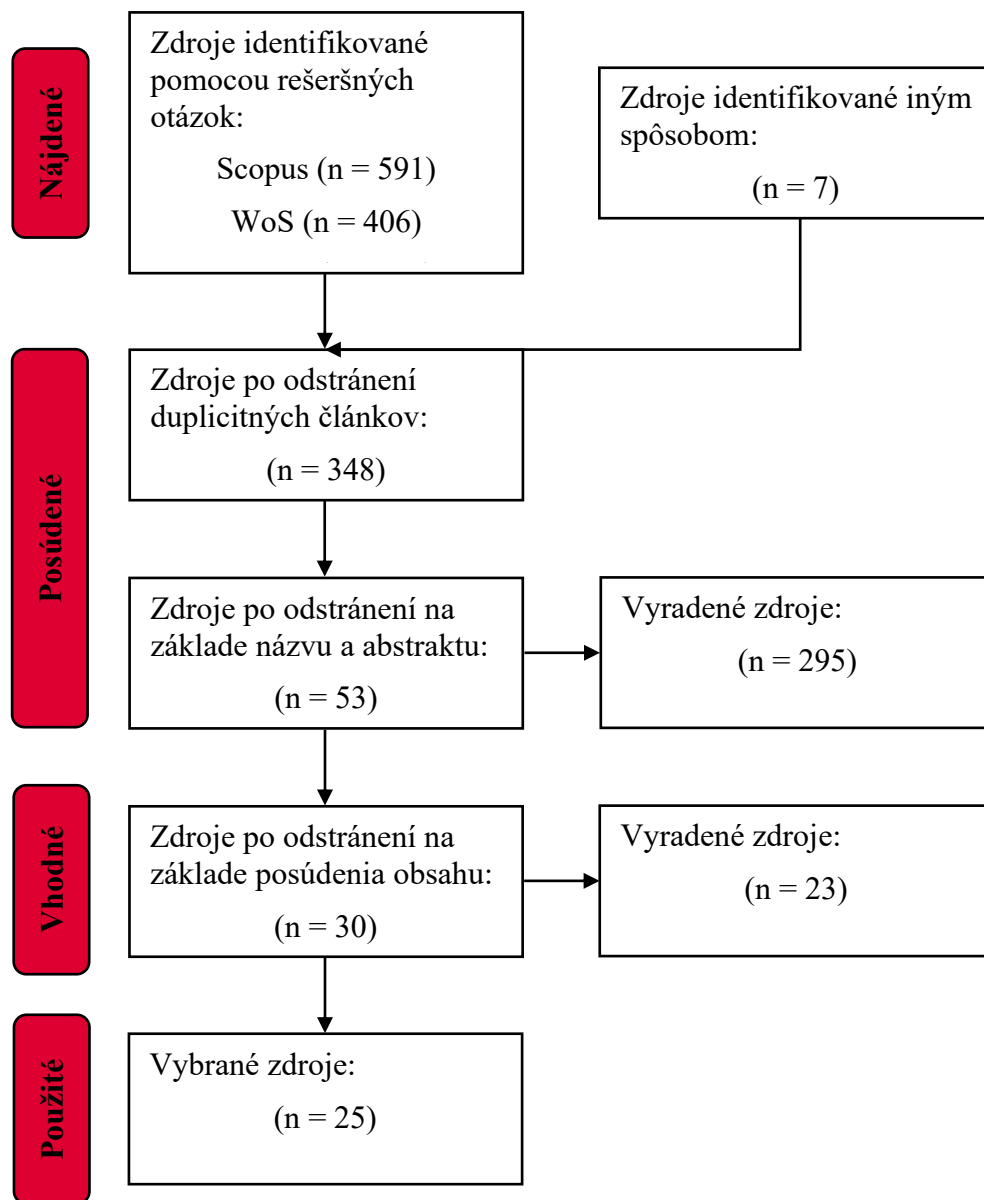
Táto diplomová práca sa zaoberá experimentálnym skúmaním vplyvu úrovne plnenia plastického maziva na prevádzkové parametre kuželikového valivého ložiska. Pozornosť je venovaná predovšetkým teplotnému správaniu ložiska, priebehu zábehovej fázy a úniku maziva pri rôznych úrovniach plnenia. Cieľom práce je prispieť k lepšiemu pochopeniu vplyvu množstva plastického maziva na prevádzkové správanie ložiska a posúdiť vhodnosť jednotlivých úrovní plnenia pre skúmané podmienky.

2 PREHL'AD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2.1 Rešeršné metódy

Výber informačných zdrojov zaoberajúcich sa riešenou problematikou boli na základe výskumných otázok formulované rešeršné dotazy, ktoré boli aplikované v databázach WoS a Scopus. Vyhľadávanie bolo postupne spresňované doplnením relevantných kľúčových slov a ich synonym s cieľom zabezpečiť čo najvyššiu relevanciu výsledkov. Získané publikácie boli následne podrobené systematickému výberovému procesu, ktorý zahŕňal odstránenie duplícít, triedenie podľa názvu a abstraktu a následné posúdenie plného textu z hľadiska tematickej relevancie a technickej hĺbky. Do finálneho súboru pre kritickú rešerš bolo zaradených 20 vedeckých publikácií a ďalšie zdroje, v celkovom počte 25. Podrobný postup identifikácie, selekcie a vyradenia zdrojov je znázornený na Obr. 2-1. Rešeršné otázky boli formulované nasledovne:

- 1) Aké prevádzkové fázy možno identifikovať pri chode valivého ložiska mazaného plastickým mazivom a ako prebieha distribúcia maziva v jednotlivých fázach?
- 2) Ako zloženie a reologické vlastnosti plastických mazív ovplyvňujú správanie maziva pri prevádzke valivých ložísk?
- 3) Ako úroveň plnenia plastickým mazivom ovplyvňuje prevádzkové charakteristiky valivého ložiska?
- 4) Ako rýchlosť otáčania, zaťaženie a rozmery ovplyvňujú prevádzkové charakteristiky valivého ložiska?



Obr. 2-1 PRISMA diagram práce

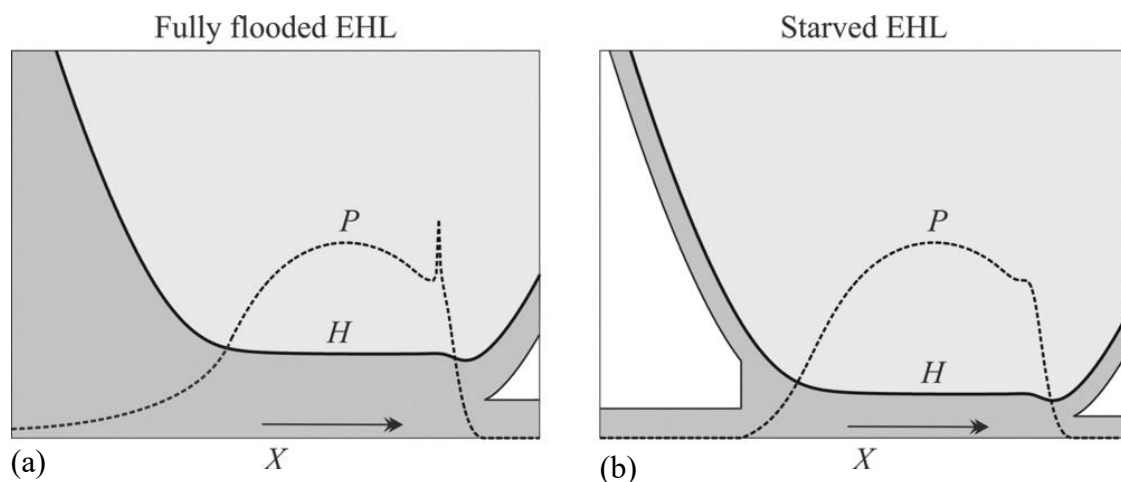
2.2 Kritická rešerš

V tejto kapitole je riešená problematika elastohydrodynamických podmienok kontaktu vo valivých ložiskách, pri ktorých je tvorba mazacieho filmu podmienená geometriou styku, veľkosťou kontaktného tlaku, elastickou deformáciou povrchov a režimom zásobovania kontaktu mazivom. Súčasne je rozoberané prevádzkové správanie plastického maziva vo vnútornom priestore ložiska, teda zábehová fáza s redistribúciou maziva, následná fáza uvoľňovania oleja a podmienky, za ktorých môže byť vyvolaný spätný tok maziva do kontaktnej oblasti. Ďalej je posudzovaná úroveň náplne plastickým mazivom, keďže práve množstvo maziva vo voľnom objeme ložiska je spájané s teplotným režimom, trecími stratami, dĺžkou zábehovej fázy aj podmienkami tvorby mazacieho filmu. Popri tom je analyzovaný vplyv zloženia plastických mazív. Kriticky je hodnotený aj vplyv prevádzkových podmienok, najmä rýchlosti otáčania a zaťaženia, ako aj vplyv veľkosti ložiska, keďže týmito faktormi je ovplyvňovaná miera hladovania, dynamika dopĺňania maziva do kontaktu, aj výsledná hrúbka mazacieho filmu.

2.2.1 Elastohydrodynamické podmienky kontaktu vo valivých ložiskách

Elastohydrodynamické podmienky kontaktu vo valivých ložiskách sú ovplyvňované geometriou styku medzi valivými telesami a obežnými dráhami, pričom zaťaženie je prenášané v relatívne malej kontaktnej oblasti. V tejto oblasti sú generované vysoké kontaktné tlaky a súčasne je vyvolaná elastická deformácia povrchov, čo vedie k zmene vlastností maziva. Kombinácia valivého pohybu a čiastočného klzania je v kontakte vždy prítomná, pričom jej účinok sa prejavuje najmä na podmienkach tvorby mazacieho filmu a spôsobe prenosu zaťaženia. Za takto definovaných podmienok je v ložiskách spravidla uplatňovaný elastohydrodynamický režim mazania (EHL), pri ktorom je separácia povrchov zabezpečená tenkou vrstvou maziva. [1, 2]

Tvorba mazacieho filmu v EHL kontakte je podmienená súčasným pôsobením hydrodynamického účinku a elastickej deformácie kontaktných telies. Zvýšenie tlaku v kontakte spôsobuje rast viskozity maziva, čím je umožnené prenášanie zaťaženia prostredníctvom mazacieho filmu. Vstupná oblasť kontaktu je charakterizovaná nárastom tlaku a postupným vytváraním filmu, zatiaľ čo vo výstupnej oblasti dochádza k jeho lokálnemu zúženiu sprevádzanému tlakovým maximom. Typické rozdelenie tlaku a hrúbky mazacieho filmu je schematicky zobrazené na Obr. 2-2. V prípade dostatočného prívodu maziva je dosahovaný plne zaplavený režim, zatiaľ čo pri obmedzenom zásobovaní kontaktu nastáva hladovanie (starvation), ktoré sa prejavuje poklesom hrúbky filmu a posunom oblasti jeho tvorby smerom ku kontaktu. [1, 3]



Obr. 2-2 Schematické znázornenie rozdelenia tlaku (P) a hrúbky mazacieho filmu (H) v elastohydrodynamickom kontakte; (a) plne zaplavený kontakt; (b) pri hladovaní kontaktu [1]

Medzi faktory ovplyvňujúce podmienky v elastohydrodynamickom kontakte patrí aj geometria styku medzi valivými telesami a obežnými dráhami. V guľôčkových ložiskách je vytváraný bodový kontakt, zatiaľ čo vo valčekových a kuželíkových ložiskách je prítomný líniový kontakt. Pri bodovom kontakte je zaťaženie koncentrované na menšej ploche, čím sú dosahované vyššie maximálne tlaky, zatiaľ čo pri líniovom kontakte je zaťaženie rozložené na väčšiu oblasť a kontaktné tlaky sú nižšie. Uvedené rozdiely sú v odbornej literatúre primárne analyzované na základe Hertzovej teórie, pričom sa sústreďujú najmä na rozdelenie tlaku a veľkosť kontaktnej oblasti. Vplyv geometrie na elastohydrodynamické mazanie je preto spravidla posudzovaný nepriamo, prostredníctvom zmien tlakového poľa a kontaktnej šírky, ktoré následne ovplyvňujú podmienky tvorby mazacieho filmu. V prípade mazania plastickým mazivom však nie sú tieto podmienky určované len geometriou kontaktu, ale aj prevádzkovým správaním maziva. [1, 3]

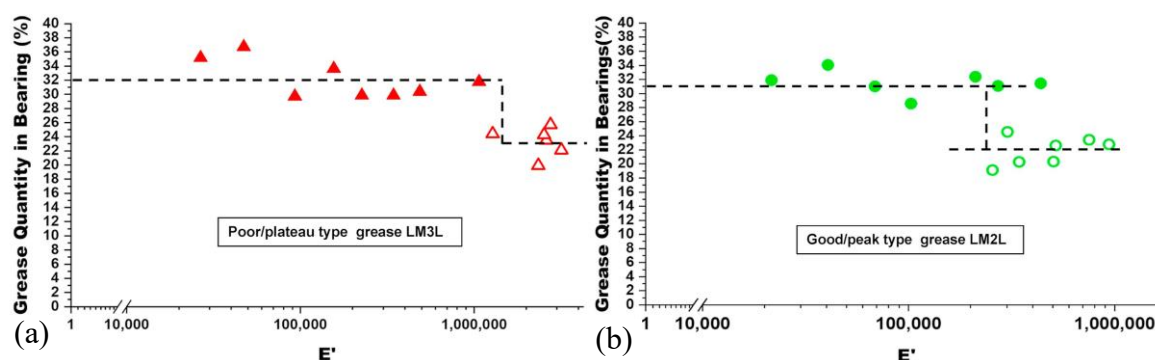
2.2.2 Prevádzkové fázy plastického maziva vo valivom ložisku

Po naplnení valivého ložiska plastickým mazivom a jeho uvedení do prevádzky dochádza k postupnej redistribúcii maziva v jeho vnútornom priestore. Mazivo pritom nevystupuje ako homogénny objem, ale mení sa jeho priestorové rozmiestnenie aj mechanizmus prívodu mazacieho oleja do kontaktnej oblasti [4]. V odbornej literatúre je preto jeho správanie opisované prostredníctvom niekoľkých na seba nadväzujúcich prevádzkových fáz. Bezprostredne po spustení prebieha zábehová fáza (churning phase), počas ktorej je mazivo intenzívne premiešavané a vytláčané z oblasti valivých dráh do menej namáhaných častí ložiska, kde dochádza k jeho akumulácii. Po redistribúcii je mazanie zabezpečované najmä uvoľňovaním základového oleja zo štruktúry maziva (bleeding phase). Pri nedostatočnom prísune oleja do kontaktu môže dôjsť k hladovaniu, pričom za určitých podmienok môže byť pozorovaný aj čiastočný spätný tok maziva do kontaktnej oblasti (reflow phase). Uvedené fázy sa premietajú do tvorby mazacieho filmu, veľkosti trecích strát aj teplotného režimu ložiska. [4, 5]

Zábehová fáza

Bezprostredne po uvedení ložiska do prevádzky prebieha zábehová fáza, počas ktorej dochádza k intenzívnemu premiešavaniu plastického maziva v jeho vnútornom priestore. V počiatočnom štádiu sa značná časť maziva nachádza v oblasti valivých dráh medzi valivými telesami, čo sa prejavuje zvýšeným odporom proti pohybu, vyššími trecími stratami a nárastom teploty [5]. Pôsobením valivých telies je mazivo postupne vytláčané z aktívnej oblasti (swept area) do neaktívnej oblasti ložiska (unswept area), kde sa akumuluje vo forme rezervoárov. Tento proces je opisovaný ako postupná redistribúcia maziva počas zábehu. Priebeh zábehovej fázy býva ďalej členený na tvorbu mazacej dráhy (channeling) a následné čistenie valivej dráhy (clearing) [6]. Počas tvorenia mazacej dráhy dochádza k rýchlemu vytlačeniu väčšiny maziva z oblasti valivých dráh, často už počas prvých otáčok ložiska, čím vzniká kanál s výrazne zníženým množstvom maziva v kontakte. Na to nadväzuje čistenie valivej dráhy, počas ktorej sa zvyšné množstvo maziva postupne presúva mimo aktívnu oblasť. Ukončenie zábehovej fázy je spojené so stabilizáciou teploty a výrazným obmedzením makroskopického prúdenia maziva. Jej dĺžka závisí od veľkosti ložiska, prevádzkových podmienok a vlastností maziva a pohybuje sa spravidla v rozsahu jednotiek až desiatok hodín. [4, 6]

Uvedený priebeh redistribúcie maziva počas zábehovej fázy bol experimentálne skúmaný Chatra et al. [6] na guľôčkovom ložisku s hlbokou drážkou (deep groove ball bearing, DGBB) naplnenom plastickým mazivom na úroveň 30 % voľného objemu. V experimente boli použité lítiové plastické mazivá LM2L (špičkový typ) a LM3L (plató typ), ktoré sa líšili najmä koncentráciou zahusťovadla a tým aj reologickými vlastnosťami. Počiatočné množstvo maziva bolo uvažované ako 100 % objemu vo vnútri ložiska. Ako je znázornené na Obr. 2-3, už počas prvých minút prevádzky dochádza k poklesu tohto množstva približne na 30 až 35 %, čo poukazuje na rýchlu redistribúciu maziva z aktívnej oblasti do neaktívnej oblasti, najmä na kryty ložiska. Následne sa množstvo maziva vo valivej dráhe ďalej mierne znižuje a ustáli sa približne na úrovni 22 až 24 %, pričom rozdiel medzi jednotlivými mazivami sa prejavuje predovšetkým v rýchlosti dosiahnutia ustáleného stavu. [6]



Obr. 2-3 Podiel maziva vo vnútri valivého ložiska typu 6204-2Z/C3 s pôvodnou náplňou 30% v závislosti od dodanej energie E' počas zábehovej a následnej fázy porovnanie mazív; (a) LM2L (špičkového typu); (b) LM3L (plató typu) [6]

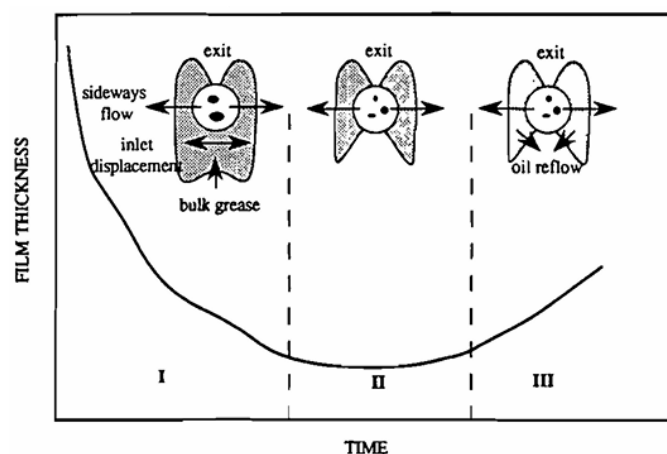
Stabilizovaná fáza prevádzky

Po ukončení zábehovej fázy nastáva stabilizovaná fáza prevádzky, označovaná aj ako fáza uvoľňovania oleja, v ktorej je plastické mazivo akumulované prevažne v neaktívnej oblasti ložiska, kde sa nachádza vo forme rezervoárov. Mazanie kontaktu je v tejto fáze zabezpečované predovšetkým uvoľneným olejom, ktorý sa postupne uvoľňuje zo štruktúry zahusťovadla a je privádzaný do oblasti valivého kontaktu. Množstvo oleja dostupného v kontakte je výsledkom rovnováhy medzi jeho prísunom z rezervoárov a jeho odvodom z oblasti valivej dráhy pôsobením valivých telies. Pri nadmernom uvoľňovaní dochádza k postupnému vyčerpaniu oleja z rezervoárov, zatiaľ čo pri nedostatočnom uvoľňovaní nemusí byť kontakt dostatočne zásobovaný, čo môže viesť k vzniku hladovania a zhoršeniu mazacích podmienok. Stabilizovaná fáza je preto charakterizovaná ustáleným režimom, v ktorom je zabezpečené priebežné dopĺňanie oleja do kontaktu. [2, 7, 8]

Podrobnejší pohľad na uvoľňovanie oleja poskytli Hogenberk et al. [7], ktorí skúmali päť plastických mazív s rôznym typom zahusťovadla a základového oleja. Mazivá boli vystavené mechanickému starnutiu v zariadení určenom na mechanické namáhanie plastického maziva (grease worker). Následne bola ich schopnosť uvoľňovať olej hodnotená pomocou SKF Grease Test Kit meraním veľkosti olejovej škvrny na filtračnom papieri pri zvýšenej teplote. Výsledky ukázali, že hoci mechanické namáhanie viedlo k poklesu konzistencie mazív, zmena schopnosti uvoľňovať olej ani permeability v rámci jedného typu maziva nebola výrazná. Tok oleja je podľa autorov riadený predovšetkým permeabilitou štruktúry zahusťovadla, ktorá závisí najmä od objemového podielu zahusťovadla a charakteristických rozmerov jeho štruktúry. Z uvedeného vyplýva, že pokles konzistencie maziva nemusí byť priamo spojený so zhoršením jeho schopnosti zásobovať kontakt olejom v stabilizovanej fáze prevádzky. [7]

Hladovanie kontaktu a spätný tok maziva

Počas fázy uvoľňovania základového oleja môže byť prísun maziva do vstupnej oblasti kontaktu postupne obmedzovaný, v dôsledku čoho dochádza k znižovaniu hrúbky mazacieho filmu a prechodu kontaktu do hladovaného režimu. Cann [9] tento proces opisuje ako dynamickú rovnováhu medzi úbytkom maziva z kontaktu a jeho dopĺňaním z okolitých oblastí. Ako je znázornené na Obr. 2-4, v počiatočnej fáze je kontakt zásobovaný aplikovaným plastickým mazivom, pričom súčasne prebieha jeho bočný odtok a vytlačanie zo vstupnej oblasti. Následne dochádza k poklesu hrúbky filmu na minimum v dôsledku postupného vyčerpania zásob maziva. V tretej fáze môže byť za určitých podmienok pozorovaný čiastočný spätný tok oleja do kontaktu, ktorý vedie k čiastočnej obnove mazacieho filmu. Hrúbka mazacieho filmu je výsledkom rovnováhy medzi odsunom maziva z kontaktu a jeho lokálnym dopĺňaním. [9]



Obr. 2-4 Vývoj hrúbky mazacieho filmu počas hladovania a spätného toku v plastickom mazive [9]

Na úrovni reálneho valivého ložiska problematiku ďalej rozpracovali Cen a Lugt [10], ktorý skúmal dopĺňanie EHL kontaktov v plastickom mazivom mazanom DGBB. Experimentálne bolo preukázané, že hladovanie vzniká už pri relatívne nízkych rýchlostiach a jeho intenzita narastá so zvyšujúcou sa rýchlosťou, viskozitou základového oleja a veľkosťou kontaktu. Zároveň bolo zistené, že dopĺňanie maziva medzi jednotlivými guľôčkami nie je dominantným mechanizmom a má prevažne lokálny charakter. Rozhodujúce procesy tak prebiehajú najmä v bezprostrednom okolí kontaktu, pravdepodobne za účasti kapilárnych síl, rotačného pohybu guľôčky alebo lokálnej redistribúcie maziva, čo významne ovplyvňuje stabilitu mazacieho filmu a životnosť ložiska [10]. [10]

2.2.3 Úroveň náplne plastickým mazivom

Úroveň náplne plastickým mazivom (grease fill) sa vo valivých ložiskách vyjadruje ako percentuálny podiel voľného objemu ložiska vyplneného mazivom. Voľný objem predstavuje priestor medzi obežnými dráhami po odčítaní objemu valivých telies a kletky. V technickej praxi nebýva ložisko plnené úplne, ale iba čiastočne. Prítomnosť väčšieho množstva maziva v oblasti valivých dráh vedie k intenzívnemu premiešavaniu (churning), ktoré zvyšuje odpor proti pohybu valivých telies, a tým aj trecie straty a prevádzkovú teplotu. Voľný objem ložiska možno približne stanoviť zo známych geometrických rozmerov a hmotnosti podľa vzťahu uvedeného v rovnici (2.1) [11]. [2, 11]

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot B (D^2 - d^2) \cdot 10^{-3} - \frac{m}{7,8 \cdot 10^{-3}} \quad (2.1)$$

kde:

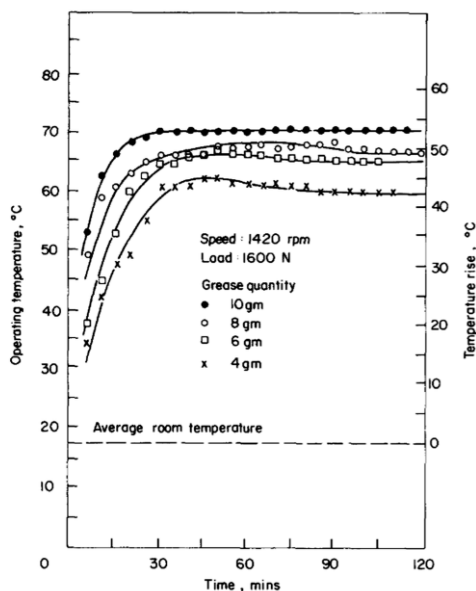
V	[cm ³]	voľný objem ložiska
B	[mm]	šírka ložiska
D	[mm]	vonkajší priemer ložiska
d	[mm]	vnútorný priemer ložiska
m	[kg]	hmotnosť ložiska

Odporúčaná úroveň náplne je stanovená predovšetkým prevádzkovými podmienkami, najmä rýchlosťou otáčania, zaťažením, konštrukciou ložiska a vlastnosťami plastického maziva. Podľa Lugta [4] sa minimálna odporúčaná náplň pohybuje približne na úrovni 30 % voľného objemu ložiska, pričom takéto množstvo umožňuje dostatočnú tvorbu rezervoárov v neaktívnej oblasti, z ktorých je počas prevádzky postupne uvoľňovaný olej do kontaktu. [4–6]

Technické podklady výrobcu ZKL [12] zároveň poukazujú na výraznú závislosť odporúčanej náplne od rýchlosti. Pri rýchlostiach nižších ako približne 50 % limitnej rýchlosti ložiska môže byť voľný priestor zaplnený približne z jednej polovice až dvoch tretín, zatiaľ čo pri vyšších rýchlostiach sa odporúča zníženie náplne na približne jednu tretinu až polovicu objemu. Nadmerné množstvo maziva je spojené so zvýšenou intenzitou premiešavania, čo sa prejavuje nárastom energetických strát a zvýšením prevádzkovej teploty ložiska. [12, 13]

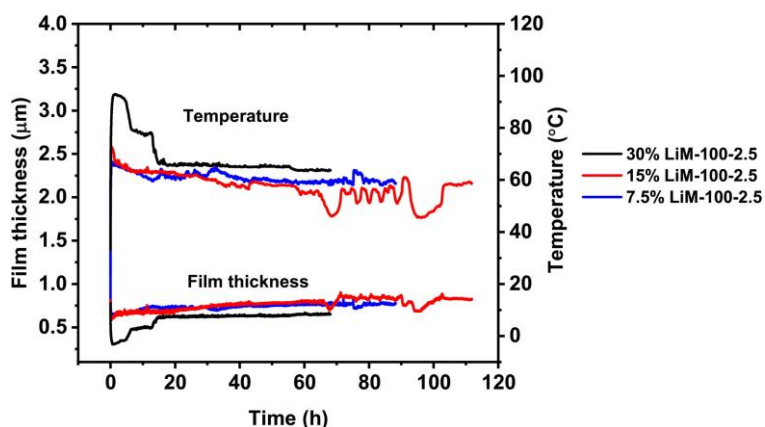
Vplyv na prevádzkové parametre

Na význam experimentálneho určenia optimálnej úrovne náplne poukázali Shawki et al. [13], ktorí analyzovali vplyv množstva plastického maziva na trecie a teplotné charakteristiky DGBB typu SKF 6209 mazaného lítiovým mazivom Esso FABRX 235. Merania boli realizované na skúšobnom zariadení s riadeným radiálnym zaťažením a rýchlosťou otáčania, pričom bol sledovaný trecí moment a prevádzková teplota pri náplniach v rozsahu 2 až 10 g. Bolo potvrdené, že počas úvodnej fázy prevádzky dochádza k rýchlemu nárastu teploty, ktorý je následne vystriedaný jej stabilizáciou (Obr. 2-5). Maximálna teplota bola dosahovaná približne medzi 30 až 70 minútou, pričom jej hodnota rástla so zvyšujúcim sa množstvom maziva. Pri náplniach 4 až 8 g bola pozorovaná stabilizácia teploty na nižšej úrovni, zatiaľ čo pri najvyššej náplni 10 g zostávala teplota prakticky konštantná na vyššej hodnote. Analýza súčiniteľa trenia ukázala existenciu optimálneho rozsahu náplne, keďže pri vyšších množstvách dochádzalo k jeho opätovnému nárastu. Ako najvýhodnejší bol identifikovaný rozsah približne 4 až 6 g, čo zodpovedá približne 20 až 30 % voľného objemu ložiska. [13]

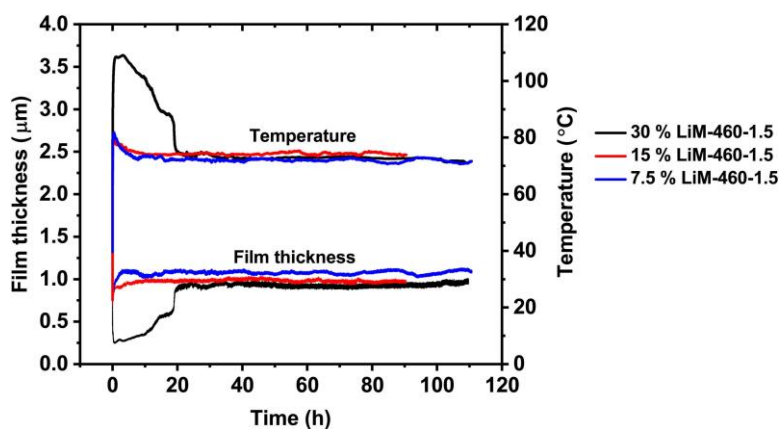


Obr. 2-5 Vplyv množstva plastického maziva na priebeh prevádzkovej teploty ložiska 6209 pri zaťažení 1600 N a rýchlosti 1420 ot/min [13]

Komplexnejšie posúdenie vplyvu náplne na teplotu a hrúbku mazacieho filmu bolo prezentované v práci Shetty et al. [14], kde boli analyzované DGBB mazané lítiovými plastickými mazivami pri náplniach 7,5 %, 15 % a 30 % voľného objemu. Hrúbka mazacieho filmu bola určovaná pomocou elektrickej kapacitnej metódy (electrical capacitance method), pričom experimenty prebiehali pri zaťažení 513 N a rýchlosti 4000 ot/min. Ako je zrejmé z Obr. 2-6 a Obr. 2-7, počas zábehovej fázy dochádza k výraznému nárastu teploty spôsobenému intenzívnym premiešavaním maziva, pričom najvyššie teploty sú dosahované pri najvyššej náplni. Súčasne bolo pri vyšších náplniach pozorované predĺženie zábehovej fázy, čo bolo spojené s väčším množstvom maziva prítomného v pracovnom priestore ložiska. Po redistribúcii maziva však dochádza vo všetkých prípadoch k poklesu teploty na podobnú ustálenú úroveň. Z rovnakých obrázkov je zároveň zrejmé, že hrúbka mazacieho filmu je v úvodnej fáze vyššia pri väčšej náplni, avšak po redistribúcii maziva klesá na porovnateľné hodnoty približne 0,5 až 1,1 μm v závislosti od maziva. Uvedené výsledky naznačujú, že po ustálení prevádzky je hrúbka mazacieho filmu určovaná predovšetkým prevádzkovými podmienkami a vlastnosťami základového oleja, zatiaľ čo počiatočná úroveň náplne zohráva významnú úlohu najmä počas zábehovej fázy. [14]

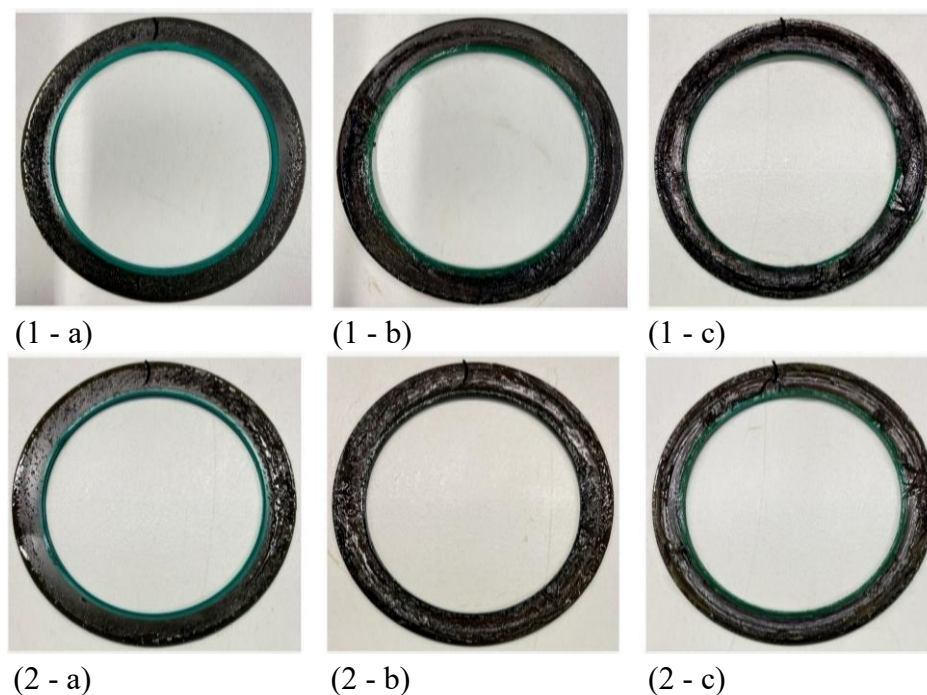


Obr. 2-6 Okamžitá zmena teploty a hrúbky mazacieho filmu v ložisku 6209 pre mazivo LiM-100-2.5 pri počiatočných náplniach 30 %, 15 % a 7,5 %, zaťažení 513 N a rýchlosti otáčania 4000 ot/min [14]



Obr. 2-7 Okamžitá zmena teploty a hrúbky mazacieho filmu v ložisku 6209 pre mazivo LiM-460-1.5 pri počiatočných náplniach 30 %, 15 % a 7,5 %, zaťažení 513 N a rýchlosti otáčania 4000 ot/min [14]

Z vizuálneho zhodnotenia množstva plastického maziva uloženého na tesneniach ložiska (Obr. 2-8) v kombinácii s kvantitatívnymi údajmi je zrejmé, že s rastúcou úrovňou náplne dochádza k výraznému nárastu množstva maziva presunutého na tesnenia. Pri náplni 7,5 % je na tesneniach prítomné iba malé množstvo maziva (približne 0,24 g pre LiM-100-2.5 a 0,28 g pre LiM-460-1.5), čo zodpovedá tenkej vrstve pozorovanej na obrázkoch. Pri náplni 15 % dochádza k výraznému nárastu uloženého množstva (1,46 g a 1,36 g), pričom sa vytvára súvislejšia vrstva maziva. Najvyššia náplň 30 % vedie k ďalšiemu zvýšeniu množstva maziva na tesneniach (2,35 g a 1,96 g), čo sa prejavuje výraznými akumuláciami maziva mimo valivých dráh. Medzi jednotlivými mazivami je možné pozorovať odlišné správanie, keď mazivo LiM-100-2.5 vykazuje pri vyšších náplniach väčšie množstvo maziva uloženého na tesneniach než LiM-460-1.5, čo môže súvisieť s rozdielnymi reologickými vlastnosťami a schopnosťou redistribúcie [14]. Napriek týmto rozdielom však po ukončení zábehovej fázy nedochádza k významným rozdielom v hrúbke mazacieho filmu, čo naznačuje, že množstvo maziva uloženého v neaktívnej oblasti nie je rozhodujúcim faktorom pre zásobovanie kontaktu v počiatočnej stabilizovanej fáze. Mazanie je v tomto štádiu pravdepodobne zabezpečované najmä olejom prítomným priamo na valivých dráhach po redistribúcii maziva, zatiaľ čo príspevok oleja uvoľňovaného z rezervoárov sa prejavuje až v neskorších fázach prevádzky [14]. [14]

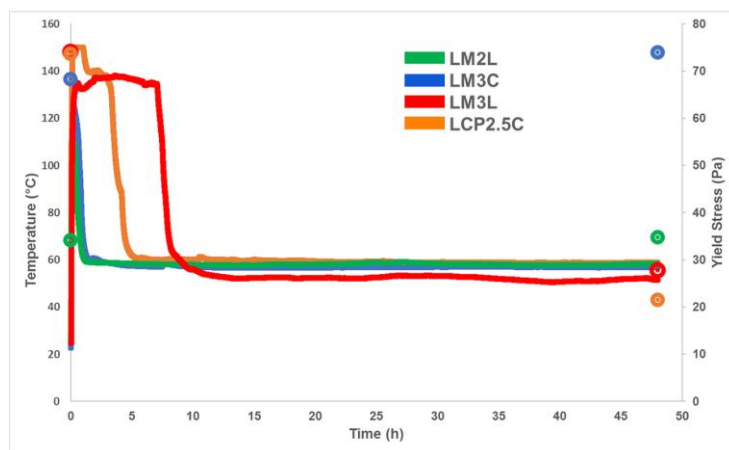


Obr. 2-8 Zvyšková hmotnosť maziva na tesneniach; (1 – a) LiM – 100 2.5, 7,5 %, 0,24 g; (1 – b) LiM – 100 2.5, 15 %, 1,46 g; (1 – c) LiM – 100 2.5, 30 %, 2,35 g; (2 – a) LiM – 460 1.5, 7,5 %, 0,28 g; (2 – b) LiM – 460 1.5, 15 %, 1,36 g; (2 – c) LiM – 460 1.5, 30 %, 1,96 g (upravené z [14])

2.2.4 Zloženie plastických mazív

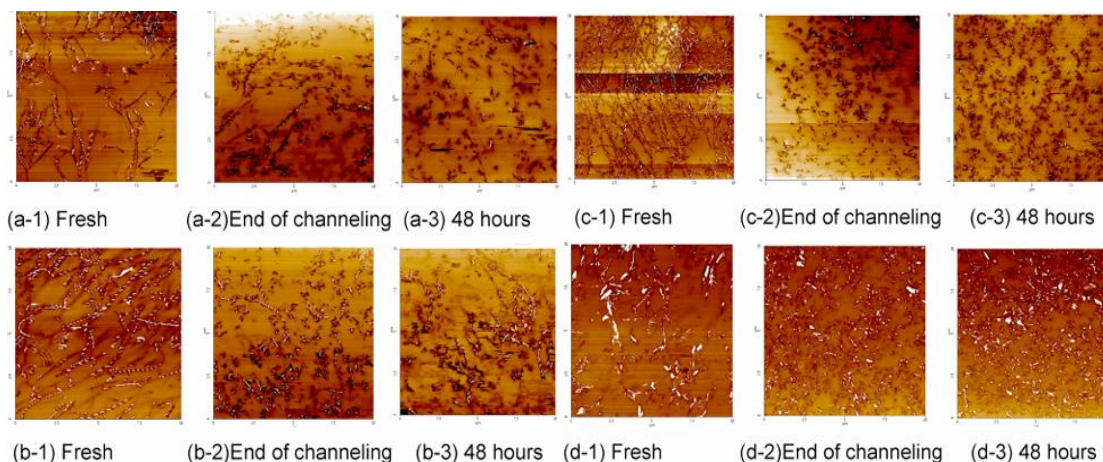
Plastické mazivá sú chápané ako viacfázový systém tvorený základovým olejom, zahusťovadlom a prísadami, pričom podiel základového oleja spravidla presahuje 70 až 90 % objemu maziva. Úlohou zahusťovadla je vytváranie priestorovej štruktúry, v ktorej je olej viazaný a z ktorej je postupne uvoľňovaný do kontaktnej oblasti počas prevádzky. Funkcia prísad (aditív) spočíva v úprave vybraných vlastností, najmä z hľadiska odolnosti voči opotrebeniu, oxidácii alebo korózii. V technickej praxi sú najčastejšie používané plastické mazivá na báze lítiových a lítiovo-komplexných zahusťovadiel, ktoré sa vyznačujú vhodnou mechanickou stabilitou a širokým rozsahom pracovných teplôt. Konzistencia je klasifikovaná podľa stupnice NLGI, ktorá rozlišuje triedy od NLGI 000 do NLGI 6, pričom pre valivé ložiská sa najčastejšie uplatňuje trieda NLGI 2 ako kompromis medzi tekutosťou a stabilitou štruktúry. Vplyv teploty sa prejavuje predovšetkým zmenou viskozity základového oleja a urýchlením degradačných procesov plastického maziva. Pri prevádzkových teplotách približne nad 60 až 70 °C začína byť významným degradačným mechanizmom oxidačné starnutie maziva, pričom podľa Arrheniovoho prístupu môže zvýšenie teploty približne o 15 °C viesť pri väčšine plastických mazív k približne dvojnásobnému skráteniu ich životnosti [15]. Tento jav sa následne prejavuje znížením mazacej schopnosti a potrebou častejšieho domazávania ložiska. [14, 15]

Experimentálne porovnanie správania plastických mazív vo valivých ložiskách realizoval Chatra et al. [5], pričom analyzovaný bol priebeh zábehovej fázy a zmeny mikroštruktúry počas prevádzky. Skúšky boli vykonané na DGBB s náplňou 30 % voľného objemu. Použité boli štyri mazivá, dve laboratórne pripravené (LM2L a LM3L) a dve komerčné (LM3C a LCP2.5C), ktoré sa líšili typom zahusťovadla, konzistenciou a vlastnosťami základového oleja. Z teplotných charakteristík ložiska, vid' Obr. 2-9, je možné identifikovať rozdielne typy správania. Mazivá LM2L a LM3C vykazovali tzv. špičkový priebeh, pri ktorom dochádza k rýchlej stabilizácii teploty približne do 90 minút, zatiaľ čo mazivá LM3L a LCP2.5C vykazovali priebeh typu plató s dlhšie trvajúcou zvýšenou teplotou. Zmeny medzného šmykového napätia naznačujú, že pri mazivách s priebehom typu plató dochádza k výraznejšej degradácii štruktúry počas zábehovej fázy. [5]



Obr. 2-9 Teplotná charakteristika ložiska pri 30 % náplni plastického maziva (6204-2Z/C3, 150 N, 15000 min⁻¹) [5]

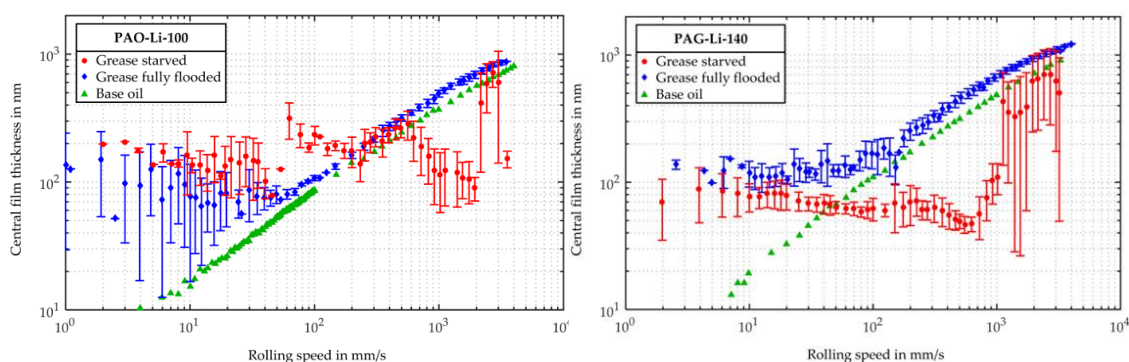
Doplňujúce vysvetlenie uvedených rozdielov bolo získané analýzou mikroštruktúry pomocou metódy AFM, vid' Obr. 2-10. Porovnanie čerstvých vzoriek, vzoriek po zábehovej fáze a po 48 hodinách prevádzky ukázalo výrazné rozdiely v stabilite vláknitej štruktúry zahusťovadla. V prípade mazív LM2L a LM3C bola štruktúra zachovaná vo forme relatívne dlhých vlákien aj po dlhšej prevádzke, zatiaľ čo pri mazivách LM3L a LCP2.5C dochádzalo k výraznej fragmentácii už v počiatočných štádiách. Tento rozdiel bol pripísaný odlišnej flexibilita vláknitej štruktúry a jej schopnosti reagovať na šmykové namáhanie počas premiešavania maziva. Výsledky naznačujú, že mikroštruktúrne charakteristiky zahusťovadla majú významný vplyv na reologické vlastnosti a priebeh zábehovej fázy, pričom jednoduché klasifikačné parametre nemusia byť postačujúce na ich popis. [5]



Obr. 2-10 AFM charakterizácia mikroštruktúry plastických mazív: (a) LM2L (b) LM3C (c) LM3L (d) LCP2.5C (1) čerstvé mazivo; (2) mazivo po ukončení zábehovej fázy; (3) mazivo po 48 hodinách prevádzky ložiska (upravené z [5])

Na vplyv typu základového oleja na tvorbu mazacieho filmu v elastohydrodynamickom kontakte sa zamerali Fischer et al. [16], pričom experimenty boli realizované na tribometri typu guľôčka disk (ball on disc). Porovnávané boli plastické mazivá s rovnakým lítiovo-komplexným zahusťovadlom (NLGI 2), avšak s odlišným základovým olejom, konkrétne polyalfaolefínovým (PAO) a polyalkylénglykolovým (PAG). Súčasne boli analyzované aj príslušné základové a uvoľnené oleje. Za plne zaplavených podmienok bola pri plastických mazivách pozorovaná vyššia hrúbka mazacieho filmu v porovnaní so samotnými olejmi, čo je možné pripísať prítomnosti zahusťovadla v kontakte. Pri nízkych rýchlostiach bol zaznamenaný zvýšený rozptyl hodnôt, čo poukazuje na nestabilné správanie maziva v oblasti dominovanej štruktúrou zahusťovadla, zatiaľ čo pri vyšších rýchlostiach sa správanie približovalo správaniu základového oleja. Porovnanie základového a uvoľneného oleja nepreukázalo významné rozdiely, čo naznačuje ich podobné vlastnosti. [16]

Výraznejšie rozdiely boli identifikované v podmienkach hladovania, vid' Obr. 2-11. Mazivo s PAO základom vykazovalo stabilnejšiu tvorbu filmu a neskorší nástup hladovania, zatiaľ čo pri mazive s PAG základom dochádzalo k skoršiemu prechodu do hladovaného režimu. Tento rozdiel bol interpretovaný ako dôsledok odlišnej schopnosti maziva uvoľňovať olej, pričom nižšia schopnosť uvoľňovania viedla k nedostatočnému zásobovaniu kontaktu. [16]



Obr. 2-11 Hrúbka mazacieho filmu v závislosti od rýchlosti pre mazivá PAO-Li-100 a PAG-Li-140: porovnanie plne zaplavených a hladujúcich podmienok mazania vrátane základového oleja [16]

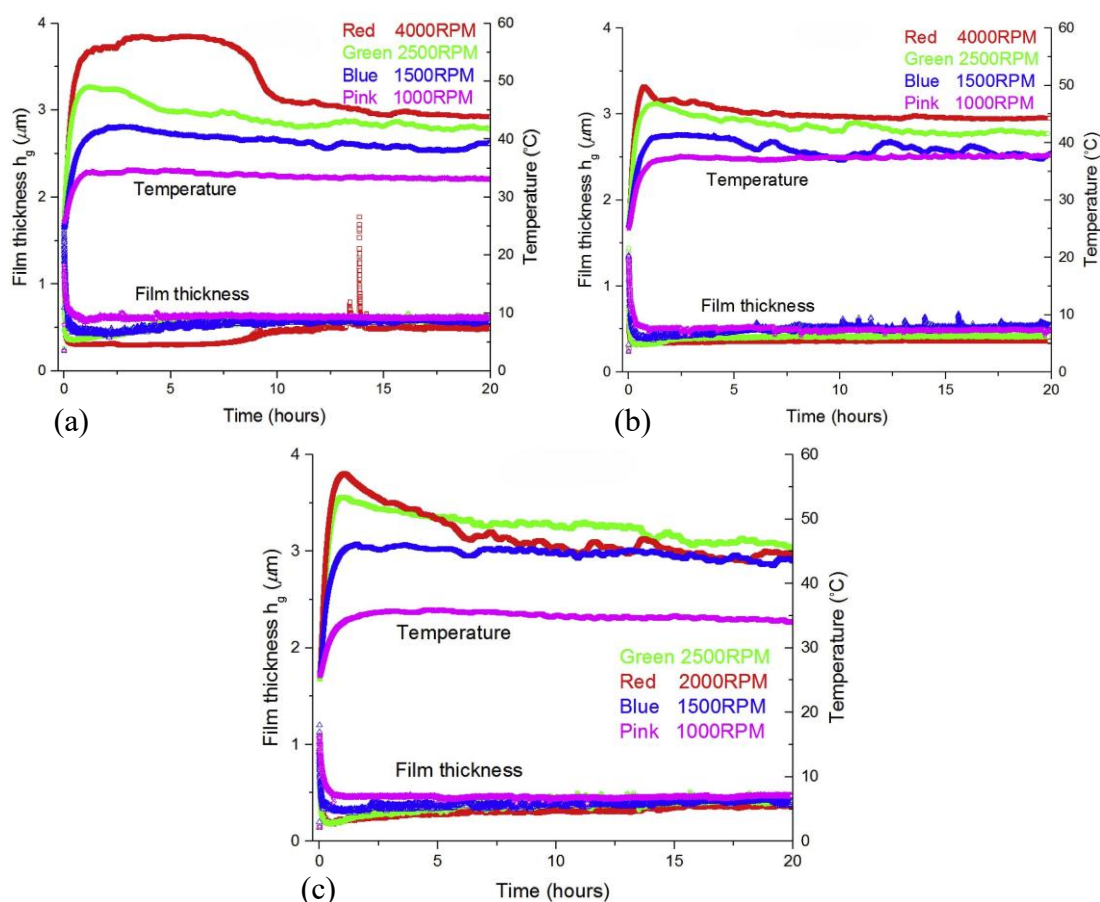
Na tieto závery nadviazali De Laurentis et al [17], ktorí na širšom súbore komerčných mazív s rôznymi typmi základových olejov a zahusťovadiel ukázali, že správanie plastických mazív je možné rozdeliť podľa rýchlostnej oblasti. Pri vyšších rýchlostiach dominuje vplyv základového oleja, zatiaľ čo pri nižších rýchlostiach sa výraznejšie uplatňuje vplyv zahusťovadla a charakter vytvoreného filmu. Súčasne bolo preukázané, že syntetické oleje s nižšou viskozitou vedú k nižším trecím stratám pri vyšších rýchlostiach. Uvedené výsledky potvrdzujú, že správanie plastického maziva je determinované kombináciou vlastností základového oleja a zahusťovadla, pričom ich relatívny význam sa mení v závislosti od prevádzkových podmienok. [17]

2.2.5 Vplyv prevádzkových podmienok a veľkosti ložiska

Vplyv rýchlosti otáčania

Rýchlosť otáčania patrí medzi rozhodujúce prevádzkové parametre, ktorými je ovplyvňovaný teplotný režim ložiska aj podmienky tvorby mazacieho filmu. Problematiku analyzovali Cen a Lugt [18], pričom bola skúmaná hrúbka mazacieho filmu v krytovanom DGBB mazanom tromi plastickými mazivami: PU/E (polyurea ester), Li/M (lítiové mazivo s minerálnym základovým olejom) a LiC/PAO (lítiovo komplexné mazivo s PAO základovým olejom). Experimenty boli realizované pri konštantnom axiálnom zaťažení 513 N a pri rýchlostiach 1000, 1500, 2000, 2500 a 4000 min⁻¹ počas 20 hodín. [18]

Zo zobrazených priebehov na Obr. 2-12 vyplýva, že so zvyšujúcou sa rýchlosťou otáčania bol pozorovaný výraznejší nárast teploty ložiska, čo môže súvisieť s vyšším mechanickým namáhaním plastického maziva počas zábehovej fázy. Tento efekt bol najvýraznejší pri najvyššej frekvencii otáčania 4000 min⁻¹. Po počiatočnom náraste bola následne zaznamenaná stabilizácia teploty, ktorá môže byť spojená s redistribúciou maziva v ložisku a útlmom intenzívneho premiešavania. Z časových priebehov zároveň vyplýva, že dĺžka zábehovej fázy je ovplyvňovaná typom maziva aj rýchlosťou otáčania. [18]



Obr. 2-12 Vplyv rýchlosti otáčania na priebeh teploty a hrúbky mazacieho filmu v ložisku 6209-2Z/C3 pre mazivá; (a) PU/E; (b) Li/M; (c) LiC/PAO; pri zaťažení 513 N (upravené z [18])

Absolútna hrúbka mazacieho filmu po ukončení zábehovej fázy nevykazovala výraznú závislosť od rýchlosti a po dlhšom čase sa pri jednotlivých frekvenciách otáčania ustálila na porovnateľnej úrovni. Pri hodnotení normalizovanej hrúbky filmu bol však pozorovaný jej pokles so zvyšujúcou sa rýchlosťou. Tento trend naznačuje prehlbovanie hladovania kontaktu, hoci absolútna hrúbka filmu zostáva relatívne stabilná. Uvažovať možno o tom, že pri vyšších rýchlostiach narastá film vytvorený základovým olejom za plne zaplavených podmienok rýchlejšie než reálny film v ložisku, ktoré pracuje v režime obmedzeného zásobovania mazivom. [18]

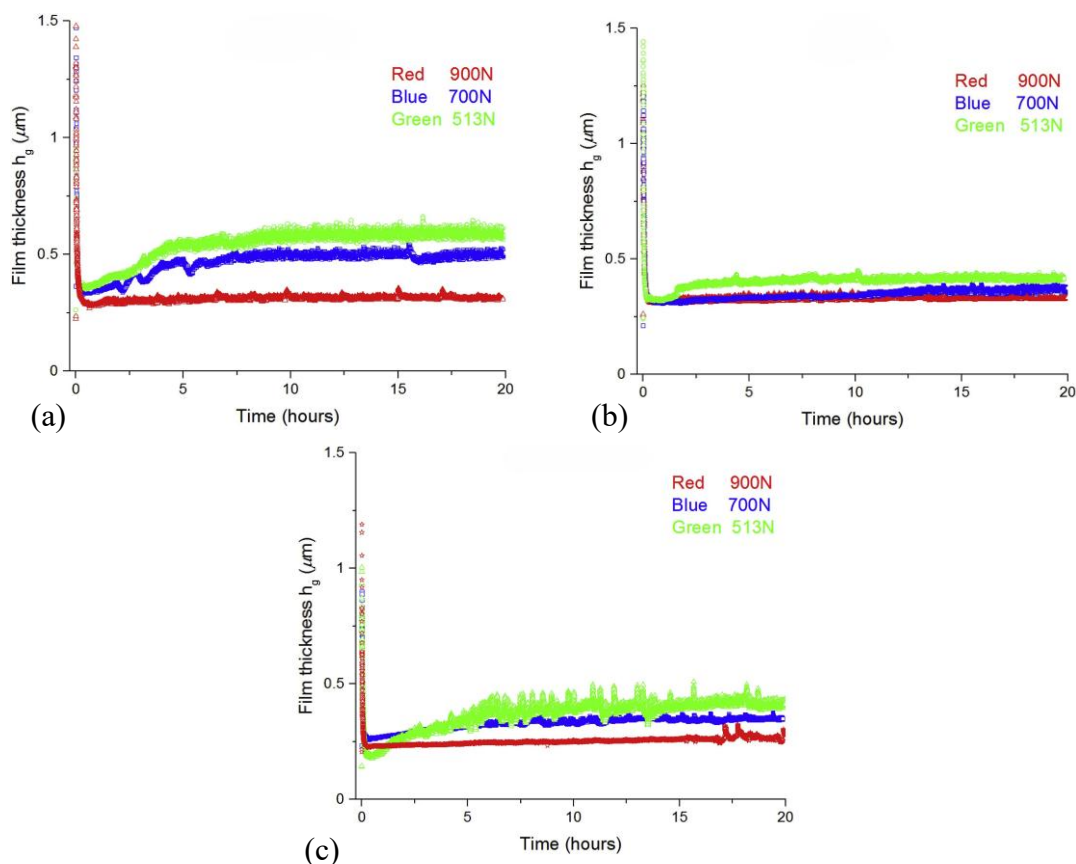
Medzi jednotlivými mazivami boli identifikované rozdiely. Polyureové mazivo PU/E vykazovalo najvyššiu normalizovanú hrúbku filmu, čo môže byť spojené s nižšou mechanickou stabilitou a vyššou schopnosťou uvoľňovania oleja počas prevádzky. Pri lítiovom mazive Li/M bol pokles normalizovanej hrúbky s rastúcou rýchlosťou výraznejší. Pri lítiovo komplexnom mazive LiC/PAO nebol pozorovaný jednoznačný trend poklesu, pričom napríklad hodnoty pri 2000 a 2500 min⁻¹ zostali porovnateľné. Tento jav môže súvisieť s vyššou mechanickou stabilitou maziva, ktorá ovplyvňuje dynamiku uvoľňovania oleja a následné zásobovanie kontaktu. Výsledky teda naznačujú, že rýchlosť otáčania neovplyvňuje iba teplotu ložiska, ale aj mieru hladovania kontaktu, pričom výsledné správanie je podmienené typom použitého plastického maziva. [18]

Vplyv rýchlosti otáčania na priebeh zábehovej fázy bol potvrdený aj Chatra et al. [5], kde bolo ukázané, že pri mazivách typu plató (plateau type) je so zvyšujúcou sa rýchlosťou spojené predĺženie zábehovej fázy, respektíve dlhšie trvanie zvýšenej teploty ložiska. Pri mazivách typu špičkového priebehu (peak type) bol tento efekt menej výrazný.

Vplyv zaťaženia

Okrem rýchlosti otáčania bol Cen a Lugt [18] analyzovaný aj vplyv zaťaženia na hrúbku mazacieho filmu. Pri konštantnej rýchlosti 2500 min⁻¹ boli porovnávané tri úrovne axiálneho zaťaženia 513 N, 700 N a 900 N. Zo získaných vid' Obr. 2-13 výsledkov vyplýva, že so zvyšujúcim sa zaťažením bol po ukončení zábehovej fázy zaznamenaný pokles absolútnej hrúbky mazacieho filmu. Tento trend bol prítomný pri všetkých testovaných mazivách, pričom jeho intenzita zostala relatívne nízka. Pri lítiovom mazive Li/M a lítiovo komplexnom mazive LiC/PAO boli rozdiely medzi jednotlivými úrovňami zaťaženia len mierne. Naopak, pri polyureovom mazive PU/E bol pokles výraznejší, čo môže byť spojené s nižšou mechanickou stabilitou a zmenami v procese uvoľňovania základového oleja počas prevádzky. [18]

Uvedené správanie je možné interpretovať v kontexte EHL kontaktu (elastohydrodynamic lubrication), pri ktorom zmena zaťaženia ovplyvňuje predovšetkým veľkosť kontaktnej oblasti a mieru kompresie maziva, zatiaľ čo podmienky v oblasti vstupu do kontaktu sa menia v menšej miere. V režime hladovaného mazania preto nie je vplyv zaťaženia na hrúbku filmu tak výrazný ako vplyv rýchlosti otáčania. Podobný trend bol pozorovaný aj Shetty et al. [19], kde bol pri axiálne zaťažených ložiskách rôznych veľkostí zaznamenaný pokles hrúbky filmu so zvyšujúcim sa zaťažením spolu s rastom miery hladovania kontaktu. [19]



Obr. 2-13 Vplyv zaťaženia na priebeh hrúbky mazacieho filmu v ložisku 6209-2Z/C3 pri rýchlosti 2500 min^{-1} pre mazivá; (a) PU/E; (b) Li/M; (c) LiC/PAO (upravené z [18])

Vplyv veľkosti ložiska

Vplyv veľkosti ložiska na tvorbu mazacieho filmu bol analyzovaný Shetty et al. [20], pričom boli skúmané ložiská 6204, 6206 a 6209 v podmienkach hladovania po ukončení zábehu. Hodnotenie bolo realizované pomocou relatívnej hrúbky filmu, ktorá umožňuje porovnanie rôznych prevádzkových podmienok a geometrií. Z výsledkov vyplýva, že relatívna hrúbka filmu sa pre všetky skúmané veľkosti ložísk riadi rovnakou závislosťou od kombinácie viskozity, rýchlosti a zaťaženia. Tento poznatok naznačuje, že mechanizmus dopĺňania maziva do kontaktu (replenishment) nie je riadený globálnymi rozmermi ložiska, ale lokálnymi podmienkami v oblasti kontaktu. Dopĺňanie maziva za podmienok hladovania je preto možné chápať ako lokálny jav, pri ktorom sú rozhodujúce kapilárne sily a prúdenie maziva v bezprostrednom okolí kontaktu [20]. Z praktického hľadiska z toho vyplýva, že vzdialenosť medzi rezervoárom maziva a kontaktnou oblasťou nezohráva dominantnú úlohu a samotná veľkosť ložiska nepredstavuje rozhodujúci parameter ovplyvňujúci tvorbu mazacieho filmu. [20]

2.3 Zhrnutie hlavných zistení

Z kritickej analýzy dostupnej literatúry vyplýva, že prevádzkové správanie plastického maziva vo valivých ložiskách je výsledkom kombinácie dynamických dejov prebiehajúcich v kontakte aj mimo neho, pričom samotná tvorba mazacieho filmu je ovplyvňovaná nielen podmienkami elastohydrodynamického mazania (EHL), ale predovšetkým spôsobom zásobovania kontaktu mazivom a jeho redistribúciou počas prevádzky. Bolo preukázané, že plastické mazivo neostáva v kontakte v pôvodnom objeme, ale už v úvodnej fáze dochádza k jeho rýchlemu vytlačaniu z oblasti valivých dráh a k tvorbe rezervoárov v neaktívnej oblasti, pričom táto zábehová fáza je sprevádzaná nárastom teploty.

Po ukončení zábehu je mazanie zabezpečované najmä uvoľňovaním základového oleja zo štruktúry zahusťovadla, pričom množstvo oleja dostupného v kontakte je dané rovnováhou medzi jeho prísunom a odvodom z oblasti kontaktu. Súčasne bolo ukázané, že pri nedostatočnom zásobovaní dochádza k prechodu do hladovaného režimu, v ktorom je hrúbka mazacieho filmu určovaná lokálnym dopĺňaním maziva (replenishment), pričom tento proces má prevažne lokálny charakter a nie je zásadne ovplyvnený globálnymi rozmermi ložiska.

Významným zistením je, že po ukončení zábehovej fázy dochádza k stabilizácii teploty aj hrúbky mazacieho filmu na porovnateľnej úrovni bez výraznej závislosti od počiatočnej náplne. V priebehu zábehu je však pozorovaný odlišný trend, keď so zvyšujúcou sa náplňou dochádza k výraznejšiemu nárastu teploty, zatiaľ čo hrúbka mazacieho filmu môže byť pri vyšších náplniach v niektorých prípadoch nižšia [14]. Tento jav je v literatúre spájaný s redistribúciou maziva a lokálnym zásobovaním kontaktu základovým olejom počas prevádzky. Z experimentálnych štúdií zároveň vyplýva, že zvýšená náplň je spojená s vyššou maximálnou teplotou v zábehovej fáze. Vplyv veľmi nízkych náplní na dlhodobé zásobovanie kontaktu základovým olejom však zatiaľ nebol jednoznačne kvantifikovaný. Uvažovať však možno o tom, že pri nedostatočnej náplni môže byť dostupnosť oleja v kontakte v neskorších fázach prevádzky obmedzená.

Okrem množstva maziva bolo preukázané, že výsledné správanie je významne ovplyvnené aj jeho zložením, najmä typom základového oleja a štruktúrou zahusťovadla, ktoré určujú schopnosť maziva uvoľňovať olej a reagovať na šmykové namáhanie. Vplyv prevádzkových podmienok bol identifikovaný ako kľúčový, keďže rýchlosť otáčania významne ovplyvňuje teplotný režim aj mieru hladovania kontaktu, zatiaľ čo vplyv zaťaženia sa prejavuje menej výrazne a je viazaný najmä na zmeny kontaktnej oblasti.

Z uvedených poznatkov vyplýva, že hoci je hrúbka mazacieho filmu základným parametrom charakterizujúcim stav mazania, jej meranie je experimentálne náročné a v mnohých prípadoch poskytuje po stabilizácii len obmedzenú informáciu o rozdieloch medzi jednotlivými úrovňami náplne. Naopak, teplota predstavuje integrálny prevádzkový parameter odrážajúci priebeh zábehovej fázy, redistribúciu maziva aj podmienky zásobovania kontaktu, a preto môže byť považovaná za vhodný indikátor zmien správania ložiska pri rôznych úrovniach plnenia plastickým mazivom.

2.4 Medzera v poznaní

Z dostupných poznatkov vyplýva, že problematika mazania valivých ložísk plastickým mazivom je rozsiahlo skúmaná, pričom významná časť experimentálnych prác je realizovaná na modelových kontaktoch typu guľôčka disk alebo na DGBB s eliptickým kontaktom. Súčasne boli analyzované vplyvy prevádzkových podmienok, pričom z rešerše sa naznačuje, že rozdiely medzi jednotlivými úrovňami plnenia sa neprejavujú výrazne v kvázi ustálenom režime, ale predovšetkým počas zábehovej fázy, v ktorej dochádza k redistribúcii maziva a formovaniu počiatočného rozloženia mazacej vrstvy. Experimentálne štúdie sa zároveň často zameriavajú na mazivá s laboratórne definovaným zložením, ktoré umožňujú izolovať vplyv jednotlivých zložiek, avšak nemusia plne reprezentovať správanie komerčných mazív používaných v praxi.

Napriek tomu zostáva oblasť experimentálneho hodnotenia prevádzkového správania ložísk v určitých konfiguráciách menej rozpracovaná. Ide najmä o prípady ložísk s líniovým kontaktom, kde sa mení charakter rozloženia tlaku a podmienky tvorby mazacieho filmu, ako aj o ložiská bez krytia, pri ktorých môže dochádzať k redistribúcii maziva mimo vlastný priestor ložiska. V takýchto podmienkach sa mení nielen množstvo maziva prítomného v kontakte, ale aj jeho dlhodobá dostupnosť pre zásobovanie kontaktu základovým olejom. Súčasne nie je dostatočne preskúmaný vplyv počiatočnej úrovne náplne na teplotný priebeh v kombinácii s týmito okrajovými podmienkami, najmä pri použití komerčných plastických mazív.

Na základe uvedeného je možné identifikovať medzeru v poznaní v oblasti experimentálneho posúdenia vplyvu počiatočnej náplne plastického maziva na prevádzkové správanie ložiska za podmienok líniového kontaktu a otvorenej konfigurácie, pri ktorej dochádza k redistribúcii maziva aj mimo ložisko. Keďže teplotný priebeh odráža zmeny prebiehajúce počas zábehu aj redistribúcie maziva, jeho sledovanie predstavuje vhodný nástroj na hodnotenie správania maziva pri rôznych úrovniach náplne v reálnych prevádzkových podmienkach.

3 CIELE PRÁCE

3.1 Ciele výskumu

Cieľom práce je experimentálne analyzovať vplyv úrovne plnenia a typu plastického maziva na teplotnú charakteristiku a únik maziva z valivého ložiska počas krátkodobej prevádzky, so zameraním najmä na priebeh zábehovej fázy, čas potrebný na dosiahnutie ustáleného stavu a charakter správania v ustálenej fáze. Na základe získaných výsledkov budú posúdené vzťahy medzi úrovňou plnenia, typom maziva a prevádzkovými parametrami ložiska, pričom dôraz bude kladený na identifikáciu takého rozsahu plnenia, ktorý umožňuje zníženie maximálnej prevádzkovej teploty, skrátenie dĺžky zábehovej fázy, skrátenie času ustálenia a súčasne aj obmedzenie úniku maziva.

Čiastkové ciele práce:

- spracovať literárnu rešerš v oblasti mazania valivých ložísk plastickými mazivami
- navrhnuť úpravu experimentálneho zariadenia pre pozorovanie a meranie
- určiť metodiku experimentov a zvoliť vhodné plastické mazivá pre testovanie
- realizovať experimenty s rôznou úrovňou plnenia plastickým mazivom
- vyhodnotiť a spracovať namerané údaje z experimentov
- interpretovať výsledky a formulovať závery vyplývajúce zo získaných dát

3.2 Výskumné otázky

Výskumná otázka č. 1

Aký vplyv má úroveň plnenia plastickým mazivom a typ plastického maziva na teplotnú charakteristiku valivého ložiska, najmä na maximálnu prevádzkovú teplotu a dĺžku zábehovej fázy do dosiahnutia teplotnej stabilizácie?

Výskumná otázka č. 2

Aký vplyv má úroveň plnenia plastickým mazivom a typ plastického maziva na únik maziva z otvoreného, teda nekrytovaného, ložiska počas prevádzky?

3.3 Hypotézy

Hypotéza č. 1

Predpokladá sa, že so zvyšujúcou sa úrovňou plnenia plastickým mazivom v nekrytovanom valivom ložisku dôjde k nárastu maximálnej prevádzkovej teploty a k predĺženiu zábehovej fázy potrebnej na dosiahnutie teplotnej stabilizácie. Tento predpoklad je odvodený z experimentálnych štúdií realizovaných najmä na krytovaných guľôčkových ložiskách [14], pri ktorých bol pri vyšších náplniach pozorovaný výraznejší nárast teploty počas zábehu. Predpokladá sa, že aj napriek odlišnej konfigurácii nekrytovaného ložiska s líniovým stykom zostane základný trend vplyvu náplne na teplotnú charakteristiku zachovaný. Súčasne sa predpokladá, že po ukončení zábehovej fázy sa teplota ustáli v porovnateľnom rozsahu pre jednotlivé úrovne plnenia. Z hľadiska typu maziva sa predpokladá, že vyššia viskozita základového oleja povedie k vyšším maximálnym teplotám a dlhšiemu priebehu zábehovej fázy. Vplyv typu základového oleja (syntetický, minerálny) na teplotnú charakteristiku sa predpokladá ako významný, avšak bez jednoznačného smerového určenia, keďže dostupné experimentálne výsledky nie sú v tomto smere úplne konzistentné. [5, 14]

Hypotéza č. 2

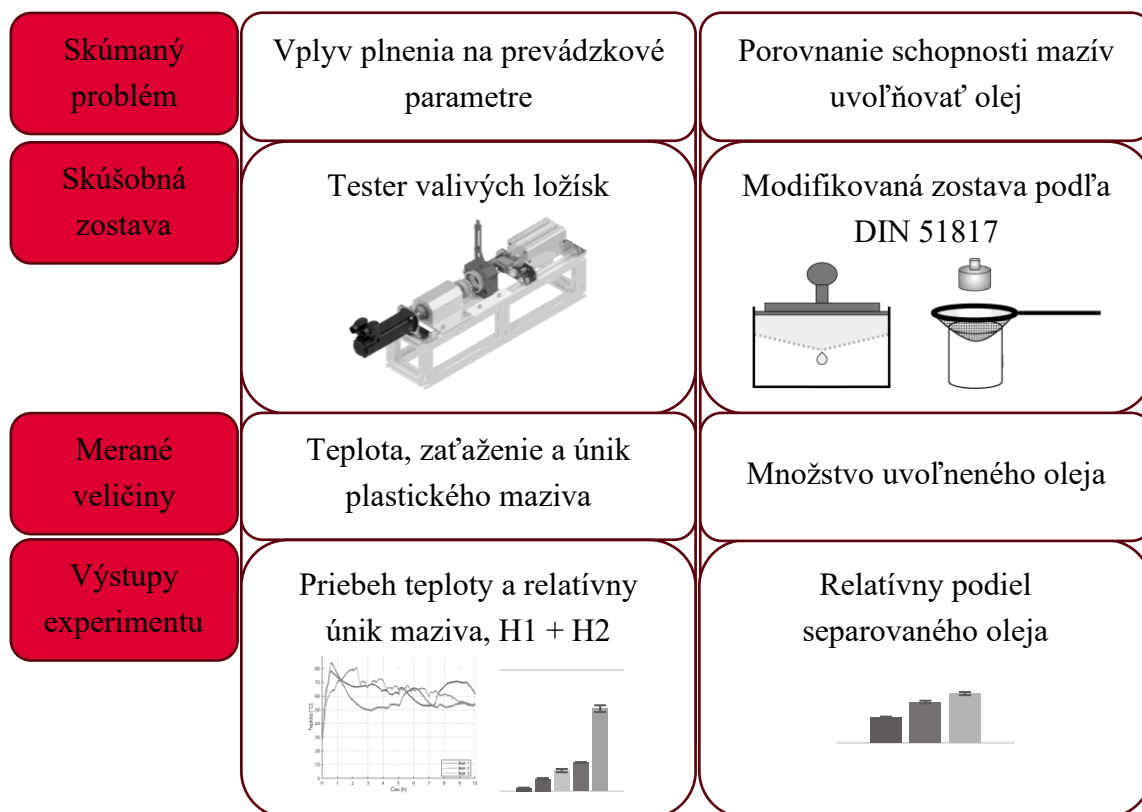
S rastúcou úrovňou plnenia plastickým mazivom sa zvyšuje množstvo maziva vytlačeného z pracovnej oblasti a tým aj celková strata maziva z otvoreného (nekrytovaného) ložiska počas prevádzky [14]. Vyššie počiatočné plnenie vedie k intenzívnejšiemu mechanickému namáhaniu maziva, v dôsledku čoho sa väčší objem maziva presúva mimo obežných dráh a vytvára neaktívne vrstvy v okolí kontaktu. Predpokladá sa, že viskozita základového oleja ovplyvňuje rozsah straty maziva, pričom s rastúcou viskozitou sa očakáva zníženie relatívneho úniku. Tento predpoklad vychádza z vyššieho odporu maziva voči prúdeniu a jeho menšej tendencie k presunu mimo pracovnú oblasť ložiska. Z hľadiska typu základového oleja sa predpokladá, že mazivá so syntetickým základovým olejom budú vykazovať nižší únik v porovnaní s mazivami s minerálnym základovým olejom. Tento predpoklad vychádza z experimentálnych pozorovaní naznačujúcich vyššiu stabilitu štruktúry zahusťovadla a lepšiu schopnosť viazať základový olej pri syntetických mazivách, čo môže viesť k obmedzeniu jeho redistribúcie mimo pracovnú oblasť ložiska. [5, 6, 14]

4 MATERIÁL A METÓDY

Kapitola opisuje metodiku experimentálneho skúmania vplyvu úrovne plnenia plastického maziva na prevádzkové parametre valivého ložiska. Obsahuje prehľad použitých materiálov, testovacích podmienok a meracích zariadení, ako aj postup prípravy vzoriek, priebeh experimentálnych meraní a spôsob spracovania získaných dát. Zvolená metodika vychádza z empirického prístupu, ktorý kombinuje meranie teploty a zaťaženia počas prevádzky ložiska s kvantifikáciou úniku maziva.

4.1 Metodika

Metodika diplomovej práce vychádza z kauzálneho typu výskumu, ktorého cieľom je experimentálne určiť vzťahy medzi úrovňou počiatočnej náplne plastického maziva, jeho typom a prevádzkovými parametrami valivého ložiska. Výskum je založený na empirickom prístupe, využívajúcom meranie teploty počas experimentu, a hmotnostných zmien po ukončení testu v kontrolovaných laboratórnych podmienkach. Práca spája experimentálne testovanie na vlastnom zariadení s hodnotením úniku maziva, pričom ako doplnkové meranie bola vykonaná aj skúška separácie základového oleja z plastických mazív. Postup experimentálnej časti a jej nadväznosť zobrazuje Obr. 4-1.



Obr. 4-1 Schéma metodického postupu

4.2 Experimentálne zariadenie a prístrojové vybavenie

Experimentálna časť diplomovej práce bola realizovaná na zariadeniach dostupných na Ústave konštruovania (ÚK). Jadro testovacieho systému tvorí zariadenie vyvinuté na ÚK ako súčasť konštrukčného projektu určeného na testovanie valivých ložísk. Táto kapitola popisuje experimentálne zariadenie v jeho stave pred úpravou a jeho využitie v rámci diplomovej práce. Pre potreby tejto práce bolo testovacie zariadenie konštrukčne upravené s cieľom zachovať jeho pôvodné funkčné časti a zlepšiť manipuláciu pred a po experimentoch. Súčasne bolo upravené uchytenie snímača sily a do zostavy bol doplnený termočlánok. Podrobný popis vykonaných konštrukčných úprav je uvedený v kapitole 5.

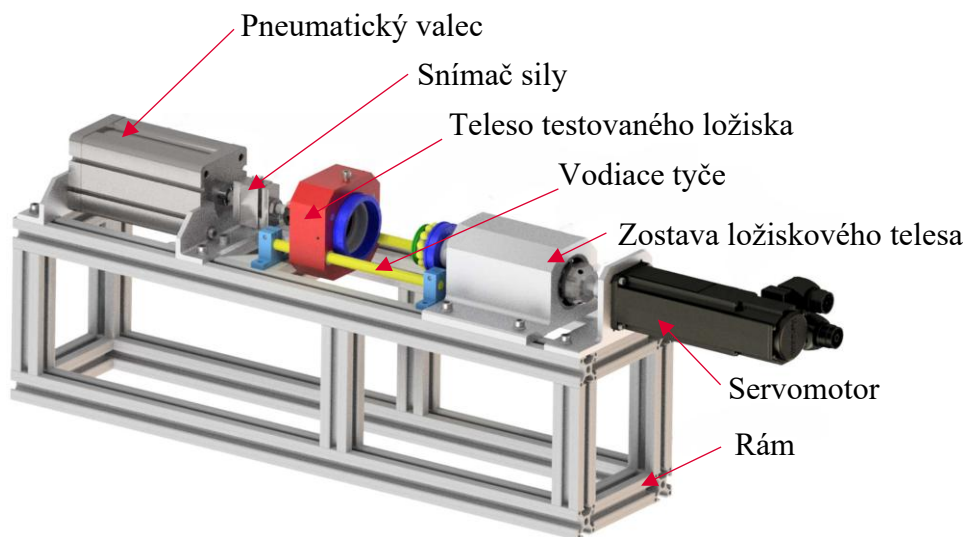
4.2.1 Zostava experimentálneho zariadenia

Tester valivých ložísk

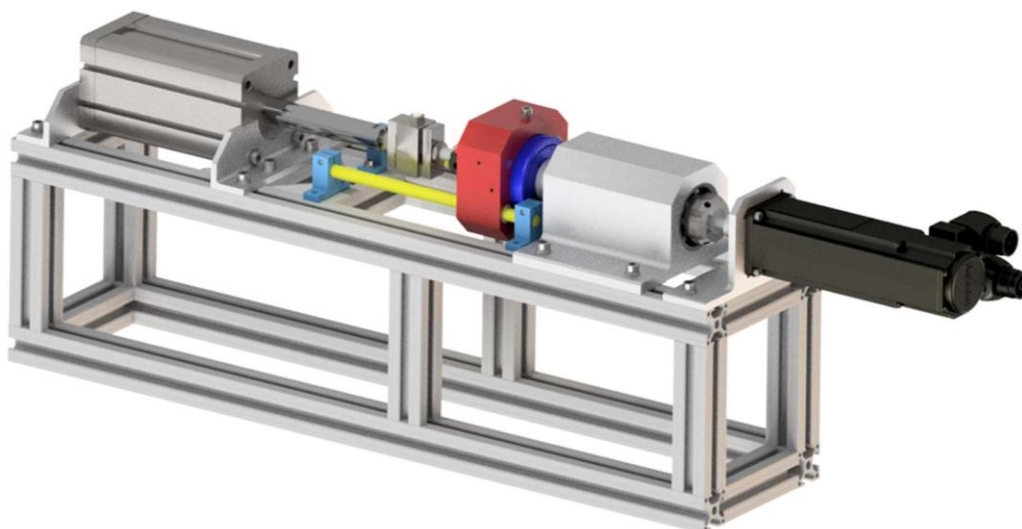
Experimentálna časť diplomovej práce využíva testovacie zariadenie valivých ložísk skonštruované na Ústave konštruovania v rámci predchádzajúcich diplomových prác. Tento stav zariadenia je považovaný za východiskovú konfiguráciu pred realizáciou konštrukčných úprav. Testovanie valivých ložísk je umožnené pri definovaných prevádzkových podmienkach. V nasledujúcej časti je uvedený konštrukčný popis a princíp fungovania zariadenia pred úpravami pre túto prácu.

Samotné zariadenie je tvorené viacerými časťami. Ako pohon je využitý elektromotor s nominálnou maximálnou frekvenciou otáčania 3500 ot/min, pričom počas experimentov je frekvencia otáčania limitovaná riadiacou jednotkou, ktorá neumožňuje prekročenie 2000 ot/min. Motor je uložený na hliníkovom profile upevnenom k rámu, na ktorom je osadená celá zostava. Prenos výkonu je realizovaný cez vlnovcovú spojku na ložiskové teleso, v ktorom je uložená hriadeľ podopretá dvomi valivými guľôčkovými ložiskami. Samotné teleso je pripevnené k rámu pomocou montážnych otvorov. Krútiaci moment je následne prenášaný cez vnútorný nadstavec na testované ložisko, pričom jeho vnútorný krúžok s valivými elementmi je uložený na vnútornom nadstavci a vonkajší krúžok je uložený vo vonkajšom nadstavci umiestnenom v telese testovaného ložiska. Teleso testovaného ložiska bolo pôvodne navrhnuté s vedením pomocou vodiacich tyčí, pričom sa ukázalo, že napriek zabezpečeniu presného vedenia nebolo dosahované dostatočne presné osové zarovnanie s telesom ložiska hriadeľa. V nadväznosti na tieto zistenia bola v predchádzajúcej práci navrhnutá konštrukčná úprava, ktorou sa možno inšpirovať, pričom vodiace tyče boli nahradené dielom vyrobeným z materiálu PLA, ktorý plní funkciu podložky pod telesom testovaného ložiska a prispieva k presnejšiemu osovému zarovnaniu zostavy.

Za telesom testovaného ložiska je prostredníctvom spojovacej tyče upevnený snímač sily s maximálnym rozsahom 2000 N spolu s pneumatickým valcom, ktorý zabezpečuje axiálne zaťažovanie ložiska. Maximálna hodnota aplikovanej sily dosahuje 1500 N. Pneumatický valec je, podobne ako elektromotor, upevnený k rámu zariadenia pomocou hliníkových profilov. Umožnené je testovanie ložísk pri konštantnej frekvencii otáčania a zaťažení. Princíp fungovania je znázornený na Obr. 4-2 a Obr. 4-3, kde sú zobrazené stavy pred/po testovaní (Obr. 4-2) a stav počas testovania (Obr. 4-3).

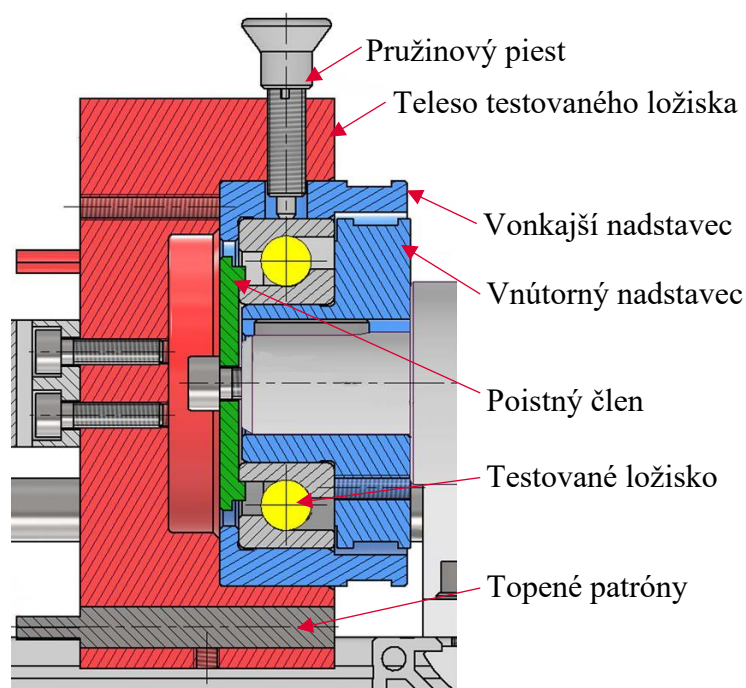


Obr. 4-2 Otvorený stav testovacieho zariadenia 2023/2024 [21]



Obr. 4-3 Uzavretý stav testovacieho zariadenia 2023/2024 [21]

Hlavnú funkčnú časť testovacieho zariadenia tvorí teleso určené na uloženie testovaného ložiska. Týmto uzlom je zabezpečené pevné a presné uloženie vnútorného aj vonkajšieho krúžku ložiska, prenos krútiaceho momentu, ako aj možnosť aplikácie axiálneho zaťaženia prostredníctvom pneumatického systému. Na Obr. 4-4 je znázornený rez telesom s vyznačením jednotlivých prvkov uloženia. Vnútorný krúžok testovaného kuželikového ložiska je uložený na vnútornom nadstavci s uložením H7/h6. Obdobne je riešený aj spoj medzi hriadeľom a vnútorným nadstavcom, pričom je použité uloženie H7/g6 s malou montážnou vôľou. Ložisko je voči vnútornému nadstavcu zaistené poistným členom, ktorým je zabránené jeho axiálnemu posunu a súčasne je obmedzený vznik relatívneho pohybu medzi valcovými aj čelnými styčnými plochami. Prenos krútiaceho momentu je zabezpečený tesným perom, ktorým je zároveň zabránené pootočeniu nadstavca. Po obvode vnútorného nadstavca sú vytvorené tri závitové otvory umožňujúce jednoduchú demontáž vnútorného krúžku ložiska po skončení testu. Vonkajší krúžok ložiska je uložený vo vonkajšom nadstavci, ktorý je osadený v hliníkovom telese. Jeho upevnenie je realizované pomocou pružinového piestu umiestneného v bočnej časti telesa, ktorým je zabezpečené uchytienie vnútorného krúžku vo vnútornom nadstavci počas testovania, čím je zabránené jeho nežiaducemu pootočeniu. Takto navrhnuté uloženie umožňuje rovnomerné rozloženie zaťaženia na valivé elementy ložiska. Teleso testovaného ložiska je vyrobené z hliníka a umožňuje temperovanie testovanej vzorky pomocou troch vyhrievacích patrón umiestnených po jeho obvode. Riadené zahrievanie ložiska je tak umožnené až do teploty približne 100 °C, čím môže byť simulované tepelné prevádzkové zaťaženie za zvýšených teplotných podmienok.

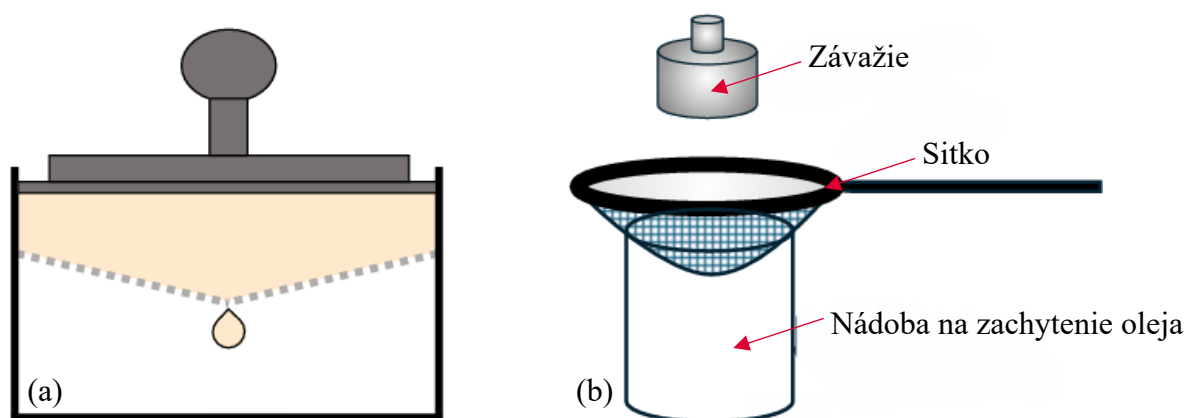


Obr. 4-4 Uloženie testovaného ložiska [21]

Meranie separácie oleja z plastického maziva

Na hodnotenie schopnosti plastického maziva separovať olej bola zvolená statická metóda merania separácie oleja podľa princípov normy DIN 51817. Tento jav, známy ako „bleeding“, predstavuje dôležitý parameter ovplyvňujúci schopnosť maziva zabezpečiť prísun základového oleja do kontaktu počas prevádzky ložiska. Metóda umožňuje hodnotiť tendenciu maziva separovať olej v čase a pri zvýšenej teplote bez vplyvu mechanického pohybu, čím dopĺňa informácie o jeho dlhodobej stabilite a schopnosti zásobovať kontakt mazacím filmom.

Dostupná skúšobná súprava bola prevzatá modifikovaná zostava podľa riešenia uvedeného v práci Procházka [22] ktorá zachováva princíp merania podľa normy, viď Obr. 4-5. Zostava pozostáva z jemného sitka, do ktorého sa aplikuje presne odmerané množstvo plastického maziva. Sitko je uložené nad zbernou nádobou na zachytávanie uvoľneného oleja a mazivo je zaťažené závažím podľa požiadaviek normy. Celá zostava je počas skúšky umiestnená v sušiackej peci, kde sú udržiavané konštantné teplotné podmienky. Po uplynutí stanoveného času je množstvo separovaného oleja určené vážením a vyjadrené ako percentuálny podiel z pôvodnej hmotnosti vzorky. Týmto postupom je umožnené posúdenie miery separácie základového oleja pri rôznych teplotách, a tým aj vhodnosti maziva pre dlhodobé použitie v ložiskách. Metóda je zároveň vhodná na vzájomné porovnanie mazív.

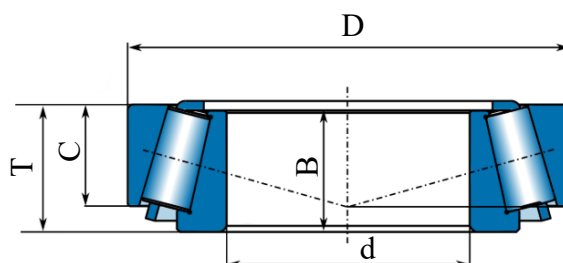


Obr. 4-5 Schéma zostavy pre meranie separácie oleja z plastického maziva; (a) oficiálna zostava; (b) modifikovaná zostava [22]

4.3 Materiál a testovacie podmienky

4.3.1 Ložisko

V experimentoch bolo použité jednoradové kužeľové ložisko ZKL 30205 A bez krytovania, znázornené na Obr. 4-6. Tento typ ložiska je navrhnutý na prenos kombinovaného radiálneho a axiálneho zaťaženia. Charakteristickým znakom je líniový styk, ktorý umožňuje sledovanie teplotného správania v oblasti kontaktu typického pre tento druh stykovej plochy. Práve táto vlastnosť predstavovala jeden z dôvodov výberu, keďže väčšina dostupných experimentálnych štúdií je zameraná na guľôčkové ložiská. Ložisko je určené pre vysoké radiálne a axiálne zaťaženie v jednom smere a jeho konštrukcia zodpovedá reálnym aplikáciám, v ktorých dochádza k dlhodobému pôsobeniu konštantných síl. Základné geometrické a technické parametre ložiska sú uvedené v Tab. 4-1, pričom vychádzajú z katalógových údajov výrobcu [23].



Obr. 4-6 Hlavné geometrické rozmery kužeľového valivého ložiska ZKL 30205 A [23]

Tab. 4-1 Geometrické a technické parametre ložiska ZKL 30205 A [23]

Označenie	Parameter	Hodnota	Jednotka
d	Vnútorý priemer	25	mm
D	Vonkajší priemer	52	mm
B	Šírka vnútorného krúžku	15	mm
C	Šírka vonkajšieho krúžku	13	mm
T	Celková šírka ložiska	16,25	mm
C_r	Dynamická únosnosť	32	kN
C_{0r}	Statická únosnosť	37	kN
n_0	Referenčné otáčky pre plastické mazivo	6400	min ⁻¹
m	Hmotnosť	0,142	kg

4.3.2 Mazivá

Pre experimentálne testovanie boli zvolené tri druhy plastických mazív, ktoré sa líšia typom základového oleja (base oil) a jeho viskozitou, viď Tab. 4 2. Takto definovaná kombinácia umožňuje sledovať vplyv viskozity a chemického zloženia základového oleja na teplotné správanie ložiska pri zmene úrovne plnenia, ako aj na schopnosť maziva uvoľňovať základový olej počas prevádzky. V literatúre sa často uvádza rozsah viskozity približne 100 až 200 mm²·s⁻¹ pri 40 °C, ktorý možno považovať za reprezentatívny pre bežné aplikácie. Použité mazivá tomuto rozsahu zodpovedajú a zároveň predstavujú komerčne dostupné produkty, čo umožňuje lepšie prepojenie experimentálnych výsledkov s praxou. Zostava SHC100, SHC220 a XHP222 bola zvolená s cieľom oddeliť vplyv viskozity základového oleja od vplyvu jeho typu, pričom všetky mazivá majú porovnateľnú konzistenciu a líšia sa najmä použitím syntetického PAO (polyalphaolefín) alebo minerálneho základového oleja.

Ložiská tohto typu sa spravidla mažu mazivami s konzistenčnou triedou NLGI 2 až 3, pričom trieda NLGI 2 predstavuje najčastejšie používané riešenie v priemyselných aplikáciách v dôsledku kompromisu medzi mechanickou stabilitou pri zvýšených teplotách a vhodnou pumpovateľnosťou pri nižších teplotách. Mazivo Mobilith SHC100 bolo zvolené ako referenčné, keďže ide o mazivo používané v aplikáciách spoločnosti ZKL, zatiaľ čo mazivá Mobilith SHC220 a Mobilgrease XHP222 boli vybrané na porovnanie vplyvu typu základového oleja pri zachovaní rovnakého typu zahusťovadla, konkrétne lítiového komplexu, a rovnakej konzistenčnej triedy.

Tab. 4-2 Charakteristika použitých plastických mazív [24–26]

Označenie maziva	Trieda NLGI	Typ zahusťovadla	Typ základového oleja	Viskozita základového oleja (40°C) [mm ² /sec]
SHC100	2	Lítiový komplex	PAO	100
SHC220	2	Lítiový komplex	PAO	220
XHP222	2	Lítiový komplex	Minerálny	220

4.3.3 Testovacie podmienky a testované kombinácie

Pri laboratórnych skúškach valivých ložísk býva skúšobné zaťaženie spravidla volené do 10 % ich dynamickej únosnosti C_r , čím je umožnené sledovanie teplotných a tribologicky významných javov bez rizika poškodenia ložiska. V rámci tejto práce bola zvolená axiálna sila 1500 N, ktorá predstavuje približne 5 % z dynamickej únosnosti ložiska $C = 32$ kN. Táto hodnota zároveň zodpovedá maximálnej sile, ktorú je možné aplikovať použitým pneumatickým valcom. Rýchlosť otáčania bola stanovená na 2000 min^{-1} , čo predstavuje približne 31 % referenčných otáčok ložiska pri plastickom mazive (6400 min^{-1}) podľa katalógových údajov výrobcu ZKL [23]. Zvolená kombinácia zaťaženia a otáčok sa nachádza mimo limitných prevádzkových stavov ložiska a zodpovedá skôr aplikáciám so strednými otáčkami a nižším až stredným zaťažením, aké sa vyskytujú napríklad v priemyselných ventilátoroch, dopravníkoch, prevodových elektromotoroch alebo skrutkových mechanizmoch mazaných plastickým mazivom.

Z hľadiska charakteru zaťaženia ide o zjednodušený stav s dominantnou axiálnou zložkou. Aplikovaná axiálna sila sa však v dôsledku geometrie kužeľového ložiska rozkladá v kontakte na radiálnu a axiálnu zložku a prenáša sa cez valivé elementy a obežné dráhy obdobne ako pri kombinovanom zaťažení. V reálnych aplikáciách sa spravidla uplatňuje kombinované zaťaženie, pričom zvolený prístup predstavuje jeho zjednodušený prípad pri zachovaní spôsobu prenosu zaťaženia v kontakte ložiska. Dĺžka jedného testu bola stanovená na 10 hodín, čo zodpovedá približne 1,2 milióna otáčok. Tento čas bol zvolený s cieľom zachytiť časť zábehovej fázy ložiska, ktorá pri ložiskách menších rozmerov spravidla prebieha v priebehu prvých desiatok hodín prevádzky. Dlhšie testovanie nebolo realizované z dôvodu časového obmedzenia prevádzky laboratória a konštrukčného riešenia skúšobného zariadenia, ktoré nie je určené na dlhodobú nepretržitú prevádzku. Počas všetkých meraní bola teplota v laboratóriu udržiavaná na hodnote $24 \pm 1^\circ\text{C}$ bez výrazných kolísaní, čím boli zabezpečené reprodukovateľné podmienky experimentu.

Na overenie vplyvu úrovne plnenia plastického maziva na prevádzkové parametre ložiska boli realizované testy s viacerými úrovňami počiatočnej náplne voľného objemu ložiska, vid' Tab. 4-3. Úroveň 60 % predstavuje odporúčanú hodnotu podľa výrobcu ZKL pre danú frekvenciu otáčania, pričom bola testovaná iba pre mazivo SHC100. Nižšie úrovne plnenia boli zvolené ako hodnoty pod odporúčanou náplňou pre dané prevádzkové podmienky, pričom ich výber vychádza z poznatkov dostupnej literatúry. Hodnota 30 % predstavuje typickú úroveň používanú v laboratórnych testoch valivých ložísk, zatiaľ čo úroveň 20 % bola zaradená s cieľom rozšíriť sledovaný rozsah smerom k nižším náplňam. Najnižšia hodnota 10 % bola testovaná pre mazivo SHC100 na posúdenie správania ložiska pri výrazne zníženom množstve maziva. Dodatočne bola do testovania zahrnutá aj úroveň 25 %, ktorá bola zvolená na základe priebežného vyhodnotenia výsledkov s cieľom spresniť sledovaný interval náplní. Pre mazivo SHC100 boli realizované testy viacerých úrovní plnenia, čím bol získaný podrobnejší prehľad o vplyve náplne. Pre mazivá SHC220 a XHP222 boli testované dve úrovne plnenia, ktoré slúžia ako referenčné pre posúdenie trendov pri rozdielnom type a viskozite základového oleja. Každý experiment bol realizovaný v troch opakovaniach, aby bola zabezpečená dostatočná opakovateľnosť výsledkov.

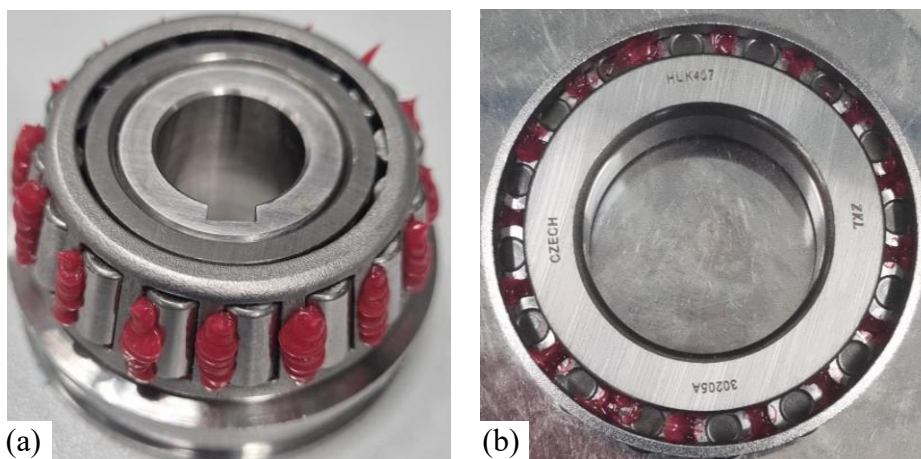
Tab. 4-3 Testované kombinácie plastických mazív

	SHC100	SHC220	XHP222
Náplň voľného objemu (%)	10 20 25 30 60	20 30	20 30
Frekvencia otáčania (min ⁻¹)	2000	2000	2000
Axiálna sila (N)	1500	1500	1500

4.4 Metódy

4.4.1 Príprava valivých ložísk

Pred samotnou aplikáciou maziva boli všetky ložiská dôkladne vyčistené od konzervačného oleja, v ktorom sú dodávané výrobcom. Čistenie bolo realizované pomocou izopropylalkoholu, pričom jednotlivé časti ložiska (vnútorný a vonkajší krúžok, klietka s valivými elementmi) boli individuálne odmastené a následne vysušené pri izbovej teplote. Voľný objem ložiska bol primárne stanovený na základe vzťahu uvedeného v rešeršnej časti práce (rovnica 2.1), pričom tento výpočet bol overený pomocou CAD modelu ložiska ZKL 30205 A odpočítaním objemu klietky a valivých elementov od celkového priestoru medzi obežnými dráhami. Výsledky oboch prístupov sa zhodovali s odchýlkou do 1 %, čím bola potvrdená správnosť stanoveného objemu. Na základe takto určeného voľného objemu bolo vypočítané požadované množstvo plastického maziva pre jednotlivé úrovne naplnenia. Mazivo bolo aplikované pomocou injekčnej striekačky s tupou ihlou s vnútorným priemerom približne 0,5 mm, čím bolo umožnené presné dávkovanie a jeho rozloženie medzi valivé elementy. Polovica objemu maziva bola nanosená pod klietku a druhá polovica nad klietku, čím bola zabezpečená distribúcia po celej šírke obežných dráh. Pomerné množstvo bolo aplikované medzi jednotlivé medzery valivých elementov s cieľom dosiahnuť rovnomerné rozloženie po celom obvode ložiska. Naplnené ložisko je zobrazené na Obr. 4-7. Po aplikácii maziva bolo ložisko osadené na vnútorný nadstavec a vložené do skúšobnej zostavy. Pre každý test bolo použité nové ložisko, keďže zábehová fáza závisí nielen od množstva plnenia, ale aj od počiatočného stavu ložiska. Počas zábehu dochádza k postupnému zahľadaniu nerovností na povrchu valivých dráh, a opätovné použitie ložiska by tak mohlo ovplyvniť merané charakteristiky.



Obr. 4-7 Naplnené ložisko ZKL 30205 A plastickým mazivom SHC100 30%; (a) pohľad z vnútornej strany; (b) pohľad zo zadnej strany

4.4.2 Skúšobný postup

Kalibrácia senzoriky

Pred začiatkom meraní bolo vykonané základné overenie funkcie snímača sily a termočlánku. Snímač sily MEGATRON KM1506 K bol zaťažovaný známymi hmotnosťami v rozsahu 0 až 600 N, pričom bol zaznamenávaný výstupný signál v rozsahu $-0,4$ až $-3,4$ V. Na základe nameraných hodnôt bola stanovená lineárna prevodná závislosť medzi napätím a silou, ktorá bola implementovaná do meracieho programu LabVIEW. Pre korekciu východiskového posunu bolo pridané odsadenie (offset) tak, aby výstupná hodnota zodpovedala nule pri nezaťaženom stave. Termočlánok typu K (OMEGA) bol overený porovnaním s referenčným digitálnym teplomerom pri dvoch známych teplotných bodoch, a to pri $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (teplota topenia ľadu) a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (teplota varu vody). Na základe zisteného rozdielu bol v programe LabVIEW aplikovaný teplotný offset, aby výstupné hodnoty zodpovedali referenčnému meraniu. Schéma meracieho reťazca je uvedená v kapitole 5.

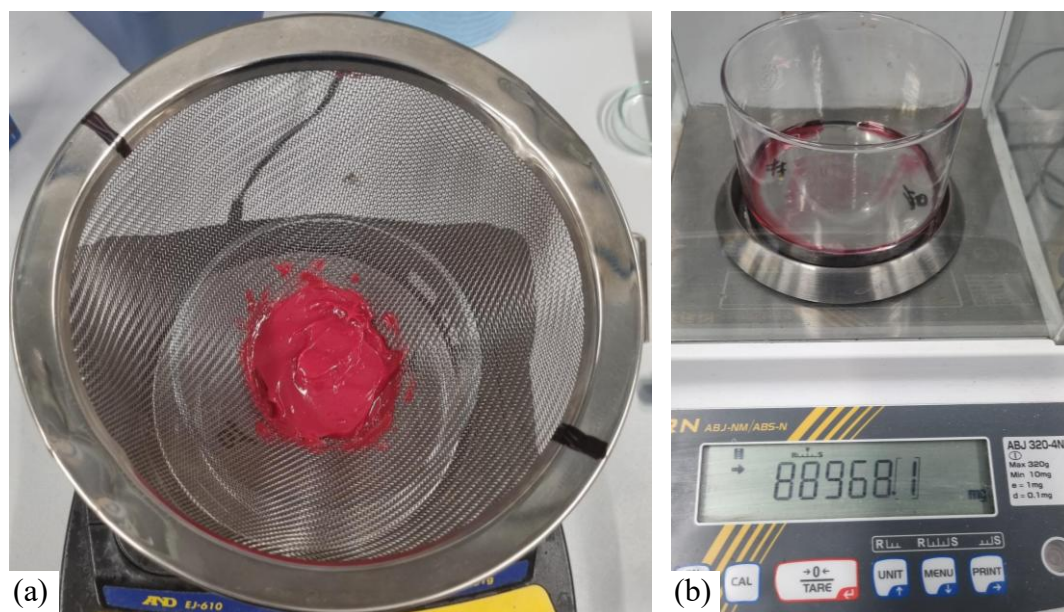
Príprava a testovanie

Po príprave a naplnení bolo ložisko osadené na vnútorný nadstavec a vložené do telesa testovacej zostavy. Následne sa pripevnil držiak termočlánku, ktorý bol v kontakte s vonkajším krúžkom ložiska pomocou teplovodivej pasty. Zostava bola uzatvorená a pripravená na spustenie testu. Po pripojení snímača sily a pneumatického valca sa systém zaťažil cez teleso testovaného ložiska požadovanou axiálnou silou. Test prebiehal pri konštantnej frekvencii otáčania po dobu 10 hodín. Záznam dát sa realizoval v programe LabVIEW, ktorý priebežne zaznamenával teplotu vonkajšieho krúžku ložiska a hodnotu pôsobiacej sily zo snímača sily s frekvenciou vzorkovania 1 Hz.

Počas testovania bola udržiavaná stabilná teplota prostredia v rozsahu $24 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, bez prúdenia vzduchu alebo zdrojov tepla. Po ukončení testu bol pneumatický valec odľahčený a zostava ponechaná na ochladenie. Po vychladnutí sa ložisko demontovalo a odvážila sa hmotnosť vonkajšieho nadstavca s vonkajším krúžkom a vytlačeným plastickým mazivom, ako aj hmotnosť vnútorného nadstavca s vnútorným krúžkom. Tieto váženia slúžili na kontrolu hmotnostnej bilancie maziva pred a po teste. Na základe rozdielu počiatkovej hmotnosti aplikovaného maziva a hmotnosti maziva zachyteného po teste na nadstavcoch bol určený únik plastického maziva. Za únik sa v tejto práci považovalo množstvo maziva, ktoré sa počas prevádzky presunulo mimo vnútorného priestoru ložiska (t. j. mimo oblasti medzi vnútorným a vonkajším krúžkom, kľetkou a valivými elementmi) do okolitého priestoru zostavy. Únik bol vyjadrený ako percentuálny podiel z pôvodnej náplne s presnosťou na jedno desatinné miesto.

Meranie separácie oleja

Meranie separácie základového oleja z plastického maziva prebiehalo podľa princípov normy DIN 51817, ktorá definuje statickú metódu hodnotenia schopnosti maziva separovať olej pri zvýšenej teplote. Na skúšku bola použitá modifikovaná skúšobná zostava popísaná v predchádzajúcej časti, pričom do kovového sitka bolo v každom meraní aplikované presne odvážené množstvo plastického maziva $13,5 \pm 0,1$ g. Následne bolo rovnomerne rozprestreté po spodnej ploche plochy sitka, viď Obr. 4-8a. Mazivo bolo následne zaťažené závažím s hmotnosťou 100 ± 1 g, sitko so vzorkou bolo umiestnené nad zbernú nádobu na zachytávanie uvoľneného oleja a celá zostava vložená do sušiacej pece s nastavenou teplotou $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ na dobu 18 hodín. Po ukončení skúšky bola zostava vyňatá z pece a ponechaná na ochladenie na izbovú teplotu, následne sa analytickou váhou s rozlíšením 1 mg stanovila hmotnosť uvoľneného oleja, ktorý sa počas testu oddelil z plastického maziva a zachytil v zbernej nádobe, viď Obr. 4-8b. Pre každé testované mazivo boli vykonané tri opakovania skúšky za rovnakých podmienok; hmotnosti jednotlivých sítiok (1–3) a zberných baniek (1–3) boli pred a po skúške samostatne zaznamenané, čím sa zabezpečilo presné stanovenie počiatočného množstva maziva aj množstva uvoľneného oleja s presnosťou na miligram. Princíp výpočtu percentuálneho podielu separovaného oleja je uvedený v nasledujúcej časti.

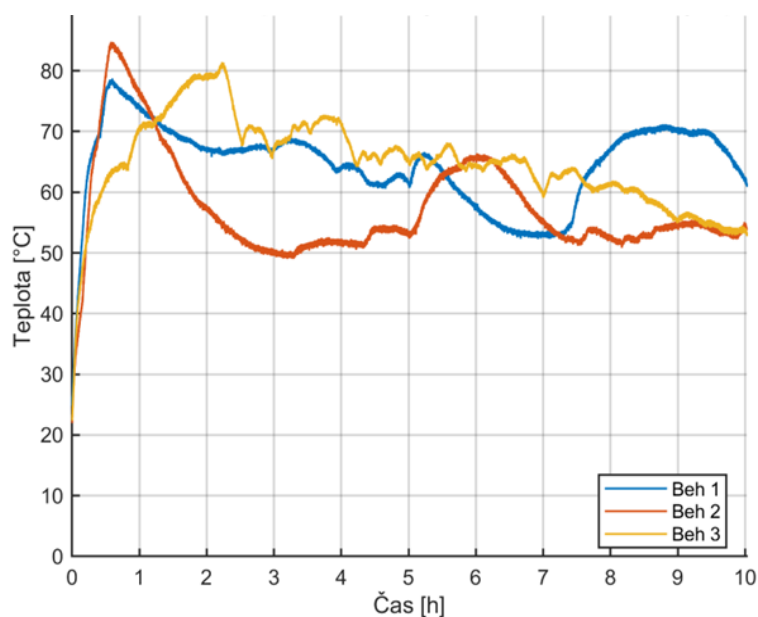


Obr. 4-8 Časti testu separácie oleja z plastického maziva; (a) rozprestreté mazivo pred testom; (b) separovaný olej v banke

4.4.3 Spracovanie získaných dát

Spracovanie teplotných charakteristík

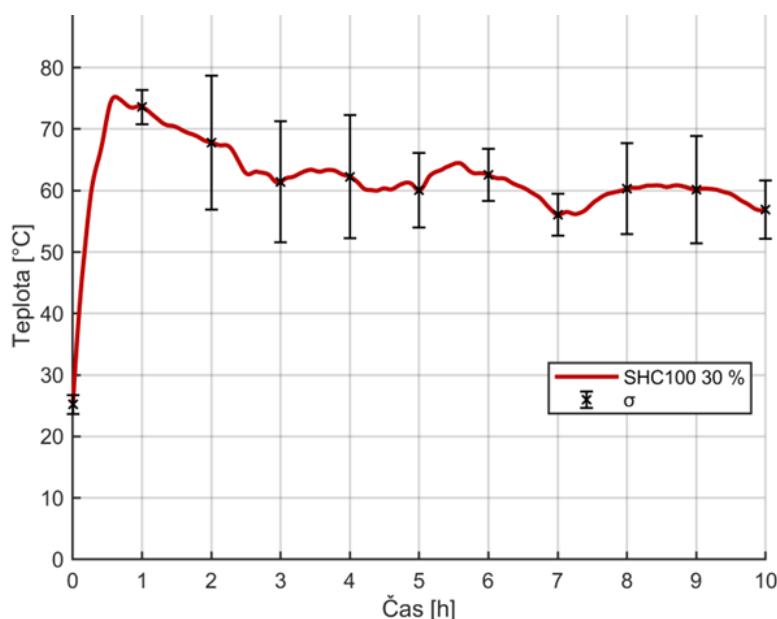
Záznamy teploty a axiálnej sily boli po ukončení experimentov exportované z programu LabVIEW vo formáte .txt a následne spracované v prostredí MATLAB. Pre každú kombináciu maziva a úrovne plnenia boli k dispozícii tri nezávislé merania. Vstupné súbory obsahovali čas, silu a teplotu, pričom časová os bola pre účely spracovania prevedená na hodiny. V úvodnom kroku boli pre každý beh vykreslené surové časové priebehy teploty bez ďalších úprav, čím bola umožnená základná vizuálna kontrola priebehu meraní a identifikácia prípadných rozdielov medzi jednotlivými behmi, vid' Obr. 4-9. Súčasne bola overená stabilita axiálneho zaťaženia, pričom priemerná hodnota sily bola počas celého testu udržiavaná na úrovni 1500 N s odchýlkou nepresahujúcou ± 10 N.



Obr. 4-9 Jednotlivé surové behy teplotnej charakteristiky pre mazivo SHC100, pri 30% náplni

Pre kvantitatívne spracovanie boli dáta zo všetkých behov časovo zosúladené na spoločnú časovú os pomocou lineárnej interpolácie. Z takto spracovaných dát bol v každom časovom okamihu vypočítaný aritmetický priemer teploty a smerodajná odchýlka, ktoré reprezentujú stredné teplotné správanie ložiska a mieru rozptylu medzi behmi. Priemerný teplotný priebeh bol následne vyhladený pomocou Savitzkyho–Golayovho filtra s polynómom 2. stupňa a fyzickým oknom zodpovedajúcim 15 minútam. Tento postup umožňuje obmedziť vplyv krátkodobých fluktuácií a elektrického šumu pri zachovaní charakteristického priebehu teploty počas experimentu.

Krátkodobé fluktuácie teplotného signálu môžu byť spôsobené najmä elektrickým šumom meracieho reťazca, ktorý vzniká v dôsledku nízkej úrovne signálu termočlánku, činnosti zosilňovača, A/D prevodníka a elektromagnetického rušenia z pohonu zariadenia. Smerodajná odchýlka bola počítaná zo surových interpolovaných dát a nebola filtrovaná. Na účely grafickej interpretácie a porovnania opakovateľnosti meraní boli v pravidelných časových intervaloch 1 h vykreslené chybové úsečky, ktoré znázorňujú absolútnu hodnotu smerodajnej odchýlky σ v danom čase, vid' Obr. 4-10. Tieto úsečky slúžia na posúdenie rozptylu nameraných hodnôt a miery zhody medzi jednotlivými behmi.



Obr. 4-10 Priemerný beh teplotnej charakteristiky pre mazivo SHC100, pri 30% náplni so smerodajnými odchýlkami zobrazenými každú hodinu

Za kvázi ustálený teplotný stav bol považovaný časový úsek nasledujúci po dosiahnutí maximálnej teploty, v ktorom dochádza k poklesu a následnej stabilizácii teploty v okolí približne konštantnej hodnoty. V tomto intervale sa zmena teploty v kľzavom časovom okne pohybuje v obmedzenom rozsahu, čo umožňuje tento stav považovať za kvázi ustálený. Tento stav zodpovedá fáze, v ktorej je časová zmena teploty nízka a priebeh sa približuje ustálenému režimu. Rozsah kolísania teploty sa pritom môže líšiť v závislosti od použitého maziva a úrovne plnenia, preto nie je možné stanoviť jednu univerzálnu hodnotu pre všetky prípady. Takto definovaný prístup bol použitý jednotne pre všetky merania, čím bolo umožnené ich vzájomné porovnanie.

Hodnotenie úniku plastického maziva

Únik plastického maziva bol hodnotený na základe hmotnostnej bilancie zostavy po ukončení jednotlivých testov a vyjadrený ako relatívny podiel v percentách voči pôvodne aplikovanému množstvu maziva pre danú úroveň plnenia. Táto hodnota predstavuje podiel maziva, ktorý počas prevádzky opustil vnútorný priestor ložiska a presunul sa do mimoložiskovej oblasti, pričom bola stanovená podľa vzťahu (4.1). Získané hodnoty relatívneho úniku boli následne spracované a graficky znázornené v stĺpcových grafoch pre jednotlivé druhy mazív a úrovně plnenia, čím bolo umožnené ich vzájomné porovnanie.

$$\eta = \frac{m_{\text{pred}} - m_{\text{po}}}{m_{\text{pred}}} \cdot 100 \% \quad (4.1)$$

kde:

η	[%]	relatívny únik plastického maziva
m_{pred}	[kg]	hmotnosť pôvodnej náplne v ložisku
m_{po}	[kg]	hmotnosť zvyškového maziva v ložisku

Separácia oleja

Spracovanie výsledkov bolo realizované na základe hmotnostných údajov získaných z laboratórnej váhy. Hmotnosť separovaného základového oleja m_1 bola stanovená po ochladení skúšobnej zostavy na izbovú teplotu. Percentuálny podiel separovaného oleja bol následne vyjadrený ako pomer hmotnosti separovaného oleja k počiatočnej hmotnosti plastického maziva m_0 podľa vzťahu:

$$x = \frac{m_0}{m_1} \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

kde:

x	[%]	uvoľnený olej
m_0	[kg]	hmotnosť plastického maziva
m_1	[kg]	hmotnosť uvoľneného oleja

Takto získané hodnoty umožňujú vzájomné porovnanie stability jednotlivých plastických mazív z hľadiska uvoľňovania oleja.

4.5 Testované predikcie

V tejto práci boli experimentálne overované predikcie vyplývajúce z formulovaných hypotéz H1–H2. Predikcie sú zamerané na dve oblasti, a to teplotné správanie ložiska počas experimentu a únik plastického maziva z nekrytovaného ložiska. Overovanie bolo realizované porovnaním výsledkov medzi jednotlivými úrovňami plnenia a medzi typmi plastických mazív pri zachovaní rovnakých skúšobných podmienok.

Predikcia P1 – vplyv plnenia na teplotnú charakteristiku (H1)

Uvažuje sa, že úroveň plnenia ovplyvní priebeh zábehovej fázy a maximálnu dosiahnutú teplotu, pričom typ plastického maziva sa prejaví najmä v celkovom tvare teplotného priebehu. Súčasne sa predpokladá, že trend zmeny maximálnej teploty v závislosti od úrovne plnenia zostane zachovaný aj pri zmene typu maziva. Overenie predikcie bolo založené na porovnaní:

- maximálnej teploty počas testu,
- priemernej teploty za celý test a v čase 6 až 10 hodín,
- času potrebného na dosiahnutie kvázi ustáleného stavu,
- teploty v kvázi ustálenom stave.
- predikcia bola posudzovaná na základe zmien týchto veličín v závislosti od úrovne plnenia a typu maziva.

Predikcia P2 – vplyv plnenia na únik plastického maziva (H2)

Uvažuje sa, že so zvyšujúcou sa úrovňou plnenia dochádza k nárastu relatívneho úniku plastického maziva z otvoreného ložiska, pričom typ maziva ovplyvňuje veľkosť tohto úniku. Overenie predikcie bolo vykonané na základe relatívnej zmeny hmotnostnej bilancie maziva, vyjadrenej percentuálne voči počiatočnej náplni. Výsledky boli porovnávané medzi jednotlivými úrovňami plnenia a medzi použitými mazivami.

5 VÝSLEDKY

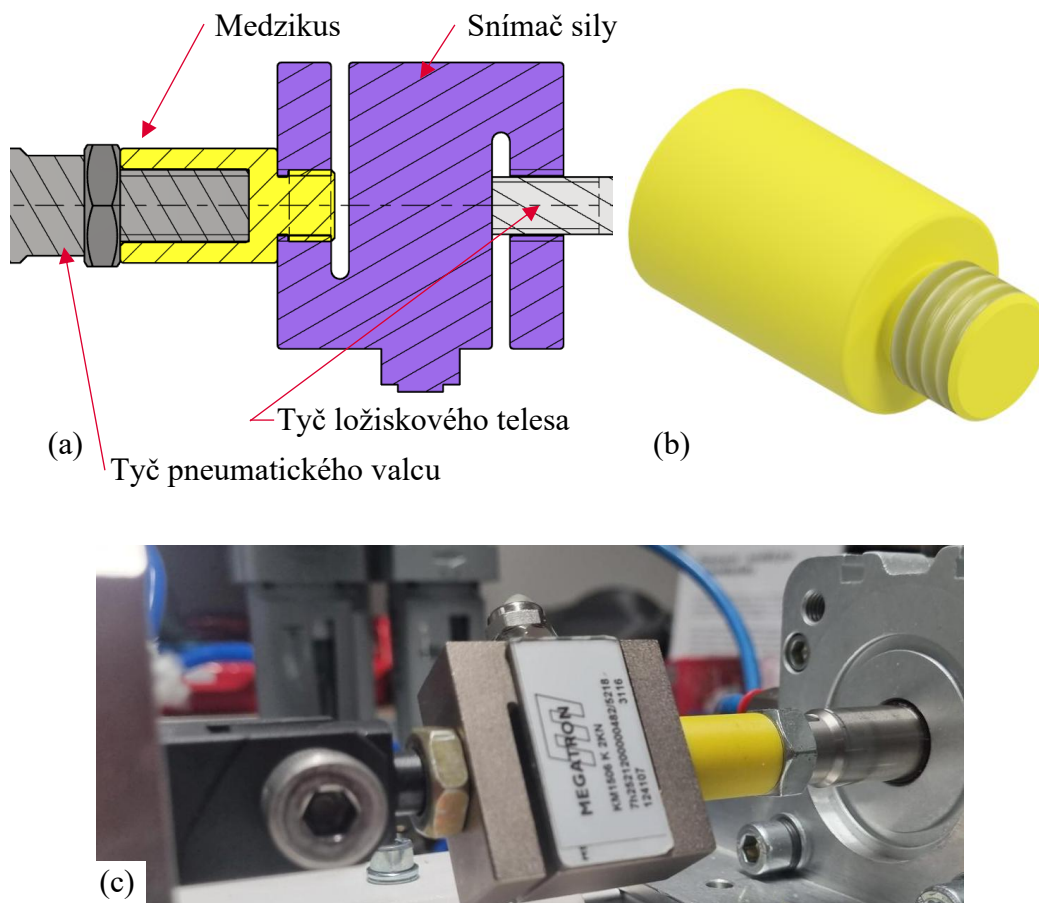
5.1 Konštrukčná úprava testovacieho zariadenia

Na počiatku bola zhodnotená využiteľnosť dostupných komponentov z existujúceho testovacieho zariadenia. Hlavné časti boli zachované, ich prehľad uvádza Tab. 5-1. Väčšina komponentov bola vo vhodnom stave na použitie, avšak vlnovcovú spojku a vnútorný nadstavec bolo nutné nahradiť novými z dôvodu opotrebenia pôvodných komponentov. Okrem toho bolo nutné navrhnuť ďalšie časti uľahčujúce manipuláciu, umožňujúce zjednodušené uchytanie snímača sily a axiálnu aretáciu testovaného ložiska.

Tab. 5-1 Použité časti zo zariadenia 2023/2024

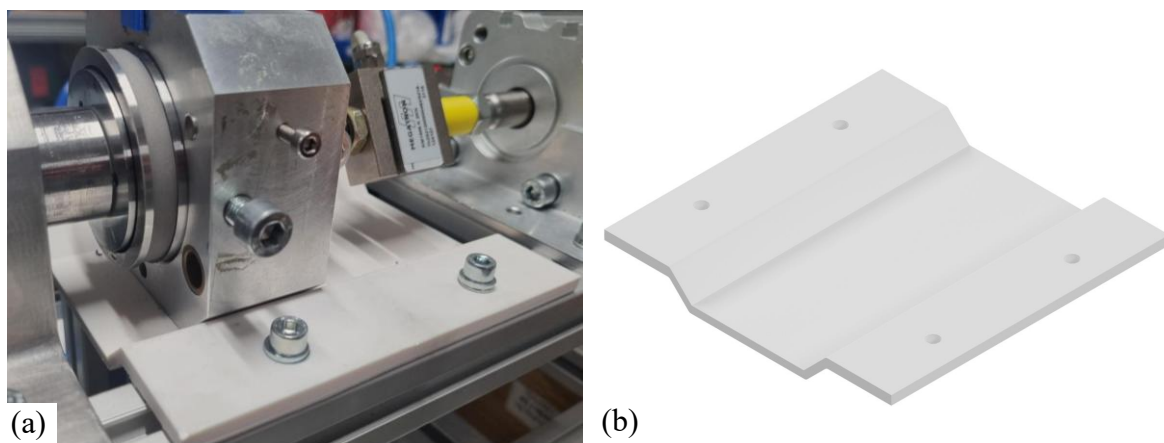
Názov	Počet
Rám	1
Pneumatický valec	1
Úchyt pneumatického valcu	2
Snímač sily	1
Teleso testovaného ložiska	1
Vonkajší nadstavec	1
Vnútorný nadstavec	1
Zostava ložiskového telesa	1
Vlnovcová spojka	1
Servomotor	1
Úchyt elektromotoru	1

Ako prvý bol navrhnutý spojovací člen medzi pneumatickým valcom a snímačom sily (ďalej len medzikus), vid' Obr. 5-1. Slúži na prepojenie pneumatického valca so snímačom sily. Hlavným dôvodom jeho návrhu bolo odstránenie nevhodného pôvodného riešenia, kde bol spoj realizovaný závitom na oboch stranách, čo sťažovalo montáž a demontáž zostavy pred a po teste. Nové riešenie umožňuje rýchle nasunutie a vysunutie celého uzla s telesom testovaného ložiska, čím sa zlepšila a urýchlila manipulácia pri montáži, resp. demontáži testovaného ložiska. Diel je vyrobený technológiou FDM 3D tlače z materiálu PLA, pričom jeho tvar zabezpečuje navedenie piestu pneumatického valca do snímača sily a zároveň spoľahlivý prenos axiálnej sily. Sila sa prenáša plošným stykom medzi čelnými plochami.



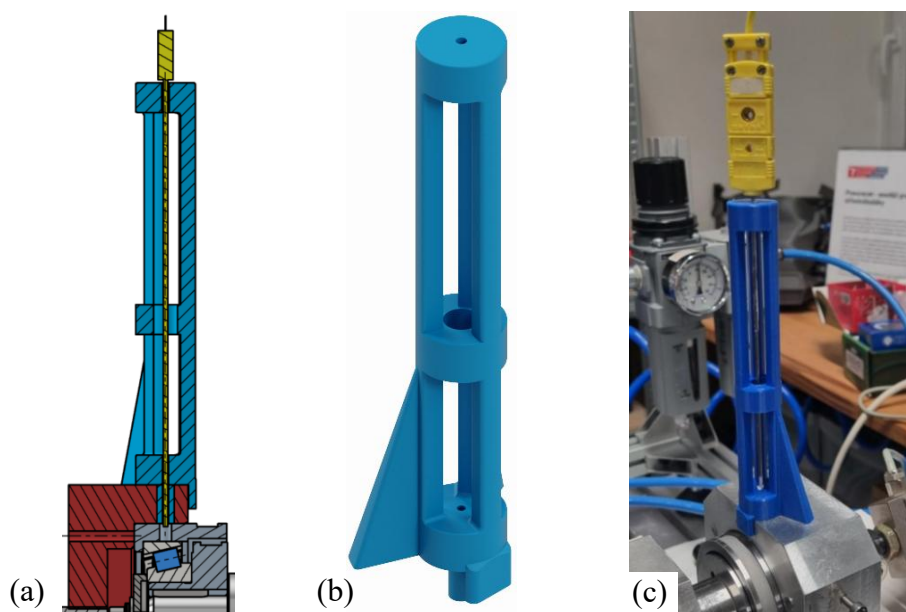
Obr. 5-1 Použitý medzikus na jednoduché spojenie tyče pneumatického valcu a snímača sily; (a) pohľad na medzikus a priliehajúce komponenty v reze; (b) izometrický pohľad na medzikus; (c) fotografia umiestnenia medzikusu v zostave

Druhým navrhnutým dielom bola podložka, vid' Obr. 5-2. Používa sa ako oporný prvok pre teleso testovaného ložiska. Riešenie bolo inšpirované prácou od Hynka [21], v ktorej bola použitá predošlá verzia testovacieho zariadenia (pred konštrukčnou úpravou). Podložka bola rozmerovo upravená a doplnená o otvory pre upevnenie k rámu testovacieho zariadenia. Bola vyrobená technológiou FDM 3D tlače z materiálu PLA. Počas testu nie je funkčnou súčasťou, keďže teleso sa pri axiálnom zaťažení opiera o protikus na hriadelí. Jej úlohou je podoprieť teleso pri zaťažovaní a pomôcť jeho jednoduchšiemu navedeniu na protikus. Súčasť zároveň zvyšuje bezpečnosť manipulácie po ukončení testu, pretože po uvoľnení pneumatického valca zostáva zahriate teleso položené na podložke a nie je s ním nutné okamžite manipulovať, ale je možné počkať na jeho ochladeniu. V porovnaní s pôvodným riešením má podložka väčšiu dĺžku opornej plochy a je pevne uchytená k rámu pomocou skrutiek, čím sa eliminuje potreba jej pridržiavania rukou a zjednodušuje sa manipulácia pred a po testoch.



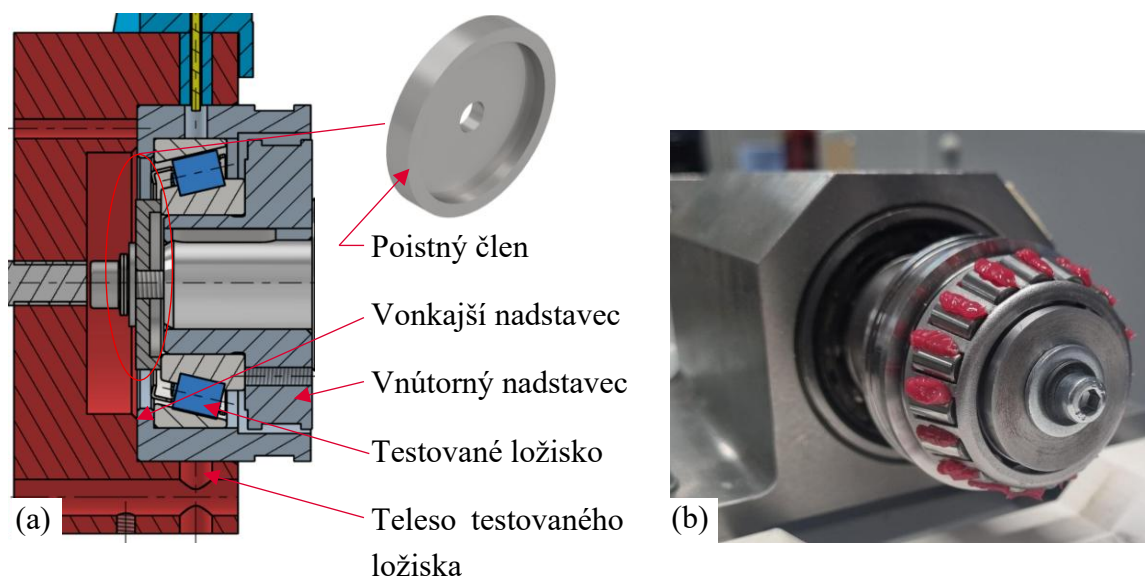
Obr. 5-2 Podložka pod teleso testovaného ložiska; (a) fotografia umiestnenia podložky v zostave; (b) izometrický pohľad na podložku

Tretím navrhnutým dielom bol držiak termočlánku, vid' Obr. 5-3. Je umiestnený na hornej časti ložiskového telesa testovaného ložiska. Jeho úlohou je zabezpečiť presné a stabilné polohovanie termočlánku na vonkajšom krúžku valivého ložiska, ktorý je počas testu stacionárny. Zvolená poloha umožňuje priamy kontakt termočlánku s vonkajším krúžkom, čím sa vytvárajú vhodné podmienky na snímanie teploty. Diel bol vyrobený technológiou FDM 3D tlače z materiálu ABS v uzavretej komore na tlačiarni Prusa CORE One, čím bola dosiahnutá vyššia teplotná odolnosť v porovnaní s materiálmi, ako sú PLA alebo PETG. Držiak zároveň zabezpečuje opakovateľné ustavenie termočlánku pri jednotlivých testoch. Na zlepšenie tepelného kontaktu medzi termočlánkom a vonkajším krúžkom ložiska bola použitá teplovodivá pasta Dow Corning 340.



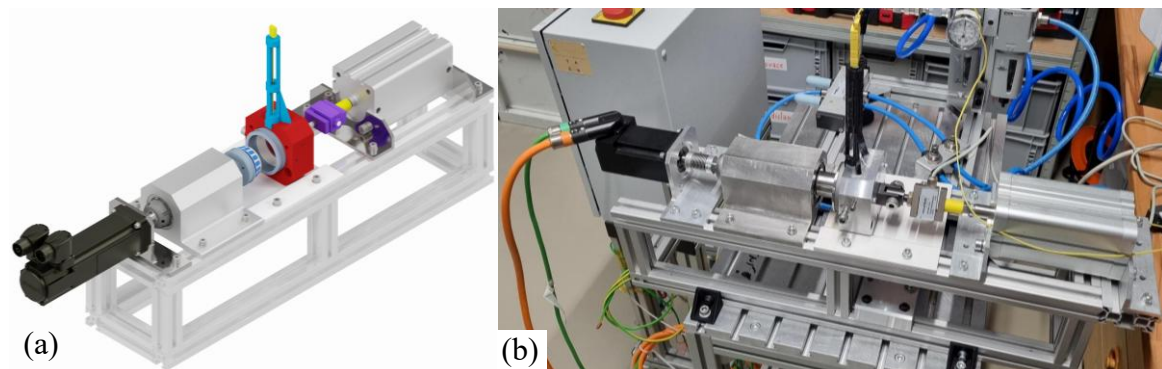
Obr. 5-3 Držiak termočlánku; (a) pohľad v reze; (b) izometrický pohľad na držiak; (c) fotografia umiestnenia držiaku termočlánku v zostave

Poslednou konštrukčnou úpravou bolo navrhnutie nového axiálneho člena, ktorý je znázornený na Obr. 5-4. Plní funkciu axiálneho prítlaču vnútorného krúžku valivého ložiska na vnútorný nastavtec. Jeho úlohou je zabezpečiť stabilné axiálne usadenie ložiska počas testu a zabrániť nežiaducemu pretáčaniu medzi vnútorným krúžkom ložiska a vnútorným nastavcom. Oproti pôvodnému riešeniu bol člen tvarovo upravený pre konkrétny typ testovaného ložiska. Diel bol vyrobený z konštrukčnej oceli C45, ktorá v porovnaní s hliníkovými alebo polymérnymi materiálmi (napr. PLA, PETG, ABS) vykazuje vyššiu pevnosť, tvarovú stabilitu a odolnosť voči deformáciám pri zvýšených teplotách. Zvolený materiál tak zabezpečuje spoľahlivé usadenie ložiska aj pri dlhodobom zahrievaní počas testu. Diera pre upevňovaciu skrutku M5 bola navrhnutá s priemerom 5,1 mm, čo umožňuje minimálnu vôľu pri montáži a zároveň presnejšie axiálne vystredenie člena. Celková hrúbka člena je 4 mm a vonkajší priemer 30,5 mm, čo zabezpečuje, že kľetka ložiska počas testu neprichádza do kontaktu s axiálnym členom.



Obr. 5-4 Axiálny člen; (a) pohľad v reze na hlavnú funkčnú časť; (b) fotografia umiestnenia poistného člena v zostave

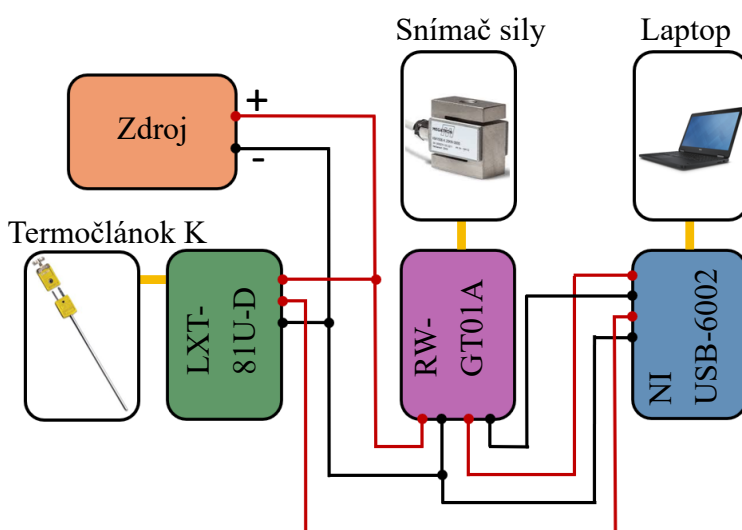
Konštrukčná úprava testovacieho zariadenia bola realizovaná s cieľom zjednodušiť manipuláciu pri vykonávaní testov, skrátiť čas prípravy, zvýšiť opakovateľnosť meraní a zároveň prispôsobiť jednotlivé prvky pre konkrétny typ testovaného ložiska. Súčasne bolo umožnené sledovanie okamžitých zmien teploty na vonkajšom krúžku ložiska, pričom pre tento účel bolo potrebné navrhnuť a zapojiť merací reťazec na meranie teploty a pôsobiacej sily. Na Obr. 5-5 je zobrazená zostava zariadenia po vykonaných úpravách. Zostava zachováva pôvodnú rámovú základňu z hliníkových profilov, na ktorej sú upevnené hlavné komponenty, ako servomotor, ložiskové teleso s testovaným ložiskom, snímač sily a pneumatický valec. Nové konštrukčné prvky, medzi ktoré patria medzikus, držiak termočlánku, podložka a axiálny člen, sú znázornené v odlišných farbách pre lepšie rozlíšenie ich funkcie a polohy v rámci zostavy. Zobrazenie poskytuje prehľad o celkovom usporiadaní a vzájomnom prepojení jednotlivých častí testovacieho systému.



Obr. 5-5 Zostava testovacieho zariadenia po úprave; (a) izometrický pohľad na celú zostavu; (b) fotografia zostavy zariadenia

Senzorika a meracie príslušenstvo

V rámci konštrukčnej úpravy testovacieho zariadenia bol realizovaný merací reťazec pozostávajúci z dvoch samostatných obvodov pre meranie aplikovanej sily a teploty, ktorých zapojenie je znázornené na Obr. 5-6. Snímač sily MEGATRON KM1506 K (2 kN) bol zapojený cez prevodník RW GT01A Load Cell Amplifier, ktorý zabezpečuje zosilnenie a prevod výstupného signálu z tenzometrického mostíka. Zosilňovač bol napájaný napätím 24 V DC a poskytoval analógový výstup v rozsahu 0 až 10 V, ktorý bol následne privedený do dátového modulu NI USB 6002 na digitalizáciu a záznam signálu. Meranie teploty bolo realizované pomocou termočlánku typu K (OMEGA K), pripojeného k prevodníku LXT 81U D, ktorý prevádza termoelektrické napätie na štandardizovaný napäťový signál vhodný pre vstup do dátového modulu. Napájanie prevodníka bolo taktiež zabezpečené zo zdroja 24 V DC, pričom rozsah merania bol nastavený na 0 až 150 °C. Oba signály z prevodníkov boli vedené do modulu NI USB 6002, kde dochádzalo k ich digitalizácii a následnému prenosu do počítača prostredníctvom rozhrania USB. Záznam a spracovanie dát boli realizované v prostredí LabVIEW.



Obr. 5-6 Schéma zapojenia obvodov

5.2 Teplotné charakteristiky

V tejto časti sú prezentované výsledky merania teploty vonkajšieho krúžku valivého ložiska počas experimentov realizovaných pri rôznych úrovniach plnenia plastického maziva a pre rôzne typy mazív. Hodnotenie je zamerané na časový priebeh teploty a na vybrané charakteristické parametre, ktoré umožňujú kvantitatívne porovnanie jednotlivých meraní.

Pre každé testované mazivo sú uvedené:

- časové priebehy teploty počas celého experimentu,
- maximálna dosiahnutá teplota,
- priemerná teplota za celý čas testu,
- priemerná teplota v kvázi ustálenom stave, určená ako priemer teploty za posledné štyri hodiny experimentu.

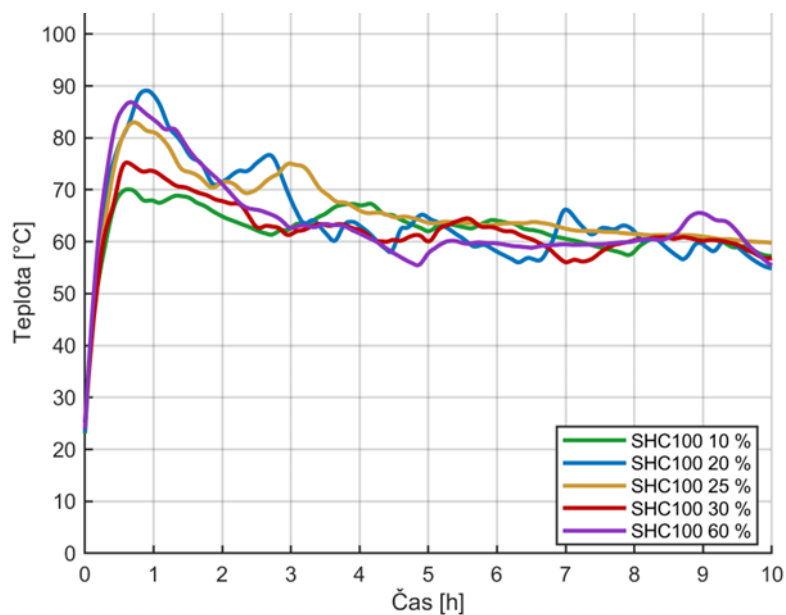
Maximálna teplota bola stanovená z nefiltrovaných dát, aby bol zachovaný jej fyzikálny význam. Zobrazené časové priebehy teploty sú pre účely prehľadnosti vyhladené, čo môže viesť k miernym rozdielom medzi hodnotou maxima v grafe a numericky určenou hodnotou.

Kvázi ustálený stav je v tejto práci definovaný ako časový úsek, v ktorom sa teplota po ukončení zábehovej fázy stabilizuje a jej časová zmena zostáva v obmedzenom rozsahu bez prítomnosti výrazného trendu. Priemerná teplota za celý čas testu predstavuje doplnkový parameter charakterizujúci celkové tepelné zaťaženie ložiska počas experimentu. Keďže tento parameter zahŕňa priebeh zábehovej aj ustálenej fázy, jeho interpretačná hodnota je čiastočne limitovaná, a preto je samostatne hodnotená aj teplota v kvázi ustálenom režime. Konkrétne je tento režim reprezentovaný poslednými štyrmi hodinami experimentu, keďže v tomto časovom úseku je pri všetkých testovaných mazivách pozorovaná už stabilizovaná teplotná odozva bez výrazných trendov.

Z dôvodu prekryvu jednotlivých priebehov nie sú v grafoch priebehu teploty zobrazené odchýlky, pričom ich kvantitatívne vyjadrenie je uvedené v texte vo forme priemernej odchýlky za celý test pre jednotlivé kombinácie maziva a úrovne plnenia. Štatistické vyhodnotenie rozdielov medzi skupinami je realizované na zvolenej hladine významnosti $\alpha = 0,05$, pričom uvádzané p-hodnoty je potrebné interpretovať v tomto kontexte.

5.2.1 Mazivo SHC100

Teplotné správanie ložiska mazaného mazivom SHC100 je znázornené na Obr. 5-7, kde sú uvedené priemerné priebehy teploty pre jednotlivé úrovne plnenia voľného objemu (10 %, 20 %, 30 % a 60 %). Zobrazené krivky reprezentujú časový vývoj teploty počas celého 10 hodinového testu. Na začiatku experimentu je vo všetkých prípadoch pozorovaný výrazný nárast teploty, ktorý zodpovedá zábehovej fáze ložiska, pričom v úvodnej časti priebehu, približne počas prvých 15 minút, je priebeh nárastu pre všetky úrovne plnenia takmer totožný. S pokračujúcim časom dochádza k postupnému rozdeľovaniu kriviek v závislosti od percenta plnenia. Maximálna teplota je pri plneniach 10 %, 30 % a 60 % dosiahnutá približne po 40 minútach od začiatku testu, zatiaľ čo pri plnení 20 % dochádza k jej dosiahnutiu s miernym časovým oneskorením, približne po 50 minútach. Po dosiahnutí maximálnych hodnôt nasleduje pri všetkých úrovniach plnenia pokles teploty, pričom pri plnení 20 % je možné pozorovať aj krátkodobý opätovný nárast teploty približne po 1 hodine a 50 minútach testu, po ktorom opäť nasleduje pokles. Obdobný krátkodobý nárast je zaznamenaný aj pri plnení 25 %, a to približne od 2 hodín a 20 minút experimentu.

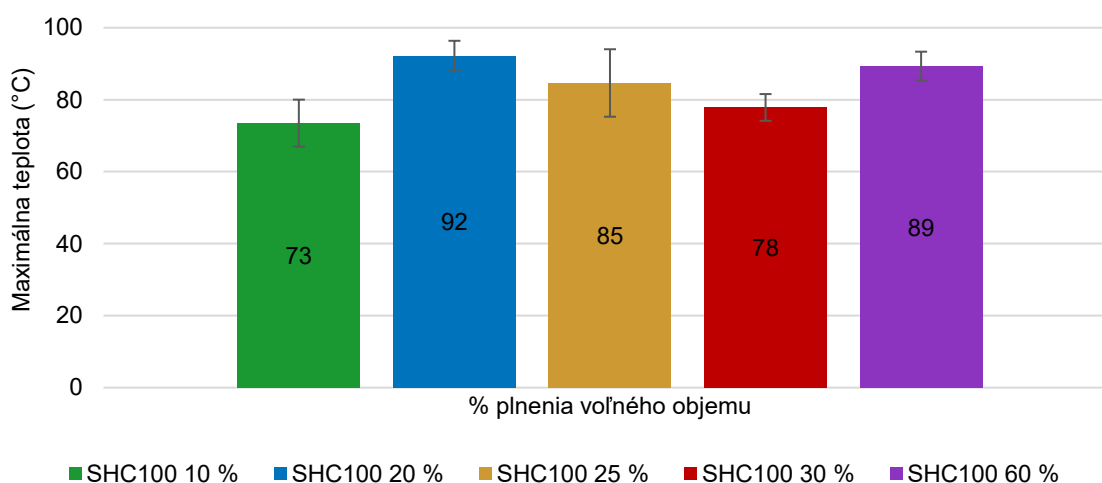


Obr. 5-7 Priebeh teploty ložiska mazaného mazivom SHC100 pri danom plnení

V kvázi ustálenom režime sa teplota pri všetkých skúmaných úrovniach plnenia pohybuje v intervale približne 56 až 68 °C a nevykazuje monotónny vývoj, ale len malé časové kolísanie hodnôt. Prechod do tohto režimu je pri plneniach 10 %, 30 % a 60 % dosahovaný približne v rovnakom čase, okolo 3 hodín od začiatku testu, zatiaľ čo pri plnení 20 % je možné identifikovať mierne oneskorenie, približne na úroveň 3 hodín a 10 minút. Najdlhší čas ustálenia je pozorovaný pri plnení 25 %, kde je kvázi ustálený stav dosahovaný až v intervale približne 4 až 5 hodín. V závere testu dochádza k postupnému znižovaniu rozdielov medzi teplotami v ustálenej fáze.

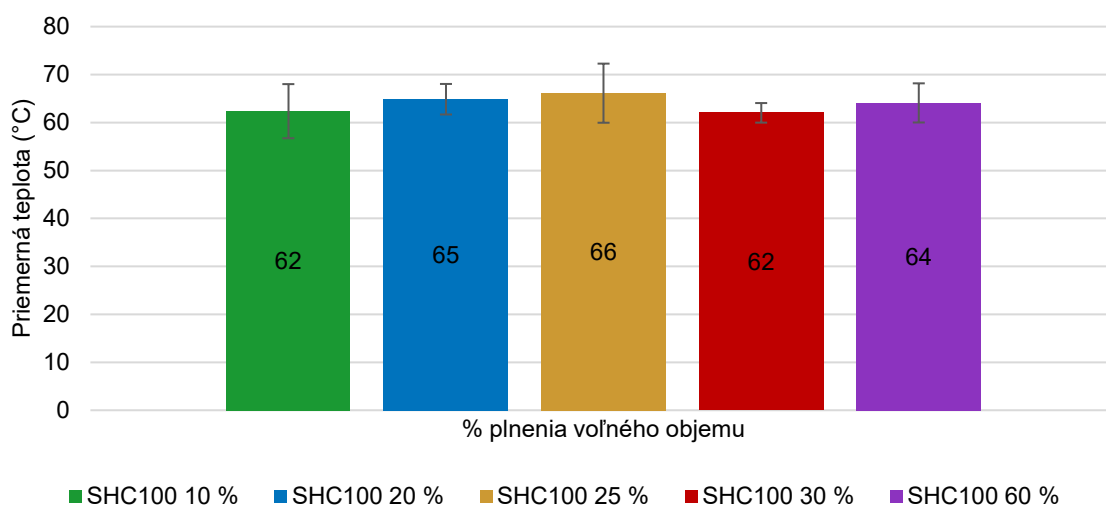
Priemerná odchýlka teploty za celý priebeh testu, stanovená ako smerodajná odchýlka z jednotlivých behov, nadobúda pre jednotlivé úrovne plnenia hodnoty približne $\pm 12,2$ °C (10 %), $\pm 9,3$ °C (20 %), $\pm 12,5$ °C (25 %), $\pm 7,1$ °C (30 %) a $\pm 9,9$ °C (60 %), čo zodpovedá relatívnym odchýlkam približne $\pm 19,4$ %, $\pm 14,3$ %, $\pm 18,7$ %, $\pm 11,4$ % a $\pm 15,3$ %. Hodnoty odchýlok nie sú z dôvodu prekryvu jednotlivých priebehov graficky znázornené, pričom ich uvedenie v textovej forme umožňuje kvantifikovať mieru rozptylu medzi jednotlivými behmi pre dané kombinácie maziva a úrovne plnenia.

Teplotné priebehy boli následne kvantitatívne vyhodnotené prostredníctvom maximálnej teploty pre jednotlivé úrovne plnenia voľného objemu. Z grafického vyjadrenia, vid' Obr. 5-8 vyplýva, že najvyššia maximálna teplota bola dosiahnutá pri plnení 20 %, kde nadobudla hodnotu 92 °C. Pri zvýšení plnenia na 60 % bola zaznamenaná mierne nižšia maximálna teplota 89 °C, zatiaľ čo pri plnení 25 % a 30 % boli dosiahnuté hodnoty 85 °C, resp. 78 °C. Najnižšia maximálna teplota bola pozorovaná pri plnení 10 %, kde dosiahla 73 °C. Z hľadiska variability meraní sú v grafe zahrnuté chybové úsečky reprezentujúce rozptyl medzi jednotlivými opakovaniami, pričom pri plneniach 20 %, 30 % a 60 % je pozorovaná takmer rovnaká a zároveň najnižšia úroveň variability. Naopak, pri plneniach 10 % a 25 % sú zaznamenané výrazne vyššie odchýlky medzi jednotlivými opakovaniami.

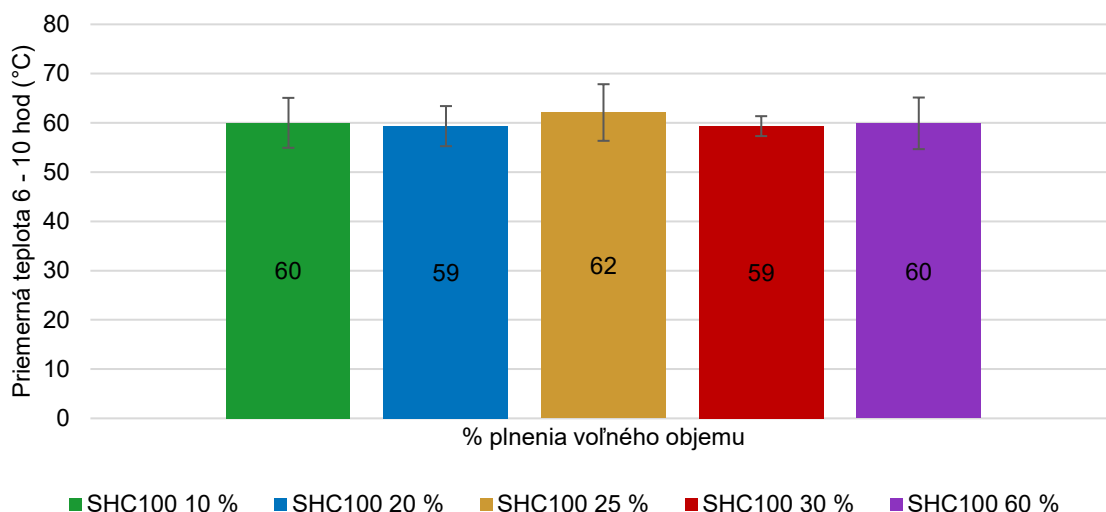


Obr. 5-8 Maximálna teplota ložiska mazaného mazivom SHC100 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,338$)

Priemerné hodnoty teploty ložiska pre mazivo SHC100 sú znázornené samostatne pre celý čas testu (Obr. 5-9) a pre interval 6 až 10 hodín (Obr. 5-10), pričom takéto rozdelenie umožňuje oddelené posúdenie vplyvu zábehovej fázy a následne stabilizovaného režimu. Z nameraných hodnôt vyplýva, že rozdiely medzi jednotlivými úrovňami plnenia zostávajú v oboch prípadoch relatívne malé, pričom sa pohybujú od 62 do 66 °C. Po obmedzení hodnotenia na interval 6 až 10 hodín dochádza iba k miernemu zníženiu priemerných teplôt. V tomto prípade sú rozdiely úplne zanedbateľné, to vyplýva zo štatistického hľadiska čo je podložené hodnotami p blížiacimi sa k 1. Na základe uvedeného sa javí, že teplotné správanie systému je v skúmanom rozsahu plnení navzájom veľmi podobné, pričom prípadné rozdiely zostávajú na úrovni experimentálnej variability.



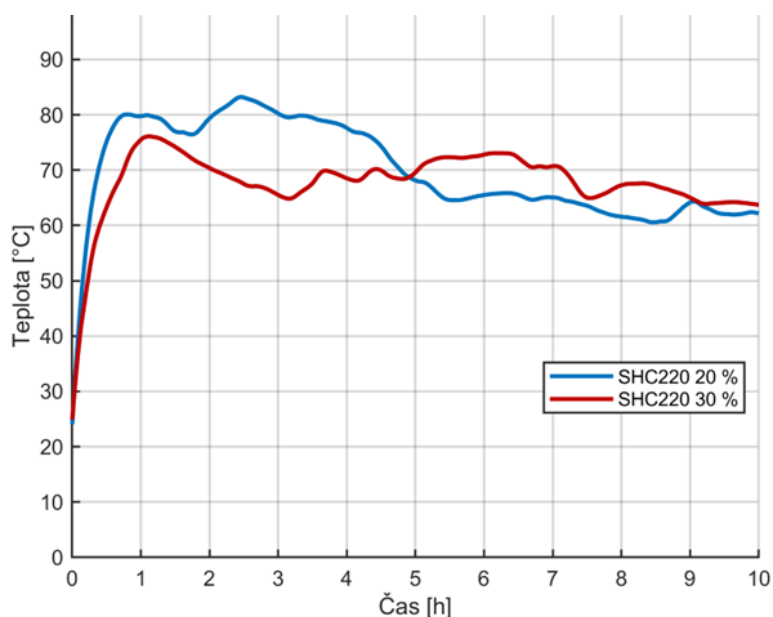
Obr. 5-9 Priemerná teplota ložiska počas celého testu mazaného mazivom SHC100 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,976$)



Obr. 5-10 Priemerná teplota ložiska v čase medzi 6 až 10 hodinou mazaného mazivom SHC100 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,995$)

5.2.2 Mazivo SHC220

Ako druhé bolo analyzované mazivo SHC220, ktoré sa od predchádzajúceho maziva odlišuje vyššou viskozitou základového oleja pri zachovaní rovnakého typu zahusťovadla. Teplotné priebehy ložiska pri plneniach 20 % a 30 % voľného objemu sú znázornené na Obr. 5-11, pričom rozdiely medzi jednotlivými úrovňami plnenia sa začínajú prejavovať už v skoršej časti experimentu. V úvodnom intervale približne do 10 min je síce pri oboch plneniach zaznamenaný výrazný nárast teploty zodpovedajúci zábehovej fáze, avšak následne dochádza k viditeľnému oddeleniu priebehov. Pri plnení 20 % je dosahovaná vyššia maximálna teplota, pričom jej nábeh je pozvoľnejší a maximum je dosiahnuté neskôr, približne po 2,5 hodinách. Naopak, pri plnení 30 % je maximum dosiahnuté skôr, približne okolo 1,5 hodiny, a následný pokles teploty má výraznejší charakter.

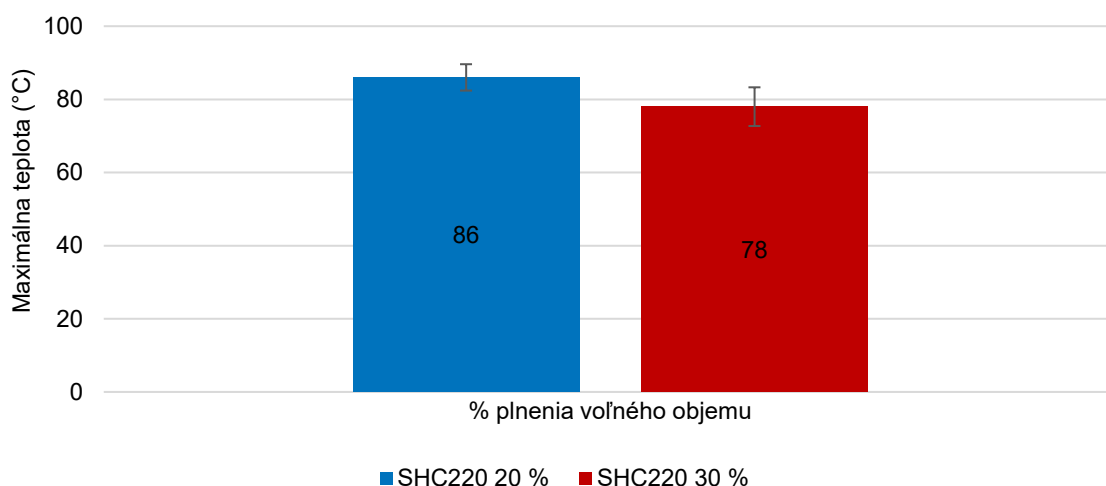


Obr. 5-11 Priebeh teploty ložiska mazaného mazivom SHC220 pri daných percentách plnenia voľného objemu

Po dosiahnutí maximálnych hodnôt je pri oboch plneniach pozorovaný pokles teploty, pričom ďalší priebeh sa medzi jednotlivými krivkami odlišuje. Pri plnení 30 % sa teplota stabilizuje rýchlejšie, približne po 3 hodinách, následne je zaznamenaný mierny sekundárny nárast približne okolo 7. hodiny, po ktorom teplota opäť klesá. Pri plnení 20 % je priebeh plynulejší, bez výrazných sekundárnych výkyvov, pričom prechod do kvázi ustáleného režimu nastáva neskôr, približne po 5 hodinách. V závere testu, približne od 9. hodiny, dochádza k postupnému zblížovaniu teplotných priebehov.

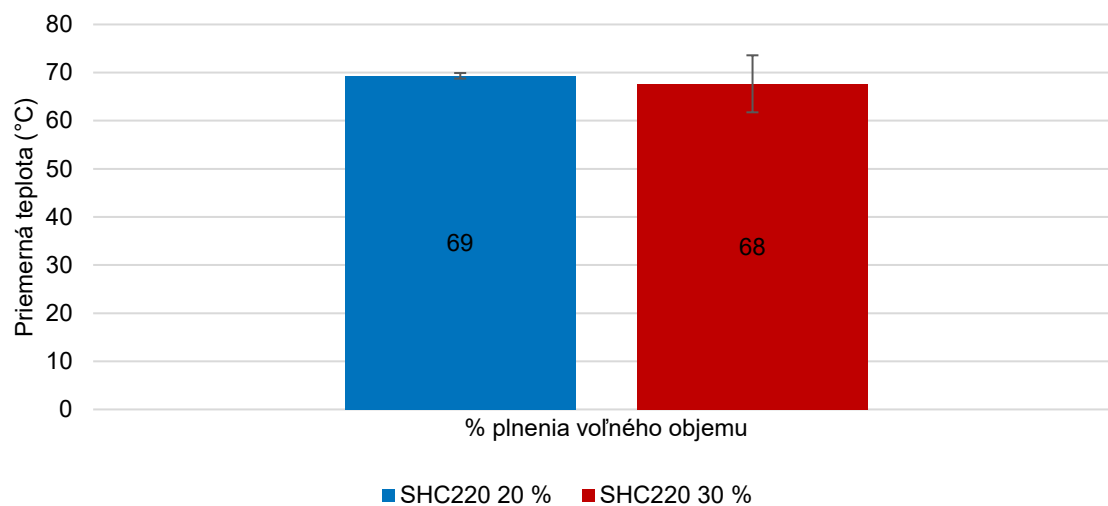
Priemerná odchýlka teploty za celý priebeh testu, stanovená ako smerodajná odchýlka z jednotlivých behov, nadobúda pre jednotlivé úrovne plnenia hodnoty približne $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 %) a $\pm 11,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (30 %), čo zodpovedá relatívnym odchýlkam približne $\pm 7,1\text{ }%$ a $\pm 17,3\text{ }%$. Tieto hodnoty kvantifikujú rozptyl nameraných priebehov počas celého testu a dopĺňajú informáciu o stabilite teplotnej odozvy pri jednotlivých úrovniach plnenia.

Maximálne dosiahnuté hodnoty teploty pre mazivo SHC220 sú znázornené na Obr. 5-12. Vyššia maximálna teplota je dosahovaná pri plnení 20 %, kde nadobúda hodnotu približne $86\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatiaľ čo pri plnení 30 % je maximálna teplota nižšia, na úrovni približne $78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z chybových úsečiek je zároveň zrejmé, že variabilita maximálnych hodnôt je pri oboch plneniach rozdielna, pričom vyšší rozptyl je indikovaný pri plnení 30 % v porovnaní s plnením 20 %.

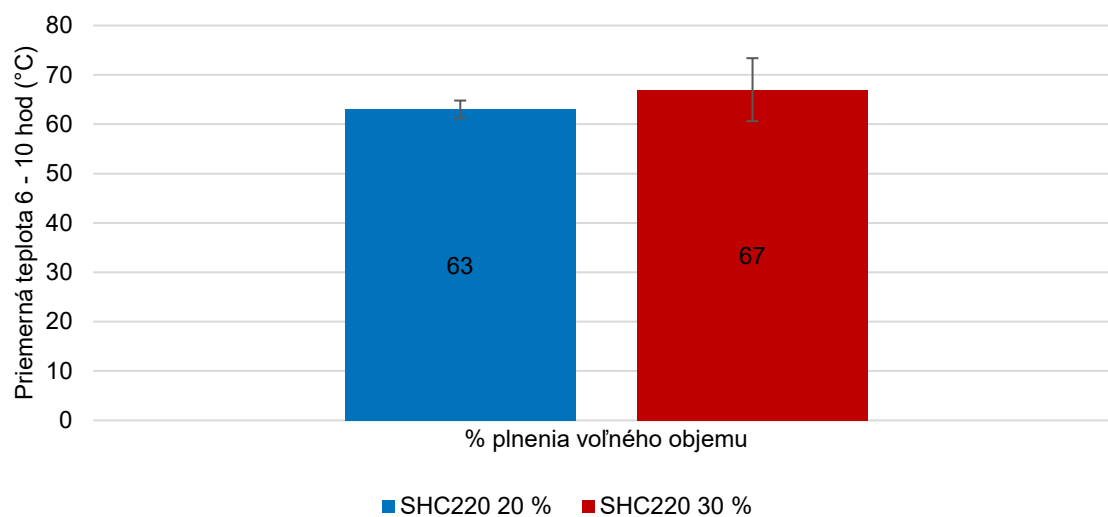


Obr. 5-12 Maximálna teplota ložiska mazaného mazivom SHC220 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,34$)

Priemerné hodnoty teploty ložiska pre mazivo SHC220 sú znázornené na Obr. 5-13 a Obr. 5-14 samostatne pre celý čas testu a pre interval 6 až 10 hodín. Pri hodnotení za celý priebeh testu je pri plnení 20 % dosahovaná vyššia priemerná teplota, približne $69\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatiaľ čo pri plnení 30 % nadobúda hodnotu približne $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. V prípade hodnotenia v kvázi ustálenom režime (6 až 10 hodín) dochádza k zmene poradia, keď pri plnení 30 % je zaznamenaná mierne vyššia teplota, približne $67\text{ }^{\circ}\text{C}$, oproti plneniu 20 %, kde dosahuje približne $63\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z chybových úsečiek je zároveň zrejmé, že variabilita meraní je pri plnení 30 % vyššia, zatiaľ čo pri plnení 20 % zostáva rozptyl nižší.



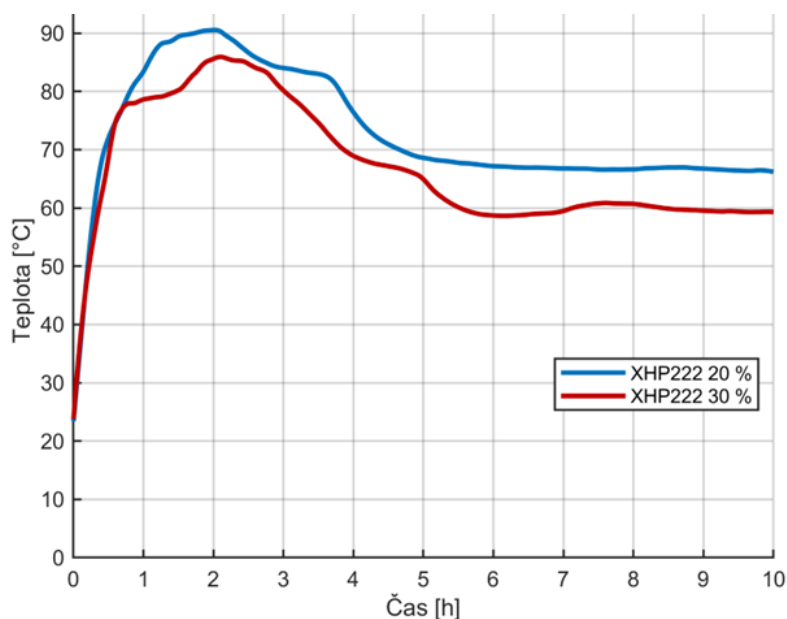
Obr. 5-13 Priemerná teplota ložiska počas celého testu mazaného mazivom SHC220 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,82$)



Obr. 5-14 Priemerná teplota ložiska v čase medzi 6 až 10 hodinou mazaného mazivom SHC220 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,629$)

5.2.3 Mazivo XHP222

Mazivo XHP222 bolo testované ako tretie v poradí. V porovnaní s mazivom SHC220 je zachovaná rovnaká viskozita základového oleja pri 40 °C, pričom odlišnosť je daná typom základového oleja, keďže mazivo SHC220 je formulované na báze syntetického oleja (PAO), zatiaľ čo mazivo XHP222 využíva minerálny základový olej. Teplotné správanie ložiska pri plneniach 20 % a 30 % voľného objemu je znázornené na Obr. 5.15. V úvodnej fáze testu je pri oboch úrovniach plnenia zaznamenaný výrazný nárast teploty zodpovedajúci zábehovej fáze, pričom približne do 10 až 15 minút je priebeh nárastu prakticky zhodný. Následne dochádza k postupnému oddeleniu teplotných kriviek, pričom pri plnení 20 % je dosahovaná vyššia teplotná úroveň počas väčšiny priebehu testu.

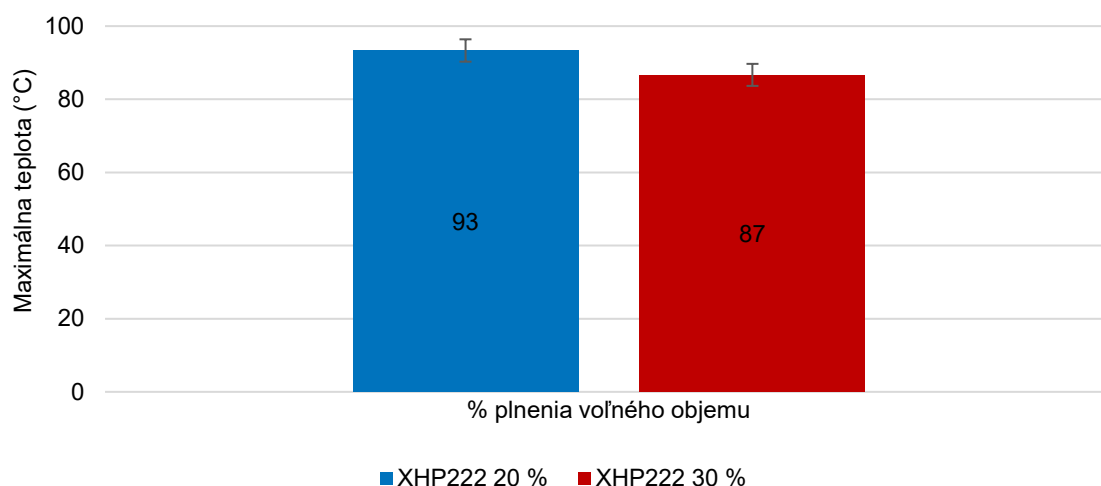


Obr. 5-15 Priebeh teploty ložiska mazaného mazivom XHP222 pri daných percentách plnenia voľného objemu

Maximálne hodnoty teploty sú pri oboch plneniach dosahované približne po 2 hodinách od začiatku testu, po ktorých nasleduje plynulý pokles teploty bez výrazných sekundárnych výkyvov. V porovnaní s predchádzajúcimi mazivami má priebeh stabilnejší charakter a nevykazuje náhle zmeny. Prechod do kvázi ustáleného režimu je pri plnení 20 % identifikovaný približne po 5 hodinách, zatiaľ čo pri plnení 30 % nastáva neskôr, približne po 6 hodinách. V ustálenom stave sa teplota pri plnení 20 % pohybuje na vyššej úrovni, približne okolo 67 až 68 °C, zatiaľ čo pri plnení 30 % je stabilizovaná približne na úrovni 59 až 61 °C. V závere testu zostávajú teplotné priebehy bez výrazného trendu ďalšej zmeny.

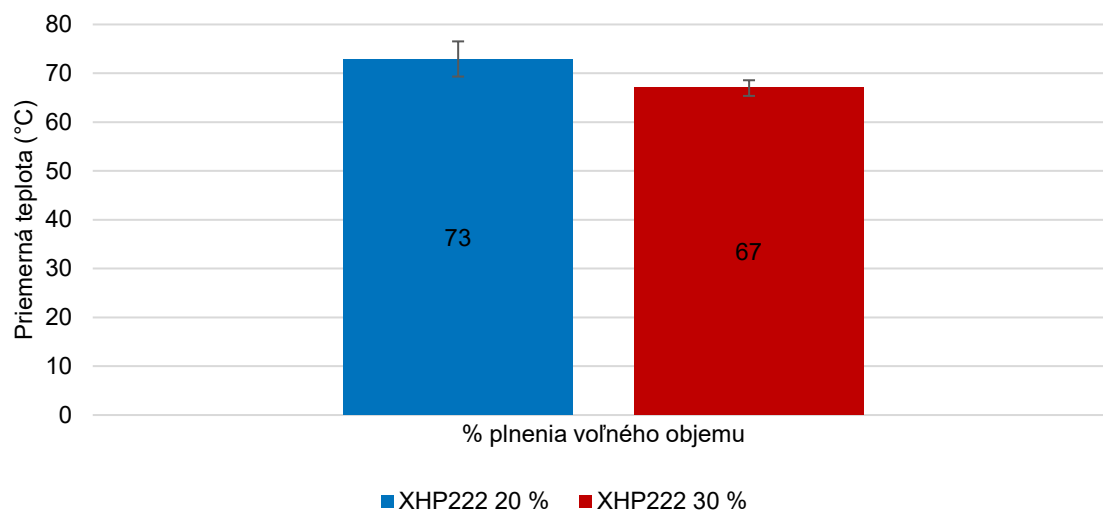
Priemerná odchýlka teploty za celý priebeh testu, stanovená ako smerodajná odchýlka (standard deviation) z jednotlivých behov, nadobúda hodnotu približne $\pm 8,6$ °C (20 %) a $\pm 4,6$ °C (30 %), čo zodpovedá relatívnym odchýlkam približne $\pm 12,3$ % a $\pm 6,7$ %.

Maximálne dosiahnuté hodnoty teploty pre mazivo XHP222 sú znázornené na Obr. 5-16. Pri plnení 20 % je dosahovaná vyššia maximálna teplota, približne 93 °C, zatiaľ čo pri plnení 30 % nadobúda hodnotu približne 87 °C. Z chybových úsečiek vyplýva, že rozptyl maximálnych hodnôt teploty je pri oboch úrovniach plnenia porovnateľný a zostáva na relatívne nízkej úrovni.

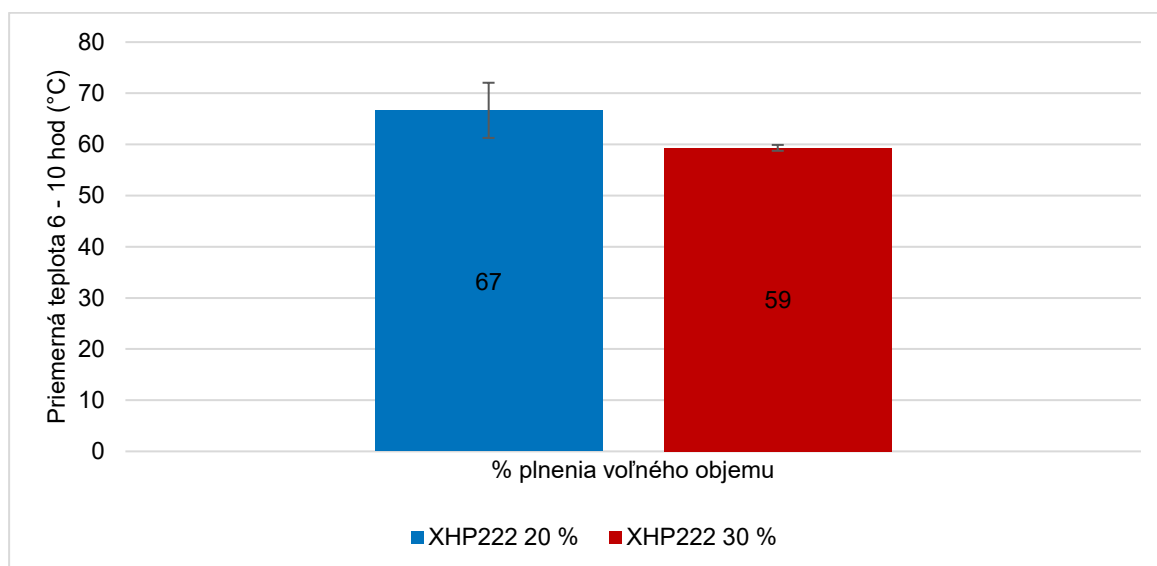


Obr. 5-16 Maximálna teplota ložiska mazaného mazivom XHP222 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,249$)

Priemerné hodnoty teploty ložiska pre mazivo XHP222 sú znázornené na Obr. 5-17 a Obr. 5-18 samostatne pre celý čas testu a pre interval 6 až 10 hodín. Pri hodnotení za celý priebeh testu je pri plnení 20 % dosahovaná vyššia priemerná teplota, približne 73 °C, zatiaľ čo pri plnení 30 % nadobúda hodnotu približne 67 °C. Obdobný trend je zachovaný aj v prípade hodnotenia v kvázi ustálenom režime, kde pri plnení 20 % dosahuje priemerná teplota približne 67 °C, zatiaľ čo pri plnení 30 % sa pohybuje na úrovni približne 59 °C. Z chybových úsečiek je zároveň zrejmé, že variabilita meraní je pri plnení 30 % nižšia, zatiaľ čo pri plnení 20 % je rozptyl vyšší.



Obr. 5-17 Priemerná teplota ložiska počas celého testu mazaného mazivom XHP222 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,261$)



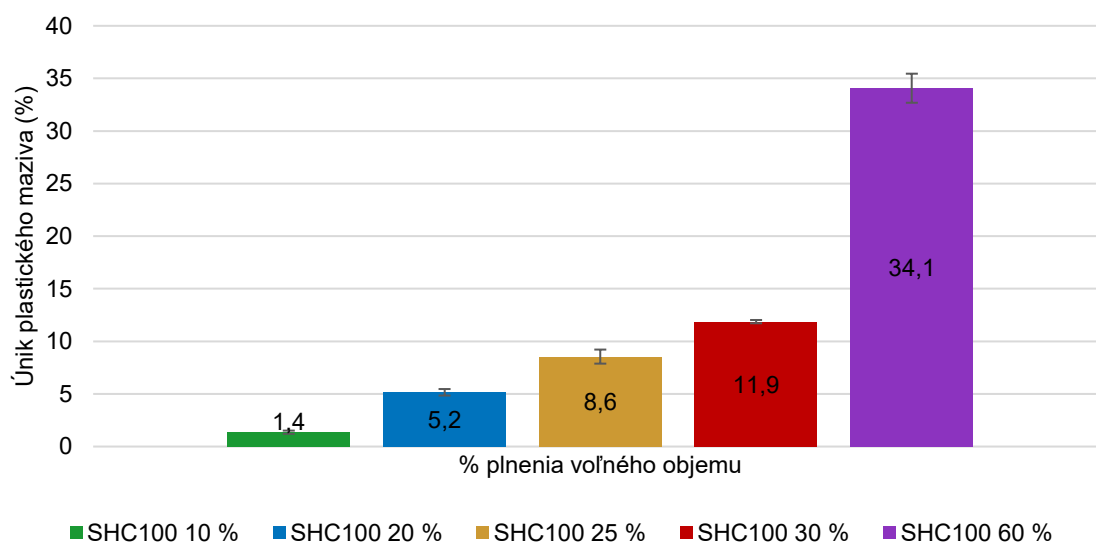
Obr. 5-18 Priemerná teplota ložiska v čase medzi 6 až 10 hodinou mazaného mazivom XHP222 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,307$)

5.3 Únik plastického maziva

V tejto kapitole je hodnotený únik plastického maziva z ložiska, pričom výsledné hodnoty sú vzťahované k pôvodne aplikovanému množstvu maziva a vyjadrené v relatívnej forme. Referenčná hodnota 100 % je definovaná pre každú skúmanú úroveň plnenia samostatne, čím je zabezpečená porovnateľnosť medzi jednotlivými prípadmi. Takto stanovený parameter vyjadruje podiel maziva, ktorý počas skúšky opustil ložisko vzhľadom na jeho počiatočné množstvo. Uvedené výsledky predstavujú priemerné hodnoty získané z troch opakovaní merania pre každú kombináciu typu maziva a úrovne plnenia, pričom variabilita meraní je zohľadnená v ďalšom vyhodnotení.

5.3.1 Mazivo SHC100

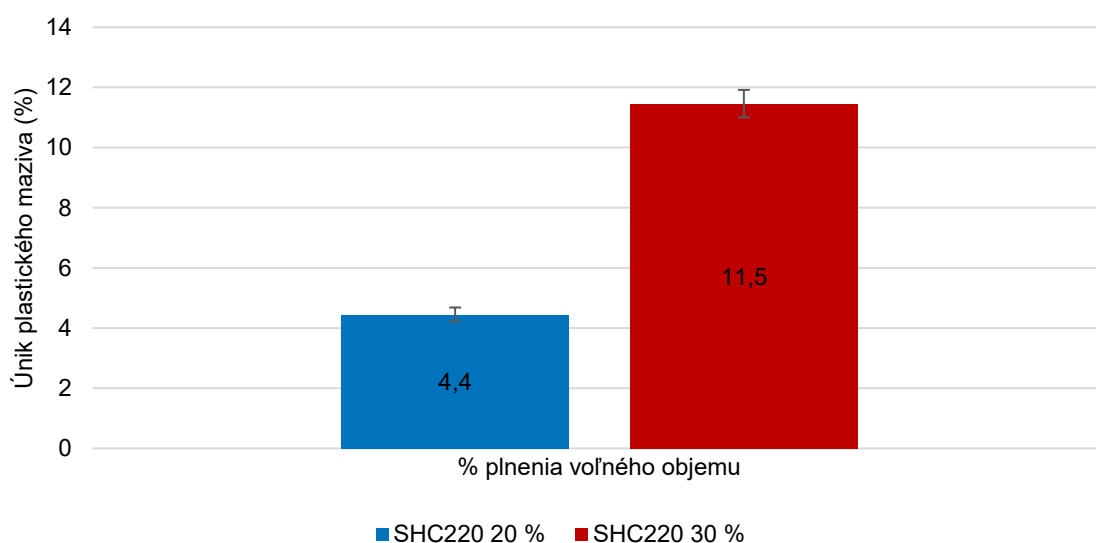
Únik plastického maziva SHC100 pre jednotlivé úrovne plnenia voľného objemu je znázornený na Obr. 5-19. Pri najnižšej úrovni plnenia 10 % bola zaznamenaná minimálna strata maziva, pričom priemerná hodnota dosiahla 1,4 %. So zvyšovaním plnenia dochádza k postupnému nárastu relatívneho úniku, keď pri 20 % bola stanovená hodnota 5,2 % a pri 25 % približne 8,6 %. Pri plnení 30 % sa tento trend ďalej zvyrazňuje, pričom priemerný únik dosahuje 11,9 %, zatiaľ čo pri najvyššej úrovni plnenia 60 % bol zaznamenaný výrazný nárast až na úroveň 34,1 % pôvodne aplikovaného množstva maziva. Tento priebeh poukazuje na systematický nárast relatívneho úniku plastického maziva so zvyšujúcou sa úrovňou plnenia. Z hľadiska variability možno konštatovať, že rozptyl hodnôt medzi jednotlivými opakovaniami je vo väčšine prípadov porovnateľný, pričom mierne vyššia variabilita je indikovaná pri najvyššom plnení.



Obr. 5-19 Hodnoty relatívneho úniku plastického maziva SHC100 z valivého ložiska, pri uvedených náplniach ($p = 6 \cdot 10^{-10}$)

5.3.2 Mazivo SHC220

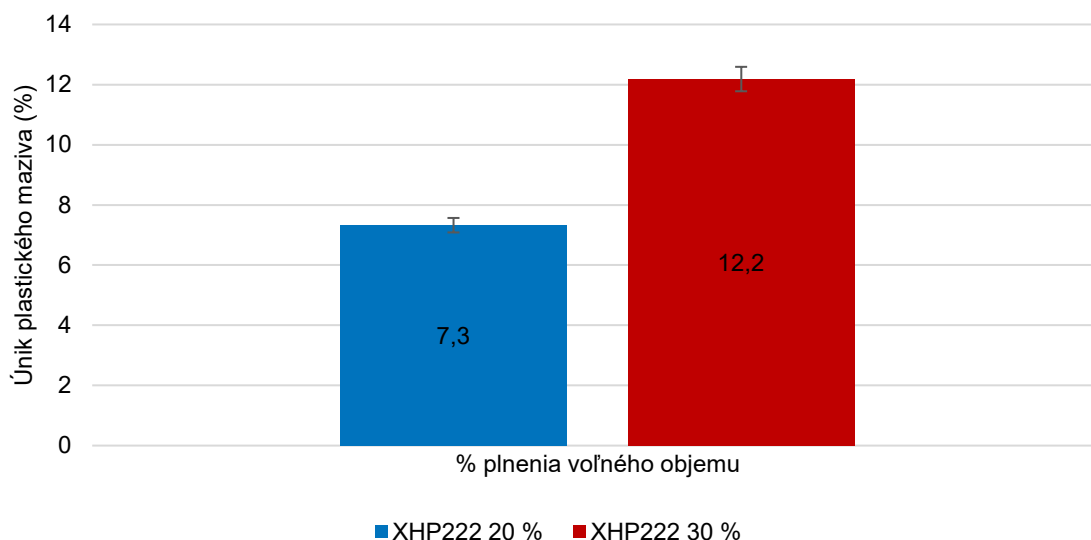
Únik plastického maziva SHC220 pre úrovne plnenia voľného objemu 20 % a 30 % je znázornený na Obr. 5-20. Pri plnení 20 % bola stanovená priemerná hodnota relatívneho úniku 4,4 %, zatiaľ čo pri plnení 30 % bola zaznamenaná hodnota 11,5 % pôvodne aplikovaného množstva maziva. Zvýšenie úrovne plnenia je teda sprevádzané výrazným nárastom úniku, pričom pri prechode z 20 % na 30 % dochádza k viac než dvojnásobnému zvýšeniu tejto veličiny. Z rozsahu chybových úsečiek možno usudzovať, že rozptyl hodnôt medzi jednotlivými opakovaniami je v oboch prípadoch približne porovnateľný, pričom pri vyššej úrovni plnenia je naznačená mierne zvýšená variabilita meraní.



Obr. 5-20 Hodnoty relatívneho úniku plastického maziva SHC220 z valivého ložiska, pri uvedených náplniach ($p = 0,00029$)

5.3.3 Mazivo XHP222

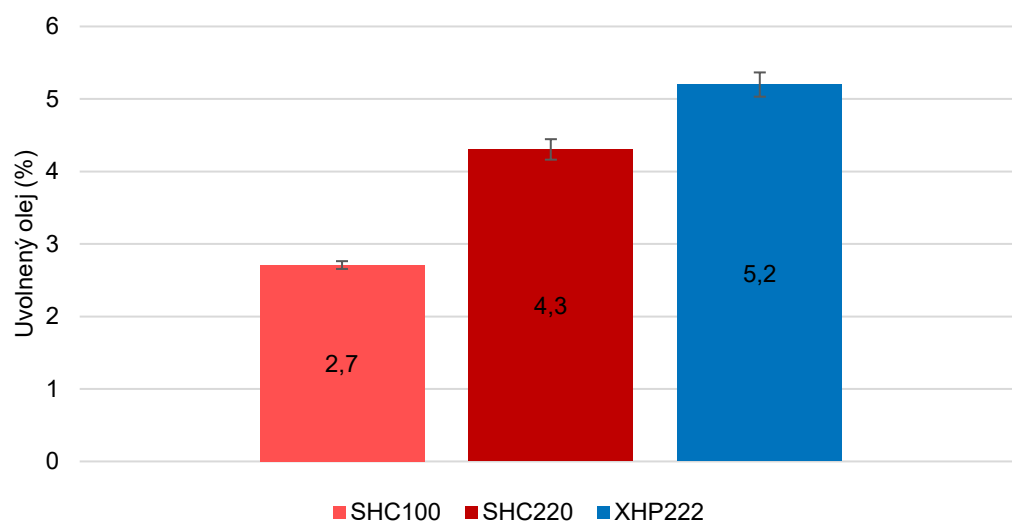
Únik plastického maziva XHP222 pre úrovne plnenia voľného objemu 20 % a 30 % je znázornený na Obr. 5-21. Pri plnení 20 % bola stanovená priemerná hodnota relatívneho úniku 7,3 %, zatiaľ čo pri plnení 30 % bola zaznamenaná vyššia hodnota 12,2 % pôvodne aplikovaného množstva maziva. Zvýšenie úrovne plnenia je tak sprevádzané nárastom úniku aj v tomto prípade, pričom rozdiel medzi jednotlivými úrovňami zostáva zreteľný. Z rozsahu chybových úsečiek možno usudzovať, že rozptyl hodnôt medzi jednotlivými opakovaniami je mierny, pričom pri plnení 30 % je indikovaná o niečo vyššia variabilita meraní.



Obr. 5-21 Hodnoty relatívneho úniku plastického maziva XHP222 z valivého ložiska, pri uvedených náplniach ($p = 0,00091$)

5.4 Separovaný olej

Hodnotenie separácie základového oleja z plastických mazív bolo vykonané pri teplote 80 °C počas 18 hodín v súlade so skúšobným postupom podľa normy DIN 51817. Stanovenie tohto parametra bolo realizované s cieľom umožniť vzájomné porovnanie schopnosti jednotlivých mazív separovať základový olej za identických skúšobných podmienok. Výsledky separácie základového oleja sú znázornené na Obr. 5-22, pričom pre každé mazivo boli vyhodnotené tri opakovania, z ktorých bola určená priemerná hodnota relatívneho hmotnostného podielu separovaného oleja. Pri mazive SHC100 bola stanovená hodnota 2,7 %, zatiaľ čo pri mazive SHC220 bola zaznamenaná vyššia hodnota 4,3 %. Najvyššia priemerná hodnota bola zistená pri mazive XHP222, kde dosiahla 5,2 %. Z rozsahu chybových úsečiek možno usudzovať, že rozptyl nameraných hodnôt je medzi jednotlivými mazivami mierne odlišný, pričom s rastúcou hodnotou separovaného oleja je indikované aj jeho mierne zvýšenie. Uvedené výsledky tak poukazujú na rozdielnú mieru separácie základového oleja medzi skúmanými mazivami za daných podmienok skúšky.



Obr. 5-22 Relatívny podiel separovaného oleja pre mazivá SHC100, SHC220, XHP222 ($p = 0,00007$)

6 DISKUSIA

6.1 Interpretácia výsledkov

6.1.1 Variabilita meraní

V priebehu opakovaných experimentov bola aj pri totožných prevádzkových podmienkach zaznamenaná variabilita jednotlivých teplotných priebehov. Na jej kvantifikáciu bola použitá priemerná relatívna odchýlka vyhodnotená za celý priebeh merania, keďže rozdiely medzi jednotlivými experimentmi sa menili v čase a ich hodnotenie v konkrétnych časových bodoch by neposkytovalo reprezentatívne porovnanie. Zistené odchýlky sa pohybovali približne v rozsahu $\pm 6,7$ až $\pm 19,4$ % vzhľadom na stredné hodnoty.

Charakter pozorovanej variability bol spájaný predovšetkým so správaním plastického maziva počas zábehovej fázy. Po aplikácii maziva nemožno zabezpečiť úplne identické priestorové rozloženie maziva vo vnútornom priestore ložiska, pričom už v počiatočných fázach prevádzky dochádza k jeho redistribúcii a vytláčaniu do neaktívnej oblasti. S určitým rozptylom bolo potrebné uvažovať aj pri samotnom procese plnenia ložiska, keďže lokálne rozmiestnenie maziva medzi valivými elementmi nie je možné plne reprodukovať. Vplyv mohol byť čiastočne pripísaný aj mechanickému ustaveniu testovacieho zariadenia, avšak podmienky experimentu boli počas jednotlivých meraní udržiavané na porovnateľnej úrovni.

Doplňujúce overenie bolo realizované opakovaným testovaním identického ložiska pre mazivo XHP222 pri úrovni plnenia 25 %. Medzi jednotlivými meraniami bola stanovená odchýlka približne $\pm 12,6$ %, teda hodnota porovnateľná s ostatnými experimentmi. Výsledky preto nepoukazovali na dominantný vplyv použitia nového ložiska, ale skôr na prirodzenú citlivosť systému na dynamiku redistribúcie plastického maziva počas prevádzky. Napriek identifikovanej variabilite boli v jednotlivých sériách opakovane pozorované rovnaké trendy teplotného správania a úniku maziva, čo umožnilo formulovanie konzistentných záverov v ďalších častiach práce.

Určitá opora pre interpretáciu získaných výsledkov bola identifikovaná aj v dostupnej literatúre. Fischer et al. [16] analyzovali tvorbu mazacieho filmu na tribometri typu guľôčka disk pri podmienkach plne zaplaveného kontaktu a hladovania. Pri hladovanom režime boli zaznamenané výraznejšie rozptyly hrúbky mazacieho filmu, a to aj pri obvodových rýchlostiach rádovo $10^3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Charakteristická obvodová rýchlosť v realizovanom experimente sa pri otáčkach 2000 min^{-1} pohybovala v rovnakom rádovom rozsahu. Napriek odlišnej geometrii kontaktu a experimentálneho usporiadania možno predpokladať, že časť variability mohla súvisieť s obmedzeným zásobovaním kontaktu mazivom a s lokálnymi zmenami mazacieho režimu.

Jednoznačné určenie režimu mazania v podmienkach realizovaného experimentu nebolo možné, keďže hrúbka mazacieho filmu nebola priamo meraná. Z priebehov meraní však bolo možné pozorovať postupnú redistribúciu maziva mimo aktívnu oblasť, čím dochádzalo k zmene podmienok zásobovania kontaktu mazivom. Výraznejšie rozdiely medzi jednotlivými teplotnými priebehmi boli identifikované približne po 10 až 15 minútach prevádzky, teda v období po počiatočnej redistribúcii maziva. Pozorovaná variabilita tak pravdepodobne neodrážala iba experimentálnu neistotu merania, ale aj prirodzenú dynamiku mazacieho procesu v podmienkach otvoreného ložiska.

6.1.2 Teplotné charakteristiky

Pri interpretácii teplotného správania nebolo postačujúce hodnotiť iba jednu charakteristickú teplotu. Maximálna teplota je dôležitá najmä z hľadiska zábehovej fázy, v ktorej dochádza k intenzívnemu pohybu plastického maziva a k interakcii väčšieho množstva maziva s obežnými elementmi ložiska. Súčasne však nevystihuje dlhodobé prevádzkové správanie ložiska. Z tohto dôvodu boli hodnotené aj priemerná teplota počas celého testu a priemerná teplota v kvázi ustálenom režime. Takýto prístup umožňuje posúdiť krátkodobé teplotné maximum aj stabilitu prevádzkových podmienok po redistribúcii maziva v priestore ložiska.

Význam znižovania prevádzkovej teploty je spojený aj so životnosťou plastického maziva, keďže pri prevádzkových teplotách približne nad 60 až 70 °C začína byť významným degradačným mechanizmom oxidačné starnutie maziva. Podľa Arrheniovhovho prístupu používaného pri hodnotení životnosti plastických mazív môže pri väčšine mazív zvýšenie teploty približne o 15 °C viesť k približne dvojnásobnému skráteniu ich životnosti [15]. Pri hodnotení vhodnej úrovne plnenia preto nemožno vychádzať iba z maximálnej teploty, ale je potrebné porovnať teploty počas celej prevádzky.

V prípade maziva SHC100 nebol medzi jednotlivými úrovňami plnenia identifikovaný monotónny trend teplotného správania. Napriek odlišným počiatočným náplňiam zostával charakter teplotných priebehov v úvodnej fáze podobný a výraznejšie rozdiely sa začali prejavovať až po približne 10 až 15 minútach prevádzky (Obr. 5-7). Tento priebeh zodpovedá počiatočnej redistribúcii maziva v priestore ložiska, počas ktorej sa ešte plne neprejavil vplyv množstva maziva prítomného v kontakte a jeho bezprostrednom okolí.

Mazivo SHC100 nevykazovalo jednoznačnú závislosť maximálnej teploty ani času potrebného na dosiahnutie kvázi ustáleného režimu od úrovne plnenia (Obr. 5-7). Ustálený stav bol pri väčšine náplní dosahovaný v porovnateľnom čase, pričom výraznejšie oneskorenie bolo pozorované iba pri plnení 25 %. Pri plneniach 10 %, 20 % a 25 % bol po dosiahnutí maximálnej teploty a následnom poklese pozorovaný aj sekundárny mierny nárast teploty. Pri plneniach 30 % a 60 % sa tento jav výraznejšie neprejavil. Uvedený priebeh podporuje interpretáciu, že pri nižších náplniach sa po počiatočnej redistribúcii prejavilo obmedzenejšie zásobovanie kontaktu olejom, čo viedlo k dočasnému opätovnému nárastu teploty počas prechodu do kvázi ustáleného režimu.

Najnižšia maximálna teplota bola zaznamenaná pri plnení 10 %, kde dosiahla približne 73 °C. Naopak, pri plnení 20 % bola dosiahnutá najvyššia hodnota zo všetkých skúmaných náplní, približne 92 °C. Pri ďalšom zvyšovaní množstva maziva už nebol pozorovaný monotónny rast teploty, keďže pri plneniach 25 % a 30 % boli maximálne teploty nižšie, približne 85 °C a 78 °C, zatiaľ čo pri plnení 60 % došlo opätovne k nárastu približne na 89 °C (Obr. 5-8). Takéto poradie maximálnych teplôt sa odlišuje od trendov uvádzaných v prácach Shetty et al. [14] a Shawki et al. [13], kde bol pri rastúcej náplni pozorovaný postupný nárast maximálnej teploty a predĺženie zábehovej fázy pri vyšších náplniach.

Získané výsledky ukazujú, že maximálna teplota nebola v skúmaných podmienkach riadená iba celkovým množstvom aplikovaného maziva, ale aj podmienkami jeho redistribúcie a zásobovania kontaktu počas zábehovej fázy. Pri plnení 10 % bolo v pracovnom priestore prítomné malé množstvo maziva, čo znižovalo jeho interakciu s obežnými elementmi ložiska. Súčasne bolo možné očakávať obmedzenejšie zásobovanie kontaktu olejom. Dosiahnutie najnižšej maximálnej teploty pri tejto náplni preto ukazuje, že vplyv menšieho množstva maziva v pracovnom priestore prevážil nad rizikom obmedzeného zásobovania kontaktu. Pri plnení 20 % sa už výraznejšie prejavilo pôsobenie maziva v pracovnom priestore, zatiaľ čo podmienky zásobovania kontaktu ešte neboli stabilizované. Tento stav sa prejavil najvyššou maximálnou teplotou. Pri plneniach 25 % a 30 % boli zaznamenané nižšie maximálne teploty, čo poukazuje na priaznivejšie podmienky po redistribúcii maziva v priestore ložiska.

Rovnaký charakter správania bol identifikovaný aj pri ostatných skúmaných mazivách, kde boli pri plnení 20 % zaznamenané vyššie maximálne teploty než pri plnení 30 % (Obr. 5-8). Opätovný nárast maximálnej teploty pri plnení 60 % súvisel s väčším objemom maziva prítomného v pracovnom priestore ložiska. Odlišnosti oproti práci Shetty et al. [14] možno vysvetliť rozdielnym typom ložiska, otvorenou konštrukciou skúšanej zostavy a vyššími obvodovými rýchlosťami použitými v uvedenej štúdii.

Pri hodnotení priemernej teploty počas celého testu sa rozdiely medzi jednotlivými náplňami výrazne zmenšili v porovnaní s maximálnymi teplotami. Takýto výsledok bol očakávaný, keďže priemerná teplota za celý priebeh experimentu bola čiastočne ovplyvnená zábehovou fázou a dosiahnutými maximálnymi teplotami. Po prechode do kvázi ustáleného režimu sa rozdiely medzi jednotlivými náplňami ďalej znižovali. Hodnoty priemernej teploty v ustálenom stave sa pre mazivo SHC100 pohybovali približne v intervale 59 až 62 °C a zo štatistického hľadiska boli rozdiely medzi jednotlivými plneniami nevýznamné (Obr. 5-9). Tento výsledok je v súlade s pozorovaniami Shetty et al. [14] aj Shawki et al. [13], kde po ukončení zábehovej fázy dochádzalo k postupnému zblížovaniu teplotných priebehov pre rôzne úrovne plnenia. Menšie rozdiely v ustálenom režime v realizovanom experimente súviseli najmä s otvorenou konštrukciou ložiska a únikom maziva z pracovného priestoru.

Vzťah medzi teplotným správaním a separáciou základového oleja nemožno hodnotiť iba na základe samotnej hodnoty separovaného oleja. V literatúre býva vyššia schopnosť uvoľňovať olej spájaná so zlepšeným zásobovaním kontaktu olejom [7], avšak v realizovaných meraniach nebola identifikovaná priama väzba medzi mierou separácie oleja a dosiahnutou teplotou. Rozdiely medzi jednotlivými mazivami sa však prejavili aj v charaktere samotných teplotných priebehov. Pri mazive SHC220 boli v porovnaní s mazivom SHC100 pozorované plynulejšie prechody medzi jednotlivými časovými úsekmi teplotného priebehu. Ešte hladší priebeh bol pozorovaný pri mazive XHP222, pri ktorom boli teplotné zmeny počas experimentu menej dynamické. Uvedené rozdiely naznačujú, že schopnosť separácie základového oleja sa prejavovala množstvom dostupného oleja, čo následne ovplyvňuje teplotnú stabilitu.

Rozdiely medzi jednotlivými mazivami sa v rámci priemerných aj maximálnych teplôt prejavovali menej výrazne, než bolo predpokladané na základe dostupnej literatúry a rozdielnej viskozity základového oleja. Pri porovnaní mazív SHC100 a SHC220 bola pri plnení 20 % zaznamenaná nižšia maximálna teplota pre mazivo SHC220, zatiaľ čo pri plnení 30 % sa maximálne teploty oboch mazív pohybovali na veľmi podobnej úrovni (Obr. 5-8, Obr. 5-12, Obr. 5-16). Priemerné teploty počas celého testu aj v kvázi ustálenom režime boli medzi týmito mazivami veľmi podobné, pričom pri mazive SHC220 boli zaznamenané iba zanedbateľne vyššie hodnoty (Obr. 5-9, Obr. 5-13, Obr. 5-15).

Vyššia viskozita základového oleja maziva SHC220 bola pri hodnotení priemernej teploty medzi 6. až 10. hodinou experimentu sprevádzaná iba zanedbateľne vyššími teplotami v porovnaní s mazivom SHC100 pri oboch skúmaných plneniach (Obr. 5-10, Obr. 5-14,), čo naznačuje, že rozdiel vo viskozite základového oleja v skúmanom rozsahu nepredstavoval dominantný faktor ovplyvňujúci teplotné správanie ložiska v kvázi ustálenom režime. Odlišné správanie bolo pozorované pri porovnaní mazív SHC220 a XHP222 (Obr. 5-14, Obr. 5-18), ktoré vykazovali porovnateľnú viskozitu základového oleja. Pri hodnotení priemernej teploty medzi 6. až 10. hodinou bol medzi plneniami 20 % a 30 % pozorovaný opačný smer zmien priemernej teploty než pri hodnotení priemernej teploty počas celého experimentu, čo poukazuje na významnejší vplyv typu základového oleja a formulácie plastického maziva.

Na základe výsledkov publikovaných Shetty et al. [14] sa očakával výraznejší rozdiel v teplotnom správaní jednotlivých mazív. V uvedenej práci boli pri rastúcej viskozite základového oleja a súčasne odlišnej NLGI triede pozorované výraznejšie rozdiely v maximálnych aj prevádzkových teplotách. Menší rozdiel pozorovaný v realizovaných meraniach súvisel s podobným zložením skúmaných mazív, keď dominantná odlišnosť spočívala najmä vo viskozite základového oleja. Výsledky preto ukazujú, že samotná viskozita základového oleja nebola v skúmaných podmienkach dominantným faktorom určujúcim teplotné správanie ložiska.

Priame porovnanie s publikovanými výsledkami je potrebné vnímať v kontexte použitých mazív. V dostupnej literatúre sa často porovnávali mazivá odlišujúce sa viacerými vlastnosťami súčasne, napríklad typom zahusťovadla, konzistenciou alebo základovým olejom, pričom zmeny teplotného správania nebolo možné pripísať iba jednému parametru. V realizovanom experimente boli použité mazivá s veľmi podobným zložením, kde dominantnou odlišnosťou bola najmä viskozita alebo typ základového oleja. Významnejšiu úlohu preto mohli zohrávať rozdiely v reologickom správaní mazív počas mechanického namáhania alebo schopnosť zásobovania kontaktu olejom v priebehu zábehovej fázy.

Podobný trend bol pozorovaný aj pri porovnaní SHC220 a XHP222, ktoré vykazovali porovnateľnú viskozitu základového oleja, avšak odlišný typ základového oleja. U XHP222 boli zaznamenané mierne vyššie maximálne aj priemerné teploty pri oboch skúmaných úrovniach plnenia (Obr. 5-12, Obr. 5-13, Obr. 5-16, Obr. 5-17), čo poukazuje na priaznivejšie teplotné správanie syntetického plastického maziva SHC220. Rozdiely medzi jednotlivými mazivami však boli štatisticky významné. Rovnaký smer správania bol pri nižších otáčkach pozorovaný aj v práci Cen a Lugt [18], kde syntetické plastické mazivo dosahovalo nižšie prevádzkové teploty než minerálne mazivo. Pri vyšších otáčkach sa však poradie teplôt medzi mazivami menilo, čo potvrdzuje, že výsledná prevádzková teplota nezávisí iba od typu základového oleja, ale aj od prevádzkových podmienok a reologického správania plastického maziva.

6.1.3 Únik a distribúcia plastického maziva

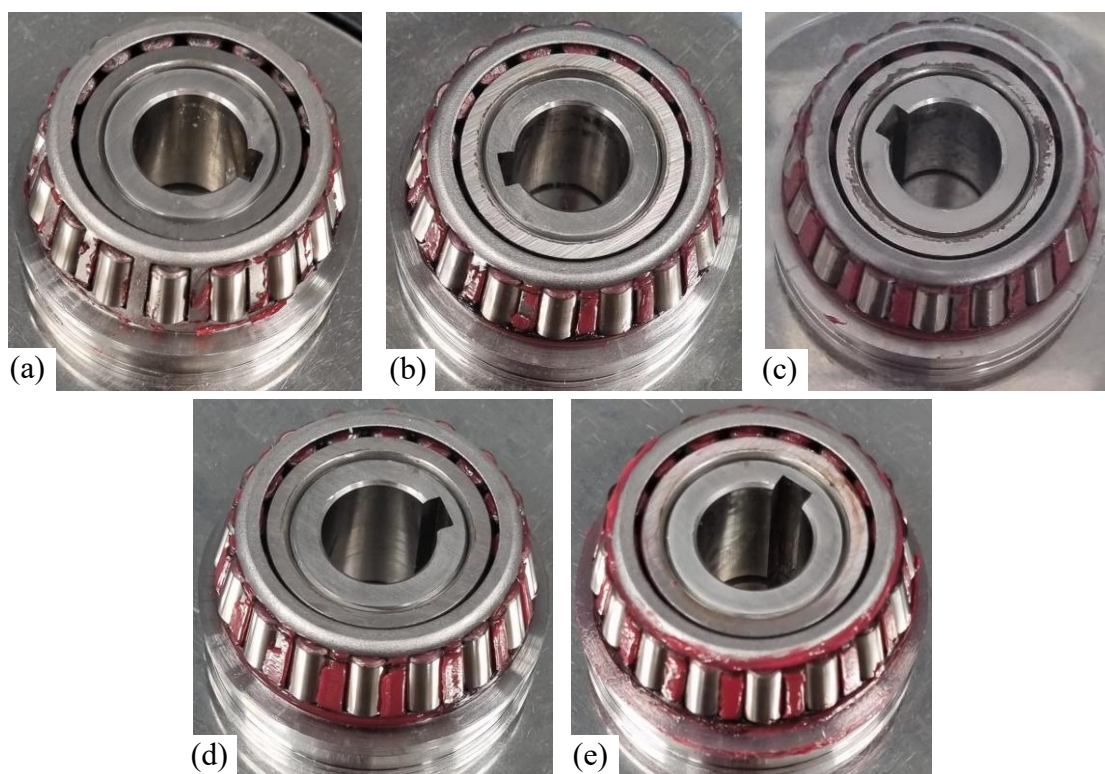
Významná redistribúcia plastického maziva počas zábehovej fázy bola pozorovaná vo všetkých realizovaných experimentoch. Z nameraných hodnôt úniku a vizuálneho zhodnotenia zvyškového množstva maziva po ukončení testov vyplynulo, že počiatočná úroveň plnenia nezodpovedala množstvu maziva, ktoré zostalo v ložisku po redistribúcii. Prehľad nameraných hodnôt úniku a odhadovanej zvyšnej náplne je uvedený v Tab. 6-1. Pri plnení 60 % bol zaznamenaný najvyšší relatívny únik maziva, pričom aj po jeho zohľadnení zostávalo v ložisku približne 40 % voľného objemu. Výsledky zároveň potvrdzujú, že zvyšovanie počiatočnej náplne nevedlo k úmernému zvýšeniu množstva maziva využiteľného v oblasti kontaktu, ale predovšetkým k intenzívnejšej redistribúcii prebytočného maziva mimo pracovný priestor ložiska.

Tab. 6-1 Relatívny únik a zvyšná náplň po teste vo valivom ložisku pre jednotlivé mazivá a plnenia

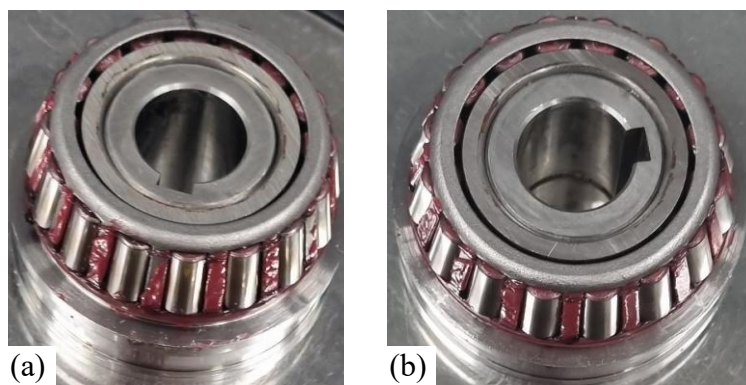
Označenie maziva	Počiatočné plnenie	Relatívny únik maziva	Zvyšná náplň v ložisku
SHC100	10%	1,4%	9,9%
SHC100	20%	5,2%	19%
SHC100	25%	8,6%	22,9%
SHC100	30%	11,9%	26,4%
SHC100	60%	34,1%	39,5%
SHC220	20%	4,4%	19,1%
SHC220	30%	11,5%	26,6%
XHP222	20%	7,3%	18,5%
XHP222	30%	12,2%	26,3%

Obdobný priebeh redistribúcie plastického maziva počas zábehovej fázy bol publikovaný aj v práci Chatra et al. [6], kde pri počiatočnom plnení 30 % došlo po krátkom čase prevádzky k poklesu množstva maziva v pracovnom priestore približne na 22 až 24 %. V realizovanom experimente zostávalo pri počiatočných náplniach 25 % a 30 % po ukončení skúšky približne 23 až 26 % voľného objemu, teda hodnoty veľmi blízke výsledkom uvedeným v literatúre. Zhoda týchto výsledkov je významná najmä vzhľadom na odlišnú konštrukciu ložiska, otvorené usporiadanie bez krytov a rozdielne prevádzkové podmienky. V práci Chatra et al. [6] boli navyše použité vyššie obvodové rýchlosti, ktoré mohli redistribúciu maziva ešte viac podporovať.

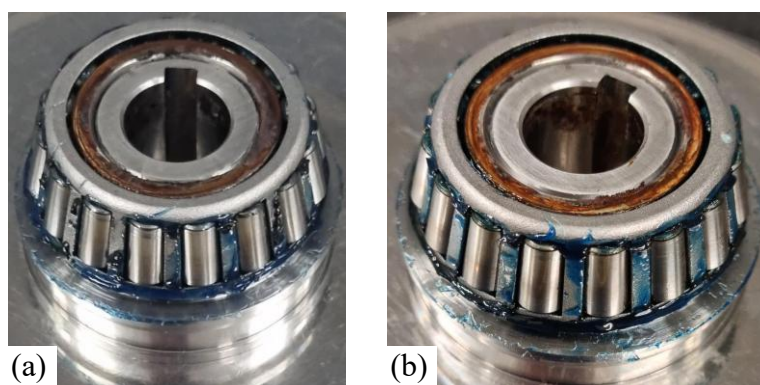
Z vizuálneho zhodnotenia ložísk po ukončení experimentov bolo zároveň identifikované výrazné ovplyvnenie tvorby rezervoárov úrovňou plnenia, viď Obr. 6-1 až Obr. 6-3. Pri plnení 10 % neboli vytvorené výraznejšie rezervoáre a veľká časť povrchu zostávala pokrytá iba tenkou vrstvou maziva, prípadne bez viditeľného pokrytia. Pri plneniach 20 % a 25 % už boli v okolí valivých elementov pozorované lokálne akumulácie maziva, ich rozloženie však zostávalo menej rovnomerné a medzi jednotlivými rezervoármi sa stále nachádzali oblasti s menším množstvom maziva. Výraznejšia a súvislejšia tvorba rezervoárov bola pozorovaná až pri plnení 30 %, kde bolo mazivo distribuované stabilnejšie po obvodu ložiska a voľné priestory medzi jednotlivými rezervoármi sa vyskytovali iba minimálne. Pri plnení 60 % bolo mazivo prítomné prakticky v celom pracovnom priestore a vo veľkom množstve bolo vytláčané mimo ložisko.



Obr. 6-1 Pohľad na vnútorný krúžok valivého ložiska s kietkou a valivými elementmi po ukončení experimentu pre mazivo SHC100 pri rôznych úrovniach plnenia; (a) 10 %; (b) 20 %; (c) 25 %; (d) 30 %; (e) 60 %



Obr. 6-2 Pohľad na vnútorný krúžok valivého ložiska s kietkou a valivými elementmi po ukončení experimentu pre mazivo SHC220 pri rôznych úrovniach plnenia; (a) 20 %; (b) 30 %



Obr. 6-3 Pohľad na vnútorný krúžok valivého ložiska s kietkou a valivými elementmi po ukončení experimentu pre mazivo XHP222 pri rôznych úrovniach plnenia; (a) 20 %; (b) 30 %

V rámci porovnania jednotlivých mazív boli pozorované rozdiely v charaktere redistribúcie aj tvorbe rezervoárov. Mazivá SHC100 a SHC220 vykazovali relatívne podobné rozloženie maziva po ukončení experimentov, pričom náplň 30 % viedla k výraznejšej a súvislejšej tvorbe rezervoárov než náplň 20 %. Odlišné správanie bolo pozorované pri mazive XHP222, kde bolo mazivo distribuované menej rovnomerne a vo väčšej miere sa nachádzalo mimo vytvorených rezervoárov. Získané výsledky tak poukazujú na to, že výsledný charakter redistribúcie nebol ovplyvnený iba úrovňou plnenia, ale aj reologickým správaním plastického maziva počas prevádzky.

6.1.4 Prenositel'nosť výsledkov

Prenositel'nosť získaných výsledkov je potrebné posudzovať s ohľadom na konkrétne podmienky realizovaného experimentu. Skúšané bolo nekrytované kuželíkové ložisko s líniovým kontaktom, pri ktorom dochádzalo nielen k redistribúcii maziva v priestore ložiska, ale aj k jeho úniku mimo ložisko. Takto zvolené experimentálne usporiadanie sa odlišuje od viacerých publikovaných prác, ktoré boli realizované prevažne na krytovaných guľôčkových ložiskách alebo na modelových kontaktoch typu guľôčka disk. Z tohto dôvodu nemožno získané výsledky priamo zovšeobecniť na všetky typy valivých ložísk.

Z dostupnej literatúry vyplýva, že prevádzkové správanie plastického maziva je významne ovplyvňované otáčkami, zaťažením, vlastnosťami maziva aj geometriou ložiska. Pri zvyšovaní otáčok býva pozorovaný nárast strát spojených s pohybom maziva, predlžovanie zábehovej fázy a výraznejší prejav hladovania kontaktu [5, 18]. Vplyv zaťaženia býva v porovnaní s otáčkami menej výrazný a prejavuje sa najmä zmenou kontaktnej oblasti a lokálnych podmienok v EHL kontakte [18, 20]. Shetty et al. [20] zároveň uvádzajú, že pri krytovaných DGBB nie je mechanizmus dopĺňania maziva zásadne ovplyvňovaný globálnou veľkosťou ložiska, ale predovšetkým lokálnymi podmienkami v oblasti kontaktu.

V realizovanom experimente však bolo pozorované, že významnú úlohu zohrávala aj samotná konfigurácia ložiska. Pri otvorenom kuželíkovom ložisku s líniovým kontaktom bolo zaznamenané odlišné správanie maziva než v štúdiách realizovaných na krytovaných guľôčkových ložiskách. Výsledky naznačujú, že sa prejavoval kombinovaný vplyv geometrie valivých elementov, charakteru kontaktu a možnosti úniku maziva mimo pracovný priestor ložiska. Táto skutočnosť sa prejavila najmä pri vyšších úrovniach plnenia, kde dochádzalo k intenzívnejšej redistribúcii a vytláčaniu maziva mimo kontaktnú oblasť.

Prenositel'nosť výsledkov je preto možné uvažovať predovšetkým pre ložiská obdobnej konštrukcie, geometrie a prevádzkových podmienok, teda najmä pre otvorené ložiská s porovnateľným voľným objemom, podobným charakterom kontaktu a obdobným rozsahom otáčok a zaťaženia. Použitie percentuálneho podielu voľného objemu ako vyjadrenia úrovne plnenia zároveň umožňuje jednoduchšie porovnanie medzi ložiskami rôznych rozmerov. Ani pri rovnakom percentuálnom plnení však nemožno automaticky predpokladať identický trend prevádzkového správania. Výsledný stav je pravdepodobne ovplyvňovaný aj detailmi konštrukcie ložiska, typom kletky, spôsobom krytia a schopnosťou maziva vytvárať a udržiavať rezervoáre v neaktívnych oblastiach.

Získané výsledky preto predstavujú predovšetkým experimentálne overenie správania konkrétnej konfigurácie otvoreného kuželíkového ložiska mazaného plastickým mazivom. Pre širšie zovšeobecnenie by bolo vhodné doplniť merania pri odlišných otáčkach, zaťaženiach, rozmeroch ložísk a pri ďalších typoch valivých ložísk.

6.2 Vyhodnotenie výskumných otázok a hypotéz

Výskumná otázka č. 1

Aký vplyv má úroveň plnenia plastickým mazivom a typ plastického maziva na teplotnú charakteristiku valivého ložiska, najmä na maximálnu prevádzkovú teplotu a dĺžku zábehovej fázy do dosiahnutia teplotnej stabilizácie?

Hypotéza č. 1

Predpokladá sa, že so zvyšujúcou sa úrovňou plnenia plastickým mazivom v nekrytovanom valivom ložisku dôjde k nárastu maximálnej prevádzkovej teploty a k predĺženiu zábehovej fázy potrebnej na dosiahnutie teplotnej stabilizácie. Tento predpoklad je odvodený z experimentálnych štúdií realizovaných najmä na krytovaných guľôčkových ložiskách [14], pri ktorých bol pri vyšších náplniach pozorovaný výraznejší nárast teploty počas zábehu. Predpokladá sa, že aj napriek odlišnej konfigurácii nekrytovaného ložiska s líniovým stykom zostane základný trend vplyvu náplne na teplotnú charakteristiku zachovaný. Súčasne sa predpokladá, že po ukončení zábehovej fázy sa teplota ustáli v porovnateľnom rozsahu pre jednotlivé úrovne plnenia. Z hľadiska typu maziva sa predpokladá, že vyššia viskozita základového oleja povedie k vyšším maximálnym teplotám a dlhšiemu priebehu zábehovej fázy. Vplyv typu základového oleja (syntetický, minerálny) na teplotnú charakteristiku sa predpokladá ako významný, avšak bez jednoznačného smerového určenia, keďže dostupné experimentálne výsledky nie sú v tomto smere úplne konzistentné. [5, 14]

Vyhodnotenie

Predpoklad, podľa ktorého by malo so zvyšujúcou sa úrovňou plnenia dochádzať k nárastu maximálnej prevádzkovej teploty, sa v rámci realizovaných meraní nepotvrdil. Medzi jednotlivými úrovňami plnenia síce boli zaznamenané určité rozdiely, ich veľkosť však zostávala relatívne nízka a pohybovala sa v rozsahu experimentálnej variability, preto nemožno hovoriť o jasne definovanom trende v súlade s formulovanou predikciou.

Podobná situácia bola pozorovaná aj pri hodnotení dĺžky zábehovej fázy. Očakávané predĺženie času potrebného na dosiahnutie teplotnej stabilizácie pri vyšších náplniach sa neprejavilo a nebol identifikovaný systematický nárast tohto času so zvyšujúcim sa množstvom maziva. Správanie nekrytovaného ložiska s líniovým stykom sa tak odlišovalo od trendov uvádzaných v literatúre pre krytované guľôčkové ložiská [14].

Z hľadiska typu maziva nebol pozorovaný jednoznačný vplyv viskozity základového oleja na maximálnu teplotu. Rozdiely medzi mazivami sa javili ako nevýrazné a nekonzistentné, pričom pri niektorých úrovniach plnenia boli maximálne teploty porovnateľné alebo sa objavili aj opačné tendencie. Na základe uvedeného možno konštatovať, že hypotéza č. 1 nebola potvrdená a v skúmaných podmienkach sa vplyv úrovne plnenia ani typu maziva na teplotnú charakteristiku neprejavil jednoznačne.

Výskumná otázka č. 2

Aký vplyv má úroveň plnenia plastickým mazivom a typ plastického maziva na únik maziva z otvoreného, teda nekrytovaného, ložiska počas prevádzky?

Hypotéza č. 2

S rastúcou úrovňou plnenia plastickým mazivom sa zvyšuje množstvo maziva vytlačeného z pracovnej oblasti a tým aj celková strata maziva z otvoreného (nekrytovaného) ložiska počas prevádzky [14]. Vyššie počiatočné plnenie vedie k intenzívnejšiemu mechanickému namáhaniu maziva, v dôsledku čoho sa väčší objem maziva presúva mimo obežných dráh a vytvára neaktívne vrstvy v okolí kontaktu. Predpokladá sa, že viskozita základového oleja ovplyvňuje rozsah straty maziva, pričom s rastúcou viskozitou sa očakáva zníženie relatívneho úniku. Tento predpoklad vychádza z vyššieho odporu maziva voči prúdeniu a jeho menšej tendencie k presunu mimo pracovnú oblasť ložiska. Z hľadiska typu základového oleja sa predpokladá, že mazivá so syntetickým základovým olejom budú vykazovať nižší únik v porovnaní s mazivami s minerálnym základovým olejom. Tento predpoklad vychádza z experimentálnych pozorovaní naznačujúcich vyššiu stabilitu štruktúry zahusťovadla a lepšiu schopnosť viazať základový olej pri syntetických mazivách, čo môže viesť k obmedzeniu jeho redistribúcie mimo pracovnú oblasť ložiska. [5, 6, 14]

Vyhodnotenie

Predpoklad nárastu množstva uniknutého maziva so zvyšujúcou sa úrovňou plnenia sa ukázal ako správny. S rastúcim objemom aplikovaného maziva dochádzalo k intenzívnejšiemu mechanickému namáhaniu maziva v kontakte, čo sa prejavilo zvýšenou mierou jeho vytláčania mimo pracovnú oblasť ložiska. Tento trend bol pozorovaný vo všetkých skúmaných prípadoch.

Z hľadiska porovnania jednotlivých mazív bol síce zaznamenaný trend zodpovedajúci predpokladom, avšak rozdiely medzi nimi boli vyhodnotené ako štatisticky nevýznamné. Výraznejšie rozdiely boli pozorované pri nižšej úrovni plnenia, zatiaľ čo pri vyššom plnení sa rozdiely medzi mazivami zmenšovali. Vplyv viskozity základového oleja ani rozdiel medzi syntetickým a minerálnym mazivom sa preto nepodarilo jednoznačne potvrdiť, pričom hypotéza č. 2 bola potvrdená len čiastočne. Uvažuje sa, že pri vyššom objeme maziva začína dominovať mechanizmus jeho vytláčania, čím sa vplyv vlastností samotného maziva stáva menej výrazným.

6.3 Odporúčania pre úroveň plnenia

Na základe získaných výsledkov nebolo možné stanoviť univerzálnu optimálnu náplň plastického maziva pre všetky prevádzkové podmienky, keďže vhodná úroveň plnenia je viazaná na konkrétny typ ložiska, jeho voľný objem, otáčky, zaťaženie aj vlastnosti použitého maziva. Pre skúmanú konfiguráciu nekrytovaného kuželikového ložiska sa však ako najvhodnejšia preukázala náplň 30 % voľného objemu (Obr. 5-7, Obr. 5-8, Obr. 5-11, Obr. 5-12, Obr. 6-1, Obr. 6-2). Pri tejto úrovni plnenia boli dosahované nižšie maximálne teploty než pri plneniach 20 % a 25 %, pričom súčasne bola vizuálne pozorovaná výraznejšia a súvislejšia tvorba rezervoárov v okolí valivých elementov. V porovnaní s plnením 60 % dochádzalo zároveň k nižšiemu úniku maziva. Na základe experimentálnych výsledkov bola preto pre skúmané ložisko a dané prevádzkové podmienky odporúčená náplň 30 % voľného objemu.

Pri náplni 10 % síce boli zaznamenané nižšie maximálne teploty, avšak nebola pozorovaná dostatočná akumulácia maziva v okolí valivých elementov. Pri plneniach 20 % a 25 % zostávali maximálne teploty vyššie než pri plnení 30 %, pričom redistribúcia maziva bola menej výrazná. Náplň 25 % zároveň nevykazovala dostatočne výrazné zníženie úniku maziva, ktoré by kompenzovalo menej priaznivý teplotný priebeh. Odlišné správanie bolo pozorované pri plnení 60 %, pri ktorom dochádzalo k intenzívnejšiemu vytlačaniu maziva mimo pracovný priestor ložiska a súčasne k vyšším maximálnym teplotám.

Z praktického hľadiska je významné aj porovnanie spotreby plastického maziva pri jednotlivých úrovniach plnenia. Pri náplni 60 % bolo do ložiska aplikovaných približne 2,95 g maziva, zatiaľ čo pri plnení 30 % predstavovala aplikovaná náplň približne 1,47 g. Pri použití 1 milióna ložísk obdobnej konfigurácie by tak zníženie plnenia zo 60 % na 30 % predstavovalo úsporu približne 1 480 kg plastického maziva. Pri použití maziva Mobilith SHC100 s cenou približne 329 Kč za 380 g balenie by takáto úspora predstavovala približne 1,28 milióna CZK. Okrem ekonomického prínosu by dochádzalo aj k zníženiu celkovej spotreby maziva čo predstavuje aj environmentálny prínos.

7 ZÁVER

Diplomová práca bola zameraná na experimentálne skúmanie vplyvu úrovne plnenia plastického maziva na prevádzkové parametre kuželikového valivého ložiska. V rámci experimentov boli sledované prevádzkové teploty, priebeh zábehovej fázy a únik maziva pri rôznych úrovniach plnenia ložiska. Merania boli realizované na upravenom experimentálnom zariadení umožňujúcom opakovateľné testovanie za definovaných prevádzkových podmienok.

Na základe nameraných výsledkov bolo potvrdené, že množstvo plastického maziva významne ovplyvňuje prevádzkové správanie ložiska. Pri vyšších náplniach boli zaznamenané vyššie prevádzkové teploty a výraznejší únik maziva z pracovného priestoru ložiska. Pri nižších úrovniach plnenia bol síce spravidla pozorovaný menší únik maziva, avšak teplotné správanie nevykazovalo jednoznačne priaznivejší priebeh a súčasne bola identifikovaná menej výrazná tvorba rezervoárov v okolí valivých elementov. V skúmaných podmienkach sa ako najvhodnejšia preukázala náplň 30 % voľného objemu ložiska, pri ktorej bol dosahovaný priaznivý kompromis medzi prevádzkovou teplotou, redistribúciou maziva a mierou jeho úniku. Získané výsledky zároveň naznačujú, že pri skúmanej konfigurácii nebolo potrebné používať úroveň plnenia reprezentujúcu hornú hranicu všeobecne odporúčaného rozsahu pre aplikácie s otáčkami do približne 50 % limitnej rýchlosti ložiska, pri ktorých býva uvádzané plnenie približne 1/2 až 2/3 voľného objemu [12]. V rámci experimentu bola táto úroveň reprezentovaná plnením 60 %, ktoré však nevedlo k priaznivejšiemu prevádzkovému správaniu ložiska.

Význam výsledkov sa prejavuje aj z praktického hľadiska. Pri znížení plnenia zo 60 % na 30 % bolo možné znížiť množstvo aplikovaného maziva, konkrétne z 2,95 g na 1,47 g na jedno ložisko, bez zhoršenia sledovaných prevádzkových parametrov. Uvedený prístup sa v realizovaných meraniach ukázal ako vhodný najmä pri syntetických plastických mazivách, pri ktorých boli vytvorené súvislejšie rezervoáre v porovnaní s rovnakými plneniami pri minerálnom plastickom mazive. To naznačuje potrebu individuálneho posudzovania vhodnej úrovne plnenia v závislosti od typu plastického maziva. Pri veľkosériových aplikáciách by takýto prístup mohol predstavovať významný ekonomický aj environmentálny prínos. Pri použití 1 milióna ložísk obdobnej konfigurácie by dochádzalo k úspore približne 1 480 kg plastického maziva, čo pri mazive Mobilith SHC100 predstavuje približne 1,28 milióna CZK.

Stanovené ciele diplomovej práce boli splnené a získané výsledky prispievajú k lepšiemu pochopeniu správania plastického maziva vo valivých ložiskách pri rôznych úrovniach plnenia. Súčasne bolo potvrdené, že optimalizácia množstva maziva predstavuje významný faktor ovplyvňujúci prevádzkovú efektivitu a spoľahlivosť ložiska.

Ďalší výskum by mohol byť zameraný na skúmanie odlišných prevádzkových podmienok, predovšetkým rôznych zaťažení, otáčok a rozmerov ložísk. Prínosné by bolo aj realizovanie dlhodobých experimentov umožňujúcich sledovanie zmien vlastností plastického maziva a vývoja mazacích režimov počas prevádzkovej životnosti ložiska.

8 VÝSLEDKY VÝSKUMU PODĹA RIV

Odborný článek (J)

Influence of grease filling on the operating parameters of rolling bearing

Gímeš, M.; Svoboda, P.; Michalec, M.

Abstract

Grease fill level represents an important parameter influencing operating behaviour of grease lubricated rolling bearings. The present study experimentally investigated the influence of grease fill level on temperature evolution, grease leakage and grease redistribution in an open tapered roller bearing. Three greases differing in base oil type and viscosity were evaluated under constant operating conditions. Temperature evolution was analysed with focus on churning behaviour and subsequent transition towards quasi stabilized operating conditions. Relative grease leakage was quantified and post test grease distribution was visually evaluated. The results confirmed that grease fill level significantly influenced bearing operating behaviour. Increasing grease quantity intensified grease leakage and grease redistribution outside the active working region. Maximum temperature did not exhibit monotonic dependence on grease quantity and 20 % filling resulted in higher maximum temperatures than 30 % filling for all investigated greases. Under investigated conditions, 30 % filling provided favourable compromise between operating temperature, grease redistribution and grease leakage. Synthetic greases also exhibited more continuous grease reservoir formation than mineral grease

Funkční vzorek (G)

Zařízení pro testování vlivu náplně plastického maziva na parametry valivého ložiska

Gímeš, M.; Svoboda, P.; Šperka, P.

Technický popis

Zařízení je využito při laboratorním výzkumu distribuce plastického maziva na vnějším a vnitřním kroužku ložiska a na jeho valivých elementech včetně hodnocení režimu mazání a teploty ve valivém ložisku. Zařízení obsahuje elektromotor 3500 ot/min, který přes pružnou spojku pohání hřídel uloženou ve dvou ložiscích. Moment je veden na zkoušené ložisko přes vnitřní a vnější prodloužení. Za pouzdrem je snímač síly 2000 N a pneumatický válec 1500 N pro axiální zatížení. Skříň umožňuje přesné uchycení kroužků, přenos momentu a ruční montáž (H7/h6). Vnější kroužek je fixován pružinovým pístem. Pouzdro z Al obsahuje 3 topné patrony (až 100 °C). Konstrukce umožňuje rychlou výměnu ložisek.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL. A review of elasto-hydrodynamic lubrication theory. *Tribology Transactions* [online]. 2011, **54**(3), 470–496. ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2010.551804
- [2] LUGT, P. M. A review on grease lubrication in rolling bearings. *Tribology Transactions* [online]. 2009, **52**(4), 470–480. ISSN 10402004. Dostupné z: doi:10.1080/10402000802687940
- [3] HAMROCK, B a D DOWSON. ISOTHERMAL ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF POINT CONTACTS I11-Fully Flooded Results. *Journal of Lubrication Technology* [online]. 1976, **99**. Dostupné z: doi:10.1115/1.3453074
- [4] LUGT, P. M. *Grease Lubrication in Rolling Bearings* [online]. B.m.: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 9781118483961. Dostupné z: doi:10.1002/9781118483961
- [5] CHATRA, K. R. Sathwik a Piet M. LUGT. Channeling behavior of lubricating greases in rolling bearings: Identification and characterization. *Tribology International* [online]. 2020, **143**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.106061
- [6] CHATRA, K. R. Sathwik a Piet M. LUGT. The process of churning in a grease lubricated rolling bearing: Channeling and clearing. *Tribology International* [online]. 2021, **153**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106661
- [7] HOGENBERK, Femke, Jude A. OSARA, Dirk VAN DEN ENDE a Piet M. LUGT. On the evolution of oil-separation properties of lubricating greases under shear degradation. *Tribology International* [online]. 2023, **179**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2022.108154
- [8] CHATRA, K. R. Sathwik, Jude A. OSARA a Piet M. LUGT. The lubrication mechanism behind the transition from churning to bleeding in grease lubricated bearings – Experimental characterization. *Tribology International* [online]. 2023, **183**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2023.108375
- [9] CANN, P. M. Starvation and reflow in a grease-lubricated elastohydrodynamic contact. *Tribology Transactions* [online]. 1996, **39**(3), 698–704. ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402009608983585
- [10] CEN, Hui a Piet M. LUGT. Replenishment of the EHL contacts in a grease lubricated ball bearing. *Tribology International* [online]. 2020, **146**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.106064

- [11] SKF. *Determining grease quantities for initial fill and relubrication* [online]. [vid. 2026-03-15]. Dostupné z: <https://www.skf.com/us/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/lubrication/determining-grease-quantities>
- [12] ZKL GROUP. 9. *Bearing lubrication* [online]. [vid. 2026-03-15]. Dostupné z: <https://www.zkl.cz/es/produkty/obecne-informace-pro-konstruktery/9-mazani-lozisek>
- [13] SHAWKI, G. S.A. a M. O.A. MOKHTAR. Optimum grease quantity for roller bearing lubrication. *Tribology International* [online]. 1979, **12**(1), 21–24 [vid. 2024-10-28]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/0301-679X(79)90158-0
- [14] SHETTY, Pramod, Robert Jan MEIJER, Jude A. OSARA, Rihard PASARIBU a Piet M. LUGT. Effect of Grease Filling on the Film Thickness in Deep-Groove Ball Bearings. *Tribology Transactions* [online]. 2024, **67**(1), 62–69. ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2023.2282632
- [15] LUGT, Piet M. On the use of the Arrhenius equation to describe the impact of temperature on grease life. *Tribology International* [online]. 2023, **179**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2022.108142
- [16] FISCHER, D, G JACOBS, A STRATMANN a G BURGHARDT. Effect of base oil type in grease composition on the lubricating film formation in EHD contacts. *Lubricants* [online]. 2018, **6**(2). ISSN 20754442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants6020032
- [17] DE LAURENTIS, Nicola, Amir KADIRIC, Piet LUGT a Philippa CANN. The influence of bearing grease composition on friction in rolling/sliding concentrated contacts. *Tribology International* [online]. 2016, **94**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2015.10.012
- [18] CEN, Hui a Piet M. LUGT. Film thickness in a grease lubricated ball bearing. *Tribology International* [online]. 2019, **134**, 26–35. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.01.032
- [19] SHETTY, Pramod. *On the film thickness in grease lubricated deep groove ball bearings* [online]. Enschede, 2024. Ph.D. Thesis. University of Twente. Dostupné z: doi:10.3990/1.9789036561679
- [20] SHETTY, Pramod, Robert Jan MEIJER, Jude A. OSARA, Rihard PASARIBU a Piet M. LUGT. Effect of bearing size on film thickness in grease-lubricated axially loaded deep groove ball bearings. *Tribology International* [online]. 2024, **197**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2024.109748

- [21] HYNEK, J. *Distribuce plastického maziva ve valivém ložisku* [online]. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav konstruování. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149644>
- [22] MICHAL PROCHÁZKA. *Plastická maziva pro ložiska větrných elektráren* [online]. Brno, 2025 [vid. 2026-05-22]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162395>
- [23] ZKL. 30205 A [online]. [vid. 2025-12-22]. Dostupné z: <https://www.zkl.cz/cs/p/30205A>
- [24] MOBIL. *Mobilith XHP222* [online]. [vid. 2025-12-22]. Dostupné z: <https://www.mobil.eu/en-gb/lubricants/products/products/mobilgrease-xhp-222>
- [25] MOBIL. *Mobilith SHC220* [online]. [vid. 2025-12-22]. Dostupné z: <https://www.mobil.eu/en-gb/lubricants/products/products/mobilith-shc-220>
- [26] MOBIL. *Mobilith SHC100* [online]. [vid. 2025-12-22]. Dostupné z: <https://www.mobil.eu/en-gb/lubricants/products/products/mobilith-shc-100>

10 ZOZNAM POUŽITÝCH ZKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

AFM	Atomic Force Microscopy
B	šírka ložiska
C	šírka vonkajšieho krúžku ložiska
C_{0r}	statická únosnosť
CAD	Computer-Aided Design
C_r	dynamická únosnosť
d	vnútorný priemer ložiska
D	vonkajší priemer ložiska
DGBB	Deep Groove Ball Bearing
E'	dodaná energia
EHL	Elastohydrodynamické mazanie
FDM	Fused Deposition Modeling
H	hrúbka mazacieho filmu
m	hmotnosť ložiska
m_0	hmotnosť plastického maziva
m_1	hmotnosť uvoľneného oleja
m_{po}	hmotnosť zvyškového maziva v ložisku
m_{pred}	hmotnosť pôvodnej náplne v ložisku
n	počet
η	relatívny únik plastického maziva
n_0	referenčné otáčky pre plastické mazivo
NLGI	National Lubricating Grease Institute
p	p-hodnota
P	tlak v elastohydrodynamickom kontakte
PAG	polyalkylénglykol
PAO	polyalfaolefín
T	celková šírka ložiska

ÚK	Ústav konštruovania
V	voľný objem ložiska
WoS	Web of Science
X	smer osi x
x	uvoľnený olej
α	hladina štatistickej významnosti
σ	smerodajná odchylka

11 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 2-1 PRISMA diagram práce.....	15
Obr. 2-2 Schematické znázornenie rozdelenia tlaku (P) a hrúbky mazacieho filmu (H) v elastohydrodynamickom kontakte; (a) plne zaplavený kontakt; (b) pri hladovaní kontaktu [1]	17
Obr. 2-3 Podiel maziva vo vnútri valivého ložiska typu 6204-2Z/C3 s pôvodnou náplňou 30% v závislosti od dodanej energie E' počas zábehovej a následnej fázy porovnanie mazív; (a) LM2L (špičkového typu); (b) LM3L (plató typu) [6]	19
Obr. 2-4 Vývoj hrúbky mazacieho filmu počas hladovania a spätného toku v plastickom mazive [9]	20
Obr. 2-5 Vplyv množstva plastického maziva na priebeh prevádzkovej teploty ložiska 6209 pri zaťažení 1600 N a rýchlosti 1420 ot/min [13].....	22
Obr. 2-6 Okamžitá zmena teploty a hrúbky mazacieho filmu v ložisku 6209 pre mazivo LiM-100-2.5 pri počiatočných náplniach 30 %, 15 % a 7,5 %, zaťažení 513 N a rýchlosti otáčania 4000 ot/min [14]	23
Obr. 2-7 Okamžitá zmena teploty a hrúbky mazacieho filmu v ložisku 6209 pre mazivo LiM-460-1.5 pri počiatočných náplniach 30 %, 15 % a 7,5 %, zaťažení 513 N a rýchlosti otáčania 4000 ot/min [14]	23
Obr. 2-8 Zvyšková hmotnosť maziva na tesneniach; (1 – a) LiM – 100 2.5, 7,5 %, 0,24 g; (1 – b) LiM – 100 2.5, 15 %, 1,46 g; (1 – c) LiM – 100 2.5, 30 %, 2,35 g; (2 – a) LiM – 460 1.5, 7,5 %, 0,28 g; (2 – b) LiM – 460 1.5, 15 %, 1,36 g; (2 – c) LiM – 460 1.5, 30 %, 1,96 g (upravené z [14])	24
Obr. 2-9 Teplotná charakteristika ložiska pri 30 % náplni plastického maziva (6204-2Z/C3, 150 N, 15000 min ⁻¹) [5]	26
Obr. 2-10 AFM charakterizácia mikroštruktúry plastických mazív: (a) LM2L (b) LM3C (c) LM3L (d) LCP2.5C (1) čerstvé mazivo; (2) mazivo po ukončení zábehovej fázy; (3) mazivo po 48 hodinách prevádzky ložiska (upravené z [5]).....	26
Obr. 2-11 Hrúbka mazacieho filmu v závislosti od rýchlosti pre mazivá PAO-Li-100 a PAG-Li-140: porovnanie plne zaplavených a hladujúcich podmienok mazania vrátane základového oleja [16]	27
Obr. 2-12 Vplyv rýchlosti otáčania na priebeh teploty a hrúbky mazacieho filmu v ložisku 6209-2Z/C3 pre mazivá; (a) PU/E; (b) Li/M; (c) LiC/PAO; pri zaťažení 513 N (upravené z [18])	28

Obr. 2-13 Vplyv zaťaženia na priebeh hrúbky mazacieho filmu v ložisku 6209-2Z/C3 pri rýchlosti 2500 min^{-1} pre mazivá; (a) PU/E; (b) Li/M; (c) LiC/PAO (upravené z [18])	30
Obr. 4-1 Schéma metodického postupu.....	36
Obr. 4-2 Otvorený stav testovacieho zariadenia 2023/2024 [20]	38
Obr. 4-3 Uzavretý stav testovacieho zariadenia 2023/2024 [20]	38
Obr. 4-4 Uloženie testovaného ložiska [20]	39
Obr. 4-5 Schéma zostavy pre meranie separácie oleja z plastického maziva; (a) oficiálna zostava; (b) modifikovaná zostava [21]	40
Obr. 4-6 Hlavné geometrické rozmery kužeľového valivého ložiska ZKL 30205 A [22].	41
Obr. 4-7 Naplnené ložisko ZKL 30205 A plastickým mazivom SHC100 30%; (a) pohľad z vnútornej strany; (b) pohľad zo zadnej strany	45
Obr. 4-8 Časti testu separácie oleja z plastického maziva; (a) rozprestreté mazivo pred testom; (b) separovaný olej v banke	47
Obr. 4-9 Jednotlivé surové behy teplotnej charakteristiky pre mazivo SHC100, pri 30% náplni	48
Obr. 4-10 Priemerný beh teplotnej charakteristiky pre mazivo SHC100, pri 30% náplni so smerodajnými odchýlkami zobrazenými každú hodinu	49
Obr. 5-1 Použitý medzikus na jednoduché spojenie tyče pneumatického valcu a snímača sily; (a) pohľad na medzikus a priliehajúce komponenty v reze; (b) izometrický pohľad na medzikus; (c) fotografia umiestnenia medzikusu v zostave	53
Obr. 5-2 Podložka pod teleso testovaného ložiska; (a) fotografia umiestnenia podložky v zostave; (b) izometrický pohľad na podložku	54
Obr. 5-3 Držiak termočlánku; (a) pohľad v reze; (b) izometrický pohľad na držiak; (c) fotografia umiestnenia držiaku termočlánku v zostave.....	54
Obr. 5-4 Axiálny člen; (a) pohľad v reze na hlavnú funkčnú časť; (b) fotografia umiestnenia poistného člena v zostave.....	55
Obr. 5-5 Zostava testovacieho zariadenia po úprave; (a) izometrický pohľad na celú zostavu; (b) fotografia zostavy zariadenia	56
Obr. 5-6 Schéma zapojenia obvodov	56
Obr. 5-7 Priebeh teploty ložiska mazaného mazivom SHC100 pri danom plnení.....	58
Obr. 5-8 Maximálna teplota ložiska mazaného mazivom SHC100 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,338$)	59
Obr. 5-9 Priemerná teplota ložiska počas celého testu mazaného mazivom SHC100 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,976$).....	60

Obr. 5-10 Priemerná teplota ložiska v čase medzi 6 až 10 hodinou mazaného mazivom SHC100 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,995$)	60
Obr. 5-11 Priebeh teploty ložiska mazaného mazivom SHC220 pri daných percentách plnenia voľného objemu	61
Obr. 5-12 Maximálna teplota ložiska mazaného mazivom SHC220 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,34$).....	62
Obr. 5-13 Priemerná teplota ložiska počas celého testu mazaného mazivom SHC220 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,82$).....	63
Obr. 5-14 Priemerná teplota ložiska v čase medzi 6 až 10 hodinou mazaného mazivom SHC220 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,629$)	63
Obr. 5-15 Priebeh teploty ložiska mazaného mazivom XHP222 pri daných percentách plnenia voľného objemu	64
Obr. 5-16 Maximálna teplota ložiska mazaného mazivom XHP222 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,249$).....	65
Obr. 5-17 Priemerná teplota ložiska počas celého testu mazaného mazivom XHP222 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,261$).....	66
Obr. 5-18 Priemerná teplota ložiska v čase medzi 6 až 10 hodinou mazaného mazivom XHP222 pre dané úrovne plnenia voľného objemu ($p = 0,307$)	66
Obr. 5-19 Hodnoty relatívneho úniku plastického maziva SHC100 z valivého ložiska, pri uvedených náplniach ($p = 6 \cdot 10^{-10}$)	67
Obr. 5-20 Hodnoty relatívneho úniku plastického maziva SHC220 z valivého ložiska, pri uvedených náplniach ($p = 0,00029$)	68
Obr. 5-21 Hodnoty relatívneho úniku plastického maziva XHP222 z valivého ložiska, pri uvedených náplniach ($p = 0,00091$)	69
Obr. 5-22 Relatívny podiel separovaného oleja pre mazivá SHC100, SHC220, XHP222 ($p = 0,00007$).....	70
Obr. 6-1 Pohľad na vnútorný krúžok valivého ložiska s kietkou a valivými elementmi po ukončení experimentu pre mazivo SHC100 pri rôznych úrovniach plnenia; (a) 10 %; (b) 20 %; (c) 25 %; (d) 30 %; (e) 60 %	77
Obr. 6-2 Pohľad na vnútorný krúžok valivého ložiska s kietkou a valivými elementmi po ukončení experimentu pre mazivo SHC220 pri rôznych úrovniach plnenia; (a) 20 %; (b) 30 %	78
Obr. 6-3 Pohľad na vnútorný krúžok valivého ložiska s kietkou a valivými elementmi po ukončení experimentu pre mazivo XHP222 pri rôznych úrovniach plnenia; (a) 20 %; (b) 30 %	78

12 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 4-1 Geometrické a technické parametre ložiska ZKL 30205 A [22]	41
Tab. 4-2 Charakteristika použitých plastických mazív [23–25].....	42
Tab. 4-3 Testované kombinácie plastických mazív	44
Tab. 5-1 Použité časti zo zariadenia 2023/2024	52
Tab. 6-1 Relatívny únik a zvyšná náplň po teste vo valivom ložisku pre jednotlivé mazivá a plnenia	76