



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ANALÝZA OPOTŘEBENÍ MATERIÁLŮ KLUZNÝCH POVRCHŮ VELKOROZMĚRNÝCH HYDROSTATICKÝCH LOŽISEK

WEAR ANALYSIS OF THE SLIDING SURFACE MATERIAL OF LARGE-SCALE HYDROSTATIC BEARINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Daněk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Lukáš Daněk**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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:

Analýza opotřebení materiálů kluzných povrchů velkorozměrných hydrostatických ložisek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hydrostatická ložiska fungují na principu dodávání tlakové kapaliny do hydrostatické kapsy, čímž je vytvářen souvislý mazací film zcela oddělující kluzné plochy. Kromě provozní doby jsou kluzné plochy v kontaktu a v případě velkorozměrných ložisek musí přenášet značné zatížení. Obvykle se pro kluzné plochy využívá vhodné kombinace materiálů, které spolu při dosednutí nereagují, anebo se povrchy povlakuji. Zodpovězení často kladených otázek konstruktérů o vhodnosti uvažovaných materiálů a významu modifikací povrchů by přispělo k zefektivnění návrhu a provozu velkorozměrových hydrostatických ložisek.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je experimentálně objasnit vliv materiálů kluzných povrchů hydrostatických ložisek na tření a opotřebení během selhání dodávky tlakového oleje užitím univerzálního tribometru.

Dílčí cíle diplomové práce:

- definovat materiály, povrchové úpravy a jejich parametry vhodné pro experimentální ověření,
- konstrukčně navrhnout modul pro experimenty na univerzálním tribometru,
- navrhnout experimentální podmínky, postupy a jejich rozsah,
- analyzovat tření a opotřebení pro vybrané kontaktní dvojice.

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:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

LIU, Z., Y. WANG, L. CAI, Y. ZHAO, Q. CHENG a X. DONG. A review of hydrostatic bearing system: Researches and applications. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017, 9(10). ISSN 1687-8140.

MICHALEC, M., P. SVOBODA, I. KŘUPKA a M. HARTL. A review of the design and optimization of large-scale hydrostatic bearing systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2021, 24(4), 936-958. ISSN 22150986.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na experimentální studium opotřebení materiálů kluzných povrchů velkorozměrných hydrostatických ložisek během selhání dodávky tlakového oleje. Cílem bylo objasnit vliv materiálů a povrchových úprav na tření a opotřebení pomocí univerzálního tribometru. Za tímto účelem byla navržena metodika testování v laboratorních podmínkách. Pro tribometr byl vyvinut experimentální modul pro simulaci kritického stavu a nové postupy vyhodnocení pro získání informací o chování kontaktu. Pomocí profilometru, přesné váhy a mikroskopu byly pozorovány výsledky opotřebení. Práce obsahuje soubor vhodných potenciálních materiálů pro kluzné povrchy kapes, které byly otestovány za kritických podmínek. Jednalo se o zástupce konstrukčních ocelí a antikoročních úprav (pozinkování), měkkých i tvrdých (hliníkových) bronzů, kompozitních ložiskových výstelek (stanit), polymerů (UHMWPE) a kompozitních materiálů (PTFE). Výsledkem experimentů je závislost tření na kluzné rychlosti, míra opotřebení materiálů a další jevy naměřené pro statistický soubor vzorků pro vybrané materiály. Vznikl tak seznam charakteristik, omezení a doporučení pro testované kluzné materiály, který lze použít k efektivnějšímu návrhu a provozu velkorozměrných hydrostatických ložisek.

KLÍČOVÁ SLOVA

hydrostatické ložisko, tribologie, míra opotřebení, součinitel tření, kluzné povrchy kapes

ABSTRACT

This thesis focuses on the experimental investigation of the wear behavior of sliding surface materials in large-scale hydrostatic bearings during oil supply failure. The aim is to clarify the influence of materials and surface treatments on friction and wear. For this purpose, a testing methodology was designed and implemented in laboratory conditions. An experimental module was developed for the tribometer to simulate a critical state and a new procedures were established for evaluating the behavior of the contact. Wear results were observed using a profilometer, precise scales, and a microscope. A set of suitable materials for pad sliding surfaces was created, which were tested under critical conditions. The selected materials were representatives of construction steel and anticorrosion treatments (galvanization), soft and hard (aluminium) bronzes, composite bearing linings (Babbitt), polymers (UHMWPE), and composite materials (PTFE). The experimental results show the dependence of friction on sliding velocity, wear rate, and other phenomena repeatedly measured on a statistical sample of selected materials. The final result is a list of characteristics, limitations, and recommendations for the tested sliding materials, which can be used for more effective design and operation of large-scale hydrostatic bearings.

KEYWORDS

hydrostatic bearing, tribology, wear rate, coefficient of friction, surface of pads

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DANĚK, Lukáš. *Analýza opotřebení materiálů kluzných povrchů velkorozměrných hydrostatických ložisek*. Brno, 2023, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych využít této příležitosti a vyjádřit svou upřímnou vděčnost všem, kteří mi pomohli, abych mohl zdárně tuto práci dokončit.

Nejprve bych rád poděkoval svému vedoucímu práce za jeho vedení, cenné rady a podporu během celého procesu.

Dále bych rád poděkoval své rodině a blízkým za jejich neustálou podporu, lásku a trpělivost během mého studia.

Děkuji také všem přátelům a kolegům, kteří se mnou sdíleli své myšlenky a nabídli své rady. Vaše podnětné diskuze a podpora mi pomohly překonat výzvy a přispěly ke zlepšení mé práce.

Rovněž bych rád vyjádřil své uznání všem, kteří přispěli svými studii, publikacemi a dostupnými zdroji informací, které jsem využil při svém výzkumu.

Nakonec bych chtěl poděkovat všem, kdo se podíleli na organizaci a poskytnutí prostředků pro mou práci, včetně Ústavu konstruování, jejichž podpora mi umožnila realizovat výzkum.

Děkuji Vám všem

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
2.1	Rešeršní metody	17
2.2	Kritická rešerše	19
2.2.1	Provozní podmínky VHSL	21
2.2.2	Materiály funkčních povrchů kluzných ložisek	25
2.2.3	Topografie kluzných povrchů kluzných ložisek	31
2.2.4	Metody pro výzkum kluzných povrchů	36
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	37
2.3.1	Vliv provozních podmínek na stav kluzných ploch VHSL	37
2.3.2	Možnosti materiálů a povrchových úprav pro kluzné plochy VHSL	38
2.3.3	Metody testování materiálů pro VHSL	40
2.4	Mezera v poznání	40
3	CÍLE PRÁCE	41
3.1	Výzkumná otázka	41
3.2	Cíle	41
3.2.1	Globální cíle práce	41
3.2.2	Dílčí cíle	41
3.3	Hypotézy	42
3.4	Cíle vývoje	42
3.4.1	Vymezení problému	42
3.4.2	Hlavní cíl vývoje	43
3.4.3	Dílčí cíle vývoje	44
4	MATERIÁLY A METODY	45
4.1	Metodika	45
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	46
4.3	Materiál a testovací podmínky	48
4.4	Metody	52
4.4.1	Metody měření	52
4.4.2	Vyhodnocení dat a opakovatelnost	53
4.5	Testované predikce	60

4.6	Návrh experimentálního modulu	62
4.6.1	Analýza cílů a specifikace omezení	62
4.6.2	Strom cílů a omezení	63
4.6.3	Technická funkční analýza	63
4.6.4	Stanovení významnosti cílů a kritéria jejich naplnění	64
4.6.5	Výběr konfigurace modulu	65
4.6.6	Návrh alternativních řešení	67
4.6.7	Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího	73
4.6.8	Matematický model hladiny oleje	75
4.6.9	Tvarové řešení	77
4.6.10	Určení materiálu a specifikace výrobních technologií	80
4.6.11	Ergonomické řešení, bezpečnost a hygiena	81
4.6.12	Testování a úpravy experimentálního modulu	81
4.6.13	Hodnocení klíčových parametrů	87
5	VÝSLEDKY	89
5.1	Kalibrace měření	89
5.1.1	Příprava zkušebního zařízení pro experiment	89
5.2	Jednotlivé materiály	90
5.2.1	Konstrukční ocel	90
5.2.2	Cínový bronz	93
5.2.3	Olověný bronz	96
5.2.4	Hliníkový bronz	98
5.2.5	Pozinkovaná ocel	100
5.2.6	Cínová kompozice	103
5.2.7	Olověná kompozice	105
5.2.8	Vysokomolekulární polyetylen	108
5.2.9	Kompozit PTFE	110
5.3	Souhrnné výsledky	113
5.3.1	Opotřebení	113
5.3.2	Tření	114
6	DISKUZE	115
6.1	Interpretace výsledků	115
6.1.1	Opotřebení	115
6.1.2	Součinitel tření	117
6.1.3	Další pozorované jevy	118
6.1.4	Srovnání výsledků a rešerše	119
6.2	Verifikace hypotéz	123

7	ZÁVĚR	125
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	127
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	132
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	134
11	SEZNAM TABULEK	140
12	SEZNAM PŘÍLOH	141

1 ÚVOD

Hydrostatická ložiska jsou v současné době nezbytnou součástí mnoha průmyslových aplikací, zejména v oblasti obráběcích strojů, vodních turbín či radioteleskopů (Obr. 1-1). Hlavní výhodou těchto ložisek je jejich schopnost snižovat tření a opotřebení mezi kluznými povrchy, a tím zvyšovat životnost a spolehlivost strojů. Díky neustálému pokroku výrobních technologií a snižování nákladů na tuto technologii se hydrostatická ložiska rozšiřují i do nových oblastí a aplikací.

Funkce hydrostatického ložiska je závislá na dodávce tlakového oleje do kontaktu. Při jejím selhání ať už z důvodů výpadku proudu nebo selhání hydraulického obvodu dochází k nevratnému opotřebení kluzných povrchů, což může vést ke ztrátě funkčnosti celého stroje. U velkorozměrových konstrukcí není běhoun a kapsa z jednoho vyměnitelného dílu, ale skládá se ze segmentů. Vzhledem k velikosti dílů a stroje je oprava časově i finančně náročná. Havárie těchto ložisek představují jak lokální, tak globální problém z důvodů složitosti podpůrného hydraulického systému. Vyřazení z provozu je způsobeno nevhodným návrhem kluzných povrchů z pohledu materiálů a navržené kontaktní plochy vzhledem ke kritickému stavu.



Obr. 1-1 Radioteleskop pro hluboké vesmírné spojení a vynucená generální oprava, kvůli které byly půl roku omezeny vybrané mise vesmírných satelitů [6]

Chyby vznikají na základě nízké informovanosti konstruktérů o podmínkách kritického stavu. Žádná nalezená literatura neobsahuje charakteristiky materiálů v oblasti hydrostatických (dále jen HS) ložisek, protože materiál není při optimálním chodu v kontaktu. Jeho tribologické vlastnosti nemají zásadní vliv na ideální funkci stroje. Informace o kritickém stavu nejsou literaturou dostatečně zmapovány. Použitelné materiály lze usuzovat pouze z příbuzných aplikací, jako jsou kluzná ložiska a hydrodynamická (dále jen HD) ložiska. Podmínky zatěžování materiálů se však značně liší.

Vzniká tak otázka: „Jaký vliv má volba materiálu a typu povrchové úpravy na redukci poškození kluzné plochy u velkorozměrového hydrostatického ložiska v případě poruchy dodávky tlakového oleje?“ Výzkum si klade za cíl objasnit vliv materiálů a povrchových úprav na tření a opotřebení pomocí experimentu v kontrolovaných laboratorních podmínkách, který reflektuje podmínky kritického stavu výpadku tlakového oleje u velkorozměrových hydrostatických ložisek (dále jen VHSL).

Kvůli tomu, že se jedná o první výzkum v dané problematice, jsou v práci definovány metody experimentálního testování, specifikace podmínek a způsob měření. Pro tribometr je vyvinut experimentální modul pro simulaci kritického stavu včetně metodiky vyhodnocení pro získání informací o chování kontaktu. Pomocí profilometru, přesné váhy a mikroskopu je pozorováno opotřebení.

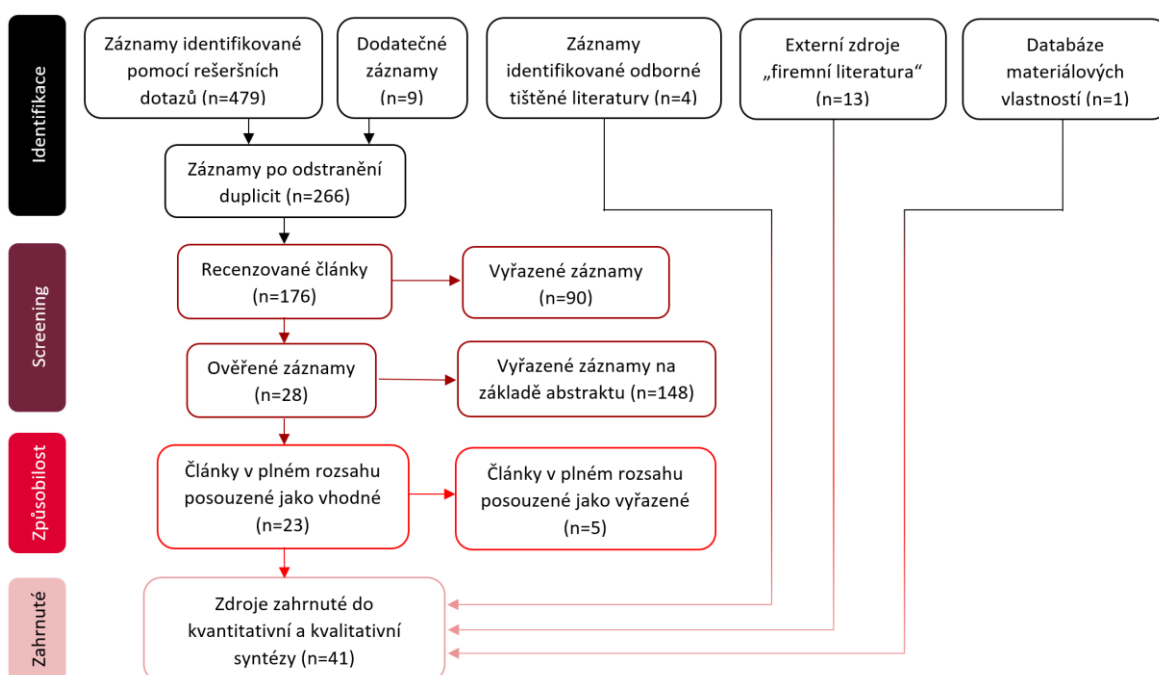
Tato práce se zaměřuje na komplexní vhled do problematiky. Pomocí rešerše je vytvořena mapa použitelných materiálů pro kluzné povrchy kapes, které jsou otestovány za kritických podmínek. Jedná se o zástupce konstrukční oceli a antikoročních úprav, měkkých i tvrdých bronzů, kompozitních ložiskových výstelek, polymerů a kompozitních materiálů. Výsledkem experimentů je závislost tření na kluzné rychlosti, míra opotřebení a další jevy naměřené pro statistický soubor vzorků pro vybrané materiály. Vzniká tak seznam charakteristik, omezení a doporučení pro testované kluzné materiály, který lze použít k efektivnějšímu návrhu a provozu velkorozměrných hydrostatických ložisek. Důsledkem může být i prosazení VHSL v nových aplikacích.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V první části jsou popsány rešeršní metody a zdroje informací. V další části je detailně sepsána rešerše a následuje zhodnocení klíčových informací a syntéza vstupů pro výzkum.

2.1 Rešeršní metody

Výběr zdrojů si zakládá na odborných člancích (viz Obr. 2-1).



Obr. 2-1 PRISMA diagram

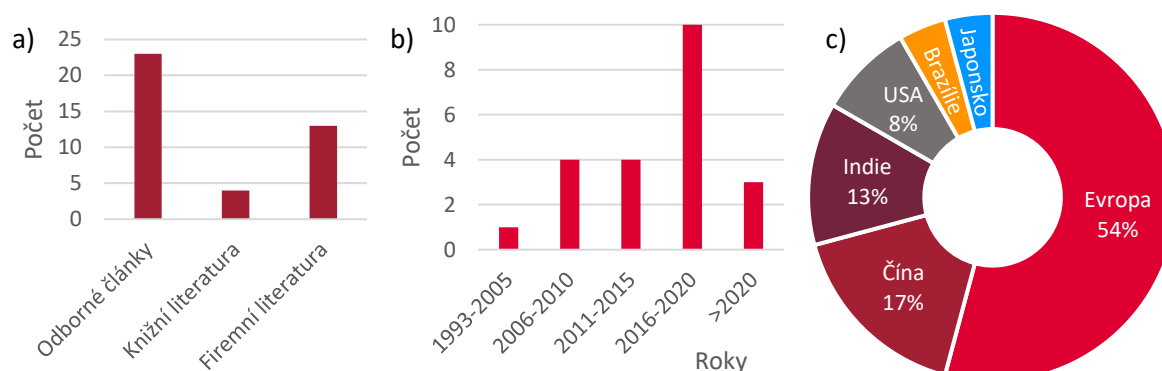
Jako kritéria pro výběr byly zvoleny 2 druhy článků „review“ a „article“. Vyhledávání probíhalo v anglickém jazyce na základě pěti formulovaných otázek (viz Tab. 2-1). Z nich byla vytipována klíčová slova a formulovány rešeršní dotazy. Základní zdroje pro hledání studií byly databáze Scopus, Web of science a Scholar. Byly odebrány duplicity. Články byly filtrovány ručně podle názvu a abstraktu. Bylo vybráno 28 článků, které byly podrobně přečteny. Pro tuto rešerši bylo použito 23 článků. Při zhodnocení informací získaných z článků bylo zjištěno, že oblast provozních vlastností a materiálů velkorozměrových ložisek není dostatečně pokryta. Z důvodů stáří technologie byly informace dohledány v odborné tištěné literatuře. Z důvodů neaktuálnosti materiálů byla do článku zahrnuta firemní literatura. Na základě výsledků z firemní literatury byly doplněny publikace, které se zabývají vydefinovanými materiály v jiných oblastech.

Tab. 2-1 Počet nalezených článků ve vědeckých databázích

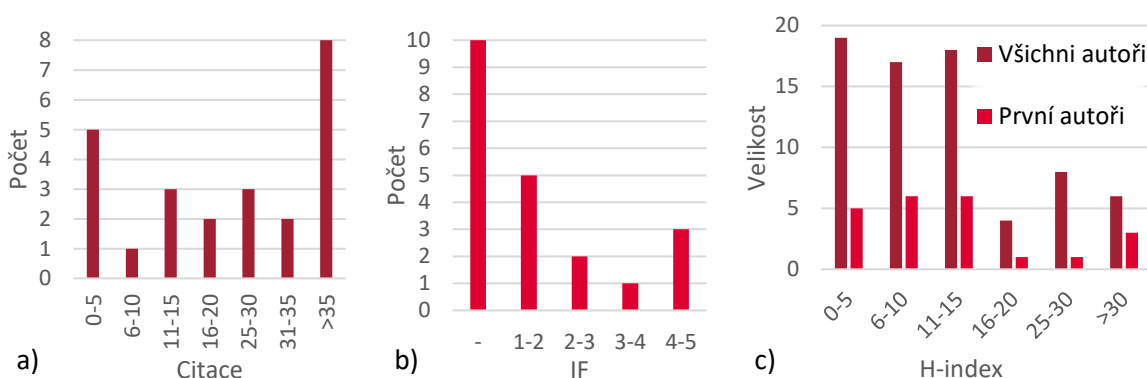
Zaměření rešeršního dotazu	Scop.	WOS	Schol.
Materiály jsou vhodné pro výrobu kapes VH ložisek	42	15	51
Možnosti povrchových úprav kluzných ploch VH ložisek	45	16	55
Jaké jsou provozní podmínky při chodu a kritickém doběhu VHSL	23	2	32
Nejvhodnější parametry a uspořádání textury povrchu pro VH ložisek	20	5	59
Konstrukce experimentálních zařízení pro měření tření a opotřebení	38	15	61

Kvalitativní a kvantitativní analýza zdrojů

Pro vytvoření přehledového článku bylo vybráno 41 informačních zdrojů. Jedná se o 23 vědeckých článků, 4 odborné knihy pro kvalitativní rozbor a 13 vybraných firemních dokumentů pro kvantitativní analýzu. Na Obr. 2-2 je zachyceno zastoupení různých typů literatury a poskytované informace o článcích. Dále jsou zde zobrazeny metriky sloužící k hodnocení kvality článků (viz Obr. 2-3). V Tab. 2-2 je seznam firem, z jejichž portfolia bylo čerpáno.



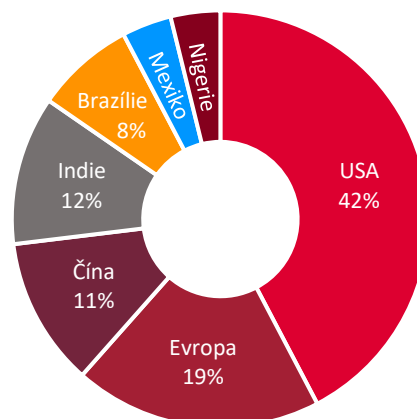
Obr. 2-2 a) Zastoupení typu literatury; b) Rozdělení článků podle data publikování; c) Lokace článků



Obr. 2-3 Rozdělení článků dle: a) množství citací; b) impact factoru; c) H – indexu

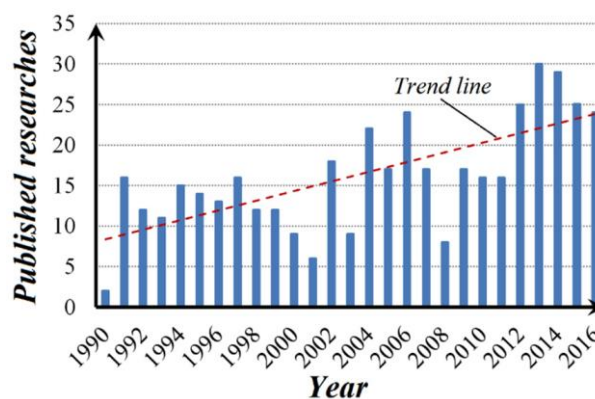
Tab. 2-2 Lokalizované firmy

Firma	Lokace
Zollern	EU, China, Indie
GTW	EU, USA, Asie, Nigerie
Outotec	EU, Indie, Brazílie
Waukbearing	USA, EU, Čína, Mexiko
Miba	USA, EU, Brazílie
Kingsbury	USA
Professional Instruments Co.	USA
Devitt Machinery Co.	USA
Wheeler industries	USA
Pioneer Motor Bearing	USA
Fusion Babbiting	USA
Lignum Vitae	USA
Diversified Bronze & Manufacturing	USA



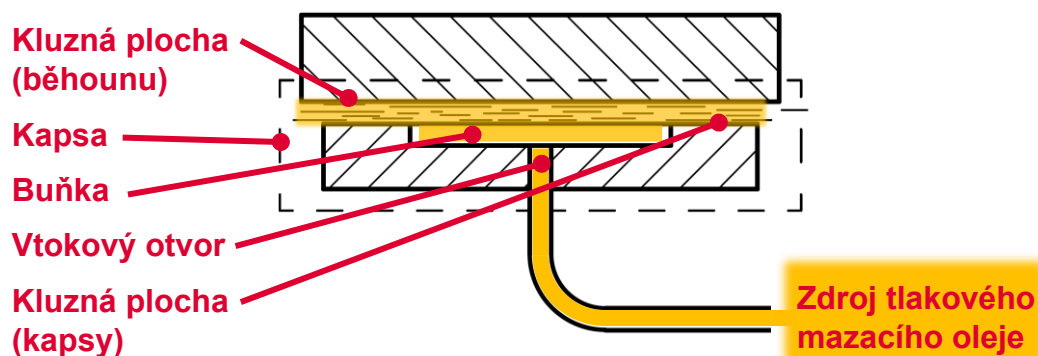
2.2 Kritická rešerše

Když v roce 1851 L. D. Girard poprvé představil hydrostatické ložisko, otevřel tím nové možnosti ve strojírenství [1]. Použití a význam HS ložisek rok od roku stoupá. Potvrzuje to i množství článků zabývajících se danou problematikou. Jejich počet se každý rok mění, ale jejich trend, jak je vidět z grafu (Obr. 2-4), stále roste.



Obr. 2-4 Výzkum publikovaný mezi roky 1990 až 2016 [2]

Hydrostatické mazání (Obr. 2-5) funguje na principu vhánění stlačené kapaliny mezi plochy kinematického páru (běhounu a kapsu). Mazivo je dodáváno pomocí externího tlakového systému do buněk, které zapříčiní oddělení povrchů a vytvoří stabilní mezeru mezi funkčními plochami až 100 μm [1]. Hlavní vlastností HS mazání je velmi nízké (kapalinné) tření a zanedbatelné opotřebení [3]. Využívá se u aplikací s velkým zatížením a nízkými rychlostmi, které mohou být i nulové [1].



Obr. 2-5 Schéma principu hydrostatického ložiska

HS ložiska můžeme z výrobního pohledu rozdělit na standardní a velkorozměrová. Velkorozměrová hydrostatická ložiska (dále jen VHSL) již nelze zhotovit z jednoho kusu materiálu, musejí se vyrábět ze segmentů a montovat (Obr. 2-6). Vysoká tuhost a únosnost VHSL i při nízkých otáčkách se uplatňuje například u rozměrných těžebních a mlecích strojů, velkých lodních hřídelí či těžkých obráběcích center. Důležitou výhodou je nízké tření a schopnost tlumení vibrací. Díky tomu jsou VHSL součástí pohyblivých nosných konstrukcí antén či teleskopů. Jednou z nejvýznamnějších aplikací jsou hydroelektrické turbíny, kde je HS ložisko kombinováno s hydrodynamickým ložiskem. VHSL snižují opotřebení hřídele při startu [4]. Jedním z vedlejších benefitů je i nízká hlučnost. Díky nízké emisivitě zvuku si našla VHSL uplatnění i u pohonu divadelních točen.

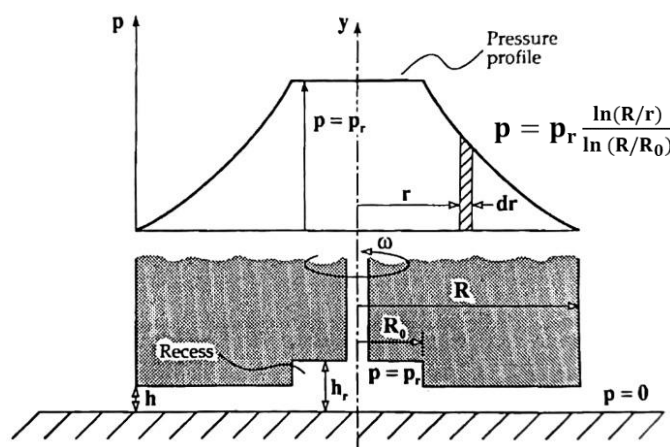


Obr. 2-6 Schéma principu hydrostatického ložiska [14]

2.2.1 Provozní podmínky VHSL

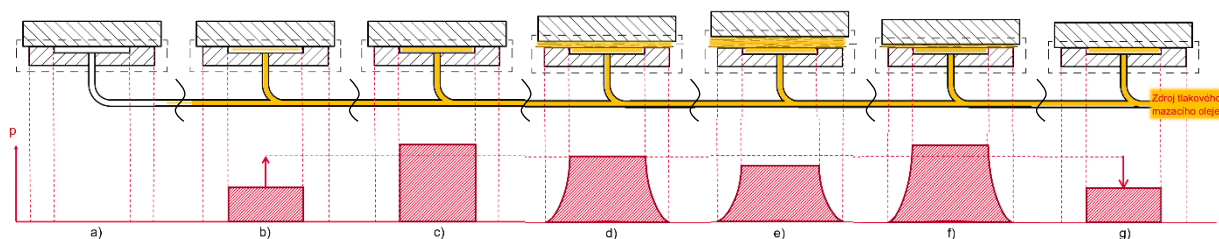
Standardní provozní podmínky

Provozní podmínky ložiska se odvíjí od konstrukce kapsy a tvaru buňky. Buňky mohou být kruhové, obdélníkové, eliptické či prstencové [2]. Vtokovým otvorem se kapalinou zaplňují buňky a roste tlak. Mazivo protéká mezi kontaktními povrchy zpět do zásobníku. Prostupem ztrácí svůj tlak, až je totožný s vnějším prostředím. Výsledný tlakový profil (Obr. 2-7) je rozdělen na dvě části. V oblasti buňky je tlak nejvyšší. Je rovnoměrně rozdělen na ploše. Mezi kluznými plochami se rozložení tlaku kvůli odtoku řídí rovnicí tlakového spádu, na Obr. 2-4 je vzorec odvozený pro kruhovou kapsu [1].



Obr. 2-7 Tlakový profil v hydrostatickém ložisku při chodu stroje [1]

Hydrostatické ložisko se při svém provozním cyklu může pohybovat v sedmi základních režimech [5]. Výchozím režimem je nečinný stav (Obr. 2-8a), kdy je ložisko v klidu a tlakový agregát vypnutý. Další fáze ložiska je spouštěcí (b), při níž dochází k nárůstu tlaku v buňce. Čerpadlo zaplňuje vtokovým otvorem buňky, zvyšuje se tlak a narůstá síla, která nakonec způsobí oddálení kontaktní plochy od kluzné plochy kapsy (c). Mazací olej následně vyplní mezeru a vytvoří stabilní mazací film, na kterém se může pohybovat běhoun (hřídel) i se zátěží (d). Během chodu může dojít k odlehčení ložiska (e), nebo naopak k jeho přetížení (f). Posledním stavem ložiska je jeho zastavení (g). Nejdříve dochází k mechanickému zastavení stroje, a když je soustava v klidu, odpojí se zdroj tlakového maziva. Přítomná tekutina oteče do zásobníků a párové kontaktní plochy dosednou na sebe.

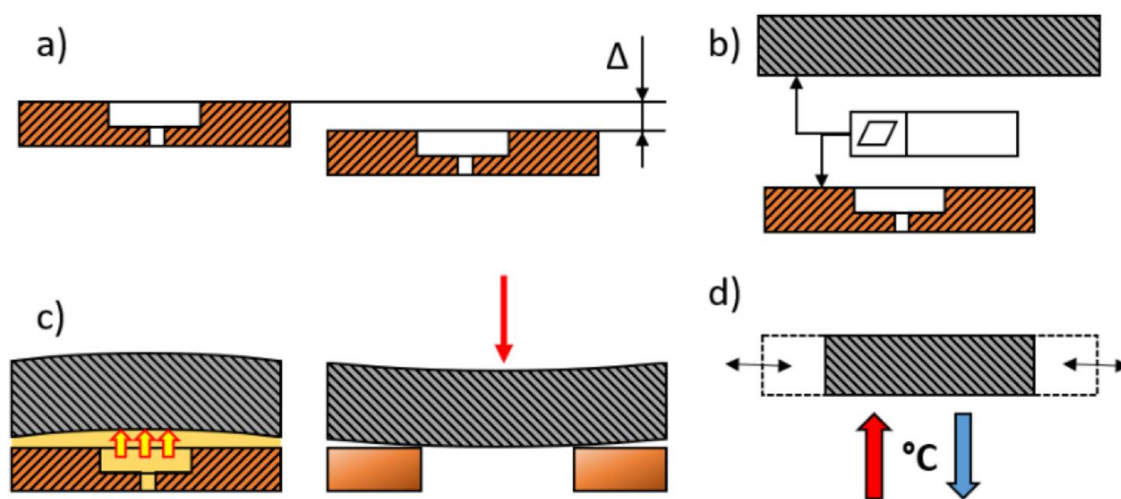


Obr. 2-8 Provozní stavy ložiska

Kritické provozní podmínky

Hydrostatické ložisko by mělo teoreticky vykazovat charakteristiky dokonalého stroje, jelikož jeho provoz by neměl vést k opotřebením kluzných ploch. Praxe ale ukazuje, že tomu tak není. Například v roce 2010 došlo v Goldstone (monitorovací stanice NASA) k nucené generální opravě jedné z antén, kterou si vyžádalo VHSL po kritické chybě. Zásah byl z finančního hlediska velice náročný a vyžádal si odstávku zařízení na půl roku. Důvodem ztráty funkce stroje bylo závažné poškození kluzných ploch u VHSL o průměru 24 metrů [6]. Je důležité si uvědomit, že problémy s kluznými plochami VHSL nejsou omezeny pouze na americký kontinent. Jedná se o globální problém, který se vyskytuje i ve střední Evropě.

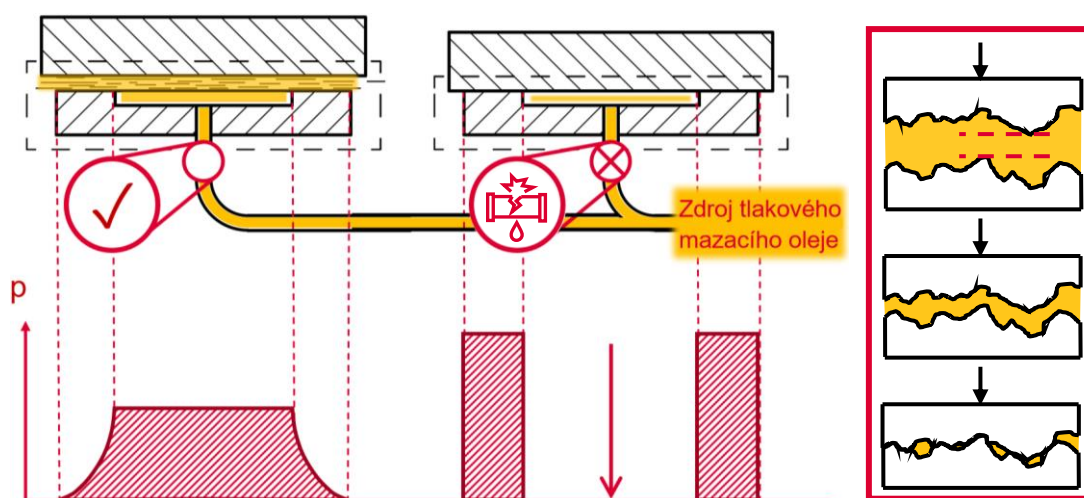
Ztráta funkce ložiska je zapříčiněna geometrickou nepřesností ložiska. Ta je způsobena primárně montážními chybami (Obr. 2-9a), kdy dochází ke špatnému pozicování kapes ložiska [7]. Bývá odstraněno při nivelaci. Další odchylky vznikají nepřesností výroby kluzných ploch (b). Hlavním faktorem je rovinnost a vlnitost u běhounu a kontaktní plochy kapsy. Při chodu ložiska navíc dochází k dalším dvěma jevům, které mění geometrii. Zatížený běhoun není u axiálního ložiska odlehčován konstantním tlakem po celé jeho délce. V místě buňky je tlak nejvyšší a v místě mezi buňkami dokonce není nadlehčený vůbec (c). Kvůli tomu se běhoun prohýbá podobně jako prostý podepřený nosník. Posledním rozhodujícím faktorem je teplota (d), na které je závislá tepelná deformace kluzných ploch. Hraje roli ve změně tuhosti stroje, a navíc snižuje viskozitu maziva. Vyjmenované faktory se sčítají s místním poškozením ploch a při přetížení ložiska způsobují kontakt kapsy hydrostatického ložiska s běhounem. Definovaný stav se charakterizuje zvýšeným nárůstem opotřebením kluzných ploch a dalším zvýšením odchylek od ideálního tvaru. Ve chvíli, kdy je celková geometrická chyba větší než výška mazací vrstvy, dochází ke ztrátě funkce ložiska.



Obr. 2-9 Geometrické nepřesnosti ložiska [7]

K prvnímu poškození ploch dochází při kritických stavech (Obr. 2-10). Nutnost použití přídatného hydraulického obvodu zvyšuje složitost hydrostatických ložisek. Údržba VHSL je komplikovaná a vykazuje poměrně vysokou poruchovost [8]. V případě poruchy tlakového agregátu dochází k rychlému poklesu tlaku, který způsobí selhání ložiska. Proti minimalizaci dopadů se u složitějších konstrukcí používá implementace hydraulického akumulátoru do obvodu [4]. Tento pasivní bezpečnostní prvek slouží jako náhradní zdroj tlaku při poruše hydraulického agregátu. Hydraulický akumulátor však není schopen udržet ložisko v chodu. Zpomalí rychlost přiblížení kontaktních ploch a zabrání tak prudkému nárazu. Kromě výpadku tlakového agregátu může dojít k méně předvídatelné poruše tlakového vedení. Hydraulický akumulátor při poškození přívodního potrubí HS kapes prudkému dosednutí nezabrání.

Při kritickém stavu výpadku tlakového oleje dojde v cirkulačním hydraulickém obvodu k odvodu mazacího média do zásobníku. Párové dvojice se k sobě začnou přibližovat. V poměrně krátkém čase se mění fyzikální podstata fungování ložiska. Kapalinné tření mezi plochami se mění na smíšené, a v extrémních případech dokonce i na mezní tření. S těmito změnami se přetváří i tlakový profil. Pokud uvažujeme situaci, že selže hydraulický agregát a pohybový mechanismus bude stále otáčet ložiskem, vznikne dokonce i nový stav zatěžování. V oblasti buňky tlak zaniká. Hmotnost břemene se rovnoměrně rozloží na kluzné plochy ložiska. Vzniká konformní kontakt. Kvůli výrobním odchylkám zde vznikají místa s vyšším lokálním tlakem a v krajních případech se zmenšuje i dosedací plocha [4].

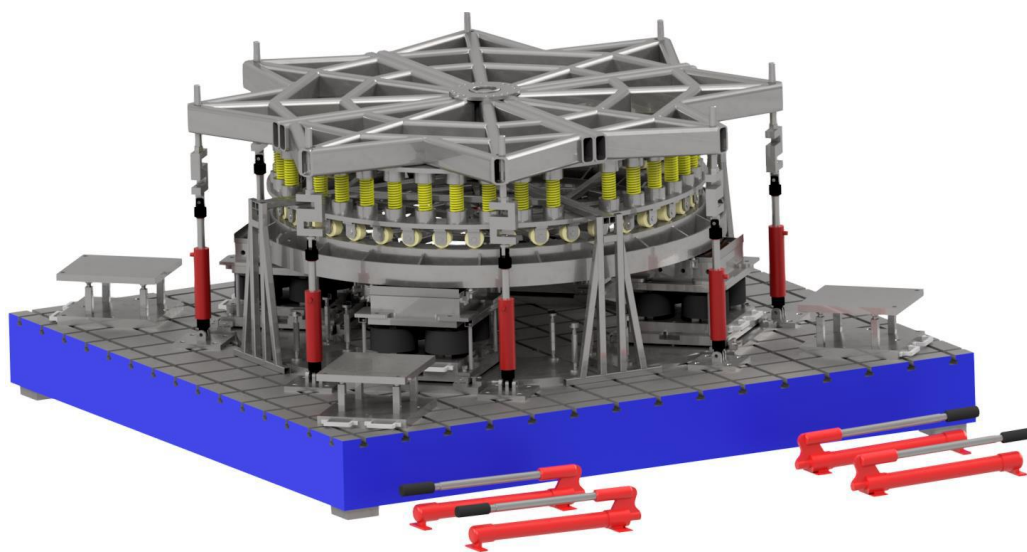


Obr. 2-10 Kritický stav ložiska a rozložení tlaku

Při výpadku tlakového agregátu může dojít ke kritickému stavu, pro který je charakteristické dosednutí ploch a nedostatečné mazání při běhu a doběhu. Pohyblivá hmota umístěná na VHSL se vyznačuje velkou hmotností a hybností. Při kritickém stavu ložiska se veškerá kinetická energie při dosednutí maří v kontaktu kluzných ploch. Část energie je proměněna v teplo, což zvyšuje teplotu maziva a snižuje jeho viskozitu a dochází k jeho degradaci. Zbylá energie se projeví mechanickým poškozením kluzných povrchů. Teplota má vliv i na vlastnosti použitých materiálů. U kovových materiálů snižuje mechanické vlastnosti materiálů a zvyšuje náchylnost k opotřebení. U polymerů, jako je například polymer UHMPE, který se v podobných aplikacích používá, může docházet k roztavení a nevratné ztrátě geometrické přesnosti ložiska už nad teplotou 80 °C [31].

Specifické hodnoty provozních parametrů

Na základě absence konkrétních parametrů v existujících vědeckých člancích bylo využito návrhové dokumentace konkrétního návrhu HS ložiska u divadelní točny (Obr. 2-11), kterou navrhl podle literatury Jan Foltyn [9]. Při ustáleném chodu ložiska je tlak v buňce 25,5 barů (2,6 MPa) a rychlost může dosahovat až $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po délce prahu můžeme pozorovat logaritmický pokles až na tlak atmosférický. Jedná se o klasické kapalinné mazání za hydrostatických podmínek. V případě kritického stavu dosedá celá hmotnost zařízení na kluznou plochu a tlak v buňce zaniká. Nominální tlak kontaktu je 2,3 Mpa. Jako mazivo je použitý hydraulický olej HPL 46.

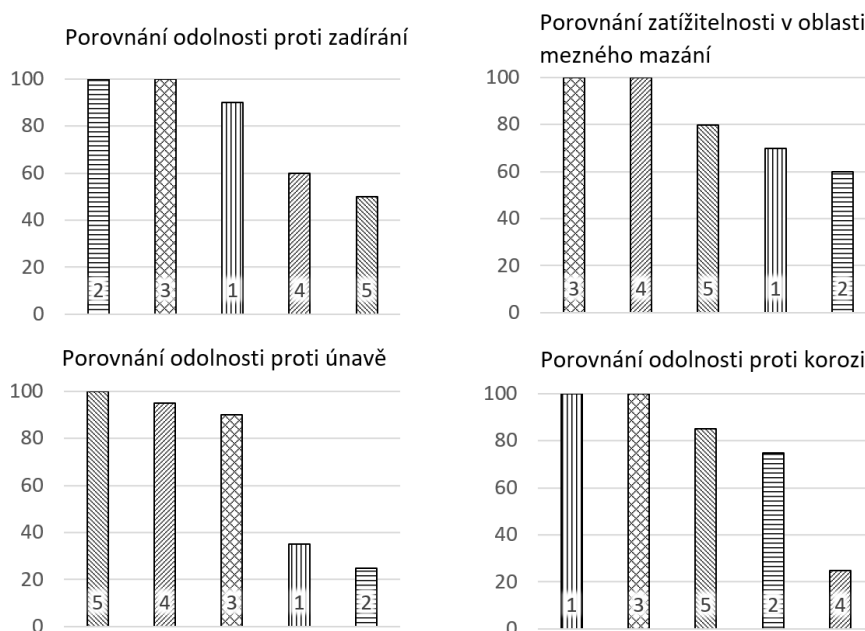


Obr. 2-11 Obrázek ložiska v testovacím zařízení [9]

2.2.2 Materiály funkčních povrchů kluzných ložisek

Kvůli principu funkce HS ložisek není materiál důležitý pro chod strojní součásti. Mazací film zcela odděluje kluzné plochy. Plochy interagují pouze při dosednutí nebo při provozních chybách. Obvykle se pro kluzné povrchy využívají vhodné kombinace materiálů, které spolu při dosednutí nereagují a jsou schopné přenášet zatížení celého stroje. V případě provozních chyb a zejména kritických stavů výpadku tlakového oleje se jako jediné preventivní opatření proti opotřebení funkčních ploch osvědčuje použití vhodného materiálu pro kluzné povrchy. Výběr vhodného materiálu může zamezit nutnosti nákladné výměny nadměrných strojních součástí [4].

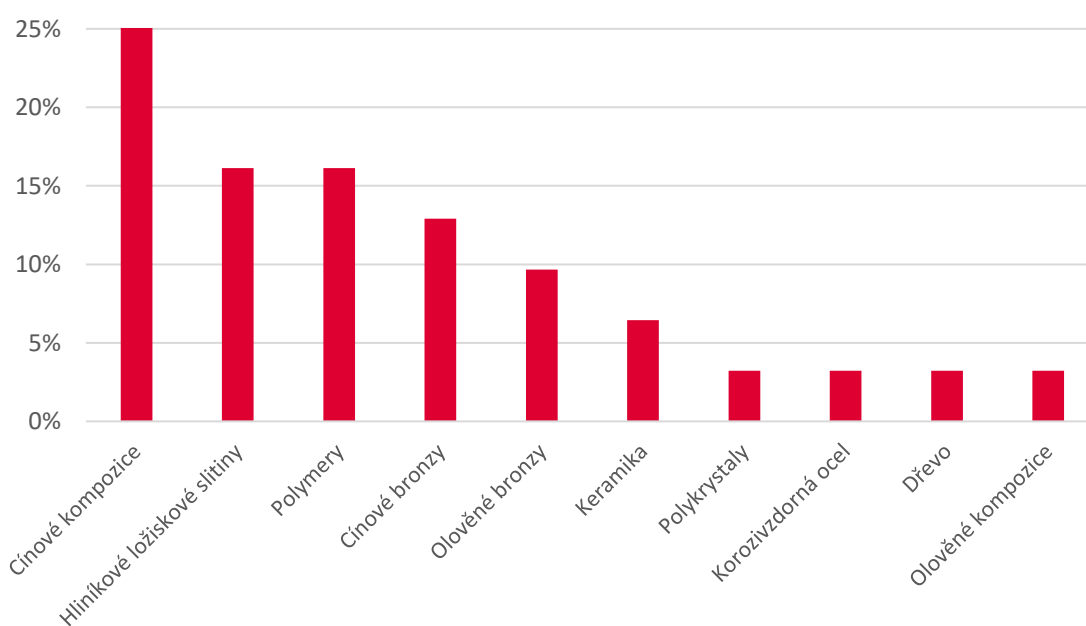
Výběr materiálu pro mechanické součásti musí brát v úvahu několik konstrukčních požadavků a parametry, jako jsou náklady, odolnost proti korozi, mechanické vlastnosti a také tribologické vlastnosti povrchu. Kovy jsou nejčastější volbou materiálů pro konstrukci mechanických součástí, protože jejich složení a mikrostruktura jsou do značné míry standardizované a jejich celkové vlastnosti jsou obvykle dobře odhadnuty [10]. Na druhou stranu nekovové materiály nejsou tak dobře standardizované a jejich vlastnosti mají tendenci se více lišit [10]. Při volbě ložiskového materiálu musíme uvažovat dostupnost kovů, abychom pokud možno omezili spotřebu kovů nedostatkových. Základní prvky ložiskových slitin jsou cín, olovo, měď, hliník a antimon [11]. Stanovit kluzné vlastnosti v absolutních hodnotách je velmi obtížné, a proto se v praxi uplatňuje metoda relativního porovnávání jednotlivých materiálů (Obr. 2-12).



Obr. 2-12 Porovnání základních ložiskových slitin (1 - cínové kompozice; 2 - olovené kompozice; 3 - hliníkové ložiskové slitiny; 4 - olovené bronzy; 5 - cínové bronzy) [11]

Mezi nekovové materiály patří například keramika a polymery. Keramické materiály vykazují velmi nízké koeficienty opotřebení. Nezanedbatelnou překážkou je obtížná výroba složitých tvarů a náchylnost k praskání povrchu [12]. Polymery se běžně používají jako ložiskové materiály, převážně u mezného a suchého tření. Nejběžnější polymery používané v tribologických aplikacích jsou nylon, polyamidy, acetal, vysokomolekulární polyetylen (UHMWPE), polyetheretherketon (PEEK) a polytetrafluorethylen (PTFE) [13].

Povrchové úpravy HS ložisek jsou historicky známé. Jejich novodobý pokrok však není veřejně přístupný. Jedná se o dílčí know-how firem, které je vyrábějí. Z produktových katalogů a firemní literatury lze v porovnání se starší odbornou literaturou pozorovat, že určité materiály se osvědčily a prodělaly pokrok v oblasti technologických vlastností a výrobních metod. Některé suroviny byly vytlačeny a je snaha se jich vyvarovat. Z provozních a ekonomických důvodů se objevují i materiály nové (Obr. 2-13).



Obr. 2-13 Zastoupení materiálu na trhu u specializovaných firem na HS a HD ložiska [14-26]

Nejčastěji zastoupeným materiálem na trhu je cínová kompozice nazývaná stanit (babbitt). Jedná se o slitinu cínu, mědi a antimonu, která se nanáší na povrch kapes. Jako výchozí materiál se používá konstrukční ocel. Při požadavku vyšších rychlostí a zatížení se ocel nahrazuje slitinou mědi a chromu kvůli rychlejšímu odvodu tepla z místa kontaktu do okolí. Povrchová vrstva je měkká a poddajná. Tyto vlastnosti napomáhají ke komfortnímu chování povrchů a kompenzují drobné geometrické vady. Materiál je chemicky odolný proti olejovým mazivům a dokáže pracovat i při nedostatečném mazání.

Druhým hlavním typem materiálů jsou bronzы. Z pohledu prodeje se rozdělují do dvou kategorií podle obsahu olova. V minulém století se používaly jako ložiskové slitiny olověné bronzы a kompozice. Olověné kompozice se kvůli značnému dopadu na životní prostředí a zdraví člověka omezují. Olověné bronzы se stále používají, ale zastoupení dané látky v nich klesá. Byly vytlačeny cínovými bronzы. Tyto slitiny se buď nanášejí jako povlak, nebo jsou rovnou i základním materiálem. Jejich hlavní výhodou je pevnost a schopnost pracovat za vyšších teplot. Vyšší tvrdost však způsobuje že je ložisko citlivější na nesouosost a výrobní odchylky.

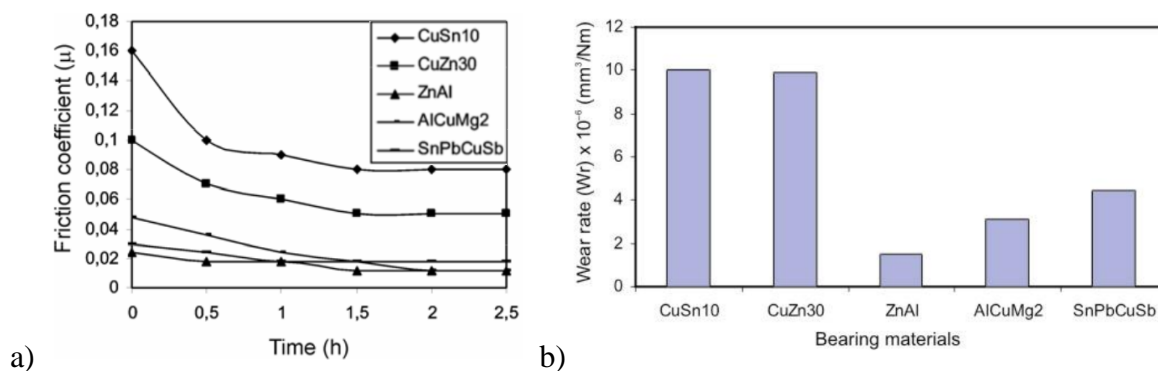
Další možností jsou hliníkové kompozice. Materiálové složení se liší u každého dodavatele. Základní složkou používaných slitin povlaku je aluminium s přídavkem cínu. Kvůli potřebné změně provozních vlastností se přidávají prvky jako nikl, zinek, železo či měď. Do kontaktní vrstvy je možné vložit teplotní senzory pro kontrolu stavu ložiska.

Posledními významnými materiály jsou polymery. Jejich vlastnosti jsou podle složení značně odlišné a doposud málo standardizované. Mezi používané polymery patří například UHMWPE, PTFE či jiné materiály s různým chemickým složením a ochrannou známkou. Jejich vlastnosti jim už dovolují konkurovat i kovům. Největší výhodou je schopnost funkce i bez dostatečného mazání či při přetížení. Ložiska se v kontaktu přehřívají, protože se materiál chová jako tepelný izolant. Řešením je nanášení tenkých vrstev plastu na základní vodivý materiál.

Pro specifické případy lze použít i speciální řešení. V aplikacích, kde jsou extrémně vysoké nároky na zatížení, lze použít keramiku a cermety. Materiály zvládají až třikrát vyšší teploty oproti cínové kompozici. Pro dlouhou životnost a vysoké výkony je možné dokonce využít i polykrystalické materiály. Tyto materiály jsou však určeny pro HD ložiska menších rozměrů. Pokud je u ložisek vyžadováno, aby byla ekologicky udržitelná, používají se korozi-vzdorné oceli. U zvláště senzitivních aplikací, kde nesmí docházet k žádnému znečištění, jako jsou vodní elektrárny s nejvyšším ochranným stupněm, se dokonce používá Karibské dřevo [25].

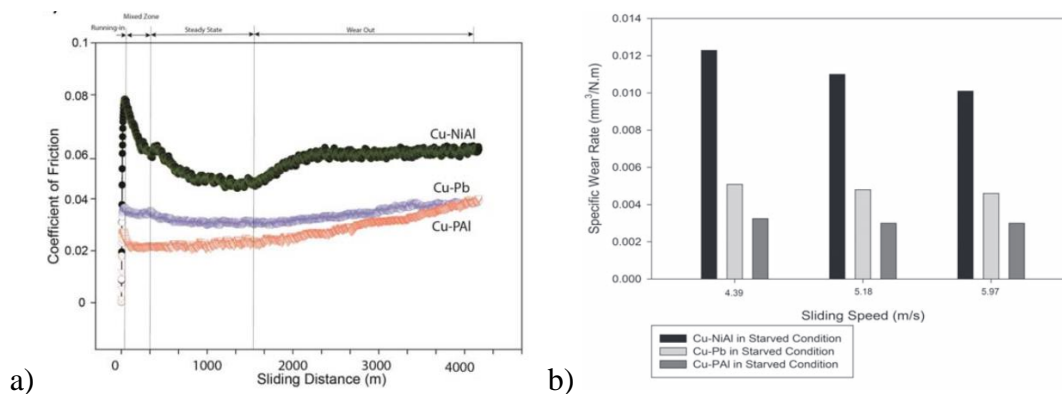
V kontextu vědeckého zkoumání je možné porovnávat různé materiály pomocí stanoveného standardu, který většina vědeckých publikací používá jako referenční bod. Referenční normou je ve většině případů cínová kompozice, která slouží k porovnání výsledků experimentů a testů pro různé účely a aplikace. Chemické složení slitiny se však mění dle lokální dostupnosti kovů.

J. Frost a W. Litwin testovali kluzná ložiska s novými ekologicky přijatelnými mazivy. Jedním z vedlejších zjištění bylo, že slinutý bronz má řádově větší opotřebení než cínová kompozice [27]. K podobným výsledkům dochází i B. S. Ünlü, který navíc testoval i hliníkové slitiny (Obr. 2-14) [28]. U slitin bronzu (CuSn10 a CuZn30) je nejvyšší opotřebení materiálu, zároveň došlo k největšímu snížení drsnosti povrchu. U ostatních materiálů došlo ke zvýšení drsnosti povrchu, nejmenšího opotřebení dosáhly hliníkové slitiny a poté až cínová kompozice. V rámci výzkumu nejlepších výsledků dosáhla slitina zinku a hliníku (ZnAl).



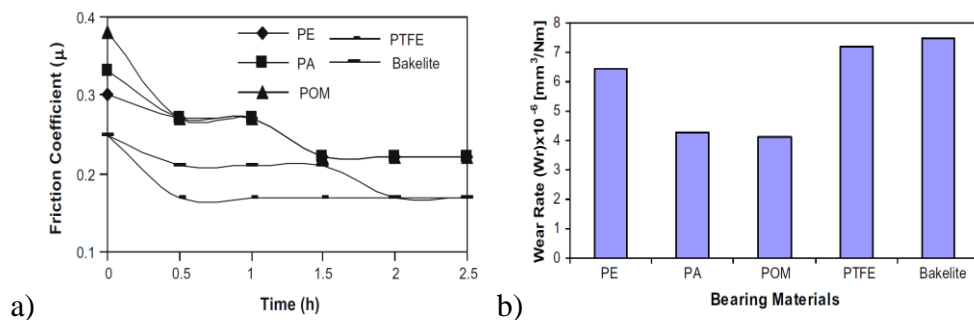
Obr. 2-14 Porovnání ložiskových slitin a) Tření; b) Opotřebení [28]

R. Ch. Singh a kol. se zabývali návrhem bezolovnatých slitin pro ložiskové aplikace, jejich práce obsahuje shrnutí používaných slitin v Indii a navrhuje nové chemické složení a testují vliv různých chemických prvků na tribologické vlastnosti [29]. Byla identifikována korelace mezi přidáním hliníku do slitiny a zvýšením její tvrdosti a současným snížením míry opotřebení. Přídavek niklu výrazně snižuje opotřebení, ale pouze v kombinaci s mazivem, při nedostatečném mazání a suchých podmínkách naopak míru opotřebení zvyšuje (Obr. 2-15).



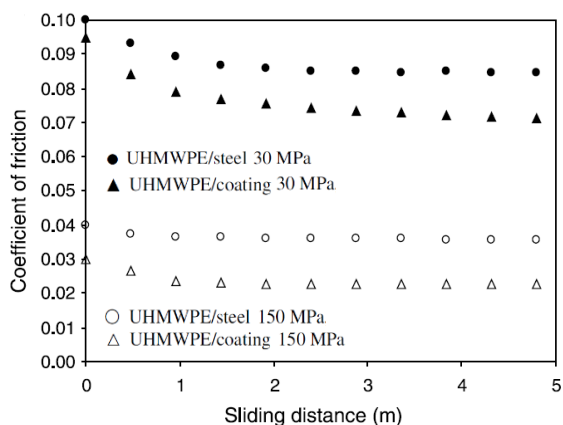
Obr. 2-15 Porovnání bezolovnatých ložiskových slitin a) Tření; b) Opotřebení [29]

B. S. Ünlü a jeho tým se rovněž zaměřovali na ložiska na bázi polymerů (Obr. 2-16). Nejmenšího opotřebení dosáhly materiály PA a POM [30]. U těchto materiálů byly pozorovány nižší známky abraze než u PE a PTFE. Z pohledu koeficientu tření nejlépe dopadl bakelit a teflon.



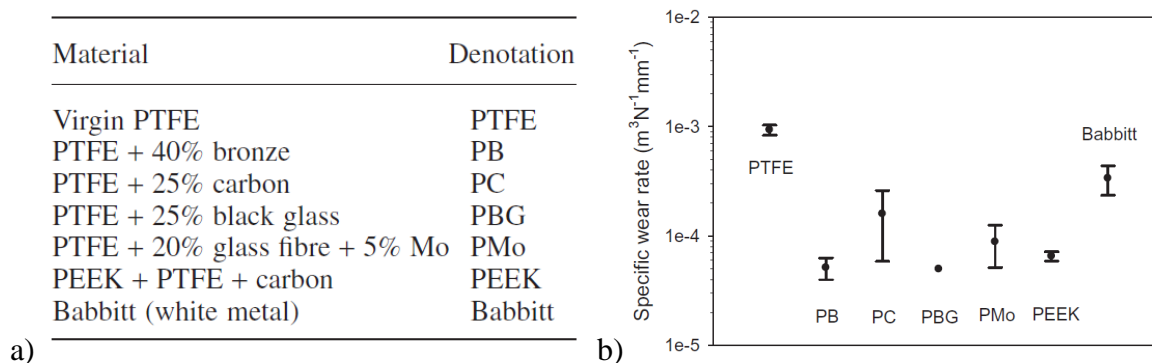
Obr. 2-16 Porovnání polymerů a) Tření; b) Opotřebení [30]

Studie P. Sanyama a kol. se zabývala využitím UHMWPE (polyetylen s vysokou molekulovou hmotností) u velkorozměrových (průměr 10 m) pohyblivých kloubů [31]. Polyetylen byl testován společně s čistou ocelí a s různými povrchovými úpravami zinku. Ukazuje se, že původně protikorozní úprava napomáhá třecím vlastnostem ložiska. Snižuje v dané konfiguraci koeficient tření z 0,09 na 0,08 (Obr. 2-17). Do povrchu polymeru jsou vytvořeny makroskopické prohlubně kruhového tvaru o průměru čtyř milimetrů. Ty slouží pro zachytávání abrazivních částic a účinnější chlazení kontaktu.



Obr. 2-17 Vývoj záběhového tření polymeru UHMWPE s kluznou vzdáleností [31]

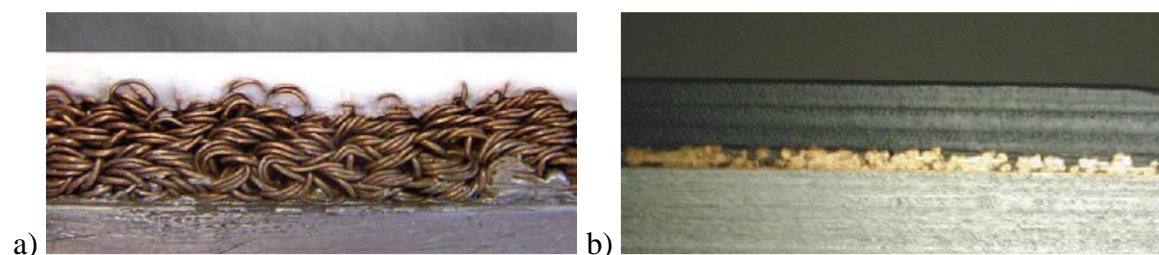
Výzkum polymerů je i v oblasti HD ložisek. M. Rutkevičius a kol. se zabývali nanášením teflonového kompozitu u kterého bylo tření materiálu dva až třikrát nižší než u cínové kompozice [32]. Při srovnání opotřebení povrchu obou materiálů je zřejmé, že cínový kompozit vykazuje stabilnější opotřebení než polymer. Na teflonovém materiálu je patrná porozita materiálu, což naznačuje, že při extrémních podmínkách může dojít k degradaci struktury. Testováním kompozitních plastů se zabývali i D. M. C. McCarthy a S. B. Glavatskih. Testovali polymery plněné bronzovou slitinou, uhlíkem či skleněnými vlákny vůči cínové kompozici [33]. Závěr studie ukazuje, že nejvýraznější míra opotřebení je patrná u čistého teflonu. Přidáním vhodného plniva do teflonu lze dosáhnout výrazně nižšího opotřebení než u cínové kompozice (Obr. 2-18).



Obr. 2-18 Porovnání kompozitních materiálů a) Chemické složení; b) Opotřeбенí [33]

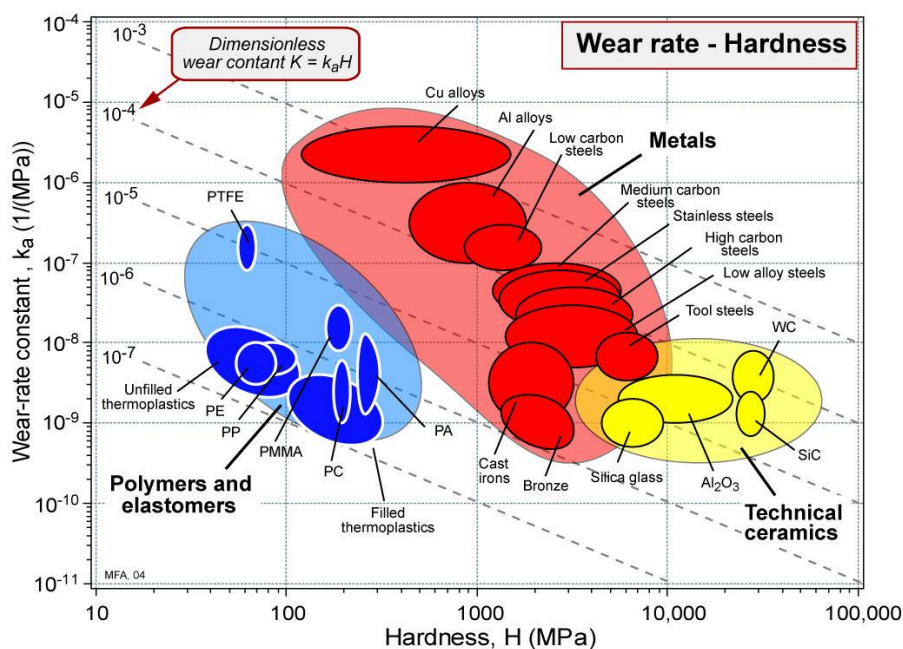
K. Katsaros a kol. numericky porovnávali termo-hydrodynamické vlastnosti povrchových úprav axiálních ložisek [34]. Z jejich výsledků vyplývá, že čím je vyšší tepelná vodivost krycí vrstvy, tím nižší je viskozita maziva, což vede k vyšší nosnosti a také vyššímu tření a naopak. Jejich výzkum ukazuje, že cínové kompozice se chovají podobně jako základní materiál (ocel). Kluzná plocha z polymeru PTFE má o 5 % nižší nosný tlak, o 15 % vyšší teplotu, ale o 2 % nižší třecí sílu. Povlak DLC (polykrystalický diamant) má o 2,5 % nižší nosný tlak, o 7 % vyšší teplotu, ale o 1 % nižší třecí sílu. S. Jahanmir a kol. se zabývali testováním H-DLC povlaků. Prokázali, že standardní i modifikované DLC povlaky jsou stabilní i při start/stop podmínkách a chrání zařízení před selháním [35].

Kvůli zvýšení teplotní vodivosti se nanáší nízká vrstva polymerů na vodivou matici. S cílem minimalizovat riziko delaminace polymerů z podkladového materiálu se využívá technika multivrstvého nanášení. Mezi polymer a základní ocelovou matici se dříve vkládalo bronzové drátové pletivo. Pletivo se pájelo na základní materiál, na jeho povrch se přitlačovala pod vysokou teplotou a tlakem vrstva polymeru. Teflon se dostal do volného prostoru mezi dráty a došlo k pevnému spojení. Další technologií používanou pro nanášení povrchů velkých axiálních ložisek je spojení polymeru s ocelí pomocí pórovitého bronzového materiálu sintrovaného na těle podložky jako mezivrstvy. Průřezy obou typů spoje jsou zobrazeny na Obr. 2-19.



Obr. 2-19 Porovnání kompozitních materiálů a) Chemické složení; b) Opotřeбенí [36]

Pro zlepšení kvality rozhodovacího procesu při návrhu strojních součástí se používají databáze informací o materiálech a jejich vlastnostech. Jejich použití může pomoci při výběru správného materiálu pro konkrétní aplikaci, optimalizaci výrobních procesů, snižování nákladů na vývoji nových produktů a zvyšování jejich výkonnosti. Například databáze GRANTA umožňuje uživatelům vyhledávat, porovnávat a analyzovat materiály a jejich vlastnosti i z pohledu opotřebení (Obr. 2-20). Databáze má své omezení a hodnoty opotřebení neodpovídají konkrétní aplikaci VHSL. Přesto však mohou sloužit jako cenný výchozí bod pro výběr vhodného materiálu s ohledem na opotřebení.



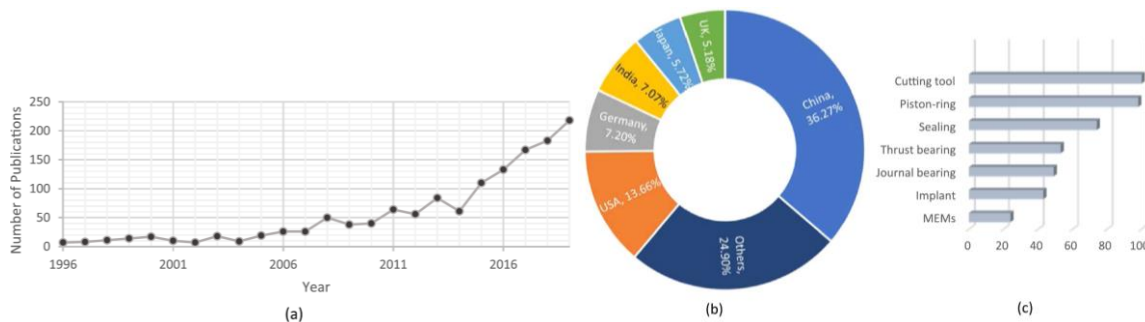
Obr. 2-20 Porovnání opotřebení a tvrdosti materiálů [37]

2.2.3 Topografie kluzných povrchů kluzných ložisek

Topografie kluzných povrchů ložisek je důležitým faktorem ovlivňujícím jejich funkci a výkon. Kluzné povrchy těchto ložisek jsou navrženy s ohledem na minimalizaci tření, opotřebení a zajištění optimálního mazání. Ideální topografie kluzných povrchů velkorozměrových hydrostatických ložisek zahrnuje hladké a rovnoměrné povrchy s minimální zrnitostí a nerovnostmi. Povrchy mohou být dosaženy různými technikami. U VHSL se používá především rovinné broušení, které dosahuje požadované vlnitosti drsnosti povrchu Ra 0,4 až 1,6. U některých materiálů, jako jsou plasty, může být drsnost vyšší, odvíjí se od metody výroby. Drsnost povrchu ovlivňuje adhezi, tribologické vlastnosti a schopnost udržet mazivo v kontaktu. Správná topografie kluzných povrchů velkorozměrových hydrostatických ložisek je klíčová pro dosažení optimálního chování ložiska, minimalizaci opotřebení a prodloužení jeho životnosti.

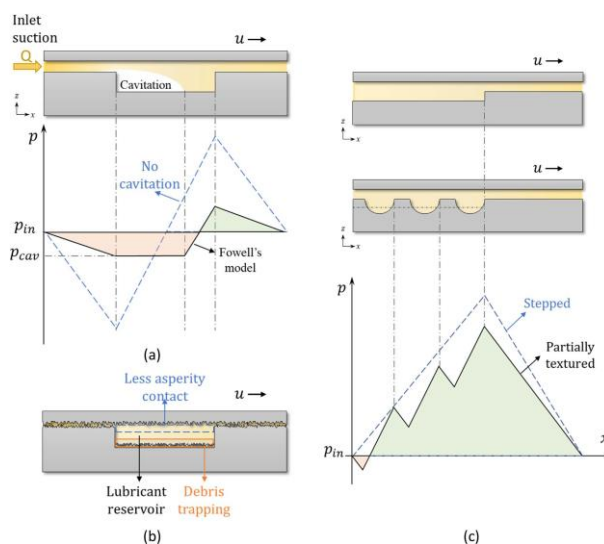
Cílené texturování povrchu

Mezi topografií povrchu se řadí texturování, o které byl v posledních dvaceti letech kvůli přínosným tribologickým vlastnostem veliký zájem. Počet článků se blíží 1500 [38]. Ve strojním inženýrství se textury zkoumají především u řezných nástrojů, pístů, těsnění, ložisek a implantátů. Ložiska zabírají jednu pětinu výzkumu (Obr. 2-21) [38]. Texturovaná ložiska se projevují až 18% snížením tření a výkonových ztrát oproti standardním netexturovaným.



Obr. 2-21 (a) Počet prací publikovaných o tribologickém povrchovém texturování od roku 1996
(b) Rozložení různých zemí/regionů (c) Hlavní oblasti využití těchto publikací [38]

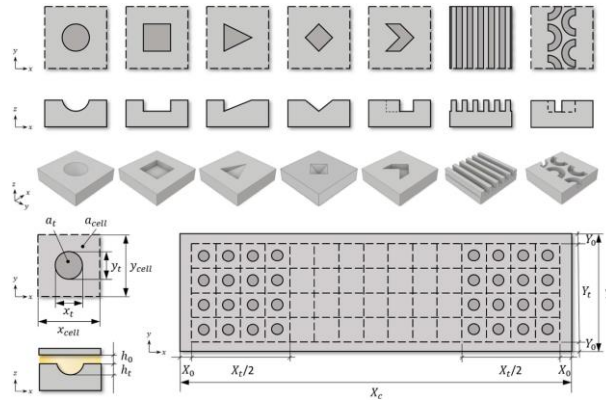
P. Lu v review potvrzuje, že textury dodávají kluzným povrchům přínosné vlastnosti [38]. Napříč všemi mazacími režimy zachytávají částice opotřebení. Fungují jako mikro hydrodynamická ložiska. Posilují dynamický tlak kapaliny, čímž se zvyšuje celková nosnost ložiska. Při hydrodynamickém mazání dochází u textur ke kavitaci, která dodává mazivo do místa kontaktu. Za smíšených až mezních podmínek mazání fungují textury jako zásobníky maziva a dodávají mazivo do místa kontaktu. Chování a synergický efekt lze pozorovat podrobněji na Obr. 2-22.



Obr. 2-22 (a) Typické rozložení tlaku pro jednu texturu s kavitací (b) Textura funguje za podmínek hladovějícího mazání (c) Typické rozložení tlaku přes stupňovitý a částečně texturovaný jezdec.

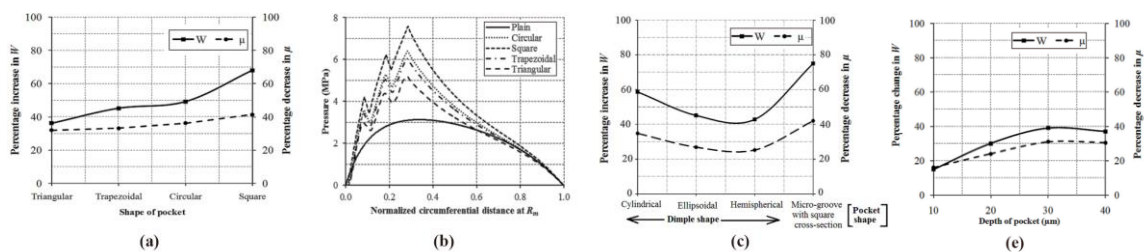
[38]

Při texturování se nejčastěji používají důlky. Každá textura je charakterizována svým trojrozměrným tvarem (základní tvar a typ dna, viz Obr. 2-23), rozměry (základní velikost a hloubka) a v případě asymetrických textur i jejich orientací [38]. Důležitou hodnotou je také procentuální plocha textury. Všechny tyto parametry je nutné pro danou aplikaci vhodně zvolit. Správná textura se odvíjí od provozních parametrů. Špatná volba parametrů textury může způsobit i její negativní účinek.



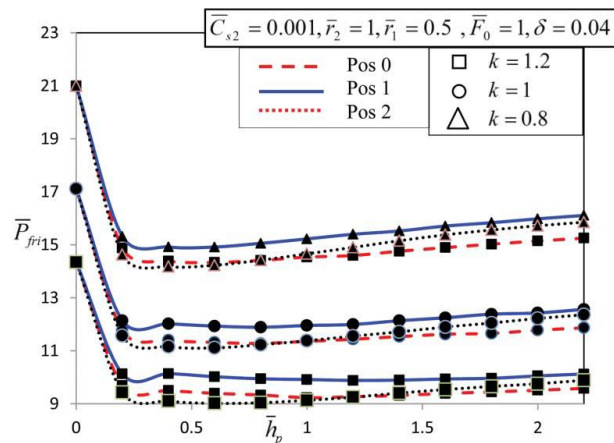
Obr. 2-23 Definice geometrií a parametrů důlků. [38]

Numerická simulace S. Aggarwla a P. K. Padleye (Obr. 2-24) porovnávala různé parametry textury HD ložiska při $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [39]. Nejvýkonnější vychází čtvercový průřez, druhý kruhový a až poslední trojúhelníkový. Nejvhodnější tvar kapsy je čtvercový a cylindrický, následně elipsoidní. Vhodná hloubka důlku pro tuto rychlost je $30 \mu\text{m}$. Numerická analýza L. Wang a kol. HD ložisek potvrdila, že texturování povrchu při různých hodnotách vždy snižuje teplotu maziva [40]. Texturování povrchu umožňuje provozovat ložiska při vyšších rychlostech nebo vyšším zatížení.



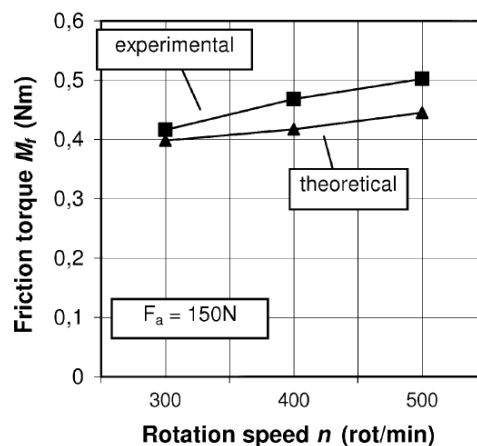
Obr. 2-24 (a) Změna zatížení a koeficientu tření s mikrokapsami různých tvarů průřezu; (b) profily tlaku ve střední rovině toku maziva v obvodovém směru s mikrokapsami různých tvarů průřezu; (c) porovnání výkonostních parametrů s různými texturami; (e) změny výkonostních parametrů s hloubkou kapsy; [39]

V numerické studii S. K. Yadava & Satish C. Sharma se zabývali výkoností HS ložiska v automobilovém průmyslu, potvrdili že lze použít textury i u HS ložiska [41]. Textura způsobuje zvýšení tloušťky mazacího filmu, a tím i snížení výkonových ztrát třením (Obr. 2-25).



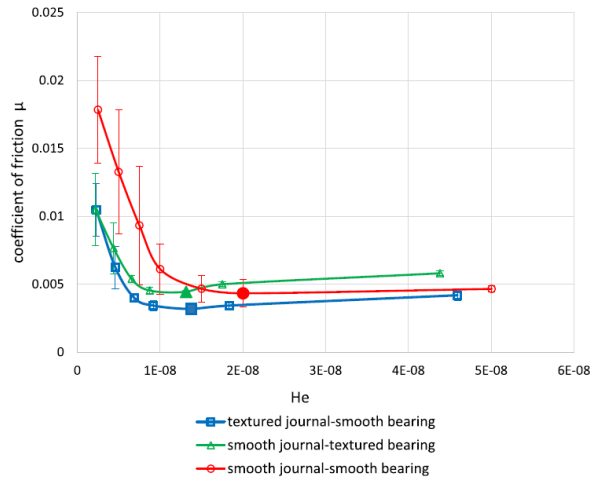
Obr. 2-25 Změna výkonových ztrát třením (P) s hloubkou textury [41].

V. G. Marian a kol. se zabývali teoretickou a experimentální analýzou texturovaného HD axiálního ložiska [42]. Pro ložisko o středním průměru 75 mm byla vybrána optimální hloubka textury 40 μm . Z experimentů vyrobených ložisek vyplývá, že částečně texturované ložisko má vyšší koeficient tření než naklápěcí. Částečně texturované ložisko lépe funguje v podmínkách častého spouštění a zastavování. Rozdíl mezi teoretickým výpočtem a experimentem při 300-500 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ (1,2 až 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) je na Obr. 2-26.



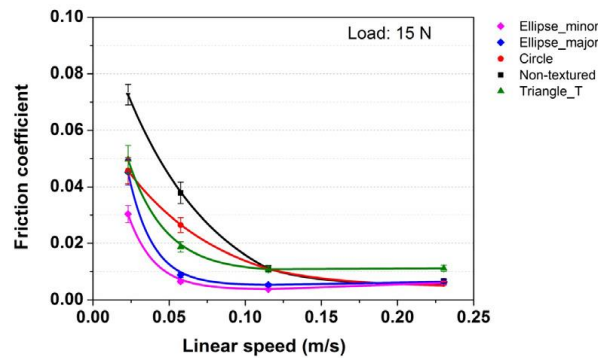
Obr. 2-26 Změna třecího momentu v závislosti na rychlosti otáčení. [42]

V leteckém institutu v Polsku se zabývali texturováním kluzných ložisek [43]. Ložisko o průměru 80 mm bylo roztáčeno a zastavováno z 0 na 150 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ (0,63 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Do povrchů byly vytvořeny důlky o velikosti 0,7-0,9 mm, hloubkou 50 μm a hustotou kolem 6 %. Textura kluzných ploch má významný vliv na součinitel tření během přerušování chodu ložiska. U hladkých povrchů došlo k selhání nosného filmu při 20-30 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Texturované povrchy se dostaly do kontaktu pouze na krátkou chvíli při rychlostech nižších než 20 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ pro texturovaný čep a nižších než 10 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ pro texturované pouzdro. Texturovaná ložiska měla nižší tření v pomalých rychlostech (Obr. 2-27). Při rychlostech vyšších než 500 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ vykazovalo texturované ložisko o 74 % vyšší ztráty než hladké.



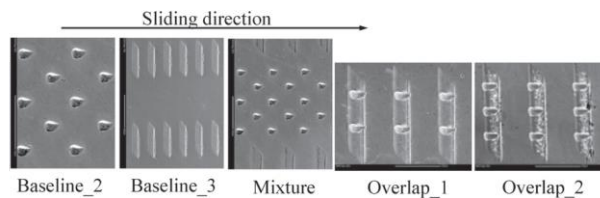
Obr. 2-27 Porovnání Stribeckových křivek radiálních ložisek s různým povrchem. [43]

S. M. Hsu a kol. se zabývali principem a designem textur [44]. Při svých experimentech porovnávali různé tvary textur napříč různými hodnotami rychlosti (Obr. 2-28) a režimy mazání. Zjistili, že chování texturovaného povrchu napříč režimy mazání ovlivňuje jejich tvar.



Obr. 2-28 Koeficienty tření jako funkce rychlosti při zatížení 15 N [44]

S. M. Hsu a kol. navrhli textury, které mohou fungovat v různých režimech mazání (Obr. 2-29) [45]. Jedná se o dvě rozdílné textury nanesené na jeden povrch, z nichž je každá optimalizována pro jiné provozní parametry. Výsledné smíšené textury (Overlap 1 a Overlap 2) jsou schopny snižovat tření napříč různými režimy mazání.



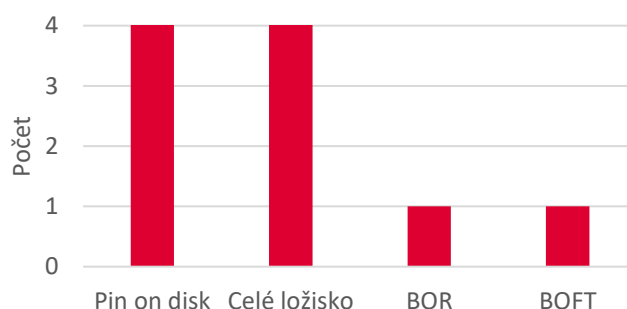
Obr. 2-29 Návrhy povrchových textur, základní vzory a jejich kombinace [45]

2.2.4 Metody pro výzkum kluzných povrchů

Metody výzkumu lze podle přístupu rozdělit do tří kategorií, které odrážejí jejich přístup a použití, ke kterému jsou směřovány. Jedná se o metody používané ve vědeckých článcích, obsahují pokročilé metody měření a vyhodnocování. Další přístup založený na normách je používán především dodavateli materiálů kluzných povrchů. Jejich cílem je zajištění konzistence a srovnatelnosti naměřených dat. Jako poslední jsou firemní testy, které odrážejí interní testovací postupy a standardy pro testování komponent v reálných podmínkách.

Vědecké metody

U experimentů použitých v rešerši je 42 % zastoupení konfigurace testu pin-on-disk, kdy je na rotační destičku testovaného materiálu přitlačován shora čep. Tyto testy sloužily především pro testování HD ložisek. Se stejným procentním zastoupením byly testy provedeny na sestaveném ložisku. Jednalo se především o kluzná ložiska. V jednom případě proběhl výzkum i na block-on-ring (BOR) podle normy pro testování plastů. V jednom případě proběhl výzkum na ball-on-three-flats (BOTF) testovacím zařízením kvůli požadovanému vysokému tlaku.



Obr. 2-30 Rozdělení experimentálních zařízení z článků rešerše

Normy

Jsou soubory předpisů a směrnic, které slouží k unifikaci postupů a metod například i v tribologických testech. Definují parametry zatížení pro testování, podmínky experimentu a metody vyhodnocení. Tyto normy jsou vypracovány různými standardizačními organizacemi, jako je například ASTM International (dříve známá jako American Society for Testing and Materials) nebo ISO (Mezinárodní organizace pro normalizaci). Například pro vyhodnocení metodou pin-on-disk se používají normy ASTM G99 a ISO 7148.

Bohužel standardizace v oboru tribologie je značně omezena, povedlo se ji prosadit hlavně v medicínském oboru, například při testování materiálů kyčelních kloubních náhrad. V ostatních oblastech se dosud nepodařilo její plné zavedení do širšího měřítka. Výsledky testů jsou závislé na specifických podmínkách a je těžké umožnit srovnání výsledků napříč různými zařízeními a aplikacemi. Tribologické chování materiálů se výrazně liší v závislosti na parametrech jako je teplota, tlak, rychlost a především mazání.

Firemní testy

Testování tribologických vlastností produktů se provádí v různých průmyslových odvětvích a aplikacích. Výrobci strojů a technických součástí se často spoléhají na vlastní interní testovací postupy, které jsou přizpůsobeny jejich specifickým potřebám. Tyto testy se často zaměřují na hodnocení tribologického chování konkrétních materiálů nebo komponent v reálných podmínkách provozu. Data a výstupy těchto testů jsou důvěrné a nepřístupné veřejnosti, přičemž bývají součástí chráněného know-how jednotlivých firem.

2.3 Shrnutí hlavních zjištění

2.3.1 Vliv provozních podmínek na stav kluzných ploch VHSL

Po sestavení a nivelaci VHSL při standardním chodu nedochází k téměř žádnému opotřebení. Materiál má minimální vliv na chod ložiska. Je potřeba zajistit, aby byly materiály navzájem inertní, aby mohlo docházet k pravidelnému oddělování při spuštění ložiska. Pokud se nashromáždí výrobní chyby s externími vlivy, může dojít při přetížení ložiska ke kontaktu ploch.

V případě poruchy tlakového agregátu nebo tlakového vedení může dojít ke kritickému stavu, kdy se ložisko ocitne bez tlakového maziva a kluzné plochy se začnou dotýkat, a nakonec na sebe prudce dosednou. Selhání funkce vede ke zvýšenému opotřebení kluzných ploch a dalším odchylkám od ideálního tvaru. Pokud ložisko není navrženo na kritické podmínky, může dojít k trvalé změně provozních podmínek. Dochází k nadměrnému opotřebení i při standardním chodu, nebo dokonce k vyřazení ložiska z provozu. Dopady tohoto stavu lze hydraulickým akumulátorem snížit, ale nelze je eliminovat. Rozhodujícím faktorem na životnosti ložiska v těchto stavech má materiál kluzných povrchů.

Tab. 2-3 Konkrétní parametry provozu VHSL

Parametry	Hodnota
Tlak v buňce při ustáleném chodu ložiska	2,6 MPa
Maximální rychlost kluzných ploch	1,2 m·s ⁻¹
Mazání	Kapalinné mazání
Nominální tlak kontaktu při kritickém stavu	2,3 MPa
Mazání	Kapalinné mazání, smíšené až mezné
Použité mazivo	Hydraulický olej HPL 46
Drsnost Ra	0,4-1,6

2.3.2 Možnosti materiálů a povrchových úprav pro kluzné plochy VHSL

Vývoj materiálů HS ložisek se z pohledu odborné literatury zastavil na konci minulého století. Skutečný vývoj však nemá stagnační tendenci a jeho pokrok lze pozorovat na širokém produktovém portfoliu nabízených materiálů a jejich vlastností. Například zjištění vysoké zdravotní závadnosti olova donutila výrobce vyřadit olovené kompozice a nahradit je jinými materiály. Došlo k významnému vývoji plastických hmot a jejich efektivní výrobě.

Z firem analyzovaných v této práci se pouze dvě zabývají přímo HS ložisky. Ostatní firmy se zaměřují na HD ložiska, ale na zakázku vyrábí i HS ložiska. Pro výrobu VHSL ložisek je potřeba počítat s velkou spotřebou materiálu, nízkou cenou a dostupností. Těmto požadavkům vyhovují cínové kompozice, bronzy, hliníkové ložiskové kompozice a vybrané polymery.

Vlastnosti materiálů a výsledky jejich testů v oblasti HS ložisek nejsou známé. Výzkum konkrétních firem je utajený či chráněný. Vlastnosti povrchů se při stejném materiálu u každého výrobce liší a skutečné hodnoty nelze ověřit. Porovnání materiálů napříč prodejci z pohledu životnosti a opotřebení nelze uskutečnit. Proto není možné vytvořit kvalitní návrh ložiska, které by mohlo efektivně pracovat. Výsledky výzkumu v podobných aplikacích jako jsou kluzná ložiska a HD ložiska shrnuté v rešerši ukázaly, že lze pomocí modifikací materiálů zvýšit dobu provozuschopnosti velkorozměrových hydrostatických ložisek. Jejich dopad však nelze pro VHSL kvantifikovat.

Z informací z rešerše lze pouze vytvořit tabulku vhodných materiálů viz Tab. 2-4 pro experimentální ověření. Do tabulky jsou vloženy i vyřazené materiály. Austenitická ocel se používá z důvodů antikorozi ochrany, z pohledu trilogického experimentu se korozivzdorná ocel chová podobně jako konstrukční ocel a není nutné ji uvažovat pro experiment. Keramické materiály, cermety a polykrystaly se používají u řádově menších aplikací, než jsou VHSL. Vyrobení tak velkých dílů je cenově nepřijatelné a technologicky nedostupné. Dřevo s dostatečnými mechanickými vlastnostmi není možné v požadovaném objemu v Evropě získat.

Z vhodných materiálů lze sestavit matici možných materiálových kombinací (Obr. 2-31). Materiály mezi sebou nesmí navzájem utvářet trvalé spoje. Materiálové kombinace s rizikem chemické interakce jsou vyřazené (černě zaznačená pole). Šedou barvou jsou vyznačené kombinace vyřazené z ekonomických důvodů, dražší materiál je vhodné aplikovat na kapsu. Tmavě červená pole jsou kombinace polymerních materiálů a barevných kovů a slitin. U velkorozměrových aplikací, jako jsou VHSL, je investice do dvou finančně náročných povrchů ekonomicky nevýhodná. Světle červená pole ukazují výsledný výběr kombinace kluzných povrchů pro experimentální ověření. Konkrétní chemické vlastnosti materiálů je nutné vybrat na základě dostupnosti jednotlivých materiálů a finančních prostředků.

Tab. 2-4 Výběr materiálů pro experimentální ověření

Vhodné materiály	Vyřazené materiály	Příčina vyřazení
Konstrukční ocel	Austenitická ocel	Tribologické vlastnosti oceli
Pozinkovaná ocel	Keramika	Cena a vyrobiteľnosť
Cínové kompozice	Cermety	Cena a vyrobiteľnosť
Olověné kompozice	Polykrystaly	Cena a vyrobiteľnosť
Cínové bronzy	Dřevo	Cena a dostupnost v EU
Olověné bronzy		
Hliníkové lož. slitiny a bronzy		
Polymery		

Kapsa	Běhoun	Konstrukční ocel	Pozinkovaná ocel	Cínové kompozice	Olověné kompozice	Cínové bronzy	Olověné bronzy	Hliníkové lož. slitiny	Polymery
		Konstrukční ocel	■	■	■	■	■	■	■
Pozinkovaná ocel	■	■	■	■	■	■	■	■	
Cínové kompozice	■	■	■	■	■	■	■	■	
Olověné kompozice	■	■	■	■	■	■	■	■	
Cínové bronzy	■	■	■	■	■	■	■	■	
Olověné bronzy	■	■	■	■	■	■	■	■	
Hliníkové lož. slitiny	■	■	■	■	■	■	■	■	
Polymery	■	■	■	■	■	■	■	■	

Obr. 2-31 Mapa možných materiálových kombinací

Technologie texturování povrchu se jeví jako vhodná povrchová úprava pro HS ložiska kvůli snížení negativních dopadů při podmínkách výpadku tlakového oleje. Tato inovativní technologie může dát kluznému povrchu další funkci. Povrchové důlky mohou sloužit jako zásobníky maziva, ze kterých při nedostatku emituje olej do místa kontaktu. Texturování zvyšují tepelnou kapacitu kluzných ploch a slouží jako pohlcovače částic opotřebení.

2.3.3 Metody testování materiálů pro VHSL

Při hledání vhodné metody testování materiálů pro VHSL nebyla nalezena publikace, která by se tím zabývala. Není definováno, jaká metoda by měla být použita. Je proto nutné postup a metodiku navrhnout. Při volbě provedení je nutné zohlednit požadované vstupy a výstupy. Je potřeba rozhodnout, zda by měly být co nejvíce přiblíženy reálným podmínkám, nebo zda je možné zjednodušení. Klíčovým faktorem je nalezení vyváženého poměru mezi komplexností a přesností, který reflektuje čas a cenu výzkumu. Zároveň je nezbytné zajistit reprodukovatelnost výsledků.

2.4 Mezera v poznání

U HS ložisek lze pozorovat růst v oblasti jejich použití a vývoje. Kvůli složitosti konstrukce dochází při jejich provozu k chybám. Kritický stav výpadku tlakového oleje způsobuje poškození kluzných ploch a vyřazení ložiska z provozu. U VHS ložisek se selhání projevuje značnými finančními ztrátami vzniklými odstávkou zařízení a nutností investice do generálních oprav. Řešením může být vhodná volba kluzného materiálu. Výzkum a pokrok v oblasti materiálů, povrchových úprav a jejich kombinací není publikován. Rozdílné vlastnosti materiálů mohou hrát významnou roli při kritickém stavu.

V návrhovém procesu vznikají otázky o správné volbě vhodných materiálů a využívání náležitých povrchových úprav k zefektivnění návrhu a provozu VHS ložisek. Povrchové úpravy hydrostatických ložisek jsou historicky známé. Jejich novodobý pokrok však není veřejně přístupný a jedná se o dílčí know-how firem, které je vyrábějí a dodávají. Prezentované provozní vlastnosti stejných materiálů se mezi různými firmami liší. Pro objasnění vhodnosti materiálů chybí experimentální studie, která by se zabývala porovnáním nejpoužívanějších materiálů. Hlavní zaměření by mělo být na tření a opotřebení.

Výsledky mohou být využity k efektivnějšímu návrhu VHSL a vhodném rozhodnutí do investice kluzných ploch. U moderních strojů může být použito i pro predikci životnosti a plánování generálních oprav. Zlepšení bezpečnosti a přehlednosti nákladů může rovněž otevřít nové možnosti využití v aplikacích, které by z finančních důvodů dosud nebyly realizovatelné.

3 CÍLE PRÁCE

Práce je převážně výzkumná (80 %). Kvůli nutným úpravám měřicího zařízení (návrh experimentálního modulu) jsou v ní prvky vývojové práce (20 %).



3.1 Výzkumná otázka

O1: Jaký vliv má volba materiálu a typu povrchové úpravy na redukcí poškození kluzné plochy u velkorozměrového hydrostatického ložiska v případě poruchy dodávky tlakového oleje?

3.2 Cíle

3.2.1 Globální cíle práce

- Hlavním cílem je experimentálně objasnit vliv materiálů kluzných povrchů velkorozměrových hydrostatických ložisek na tření a opotřebení během selhání dodávky tlakového oleje užitím univerzálního tribometru.

3.2.2 Dílčí cíle

- Definovat vhodné materiály, povrchové úpravy a jejich parametry pro experimentální ověření.
- Navrhnout experimentální podmínky, postupy a jejich rozsah.
- Na základě definovaných podmínek experimentu konstrukčně navrhnout modul a vzorky pro testování na univerzálním tribometru Rtec MFT 5000. (viz kapitola 3.4)
- Experimentálně analyzovat tření a opotřebení pro vybrané kontaktní dvojice.
- Stanovit vliv jednotlivých povrchových úprav na tření a opotřebení.

3.3 Hypotézy

H1: Cíleným použitím nových materiálů a nanášením povrchových vrstev se specifickými vlastnostmi na kluzné povrchy velkorozměrových hydrostatických ložisek lze snižovat míru jejich opotřebení při poruše dodávky tlakového oleje.

Z rešerše vyplývá, že došlo k vývoji nových materiálů a technologií zpracování vhodných pro VHSL. Existuje historické porovnání materiálů, které nezohledňuje moderní materiály, jako například plasty nebo kompozice. Vývoj materiálů se projevuje hlavně v oblasti HD ložisek. Řeší se kvalita povrchu, teplotní prostup a schopnost materiálu zachytávat částice a odolávat opotřebení. Výzkumem materiálů vhodných pro HS ložiska se zabývají pouze konkrétní firmy s omezeným portfoliem, které svůj výzkum nepublikují. Možnost využitelných materiálů a jejich kombinací je veliké a závisí na dostupnosti a know-how jednotlivých firem. Hypotéza předpokládá, že nové materiály ob stojí ve specifických podmínkách kritického stavu VHSL. Rozhodovacím mechanismem bude porovnání příspěvku různých materiálových kombinací vůči cínové kompozici (ověřenému materiálovému standardu u velkorozměrových axiálních ložisek) [46].

3.4 Cíle vývoje

3.4.1 Vymezení problému

Součástí výzkumu je fyzické testování vzorků v kritických podmínkách, kdy je třeba získat chování součinitele tření a opotřebení. Kvůli unikátnímu chování experimentu a jeho definovaným parametrům je zapotřebí vyvinout novou testovací stanici. Jedná se o rozšiřující modul, který reflektuje nedostatky používaných zařízení ve výzkumném ústavu a možných komerčně dostupných přídatných modulů.

Název a druh produktu

Výsledkem vývoje by měl být Experimentální modul pro univerzální tribometr Rtec MFT 5000. Jedná se o konstrukční úpravu a modernizaci komerčně vyráběného přístroje.

Specifikace zákazníka a spotřebitele

Modul je navrhován především pro využití ve výše definovaném výzkumu. Zákazníkem a zároveň konečným spotřebitelem je tedy výzkumná skupina hydrostatických ložisek odboru tribologie na Ústavu konstruování, který se nalézá v Brně na VUT. Jedná se o přístroj, který bude používán vědeckými pracovníky a proškolenými studenty.

Vymezení problému

V Tab. 3-1 je zobrazen přehled atributů, cílů, omezení, funkcí a prostředků návrhu Experimentálního modulu. Byly definovány na základě chování VHSL při kritickém stavu výpadku tlakového oleje z rešerše.

Tab. 3-1 Přehled atributů a cílů: C-cíle,F-funkce,O-omezení, P-prostředky.

Charakteristika	C	F	O	P
Konstrukce uchycení vzorků	X			
Možnost pravidelné výměny vzorků		X		
Konstrukce upevnění pinu	X			
Možnost nastavení rovnoběžnosti kontaktu		X		
Konstrukce nádoby pro mazivo	X			
Kontakt plně zaplavený mazivem		X		
Kompatibilita s tribometrem Rtec MFT 5000	X	X		X
Zástavbové rozměry zařízení			X	
Měření zatěžovací síly (tribometr)		X		X
Měření součinitele tření (tribometr)		X		X
Zaručení podmínek VHSL: Tlak, vzájemná rychlost		X		
Zajištění výroby	X			
Využití standardních materiálů, které nekontaminují mazivo			X	X
Montáž a kalibrace	X			
Rozebíratelnost zařízení		X		
Opakovatelnost měření v toleranci (5%)			X	
Geometrická přesnost vyráběných dílů				X
Ergonomie		X		

3.4.2 Hlavní cíl vývoje

- Na základě definovaných podmínek experimentu z rešerše navrhnout modul a vzorky pro simulaci kritického stavu výpadku tlakového oleje u VHSL na univerzálním tribometru Rtec MFT 5000.

3.4.3 Dílčí cíle vývoje

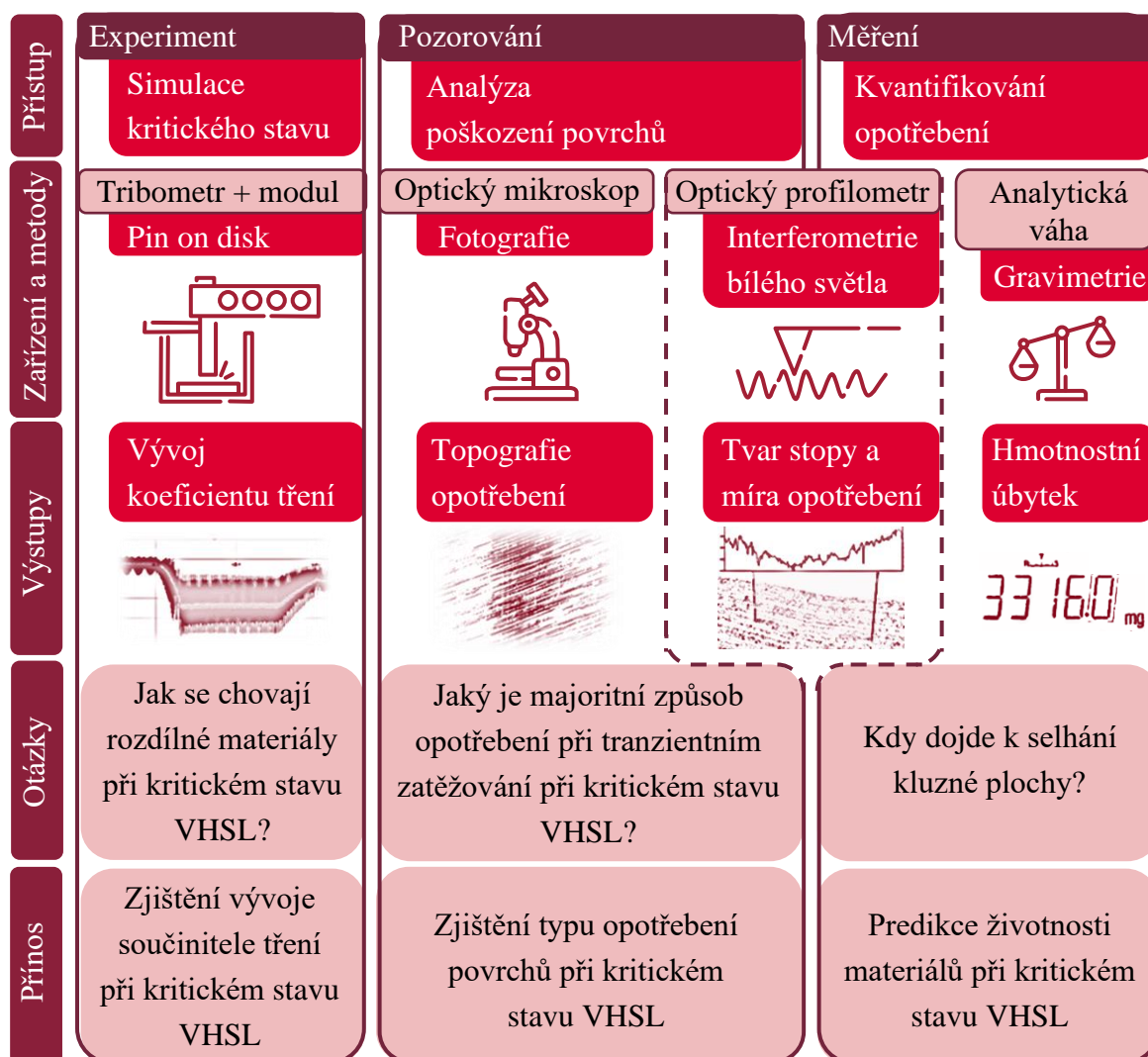
- Návrh principu simulace experimentu: typ pohybu a konfigurace
- Návrh geometrie testovacích vzorků a pinu
- Návrh uchycení vzorků a konstrukce nádoby na mazivo
- 3D návrh experimentálního modulu
- Tvorba výkresové dokumentace: Výkres sestavy, výkresy součástí
- Zajištění výroby, montáže, validace funkčnosti a hodnocení přesnosti měření

4 MATERIÁLY A METODY

Kapitola se zabývá vyhodnocovanými materiály a jejich konkrétními parametry. Specifikuje měřicí a vyhodnocovací metody a postupy. Podrobně popisuje podmínky experimentu, přístup měření, použitý měřicí řetězec včetně aparatury. Obsahuje i podrobné informace o návrhu a výsledných vlastnostech experimentálního modulu (viz kap. 4.6).

4.1 Metodika

- Typ výzkumného problému je kauzální, to předurčuje i formulace výzkumné otázky, která se zabývá příčinami, které vedou k určeným změnám.
- Jedná se o kvantitativní výzkum, pro který byla zvolena empirická metoda založená převážně na experimentu a měření.



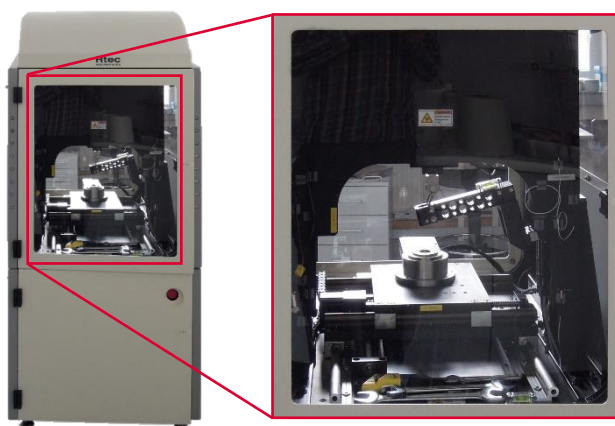
Obr. 4-1 Schéma metodiky řešení výzkumu

4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

Pro zodpovězení vědeckých otázek, potvrzení či vyvrácení vyřčených hypotéz byl navržen experiment, který by pozoroval tření. Pro jeho provedení bylo využito multifunkčního tribometru MFT-5000 společnosti Rtec. Kvůli specifickým provozním podmínkám VHSL byl navržen experimentální rotační modul. Jeho úkolem bylo rozšířit možnosti přístroje, aby bylo možné simulovat kritický stav dosednutí VHSL (výpadek tlakového oleje). Pro kvantifikování opotřebení bylo využito analytické váhy KERN ABJ 320-4NM. Pro určení topografie byl použit bezkontaktní profilometr Bruker Contour GT-X. Pro analýzu chromatických vlastností pro určení přesunu materiálu byl využit stolní mikroskop SMZ800. Pro vyhodnocení velkého objemu dat bylo využité vývojové prostředí MATLAB.

Tribometr Rtec MFT-5000

Jedná se o univerzální tribometr (multifunctional tribometer) od firmy Rtec Instruments (Obr. 4-2). Na zařízení je možné provádět různé typy testů s rotačním a reciprocitacním pohybem. Pro daný výzkum byl využit rotační modul s rychlostí otáček 0-2000 rpm. Zatěžování je řešeno aktuátorem. Maximální zatížení je až do maximální hodnoty snímače 1000 N. Pro snímání třecí síly je zde volně umístěné zatěžovací rameno, na jehož konci je tenzometrický snímač o rozsahu až 1000 N. Tribometr je automatizován a má vlastní řídicí jednotku, kterou lze ovládat pomocí počítače ve výrobcem dodávaném softwaru.

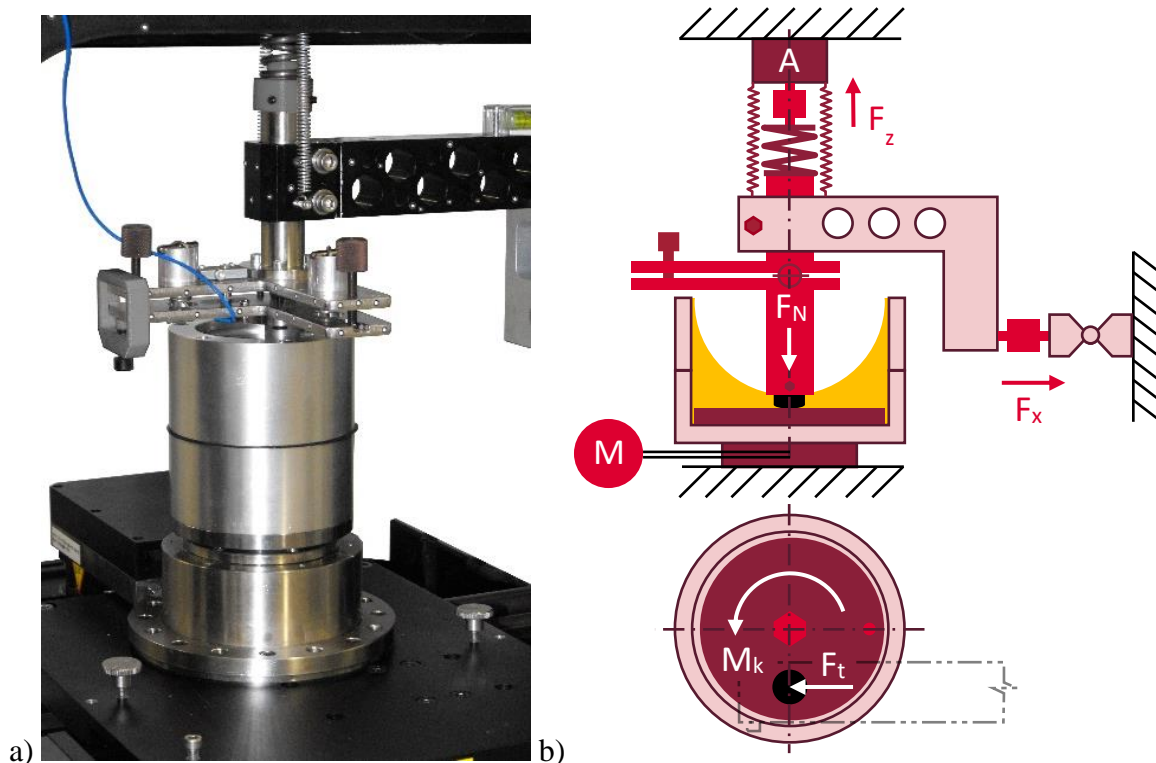


Obr. 4-2 Tribometr Rtec MFT-5000

Experimentální modul

Kvůli vysoké třecí rychlosti u VHSL nelze použít standardní přípravek pro rotační modul. Navíc na stroji není řešeno upínání vzorků. Tyto problémy vyřešil navržený rotační modul (Obr. 4-3). Umožňuje vložení vzorků do výšky až 20 mm. Je optimalizovaný pro upínání vzorků tloušťky 4 mm. Nominální objem maziva pro tyto otáčky a podmínku zaplaveného kontaktu je 100 až 120 ml. Nominální povolené otáčky jsou 700 rpm. Při použití stíracích válců lze dosáhnout až 1200 rpm s minimálními ztrátami oleje. Při vyšších otáčkách dojde k nadměrnému zvýšení hladiny maziva nad kritickou mez.

Pro vyrovnání rovinnosti plochy pinu a disku bude použit modifikovaný naklápečí mechanismus, který vznikl jako součást semestrálního projektu. Soustava je schopna přenést sílu až 1000 N. Pomocí přípravku lze naklonit pin až o $0,5^\circ$ s citlivostí $0,0019^\circ$.



Obr. 4-3 Experimentální modul: a) fotografie; b) schéma

Optický binokulární mikroskop SMZ800 s integrovaným fotoaparátem Nikon

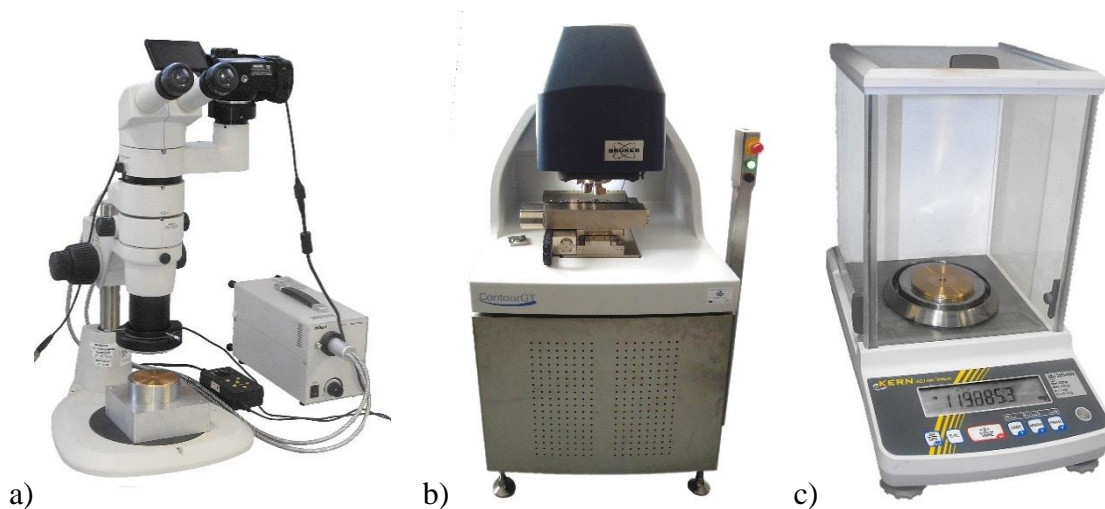
Pro pozorování pravidelnosti a vývoje opotřebené stopy byl využit stolní optický mikroskop SMZ800 (Obr. 4-4a). Zvětšení mikroskopu je až 6,3. Pro pozorování bylo využito pouze zvětšení okuláru. Mikroskop je osazen Fotoaparátem Nikon D5300. Jedná se o digitální zrcadlovku s rozlišením 24,2 Mpx a umožňuje synchronizaci s počítačem. V aplikaci digiCamControler postupně chromaticky prohlížet a popsat celou stopu opotřebení. Osvětlení je řešeno externím zdrojem a lze dosáhnout odrazového a kontrastního osvětlení.

Profilometr Bruker Contour GT-X

Kvůli potřebě přesného a nedestruktivního hodnocení povrchu byl využit bezkontaktní 3D optický profilometr Countour GT-X firmy Bruker (Obr. 4-4b). Jedná se o sofistikované měřicí zařízení, které využívá interferometrii bílého světla (WLI). Dovoluje skenovací rozsah od 0,1 nm až 10 mm ve vertikální ose s rozlišením 0,01 nm (skenovací rychlost $92,5 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Lze použít zvětšení 2x, 5x, 10x, 20x, 50x. Součástí profilometru je i ovládací software Vision64®. Díky plošnému vyhodnocování je možné vyhodnotit úbytek materiálu opotřebeného vzorku.

Laboratorní analytická váha KERN ABJ 320-4NM

Pro měření opotřebení pinu byla využita analytická váha Kern Abj 320-4NM (Obr. 4-4c). Váha umožňuje vážit vzorky o průměru až 90 mm a hmotnosti až 320 g s rozlišením 0,1 mg a reprodukovatelností 0,2 mg.

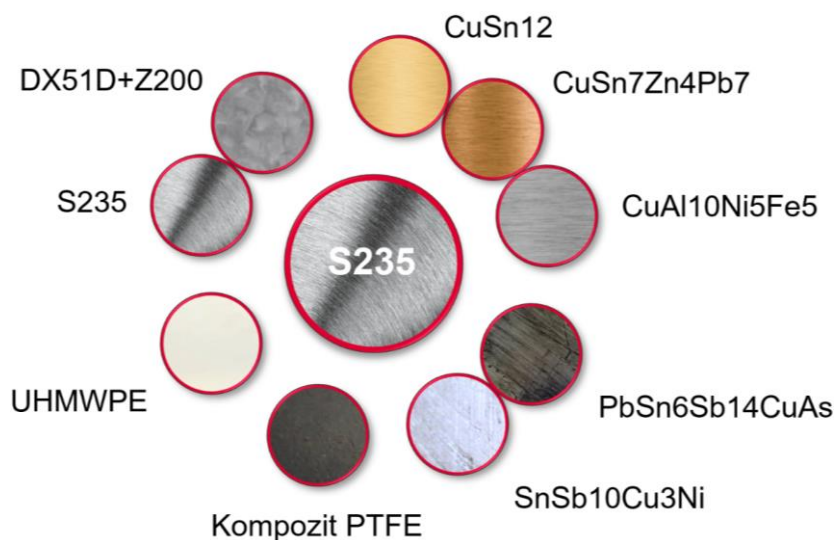


Obr. 4-4 a) Optický mikroskop Delta s fotoaparátem Nikon D5300; b) Profilometr Bruker Contour GT-X; c) Analytická váha KERN ABJ 320-4NM

4.3 Materiál a testovací podmínky

Materiálové kombinace

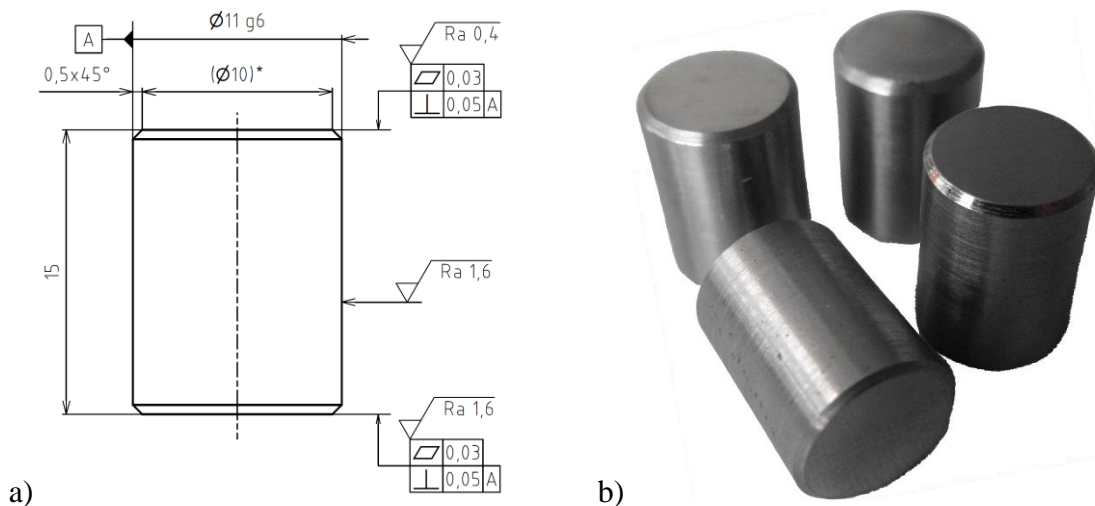
Materiálové kombinace byly vybrány na základě rešerše a byly redukovány pro snížení časové náročnosti výzkumu (Obr. 4-5).



Obr. 4-5 Schéma vybraných materiálových kombinací

Pin

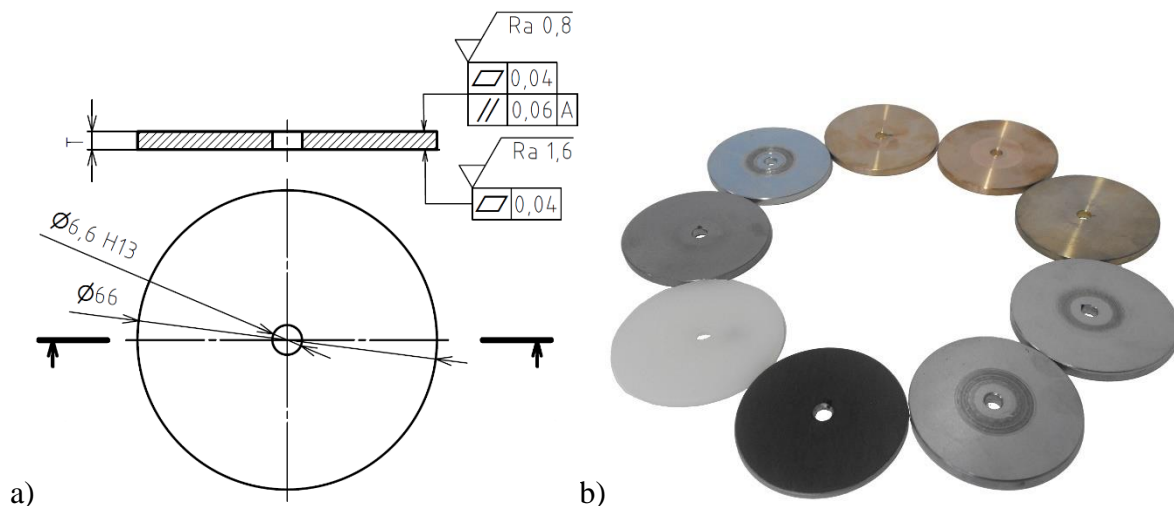
Jako materiál pinu byla zvolena standardní konstrukční ocel S235. Vybraný materiál je shodný s potenciálním materiálem vhodným pro běhoun VHSL. Materiál pinu je totožný pro všechny experimenty. Jeho výměna probíhá po každém experimentu. Kontaktní plocha pinu je $78,54 \text{ mm}^2$. Její předepsaná drsnost je $Ra 0,4$ a rovinnost $30 \mu\text{m}$. Kvůli nedodržení drsnosti výrobcem musely být piny přebroušeny. Všechny piny byly následně vyhodnoceny na profilometru a všechny splňují kritérium drsnosti $Ra 0,2$.



Obr. 4-6 a) Výkres pinu; b) Foto pinů

Vzorek

Z rešerše vyplynuly materiály vhodné pro VHSL, které byly určeny pro experimenty. Byly vyříděny do skupin a za každou z nich byly vybráni kandidáti. Z ocelí byla vybrána standardní konstrukční ocel S235. Z antikoročních úprav byla vybrána žárově zinkovaná ocel (DX51D+Z200). Byly vybrány bronzové materiály, konkrétně cínový (CuSn12) a olověný/červený (CuSn7Zn4Pb7) s poměrně nízkou tvrdostí a hliníkový (CuAl10Ni5Fe5) s vyšší tvrdostí. Z výstelkových kompozic byla vybrána lokálně dostupná slitina STANIT (Cínová kompozice - SnSb10Cu3Ni) a ASMIT (Olověná kompozice - PbSn6Sb14CuAs). Z polymerních materiálů byl vybrán ultra vysokomolekulární polyetylen (UHMWPE-1000). Dokonce bylo možné získat i kompozit PTFE (na ocelovém podkladu je nanášena vrstva pórovitého bronzu CuSn10, do kterého se válcuje směs polytetrafluoretylenu a oxidovaného olova).



Obr. 4-7 a) Výkres vzorku; b) Foto vzorků

Od každého materiálu bylo pro testování vyrobeno minimálně 6 kusů vzorků. Celkový průměr dílu je 66 mm. Ve středu je montážní otvor pro připevnění k experimentálnímu modulu. Drsnost povrchů vzorků byla navržena dle dostupných technologií pro výrobu VHSL. Drsnost povrchu vzorku zadávaná pro výrobu byla Ra 0,8. Skutečná drsnost vzorků naměřená na profilometru však byla rozdílná podle materiálu (viz Tab. 4-1).

Tab. 4-1 Vlastnosti drsnosti povrchu jednotlivých vzorků

Materiál	Materiál	Drsnost povrchu [Ra]	Vlnitost povrchu [Rq]
Ocel	S235	0,7	0,85
Pozinkovaná ocel	DX51D+Z200	1,03	1,28
Cínový bronz	CuSn12	0,40	0,48
Olověný bronz	CuSn7Zn4Pb7	0,26	0,34
Hliníkový bronz	CuAl10Ni5Fe5	0,51	0,63
Cínová kompozice	SnSb10Cu3Ni	0,40	0,51
Olověná kompozice	PbSn6Sb14CuAs	0,36	0,46
UHMWPE	PE1000	0,97	1,31
Kompozit PTFE	PTFE + olovo	1,84	2,54

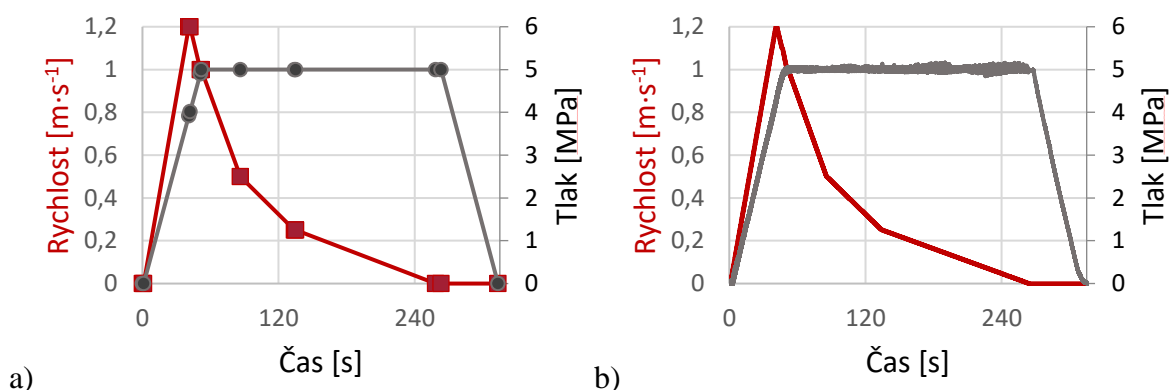
Mazivo

Z důvodů nízké ceny, vysoké dostupnosti a nízké pěnovosti se pro VHSL používá jako mazivo hydraulický olej. Nakonec byl vybrán hydraulický olej HPL 46. Pro každou sadu experimentů s jedním materiálem se spotřebuje 120 ml, protože je nutné ho před experimenty vyměnit, aby nedocházelo ke kontaminaci různých chemických vzorků navzájem. U materiálů, u kterých je velký objem částic opotřebení, je nutná výměna po každém vzorku. Dynamická viskozita maziva je $0,04 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a hustota $860 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Podmínky experimentu

Podmínky experimentu reflektují kritický stav VHSL. Velké hydrostatické točny i při pomalém otáčení mohou dosahovat maximálních kluzných rychlostí až $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. K opotřebení dochází až po dostatečném poklesu tlaku dodávaného oleje, kdy dojde ke kontaktu kluzných povrchů. Rychlost experimentu je proto při maximálním zatížení o něco nižší $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Návrh kontaktního tlaku je závislý na metodice a na dovoleném maximálním kluzném tlaku cínové kompozice, aby bylo možné materiály porovnávat. Délka experimentu je vypočítána na základě maximální rychlosti a předpovídaného koeficientu odporu. Kvůli rozdílu díla a modelu je čas násobený sedmkrát. VHSL pracují při nižších kluzných rychlostech, proto je čas u nižších rychlostí prodloužen.

Před začátkem experimentu je soustava smontována a je vyrovnán pin, aby byl rovnoběžný s diskem. Kontakt se plně zaplaví mazivem. Soustava je odlehčena. Vzorek začne společně s celým modulem rotovat. Po ustálení soustavy a vzniku vzájemné rychlosti kluzných povrchů $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je aplikován tlak 3 MPa ($2,35 \text{ MPa}$ z rešerše) a pro materiály s lepšími vlastnostmi tlak 5 MPa . Ve stejnou chvíli je vzorek zpomalován až do úplného zastavení (Obr. 4-8), následně dojde k odtižení. Sekvence je provedena vždy dvakrát, pro jedno vyrovnání pinu s opačným smyslem otáčení.



Obr. 4-8 a) Ideální cyklus zatěžování vzorku b) Skutečný zatěžovací cyklus vzorku

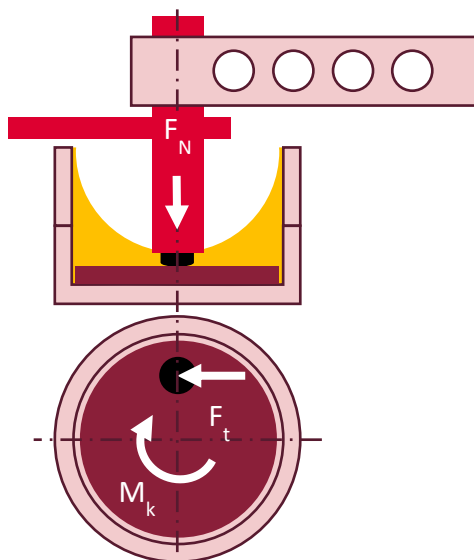
4.4 Metody

V této kapitole jsou popsány pokročilejší metody měření dat. Ve druhé části jsou podrobně popsány metody použité pro analýzu a zpracování dat.

4.4.1 Metody měření

Pin-on-disk

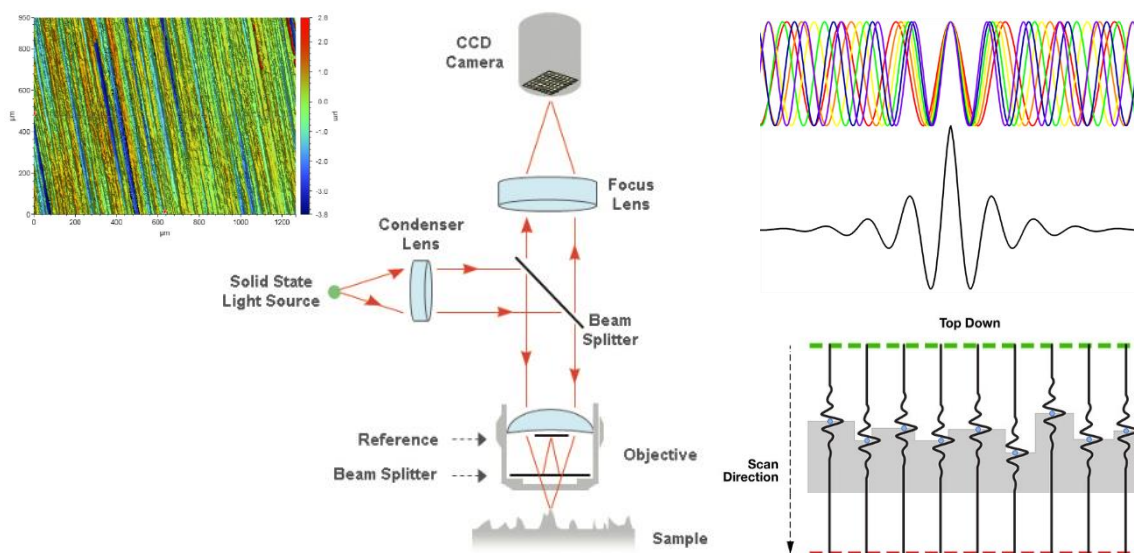
Metoda pin-on-disk se používá pro tribologické testy. Jedná se o konfiguraci třecího testu, kdy se na plochý točící se disk přitlačuje pin. Dosedací plocha může být čoučkovitá, nebo jako v našem případě plochý. Pin je dotlačován do kontaktu silou F_N (viz Obr. 4-9). Disk se otáčí a vzniká zde moment M_k . Pin má omezený pohyb v obou na sebe kolmých směrech v rovině plochy a je posunut vůči středu rotace disku. Kvůli vzájemnému pohybu kluzných ploch a přitlaku zde vzniká jako odezva síla třecí (F_t) v tečném směru, ta je zaznamenávána pomocí tenzometrického snímače.



Obr. 4-9 a) Silové působení pin-on-disk

Interferometrie bílého světla

Technika využívá interference světla (Obr. 4-10). Díky různým vlnovým délkám barev, které obsahuje bílé světlo, se nacházejí maxima jejich vlnových délek v různých bodech. U bílého světla celkový součet nabírá maxima jen v jednom bodě, v pozorované výšce. Při změně vzdálenosti objektivu měřícího zařízení vůči vzorku se na čipu měří intenzita světla, vždy když dojde k maximu, je to zaznamenáno. Postupně dochází k změření výšky všech bodů, které se promítají na čip. Pomocí 3D profilometru, který používá tuto metodu, lze naskenovat velmi přesně topografii skenovaného vzorku.



Obr. 4-10 a) Schéma optické části zařízení; b) Vizualizace interferometrie bílého světla; c) Proces snímání [47,48]

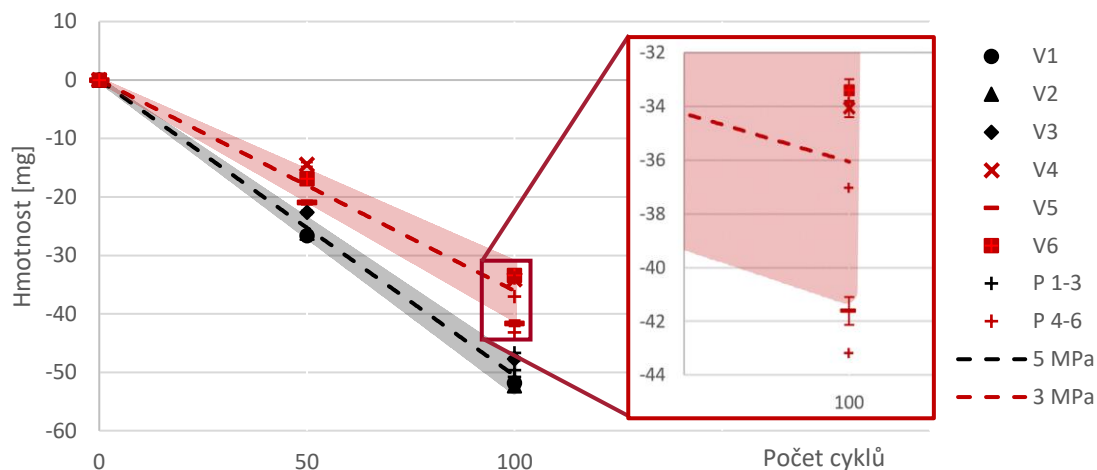
4.4.2 Vyhodnocení dat a opakovatelnost

Vyhodnocení úbytku materiálu

Jako hlavní zařízení pro měření úbytku materiálu se nakonec osvědčila gravimetrie. Hlavním důvodem je rychlost a spolehlivost dostupné analytické váhy. Oproti ostatním metodám, například optickému skenování, lze porovnávat stav před experimentem a po něm. U vzorku se určuje váha před experimentem, vždy po 50 cyklech a na konci experimentu. Měření je provedeno minimálně pro tři vzorky z totožného materiálu, kvůli prokázání statistické významnosti. Výsledkem je vždy průměrná hodnota s vypočítanou odchylkou, která respektuje deklarovanou přesnost váhy, rozptyl měření a rozdílnost výsledků.

Při každém měření je provedena kalibrace váhy. Kvůli snížení odchylky měření je následně třikrát v daných časových intervalech určena hmotnost vzorku a pinu. Vzorek je vždy před každým zvážením důkladně očištěn pomocí izopropylalkoholu. Čeká se 20 s na ustálení váhy a poté je hodnota z váhy odečtena. Pokud stále klesá hmotnost, je počet měření rozšířen, aby se předešlo riziku změření vzorku s nečistotami.

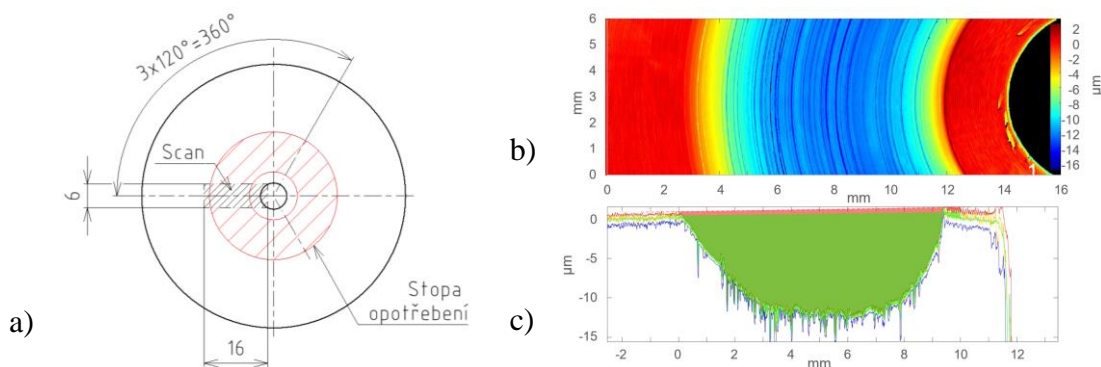
Výsledky měření vzorků jsou vynášeny do grafů (viz Obr. 4-11 V1-V6) i s chybovými úsečkami. Pomocí lineární regrese je určena směrnice opotřebení a její odchylka. Díky znalosti hustoty daného materiálu, uražené vzdálenosti (1041 m pro disk a 7127 m pro pin) a zatížení (393 N pro 5 MPa a 235 N pro 3 MPa) je dopočítána specifická míra opotřebení pro daný materiál včetně směrodatné odchylky. Veličina byla zvolena z důvodů přenositelnosti mezi různými podmínkami a pro porovnání s publikacemi.



Obr. 4-11 Výsledky gravimetrie (V1-V6) a profilometru (P1-P6) s lineární regresí

Díky vážení lze získat velice přesné hodnoty úbytku hmotnosti, měření je limitováno přesností váhy. Nelze hodnotit hmotnost menší, než je opakovatelnost váhy. Pro kontrolu gravimetrie a jejich výsledků je paralelně využita metoda 3D skenování pomocí optického profilometru. Metoda je řádově přesnější než gravimetrie z pohledu nejistoty vyhodnocených dat. Vyrobené vzorky však jsou zatíženy značnými imperfekcemi v topografii drsnosti a geometrické přesnosti povrchu. Kvůli neznalosti přesné původní geometrie nelze exaktně vypočítat chybějící materiál, jedná se o přesný odhad. Proto je výsledná hodnota vždy zatížena chybou, jejíž hodnotu je potřeba kvalifikovaně odhadovat z přesnosti výroby disku (viz Obr. 4-11 body P 1-6).

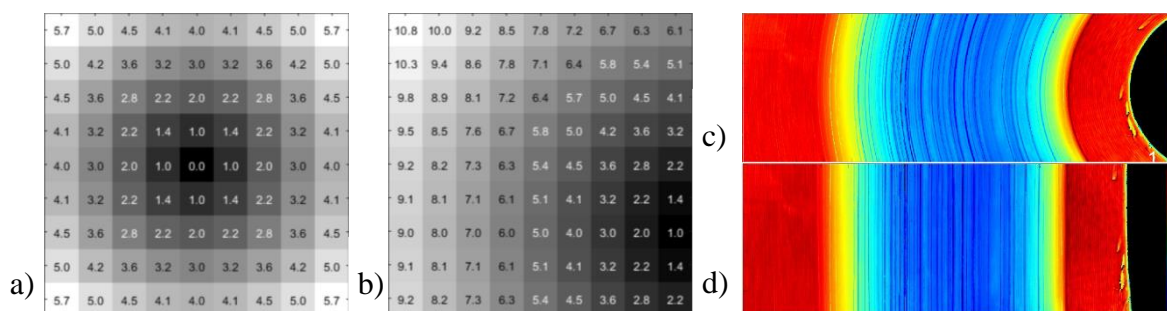
Při skenování je vzorek umístěn do prostoru optického profilometru. Je použito nejmenšího zvětšení (největší měřená oblast). I přesto je nutné na plochu 100 mm² provést 32 snímků v matici s 10% překrytím, které jsou pomocí slučování a nejlepší shody sloučeny do celistvého obrazu. Proces je plně automatizovaný řídicím softwarem zařízení. Měření je prováděno na třech definovaných místech vzorku (viz Obr. 4-12a,b). Je zde podmínka, že jeden ze skenů musí obsahovat viditelně nejvíce poškozené místo na vzorku (nalezeno pomocí mikroskopu).



Obr. 4-12 a) Schéma měření, b) Vyhodnocení z tribometru c) Statisticky zpracovaná data

Naskenovaná oblast může obsahovat chyby, které jsou opraveny na základě interpolace okolí. Pomocí maskování je zakryto místo opotřebené stopy a nedokonalosti v povrchu. Na základě zbylého obrazu, obsahující pouze původní povrch, je proložen rovinou kvůli vyrovnání a určení souřadnicového systému. Obraz je včetně měřítka a jednotek exportován přes ASCII Grid (soubor ".asc") do vývojového prostředí MATLAB.

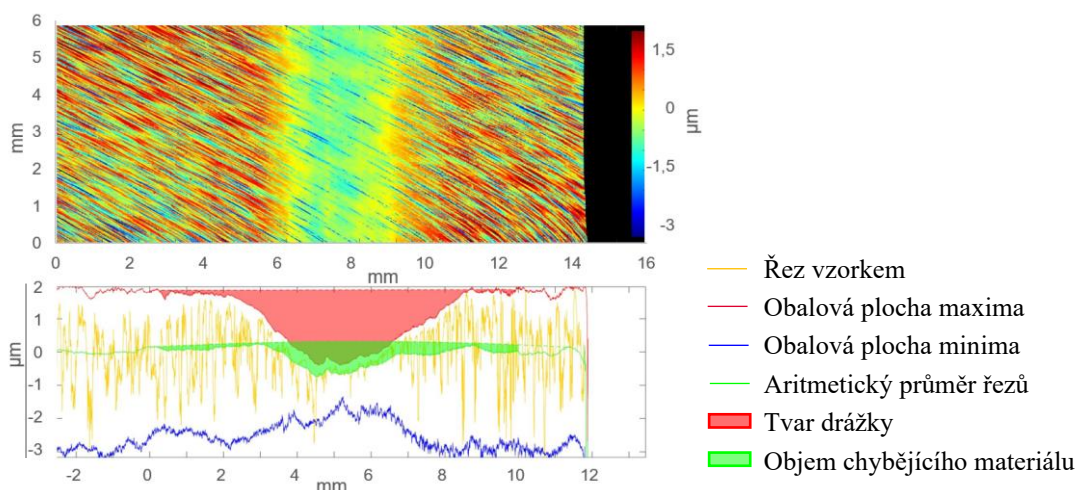
Pro zpracování dat byly použity metody úpravy obrazu. Hlavní úprava byla geometrická rekonstrukce, jejíž cílem bylo vyrovnání zakřivené drážky. Bylo využito transformace radiálního souřadnicového systému do kartézského pomocí morfologického indexování. Základem byla šablona, matice euklidovské vzdálenosti, která obsahuje ve svém středu nulu a v ostatních buňkách je vzdálenost od středu (Obr. 4-13a). Na základě zakřivení drážky (c) je nalezena poloha (výška a šířka) středu. Podle pozice je upravena šablona (b) posunutím středu a pomocí indexování je vytvořen nový transformovaný obraz (d).



Obr. 4-13 a) Šablona; b) Šablona s posunutým středem; c) Původní obraz; d) Deformovaný obraz

Výsledný obraz (matici) lze následně využít pro statistické zpracování dat. Díky velikému počtu dat lze u materiálů s nízkou mírou opotřebenosti získat velice přesně tvar průřezu opotřebené stopy. Každý sloupec lze předpokládat jako statistický soubor dat (drsnota povrchu). Výsledky statistických metrik (Obr. 4-14) byly vykreslovány do grafu pro každý sloupec. Přenosem vznikly důležité křivky pro popsání chování opotřebenosti. Na Obr. 4-14 lze žlutou barvou pozorovat řez rovinou, která prochází osou rotace disku. Lze zde pozorovat, že parametr drsnosti R_z je větší než hloubka drážky, což ztěžuje určení její geometrie. Díky statistické metrice maxima (červená křivka), která je vypočítána pomocí průměru horních 50 hodnot, je vytvořena obalová plocha drsnosti. Tato obalová plocha společně s ideální rovinou popisuje hloubku a šířku opotřebené stopy (červená plocha). Stejnou výpočetní metodou je vytvořena i obalová plocha minima, která popisuje hloubku rýh z broušení. Nejvyšší hodnoty modré křivky v oblasti drážky poukazují na to, že nedochází pouze k úběru materiálu z drážky, ale materiál je částečně vtlačován i do jejího povrchu.

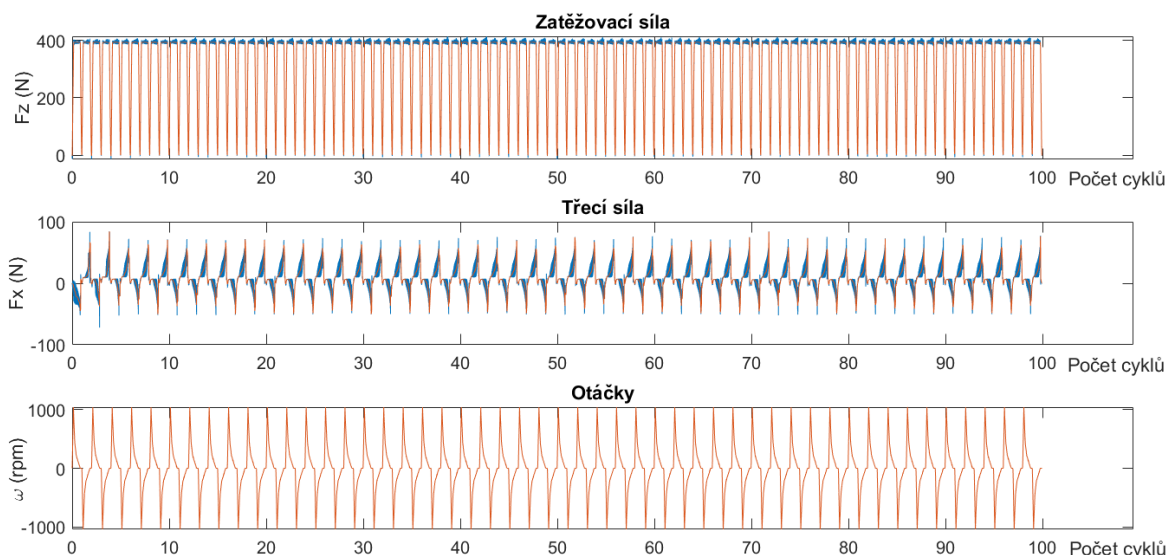
Nejdůležitější metrikou je aritmetický průměr (zelená křivka). Rozdíl tvaru křivky od ideální roviny ukazuje pokles objemu materiálu. Výpočet přesného objemu je pomocí integrace plochy s proměnnou hustotou. Výpočet je realizován pomocí sumace plochy mezi rovinou proloženou původním povrchem a aritmetickým průměrem topografie povrchu naskenované oblasti (zelená plocha). Hustota je definována vzdáleností od středu použitého pro transformaci obrazu, je rovna funkci obvodu. Pro každý vzorek je objem vypočítán ve třech místech (26,5 % plochy celkové drážky). Výsledný průměr ze tří měření odpovídá odhadované míře opotřebení materiálu pro daný vzorek.



Obr. 4-14 a) Vyhodnocení topografie drážky

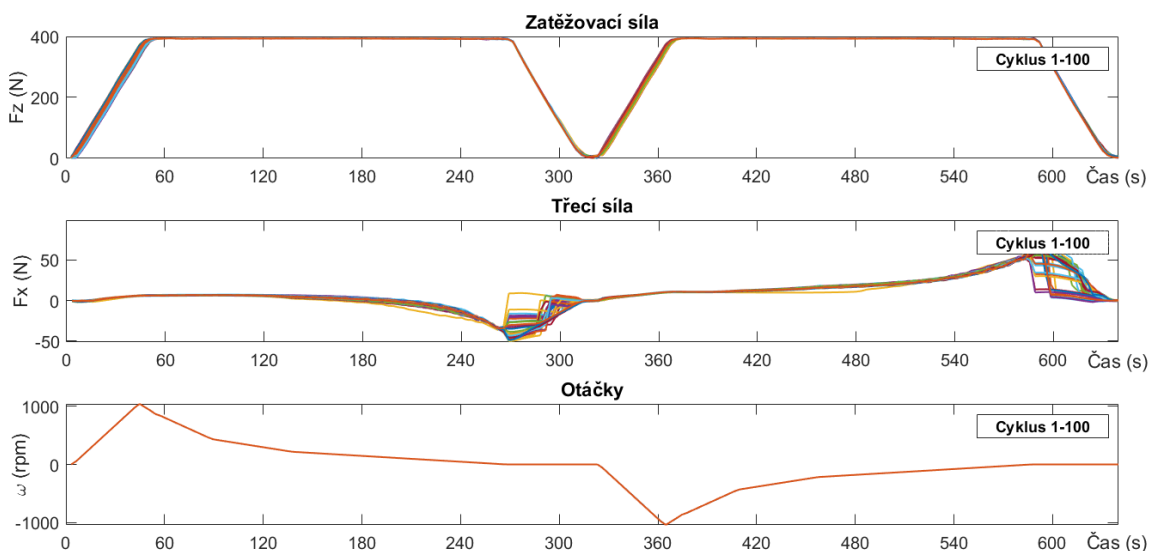
Vyhodnocení součinitele tření

Každý vzorek byl podroben minimálně 100 cyklům kritického stavu VHSL (Obr. 4-15), 50krát ve směru otáčení hodinových ručiček a 50krát proti. Test je během svého chodu několikrát přerušen a jsou provedeny testy vlivu oleje a testy parazitních sil, které vznikají nepřesnostmi zařízení. Testy slouží k zpřesnění výsledků a odstranění chyb, které ovlivňují výsledky. Při těchto odstávkách bylo kontrolováno, jestli jsou dodrženy požadované vlastnosti experimentu, jako rovnoběžnost a dostatek oleje. Všechny úkony byly zapisovány a záznamy (soubory typu *.csv) byly ukládány a indexovány podle předem definovaných kritérií. Zpracování systematicky uspořádaných dat bylo možné automatizovat.



Obr. 4-15 a) Data ze simulace kritického stavu

Všechny cykly simulace kritického stavu byly posléze v programu MATLAB spojeny do jednoho celku a kontrolovány podle kalibračních délek. Následně podle indexů byla data zarovnána za sebe a vytvořen statistický soubor dat (Obr. 4-16). Data byla filtrována pomocí klouzavého průměru kvůli odstranění šumu, který vzniká napájením tenzometrů a motoru. Odfiltrováním byly odstraněny vibrace vzniklé čelním házením disku. Všechno sto měření bylo v daných časových úsecích statisticky průměrováno. Ze statistického souboru byly vždy vyřazeny 3 nejvíce vzdálené hodnoty z důvodů ovlivnění průměru extrémně vzdálenými hodnotami. Hlavním důvodem byly chyby během kalibrace rovinnosti a vznik nahodilých odchylek.

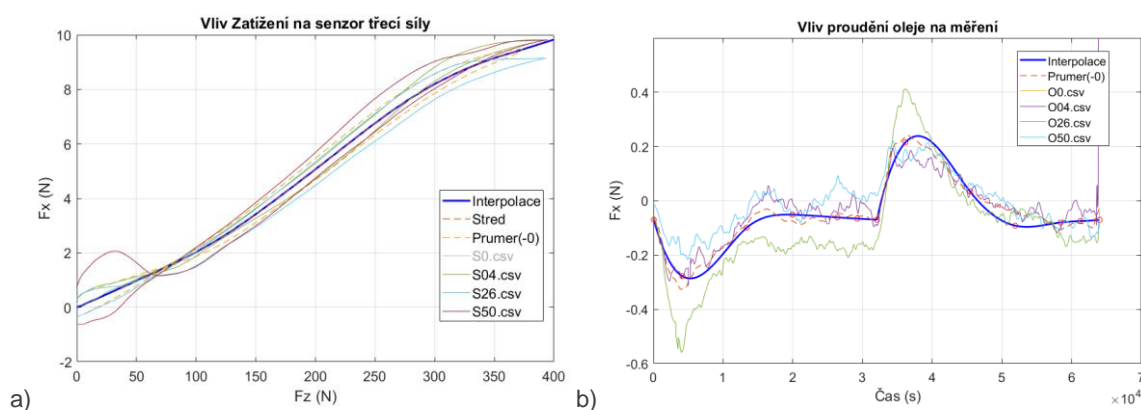


Obr. 4-16 a) Statistický soubor dat (cykly)

Naměřená data kromě popisu zatěžování a třecího odporu kontaktu obsahují také silové působení maziva. Jedná se o reakční sílu změny hybnosti oleje. Silové působení má dvě složky. První vzniká při nárazu urychleného oleje na dřík uchycení pinu. Lokální snížení rychlosti oleje se projevuje silou v ose x. Druhá se formuje při nepatrném naklonění pinu. Vzniká hydrodynamický mazací klín, který se projevuje silou v ose z. Hodnota sil závisí na otáčkách, avšak z důvodu vysoké setrvačnosti zde vzniká hystereze při zrychlování a zpomalování. Proto byla u každého testu provedena simulace celého cyklu v obou směrech otáčení.

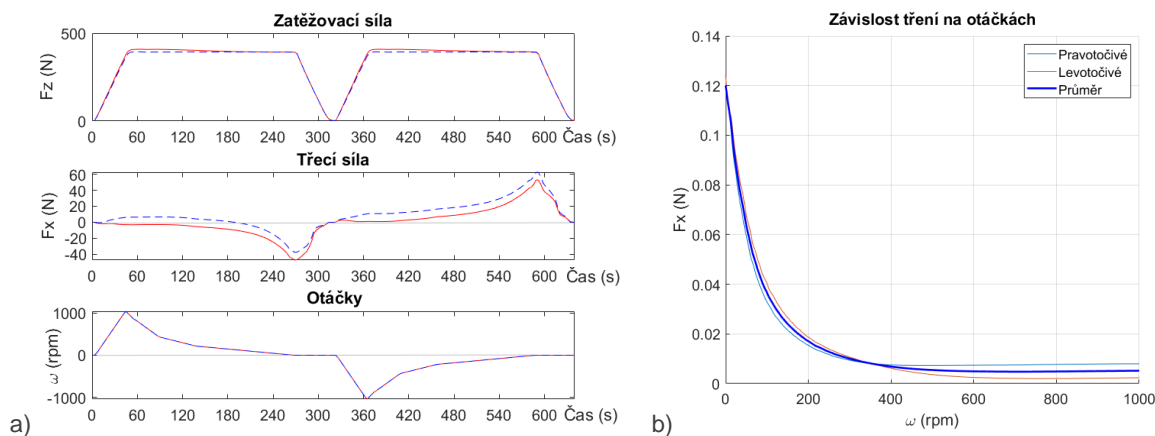
Testování chování oleje bylo provedeno během celého experimentu minimálně čtyřikrát. První měření bylo využito pro otestování správné funkce a umístění sěrky oleje, další tři měření byly použity pro zpřesnění dat. Hodnoty byly odfiltrovány a zprůměrovány. Průběžný pokles síly mezi testy je zapříčiněno úbytkem maziva způsobeným údržbou a čištěním vzorků. Výsledný průběh byl rozdělen na dvě části podle smyslu otáčení. Bylo vypočítáno šest důležitých bodů pro určení chování oleje a ty byly interpolovány pro získání závislosti chování oleje na čase (Obr. 4-17b).

Hlavním kritériem pro upínání vzorků byla vzájemná rovinnost kontaktních ploch. Až druhořadým úkolem bylo vyrovnaní zatěžovací soustavy. I při malé nesouososti vzniká parazitní síla, která se projevuje na snímači třecí síly (složka zatěžovací síly). Pro odstranění nechtěného vlivu byla soustava zatížena na maximum a opět odtížena. První měření bylo vždy vyřazeno a na základě dalších minimálně dvou byla vykreslena závislost zatěžovací a třecí (parazitní) síly (Obr. 4-17a).



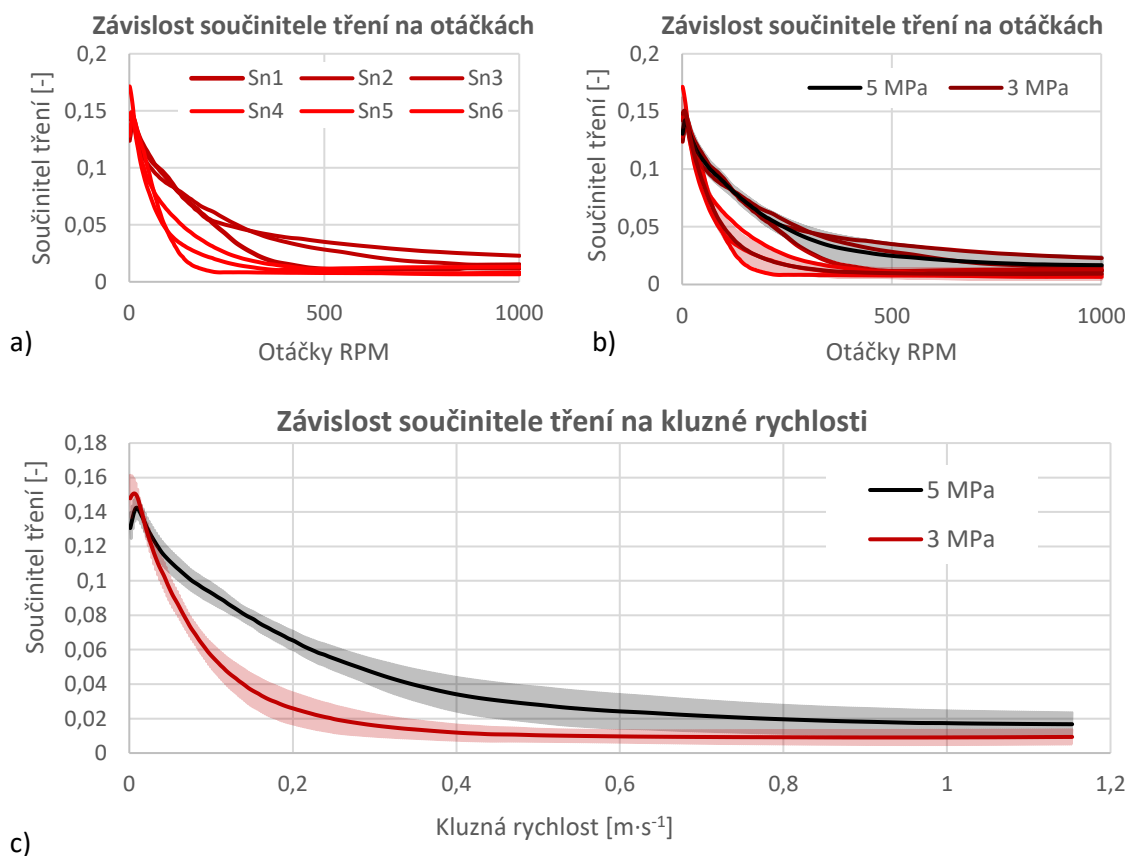
Obr. 4-17 Parazitní vlivy: a) vliv zatížení; b) vliv oleje

Od původních naměřených dat (Obr. 4-18a) bylo odečteno chování oleje. Podle zatěžování byla vytvořena teoretická závislost parazitní síly na čase, a nakonec stejným způsobem odečtena od původních naměřených hodnot. Byla izolována oblast konstantního zatěžování, ze které byla vytvořena závislost mezi třecí silou a otáčkami. Ukázalo se, že průběh se pro rozdílný smysl otáčení trochu liší (Obr. 4-18b). Odchylka je zapříčiněna asymetrií měřicího zařízení a rozdílnou tuhostí v různých směrech. Proto byly křivky s opačným smyslem otáčení nakonec průměrovány.



Obr. 4-18 a) Korigovaná data; b) Vyhodnocené tření

Toto vyhodnocení probíhalo pro všechny naměřené vzorky pro daný materiál. Výsledky byly rozděleny na základě zatížení (pro 5 a 3 MPa – viz Obr. 4-19a). Z jednotlivých výsledků byl vytvořen průměr a vypočítána směrodatná odchylka měření. Vznikla tak střední křivka a plocha směrodatné odchylky hodnot tření pro rozsah otáček od 0 do 1000 rpm (viz Obr. 4-19b). Aby bylo možné výsledky prezentovat, byl graf přepočítán na závislost tření na kluzné rychlosti (viz Obr. 4-19c).



Obr. 4-19 Statistické zpracování a prezentace dat

Pro číselné porovnání tření byly vytvořeny dvě metriky. První je zaměřená na dosažení hydrodynamického režimu při $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Druhá cílí na celkový odpor kluzného povrchu proti pohybu. Jeho výpočet je realizovaný váženým průměrem vývoje tření od 0 do 1 m, kdy součinitel tření při nízkých otáčkách má vyšší váhu než při vysokých. Poměr je totožný jako rozdělení času podle ideálního cyklu zatěžování. Jedná se o průměrný součinitel tření během testování vzorku.

4.5 Testované predikce

V této kapitole je hypotéza převedena do empiricky testovatelné podoby. Jsou zde definovány metriky pro kvantifikaci měřitelných proměnných a způsoby, jakými budou analyzovány.

Testovaná predikce

H1: Cíleným použitím nových materiálů a nanášením povrchových vrstev se specifickými vlastnostmi na kluzné povrchy velkorozměrových hydrostatických ložisek lze snižovat míru opotřebení kluzných ploch při poruše dodávky tlakového oleje.

Hypotéza si zakládá na předpokladu vývoje nových materiálů použitelných v oblasti VHSL. Hypotéza předpokládá, že nové materiály s vylepšenými vlastnostmi budou překonávat tradiční cínové kompozice a přispějí k ochraně kluzných ploch před poškozením.

Nezávislá proměnná bude v rámci výzkumu materiál kluzného povrchu kruhového disku. Mezi kontrolované proměnné patří zatížení (normálová síla, rychlost a čas), drsnost kluzných povrchů (disku a pinu), plocha kontaktu, rovnoběžnost ploch a podmínky mazání. Mezi závislé proměnné patří opotřebení materiálu, odpor materiálu vůči pohybu a výsledná topografie povrchu.

Opotřebení materiálu bude vyjádřeno pomocí specifické míry opotřebení. Obvykle se používá k posouzení odolnosti materiálu proti opotřebení při trilogických výzkumech. Jedná se o veličinu, která je přenositelná pro rozdílné podmínky, jako je zatížení, délka dráhy a plochy kontaktu. Popis umožňuje porovnávat materiály s rozdílnou zatížitelností a životností.

Měřitelná proměnná pro vyjádření odporu materiálu vůči pohybu je součinitel tření. Jelikož je soustava zatěžována proměnným cyklem, bude hodnocena průměrná hodnota součinitele tření při zatěžování pomocí ideálního cyklu. Do výpočtu bude zahrnuta pouze část cyklu, která reflektuje kritický stav výpadku oleje.

Výsledná topografie povrchu bude hodnocena na základě schopnosti materiálu zvyšovat konformitu na mikroúrovni. Vhodnost se projevuje hladkostí stopy po vzájemném tření materiálu za chodu. Měřitelná proměnná v tomto případě bude výsledná drsnost povrchu Ra (její procentuální změna) v místě stopy na disku po provedeném experimentu.

Tyto tři hlavní metriky jsou použity pro identifikování nejlepších materiálů z tribologických pohledů. Podle jednotlivých veličin budou vždy seřazeny materiály a přiřazeny body od devíti po jeden. Body jsou násobeny na základě váhy veličin, opotřebení 5krát, odpor materiálu vůči pohybu 3krát, topografie povrchu 1krát. Na základě součtu bodů budou materiály seřazeny a doporučeny pro použití (Tab. 4-2).

Tab. 4-2 Hodnocení vhodnosti materiálu

Materiál	Opotřebení	Tření	Drsnost	$\sum(k_i \cdot n_i)$
Mat 1	9	9	9	9·5+9·3+9·1
Mat 2	8	8	8	8·5+8·3+8·1
Mat 2	7	7	7	7·5+7·3+7·1
...
Mat 9	1	1	1	5+3+1
Váha kritéria (k_i)	5	3	1	-

4.6 Návrh experimentálního modulu

Na základě získaných informací z rešerše a požadovaných atributů vznikl soubor specifikací, načež byl doplněn o konkrétní parametry a jejich významnost. Na jejich základě byly navrženy alternativní možnosti řešení. Nejlepší koncept byl optimalizován, vyroben a otestován.

4.6.1 Analýza cílů a specifikace omezení

Pokud je daná specifikace nutnou podmínkou návrhu, je označena: (n)

Požadavky na zařízení:

Podmínky experimentu

- Možnost řídit vzájemně tlak v kontaktu a kluznou rychlost (n)
- Schopnost simulovat dosednutí ploch při kritickém stavu VHSL (n)
 - Kontaktní tlak: 0-5 MPa (min. 2,5 MPa)
 - Opakovatelnost zatížení: $\pm 3 \%$ (max)
 - Kluzná rychlost: 0-1,2 m·s⁻¹ (min. 0,75 m·s⁻¹)
 - Přesnost nastavení rychlosti: $\pm 3 \%$ (max)
- Během experimentu musí být kontakt plně zaplaven mazivem

Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000

- Omezení zástavbovými rozměry tribometru (n)
 - Maximální výška modulu: 160 mm
 - Rozsah posunu aktuátoru: 50 mm (+20 mm; -30 mm)
 - Maximální délka: 270 mm
 - Maximální šířka: 150 mm
- Využití integrovaného zatěžovacího aktuátoru s tenzometrickým snímačem (n)
- Využití integrovaného tenzometrického snímače tření (n)
 - Přesnost vyhodnocení tření: $\pm 5 \%$ (max)

Rozebíratelnost a montáž

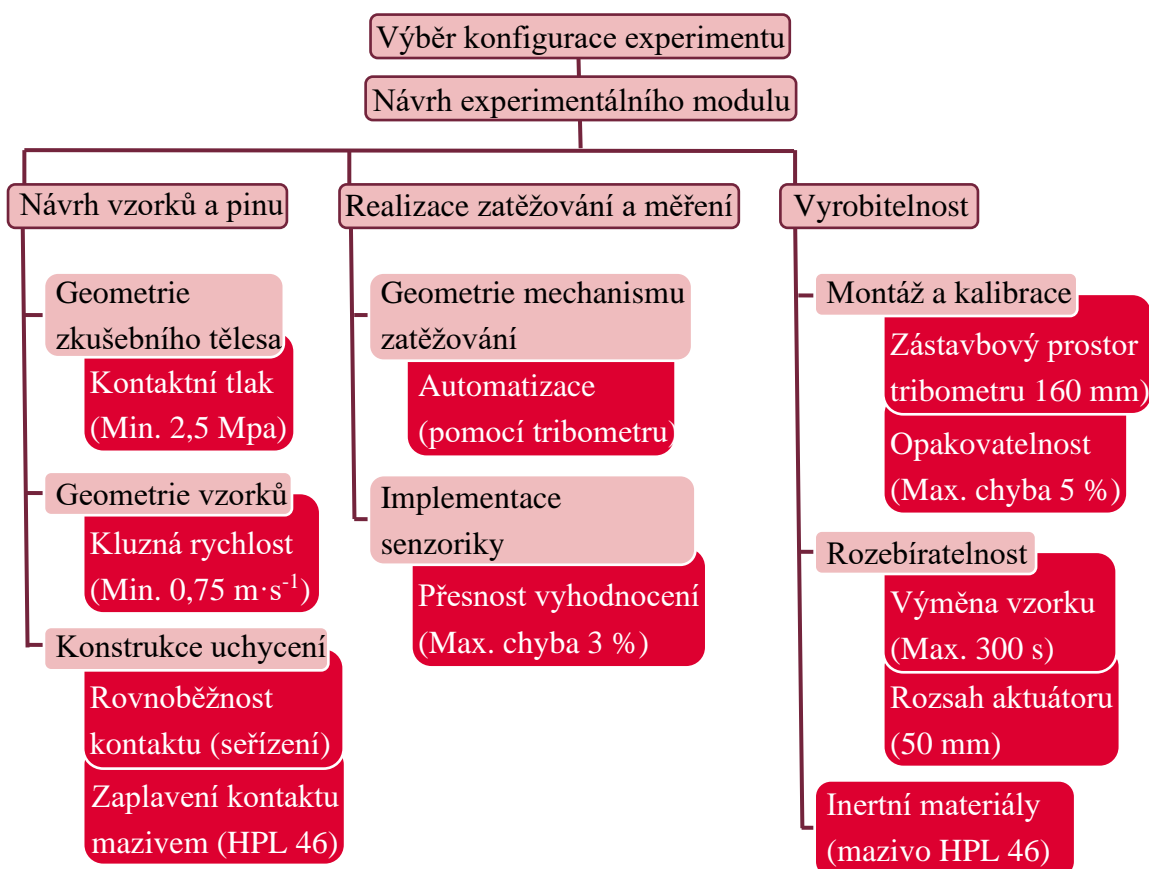
- Kvůli implementování modulu nesmí být proveden nevratný zásah do tribometru (n)
- Možnost výměny vzorků, pinu a maziva
 - Možnost nastavení rovnoběžnosti kontaktu (n)
 - Efektivita vzhledem k vysokému počtu měření: výměna vzorku max. 300 s
 - Minimální ztráty maziva během experimentu
- Opakovatelnost měření po sestavení v toleranci (max 5 %)
 - Geometrická přesnost dílů
- Možnost výměny vzorků, pinu a maziva (n)

Výrobní omezení

- Využití materiálů kompatibilních s hydraulickým olejem HPL 46
- Vyrobitelnost a dostupnost technologií (n)
- Výrobní náklady

4.6.2 Strom cílů a omezení

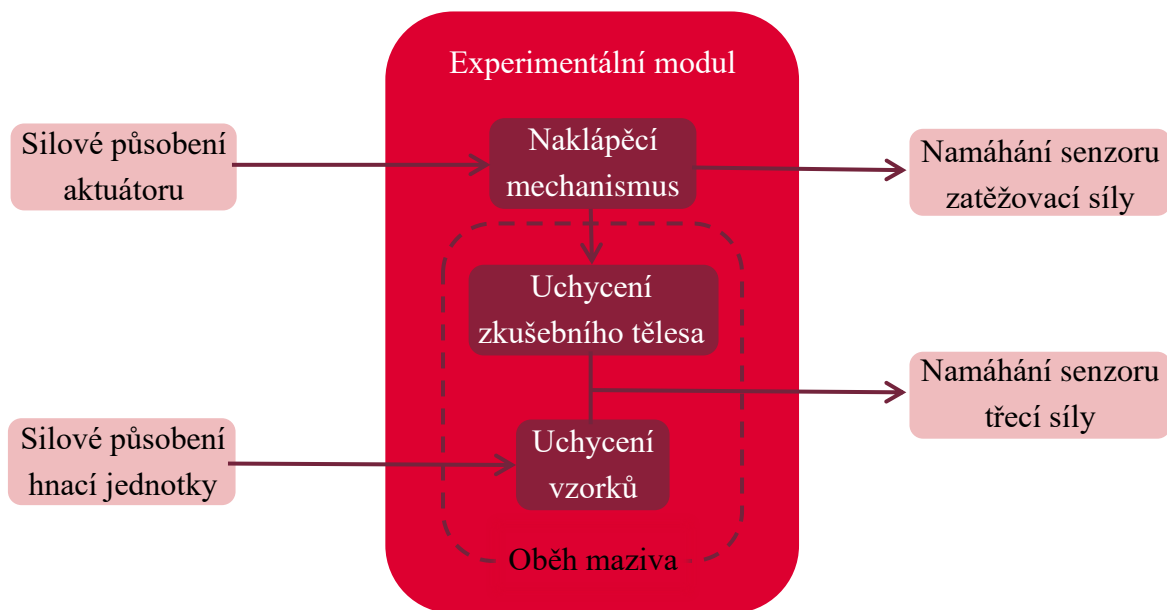
Na základě specifikace omezení a analýzy cílů byla navržena hierarchická struktura cílů a jejich omezení (Obr. 4-20).



Obr. 4-20 Strom cílů a omezení (světle cíle, červeně omezení)

4.6.3 Technická funkční analýza

Kvůli požadavku kompatibility s tribometrem jsou zde požadované mechanické vstupy a výstupy, se kterými bude muset experimentální modul reagovat. Jedná se o pohybové ústrojí, které můžeme zařadit jako vstupy, a senzorické osazení zařízení, které lze označit jako výstupy. Na samotný modul jsou kladeny požadavky funkcí, které lze rozsegmentovat. Jedná se především o uchycení komponent, kalibrační mechanismus a zajištění podmínek mazání (Obr. 4-21).



Obr. 4-21 Black box a glass box funkcí produktu

4.6.4 Stanovení významnosti cílů a kritéria jejich naplnění

Pro hodnocení kritéria naplnění je zvolena metoda VDI 2225 (viz Tab. 4-3). Specifikace byly rozděleny do skupin a hodnotí se splnění jednotlivých bodů. Pokud návrh nesplní některou z nutných podmínek návrh, je vyřazen (viz Tab. 4-4).

Tab. 4-3 Tabulka hodnocení VDI 2225

Nevyhovující	0
Snesitelný	1
Adekvátní	2
Dobrý	3
Ideální	4

Tab. 4-4 Hodnocené oblasti návrhu

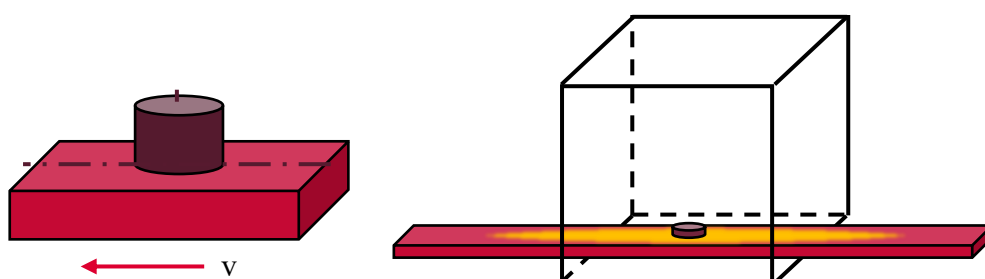
Požadavky	Hodnocení
Podmínky experimentu	0-4
Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000	0-4
Rozebíratelnost a montáž	0-4
Výrobní omezení	0-4
SOUČET:	0-16

4.6.5 Výběr konfigurace modulu

Pro celý návrh bylo potřeba rozhodnout, jaká konfigurace tribologického testu bude pro experiment nejvhodnější. Z rešerše vyplynuly tři metody: Pin-on-plate, Pin-on-disk, Disk-on-disk

Pin-on-plate

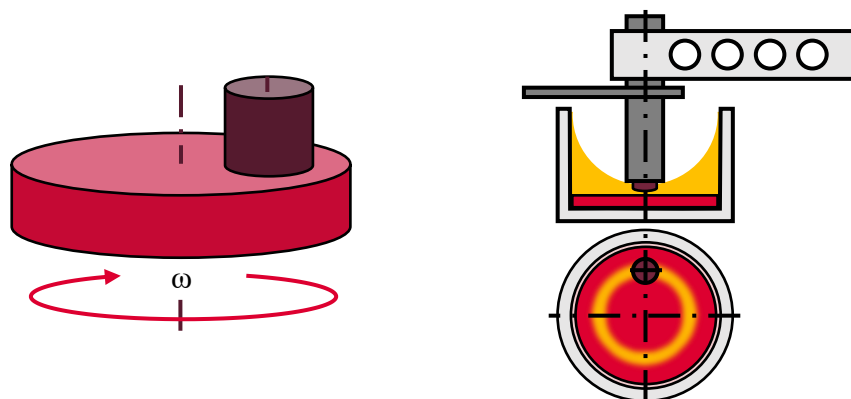
Konfigurace pin-on-plate (Obr. 4-22) se z pohledu zatěžování nejvíce podobá kluznému kontaktu VHSL. Kluzná rychlost je rovnoměrná po ploše vzorku. Na olej nepůsobí odstředivé síly. Požadovaná kluzná rychlost je $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Zároveň pro simulaci rovnoměrného zpomalení ložiska nelze vzdálenost dráhy přerušovat. Pracovní prostor tribometru není dostatečně veliký, aby bylo možné simulovat navržené podmínky experimentu. Navíc při použití konfigurace pin-on-plate by musela být velikost vzorku nadstandardní a došlo by k značnému prodražení výroby.



Obr. 4-22 Ilustrace konfigurace pin-on-plate a předběžný návrh

Pin-on-disk

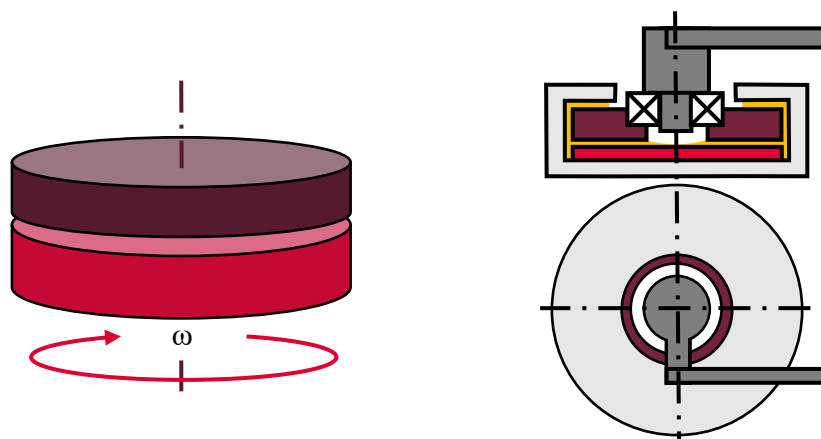
Kvůli své jednoduchosti a univerzálnosti je technika pin-on-disk (Obr. 4-23) nejvyžívanější simulace třecího kontaktu pro kluzná ložiska. Z pohledu konfigurace dokonce pin připomíná hydrostatickou kapsu a disk běhounu. Tuto metodu můžeme popsat jako zmenšený model VHSL. Kvůli nízkému průměru se zde však nadměrně projevují setrvačné síly. Jejich následky způsobují parabolickou deformaci hladiny maziva. Vliv nízkého průměru vzorku způsobuje rozdílnou kluznou rychlost na ploše pinu.



Obr. 4-23 Ilustrace konfigurace pin-on-disk a předběžný návrh

Disk-on-disk

Konfigurace disk-on-disk (Obr. 4-24) umožňuje vyšší rovnoměrnost dosednutí kontaktu. Kvůli velké dosedací ploše jsou potřebné vysoké zátěžné síly. Metoda nesimuluje výstup a vstup oleje z kontaktu. Aby bylo možné tuto metodu využít, bylo by nutné provést zásah do tribometru úpravou senzoru třecí síly. Tyto zásahy by byly značně finančně náročné a není zde jasné, zda by výsledný produkt splňoval požadavky na požadované nejistoty měření tření při experimentu. U metody by byla značně obtížná montáž a demontáž mezi jednotlivými testy.



Obr. 4-24 Ilustrace konfigurace disk-on-disk a předběžný návrh

Porovnání

Konfigurace Pin-on-plate je pro experimentální modul nepoužitelná z důvodu nedodržení nutných podmínek, kombinace minimální kluzné rychlosti a zástavbového prostoru tribometru. Aby bylo možné využít Disk-on-disk, bylo by nutné vytvořit zásah do konstrukce tribometru, což není přijatelné (hlavně z důvodů finanční náročnosti). Jedinou možnou konfigurací pro test je tedy Pin-on-disk (Tab. 4-5).

Tab. 4-5 Hodnocení konfigurace modulu

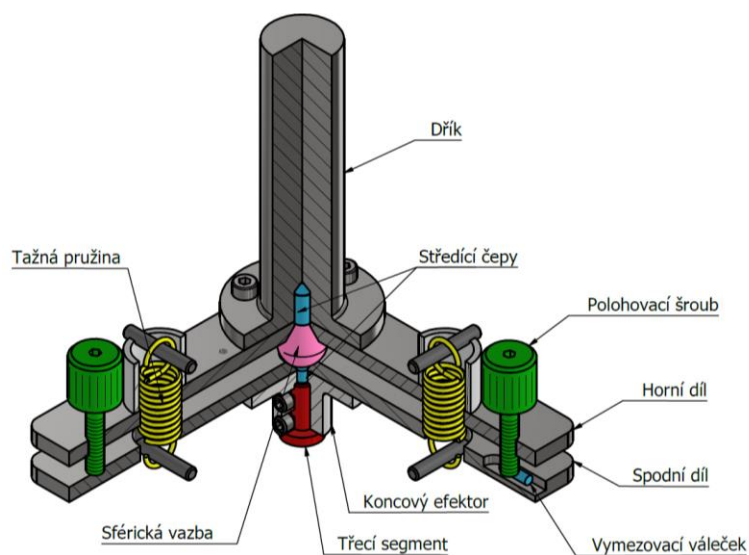
Požadavky	Pin-on-plate	Pin-on-disk	Disk-on-disk
Podmínky experimentu	0	2	3
Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000	0	3	0
Rozebíratelnost a montáž	3	2	0
Výrobní omezení	0	3	2
SOUČET:	0	9	0

4.6.6 Návrh alternativních řešení

Na základě glass boxu zařízení byly jednotlivé části modulu rozděleny na segmenty. Ty byly postupně řešeny a byly navrženy různé principy splnění požadovaných funkcí a jejich konstrukce. Různé návrhy nebyly vždy navzájem kompatibilní, a proto byly pomocí morfologické matice navrženy pouze tři možné koncepty a vybrán ten nejlepší.

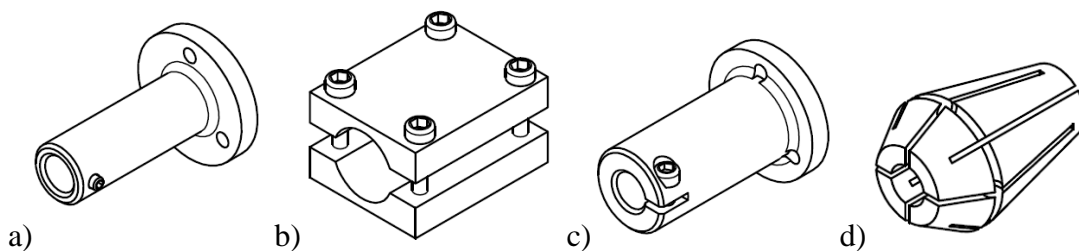
Konkrétní konstrukční uzly

Jako první úsek byl řešen přístup možnosti naklápění celé soustavy k zabezpečení rovinnosti kontaktu. Problematika byla již studentským týmem v rámci semestrálního projektu řešena [49]. Nabízelo se proto využití vyrobeného přípravku (Obr. 4-25). Byl využit funkční mechanismus sestavy a bylo nutné navrhnout propojení s dalšími komponentami. Hotový přípravek je již otestovaný a osvědčený při reálných měřeních. Varianta není jednoduše rozebíratelná, což způsobuje omezený přístup seshora. Výroba nového je finančně náročná.



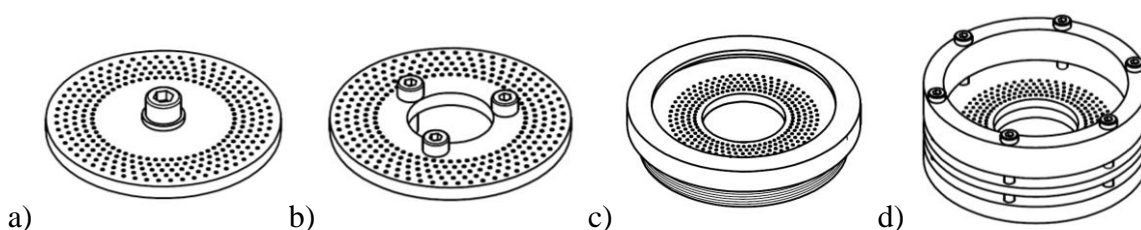
Obr. 4-25 Naklápěcí přípravek

Pro uchycení pinu (Obr. 4-26) se u současného zařízení používá kombinace přesného uložení a radiálního zajištění proti rotaci pinu pomocí stavěcího šroubu. Nelze využít současný kvůli rozdílným rozměrům pinu. Lze vyrobit díl nový optimalizovaný pro nový pin a silové působení. Varianta má nízkou upínací sílu, nízké výrobní náklady a dobrou přesnost upnutí. Pro zvýšení upínací síly lze držák naříznout a umístit zde šroubový spoj, který by způsoboval deformaci. Upínání by následně fungovalo jako objímka. Úprava způsobuje potřebnost mimoosového vrtání při výrobě, snižuje tuhost upínacího přípravku a zvyšuje riziko přesnosti upevnění. Dále lze využít standardně dodávaných dílů. První možností jsou upínací čelisti, které nemají dobrou opakovatelnost upnutí, ale vyznačují se vysokou upínací silou. Druhou možností je využít kleštiny, která se jeví jako nejlepší možnost, jenže požaduje velké zástavbové rozměry, které zvětšují pracovní prostor.



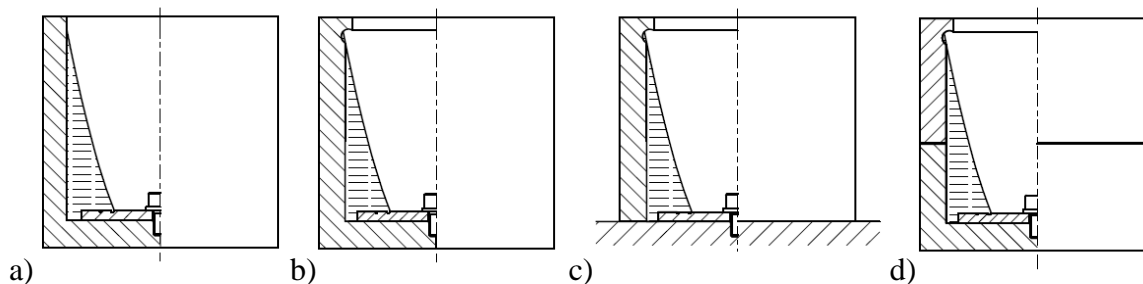
Obr. 4-26 a) Přesný otvor a stavěcí šroub; b) Upínací čelisti; c) Objímka; d) Kleština

Uchycení disku (Obr. 4-27) se kvůli potřebě rozebíratelnosti a tvaru nabízí šroubový spoj. Lze využít jednoho, nebo více šroubových spojů s podložkami. Počet spojů však prodlužuje rychlost výměny vzorku. Pro snížení počtu dílů lze vytvořit jemný závit na stěny jednotlivých dílů a využít jejich přitlaku. Alternativní možnost je využít upínky, která je přitlačena na disk (současné díl nádoby).



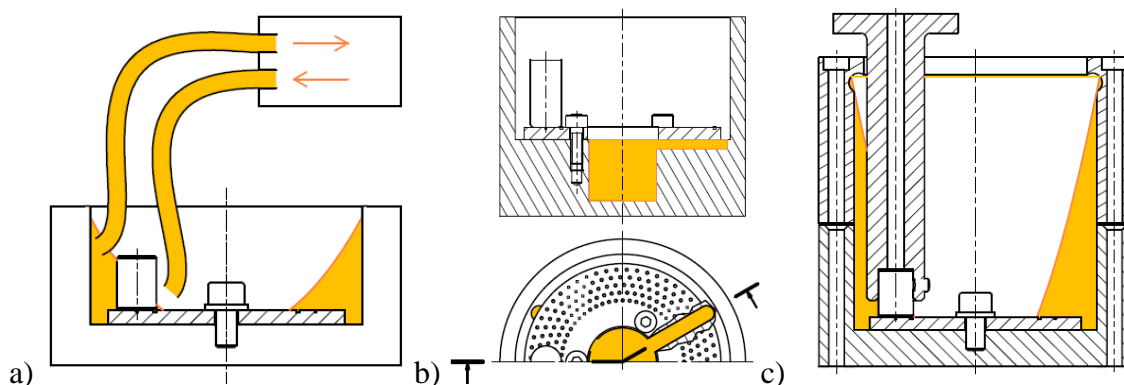
Obr. 4-27 Upínání a) jedním šroubem; b) více šrouby; c) jemným závitem mezi díly; d) upínkou

Pro udržení maziva v kontaktu (Obr. 4-28) je nutné využít nádoby pro její uložení. Na výrobu je nejvýhodnější klasická nádoba s plochým dnem. Pro snížení rizika přetečení lze na vrchu nádoby vytvořit lem ohnutý směrem do středu, který uklidní hladinu maziva. Nádobě lze i odstranit dno a místo něho využít jiných součástí, nebo rovnou nádobu koncipovat jako dvoudílnou.



Obr. 4-28 a) Nádoba se dnem; b) Nádoba se dnem i okrajem; c) Bezedná s okrajem; d) Dvoudílná nádoba

Kvůli cirkulaci maziva (Obr. 4-29a) v kontaktu lze využít nuceného oběhu. Oběh oleje dovoluje regulovat množství oleje v kontaktu a jeho čerstvost včetně chlazení. Podmínkou je pořízení dalších mechanických prvků včetně pohonné a řídicí jednotky. Druhou možností je využít mechanické energie soustavy při experimentu (b). Během změny otáček dochází k změně tvaru hladiny oleje. Pomocí správné volby kanálků lze na začátku cyklu experimentu zalít kontakt a při zastavování soustavy nechat kontakt hladovět, čímž by se zvýšila intenzita hladovění kontaktu při zastavení, což by simulovalo odtok oleje do hlavního zásobníku při kritické chybě VHSL. Výroba kanálků je však obtížná. Poslední možností je vytvoření nádoby s dostatečnou výškou pro udržení maziva v pracovním prostoru i při maximálních kluzných rychlostech (c). Přístup odráží VHSL s přepadem. Vzniká zde však riziko ovlivnění přesnosti měření unášeným mazivem.



Obr. 4-29 a) Nucený oběh maziva; b) Oběh pomocí kanálků; c) Gravitační plnění

Morfologická analýza

Některé konstrukční modifikace byly kvůli některým svým omezením a vlastnostem vyřazeny. Určité metody jsou s některými nekompatibilní. Proto byla vytvořena matice ve které jsou vypsány možné morfologické derivace produktu a lze je efektivněji skládat dohromady (viz Tab. 4-6).

Tab. 4-6 Výběr konstrukčních modifikací

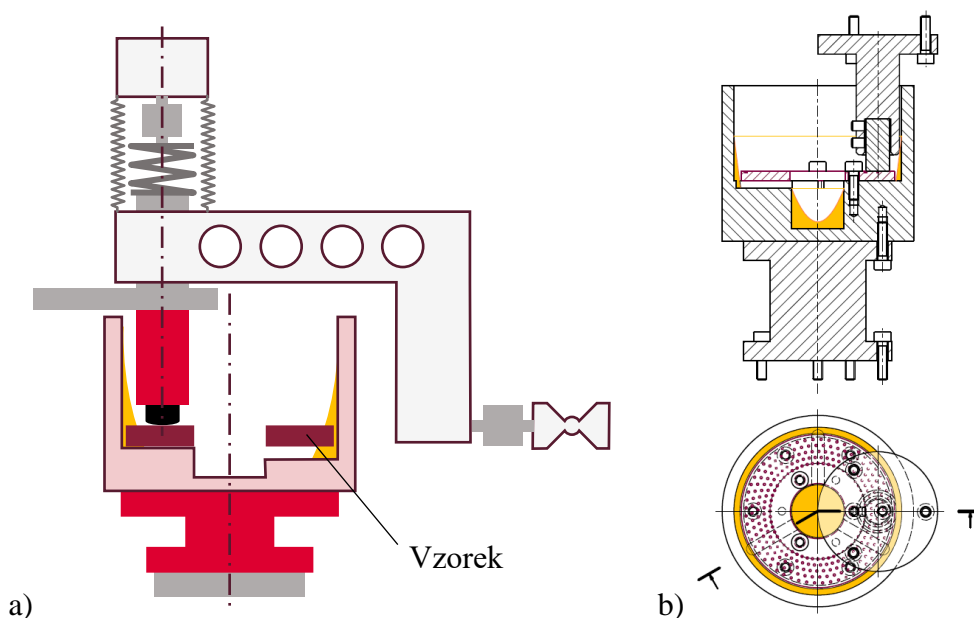
Funkce	Řešení 1	Řešení 2	Řešení 3	Řešení 4
Naklápění kontaktu	Použití současného mechanismu	Modifikace současného	Výroba nového mechanismu	...
Uchycení pinu	Přesný otvor a stavěcí šroub	Upínací čelisti	Objímka	Kleština
Uchycení disku	Jedním šroubem	Více šrouby	Jemným závitem mezi díly	Upínkou
Nádoba na mazivo	Nádoba se dnem	Bezdná s okrajem	Nádoba se dnem i okrajem	Dvoudílná nádoba
Oběh maziva	Nucené	Kanálky	Gravitačně	...

Koncept 1

Tab. 4-7 Konfigurace konceptu 1 s možnými modifikacemi

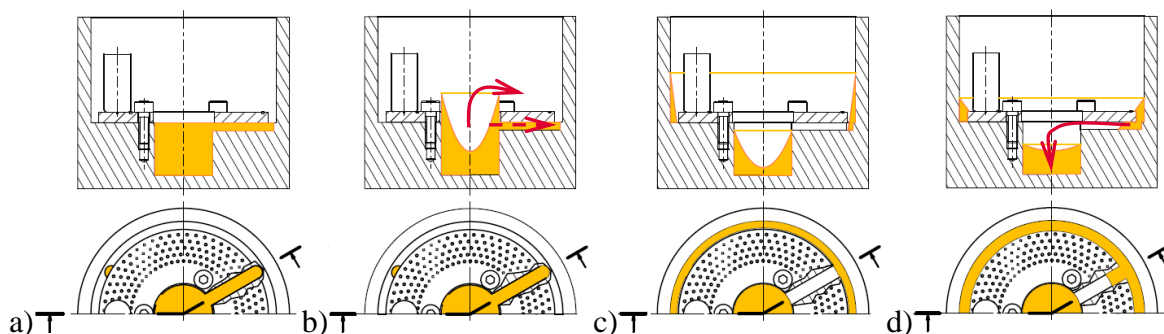
Funkce	Řešení 1	Řešení 2	Řešení 3	Řešení 4
Naklápění kontaktu	Použití současného mechanismu	Modifikace současného	Výroba nového mechanismu	...
Uchycení pinu	Přesný otvor a stavěcí šroub	Upínací čelisti	Objímka	Kleština
Uchycení disku	Jedním šroubem	Více šrouby	Jemným závitem mezi díly	Upínkou
Nádoba na mazivo	Nádoba se dnem	Bezdná s okrajem	Nádoba se dnem i okrajem	Dvoudílná nádoba
Oběh maziva	Nucené	Kanálky	Gravitačně	...

První návrh (Tab. 4-7) používá současný naklápěcí mechanismus. Jeho spodní část je odmontována a je zde připevněn nový efektor. Upnutí pinu probíhá díky přesnému uložení a stavěcímu šroubu. K rotačnímu modulu je šroubovým spojem připevněn stojan, díky kterému je nádoba ve správné výšce vůči senzoru. Nádoba je jednodílná s plochým dnem, do kterého je vytvořený otvor, ve kterém je mazivo, kvůli vyrobitelnosti nemá okraj. Do dna jsou vyfrézovány drážky. Pomocí tří šroubů se ke dnu přimontují vzorky ve tvaru prstence. Uzavřou se drážky a stanou se z nich kanálky.



Obr. 4-30 a) Ilustrace konceptu 1; b) předběžný návrh

Kanálky (Obr. 4-31) využívají změny rozložení tlaku v osovému průřezu a maximálního průtoku maziva kanálkem. Na začátku experimentu se nádoba rychle roztočí, což způsobí rychlou změnu tvaru hladiny oleje. Mazivo částečně protéká kanálky, ale zároveň přetéká přes vnitřní hranu vzorku, a tím zalévá kontakt. Zpomalování je postupné, proto při něm nedochází k přetečení hrany a mazání kontaktu, ale celý objem postupně proteče kanálky zpět do vytvořeného otvoru. Soustava pravidelně zásobuje kontakt mazivem, a přitom zde není tak velké množství oleje, aby hrozilo jeho přetečení přes vrchní hranu nádoby.



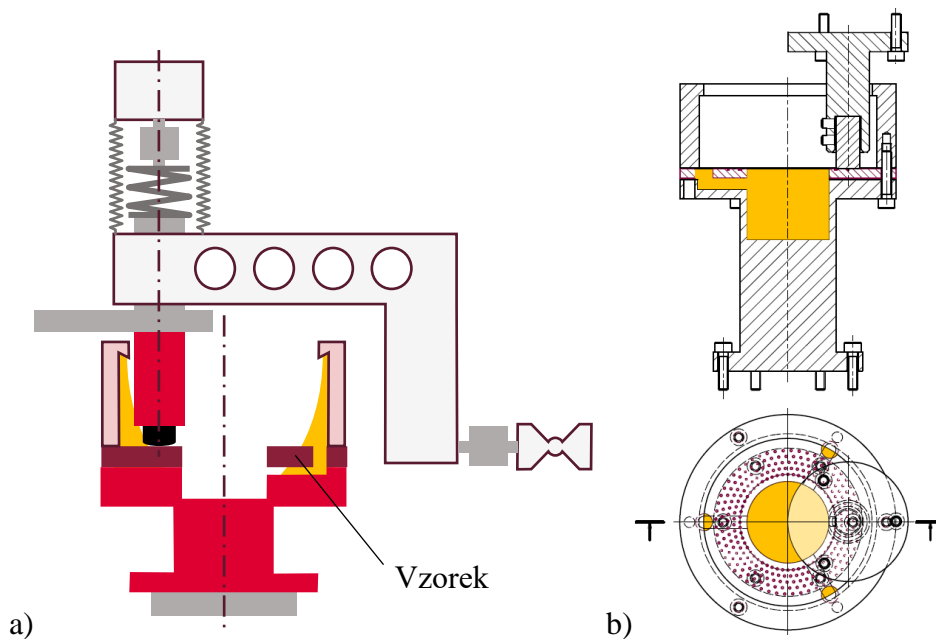
Obr. 4-31 Funkce a princip kanálků a) $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; b) $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; c) $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; d) $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Koncept 2

Tab. 4-8 Konfigurace konceptu 2 s možnými modifikacemi

Funkce	Řešení 1	Řešení 2	Řešení 3	Řešení 4
Naklápění kontaktu	Použití současného mechanismu	Modifikace současného	Výroba nového mechanismu	...
Uchycení pinu	Přesný otvor a stavěcí šroub	Upínací čelisti	Objímka	Kleština
Uchycení disku	Jedním šroubem	Více šrouby	Jemným závitem mezi díly	Upínkou
Nádoba na mazivo	Nádoba se dnem	Bezdná s okrajem	Nádoba se dnem i okrajem	Dvoudílná nádoba
Oběh maziva	Nucené	Kanálky	Gravitačně	...

Druhý koncept (Tab. 4-8) je prvnímu v mnoha ohledech podobný. Hlavním rozdílem je tvar nádoby na olej. Ta má horní okraj proti přetečení oleje a nemá dno. Jako dno slouží stojan, ve kterém jsou drážky, otvor a díry pro šrouby. Dno se přiloží těsnění a poté vzorek, ve kterém musí být vytvořeny díry na protažení šroubů a vývody z kanálků. Následně se na vzorek pokládá další těsnění a následně i nádoba (víko). Celá sestava je následně pomocí tří šroubů smontována.



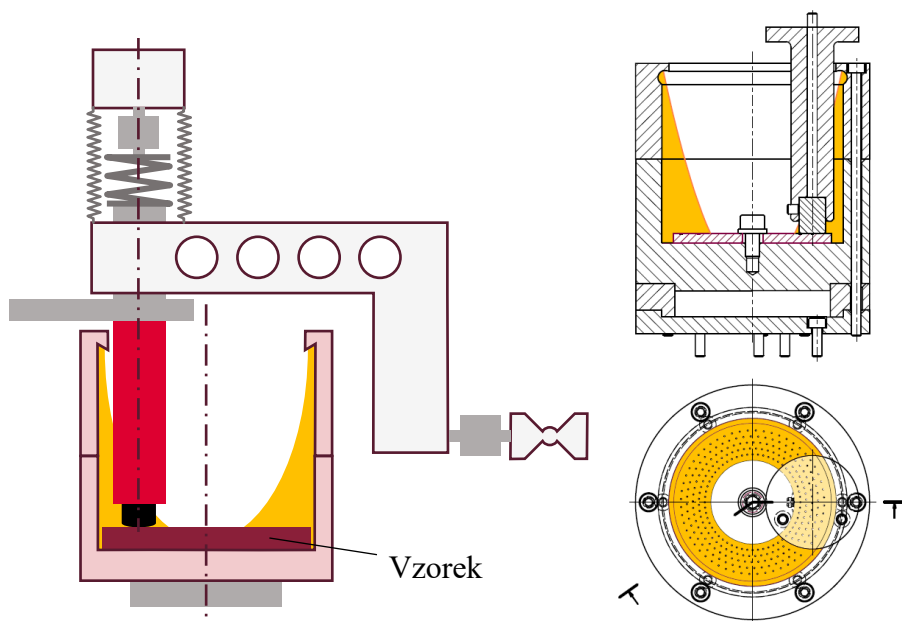
Obr. 4-32 a) Ilustrace konceptu 2; b) předběžný návrh

Koncept 3

Tab. 4-9 Konfigurace konceptu 3 s možnými modifikacemi

Funkce	Řešení 1	Řešení 2	Řešení 3	Řešení 4
Naklápění kontaktu	Použití současného mechanismu	Modifikace současného	Výroba nového mechanismu	...
Uchycení pinu	Přesný otvor a stavěcí šroub	Upínací čelisti	Objímka	Kleština
Uchycení disku	Jedním šroubem	Více šrouby	Jemným závitem mezi díly	Upínkou
Nádoba na mazivo	Nádoba se dnem	Bezdná s okrajem	Nádoba se dnem i okrajem	Dvoudílná nádoba
Oběh maziva	Nucené	Kanálky	Gravitačně	...

Koncept číslo tři (Tab. 4-9) uvažuje plně zaplavený kontakt mazivem. Nádoba je dvoudílná, skládá se z vaničky a z víka. Vanička je kruhová nádoba s plochým dnem, ve kterém je vyvrtaná díra a je v ní závit, aby bylo možné pevně připevnit vzorek. Horní hrana vaničky končí v maximálním místě aktuátoru. Na vrchní hranu je umístěno těsnění a na něj připevněno víko, které má hranu proti přetečení. Celá sestava využívá maximální zástavbové rozměry a propozice tribometru, aby mohlo být v nádobě co nejvíce maziva a mohlo být dosaženo požadované rychlosti.



Obr. 4-33 a) Ilustrace konceptu 3; b) předběžný návrh

4.6.7 Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího

Koncept 1

Tento koncept dodržuje podmínky experimentu. Jediným nedostatkem je mazání, které bylo označeno jako snesitelné. Výsledné hodnocení je adekvátní v oblasti podmínek experimentu, protože ostatní parametry experimentu jsou ideální. Kompatibilita s tribometrem je celkově ideální, protože dodržuje všechny předpokládané funkce i omezení. Dokonce má i třecí kontakt ve stejné výšce, jako je umístění senzoru třecí síly. Při testování rozebíratelnosti ve virtuálním prostředí se ukázalo, že není možné vyměnit olej a vzorek bez nutnosti rozebrání nádoby i naklápečího přípravku. Hlavní příčinou je výška nádoby a malý rozsah pohybu aktuátoru. Není možné zvednout celý přípravek tak vysoko, aby bylo možné vyjmout nádobu. Není dodržen nutný cíl, a proto je hodnocení rozebíratelnosti a montáže označen jako nevyhovující. Z tohoto důvodu je konfigurace hodnocena 0 body (4-10).

Tab. 4-10 Hodnocení konceptu 1

Požadavky	Hodnocení
Podmínky experimentu	2
Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000	4
Rozebíratelnost a montáž	0
Výrobní omezení	2
SOUČET:	0

Koncept 2

Podmínky experimentu a kompatibilita s tribometrem jsou hodnoceny stejně jako u konceptu 1. Rozebíratelnost a montáž je hodnocena jako snesitelná (Tab. 4-11). Hlavním důvodem hodnocení je nutnost odsát z nádoby mazivo při každém rozebírání. Při povolení šroubových spojů z nádoby vyteče zbylý olej do okolí. Není dodržitelná čistota a hygiena na pracovišti. Výrobní hodnocení je adekvátní. Důvodem jsou vysoké náklady na výrobu stojanu. Jedná se o strojní součást, u které by bylo nutné soustružit na dvě upnutí a zároveň i frézovat. Největší komplikace vzniká u výroby vzorků, kde je kromě soustružení potřeba použít i vrtání. Vzorků bude vyhotoveno velké množství, a tím se značně prodražuje jejich výroba. U materiálů, kde bude nanášena i kluzná vrstva, není jistá jejich vyrobiteľnosť.

Tab. 4-11 Hodnocení konceptu 2

Požadavky	Hodnocení
Podmínky experimentu	2
Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000	4
Rozebíratelnost a montáž	1
Výrobní omezení	2
SOUČET:	9

Koncept 3

Díky stálému udržování maziva v kontaktu a dodržení minimálních podmínek experimentu na rychlost jsou podmínky experimentu hodnoceny jako dobré (Tab. 4-12). Kompatibilita s tribometrem je ve všech podmínkách ideální až na pozici třetího kontaktu. Kvůli zvýšení výšky nádoby je výška kontaktu rozdílná vůči pozici senzoru. Výsledné nepřesnosti bude nutné softwarově kompenzovat. Proto je zde o stupeň nižší hodnocení. Rozebíratelnost a montáž je adekvátní. Při vyjmutí vaničky je potřebné povolit tři šrouby, vysunout podložku a lze ji celou se vzorkem a olejem vyjmout, aniž by došlo ke kontaminaci okolí. Výrobní omezení vychází jako dobré. Geometrie vzorků je jednoduchá na výrobu.

Tab. 4-12 Hodnocení konceptu 3

Požadavky	Hodnocení
Podmínky experimentu	3
Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000	3
Rozebíratelnost a montáž	2
Výrobní omezení	3
SOUČET:	11

Porovnání

Výsledky hodnocení byly porovnány (Tab. 4-13). Rozhodnutí volby správného konceptu bylo převážně podle celkového počtu získaných bodů podle VDI 2225, kde koncept 3 získal nejvíce bodů. Současně koncept 3 byl v každé oblasti minimálně adekvátní (min 2 body). Třetí fakt je, že ze všech tří konceptů má nejlepší hodnocení z pohledu dodržení podmínek experimentu.

Tab. 4-13 Hodnocení konceptu 3

Požadavky	Hodnocení K1	Hodnocení K2	Hodnocení K3
Podmínky experimentu	2	2	3
Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000	4	4	3
Rozebíratelnost a montáž	0	1	2
Výrobní omezení	2	2	3
SOUČET:	0	9	11

Konstrukční návrh

Koncepční návrh byl natolik důkladný, že pomocí něho bylo možné navrhnout finální řešení. Pro určení základních rozměrů a ověření kritických míst byl využit matematický model. Na základě výpočtu bylo vytvořeno tvarové řešení s finálními rozměry. Byly určeny vhodné materiály a specifikovány výrobní technologie. Pro zlepšení manipulace s díly byla upravena jejich geometrie.

4.6.8 Matematický model hladiny oleje

Matematický model byl použit pro maximální využití zástavbového prostoru tribometru a zajištění funkce kritických míst.

Tvar hladiny oleje

Matematický model tvaru hladiny oleje v nádobě byl potřeba kvůli predikci jeho chování a zajištění minimální požadované rychlosti kontaktu bez přetečení oleje mimo nádobu. Úkolem bylo navrhnout parametry otevřené nádoby, která udrží mazivo v jejím prostoru a zároveň v třecím kontaktu. Cílem bylo zaručit co nejvyšší kluznou rychlost.

Vstupní proměnné parametry a jejich omezení

- Výška nádoby (max. prostor tribometru = 160 mm)
- Otáčky (max. otáčky rotačního modulu = 2000 rpm)
- Vnější průměr nádoby (max. prostor tribometru = 150 mm)
- Tíhové zrychlení ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)
- Minimální rychlost na ploše pinu (minimální kluzná rychlost = $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Cílená rychlost na ploše pinu (maximální otáčky VHSL = 1 až $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Posun aktuátoru tribometru (nad nominální polohu = závislý na poloze)
- Tvarové řešení upnutí vzorku a uložení nádoby konceptu 3

Požadované výstupní parametry a jejich omezení

- Nominální střední průměr (max. velikost kvůli výrobě = 100 mm)
- Vnější průměr nádoby (max. prostor tribometru = 150 mm)
- Objem maziva (redukce)
- Nominální maximální otáčky (max. otáčky rotačního modulu = 2000 rpm)
- Výška dělení nádoby
- Konkrétní rozměry a tvary dílů

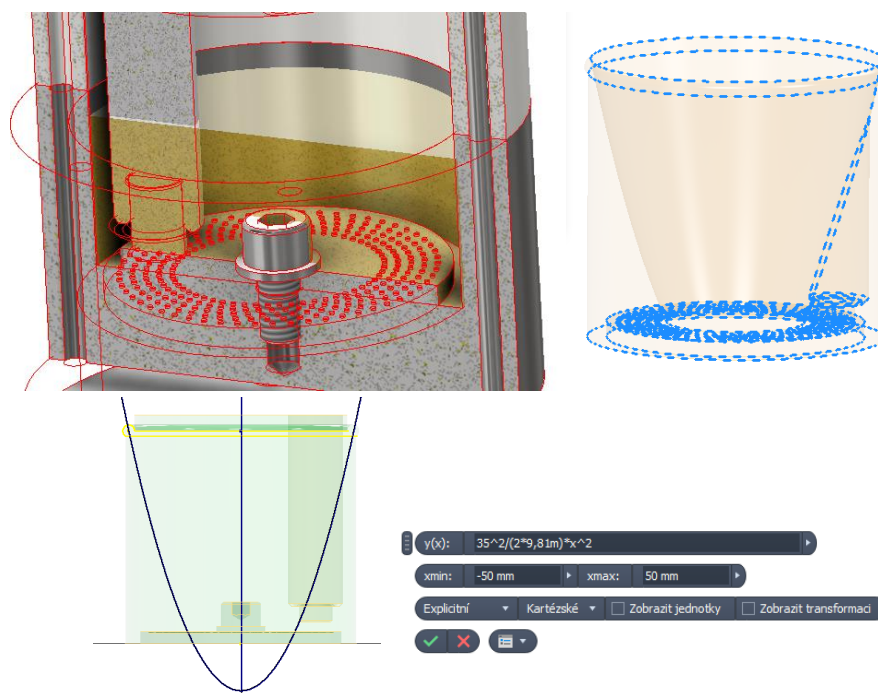
Metody a řešení

Jedná se o neurčitou soustavu parametrů (více řešení), které mají své maximální rozsahy. Pro jejich výpočet byl použitý matematický model z mechaniky tekutin pro rovnoměrně zrychlený pohyb. Teorie zanedbává tranzientní chování přechodového stavu tekutiny a určuje její stav v dokonale ustálené podobě. Při výpočtu není uvažováno vnější napětí kapaliny a změna rychlosti a tlaku kapaliny při setkání s překážkou. Výpočet používá Eulerovu rovnici hydrostatiky. Z ní lze vyjádřit rovnici hladinové plochy [50].

$$y = \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \cdot r^2 + C \quad (4.1)$$

Rovnice (4.1) byla využita v návrhovém programu Inventor, kam byla vložena i celá sestava konceptu modulu. Na základě vytvoření negativní geometrie modulu, rovnice 3D plochy a základních binárních operací byla vytvořena geometrie oleje (Obr. 4-34). Hlavní parametrizované parametry byly otáčky, nominální průměr, tloušťka nádoby a objem. Vytvořená soustava byla optimalizační metodou gradientového spádu upravena. Bylo manipulováno s parametry tak, aby byly dodrženy všechny parametry (s dodrženu podmínkou zaplavení kontaktu). Bylo zjištěno, že lze nominální průměr variovat v rozsahu 42 až 100 mm. Kvůli snížení hmotnosti dílů a velikosti plochy vzorku byl zvolen nominální

průměr 50 mm. Při tomto nominálním průměru a objemu oleje 120 ml je možné dosáhnout kluzné rychlosti až $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 4-34 Foto tvorby modelu objemu oleje

Při testování parametrů byly optimalizovány parametry nádoby jako například bezpečnostní okraj, minimální rozměry nádoby, pozice jednotlivých dílů a průměr efektoru naklápěcího přípravku. Byl odstraněn jeden díl (vločka). Na základě podmínky stejného objemu bylo vypočítáno, jak vysoko bude hladina při nulové rychlosti. Nádoba byla nad hladinou s bezpečností 3,5 mm rozdělena na dvě části.

Výsledky

- Nominální střední průměr = 50 mm
- Vnější průměr nádoby = 100 mm
- Objem maziva = 120 ml
- Nominální maximální otáčky = 344 rpm
- Výška dělení nádoby = 50 mm
- Nádoba byla optimalizována a upravena tak, aby odpovídala vypočítaným parametrům.

4.6.9 Tvarové řešení

Výsledné tvarové řešení reflektuje koncept 3. Jeho detailnější provedení a přesné rozměry byly upraveny díky tvorbě matematického modulu. Volba vhodných rozměrů funkčních dílů byla navržena na základě výpočtů. Připojovací rozměry byly získány měřením tribometru.

Ověření volby vhodného spojovacího materiálu pro upevnění vzorku

Zatěžování pinu (max 400 N) bude působit na nominálním průměru 50 mm (rameno 25 mm). Při maximálním součiniteli tření 0,15. Maximální moment v ose šroubu bude:

$$M = F_z \cdot \mu \cdot \frac{D_N}{2} = 400 \cdot 0,15 \cdot \frac{50}{2} = 1\,500 \text{ Nmm} \quad (4.2)$$

Pro upevnění bude použit metrický šroub M6 pevnosti 8.8. Zkušební zatížení šroubu je 11 600 N. Podložka pod šroubem má vnější průměr 12 mm. Nejvýznamnější přenos síly mezi šroubem a vzorkem se nalézá na průměru 9 mm (rameno 4,5 mm). Z definované geometrie lze dopočítat smykovou sílu v kontaktu:

$$F_s = \frac{M}{D_p/2} = \frac{1\,500}{9/2} = 333 \text{ N} \quad (4.3)$$

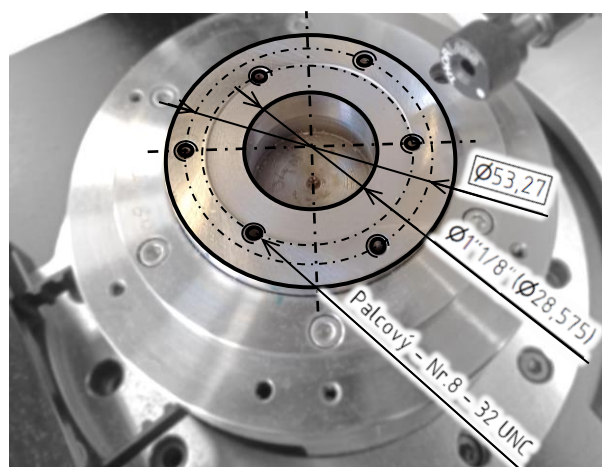
Je potřeba vypočítat návrhovou sílu předpětí [51]:

$$F_{p,c} = \frac{Y_{M3}}{k_s n \mu} \cdot F_s = \frac{1,25}{1 \cdot 1 \cdot 0,15} \cdot 333 = 2\,775 \text{ N} \quad (4.4)$$

Vypočítaná síla je 4,2krát menší, než je zkušební zatížení šroubu M6 (návrhová hodnota utažení šroubu). Bezpečnost při utažení je $K = 4$, díky čemuž lze šroub utahovat ručně bez použití momentového klíče.

Reverzní inženýrství

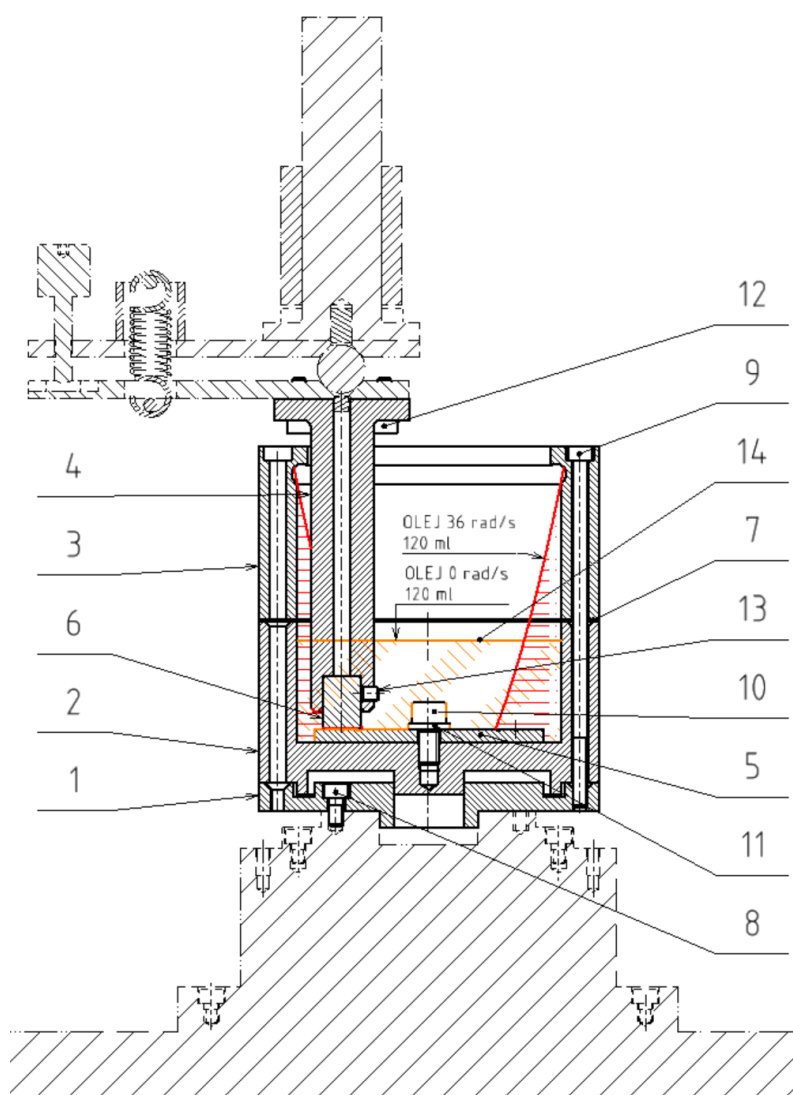
Tribometr je vyroben v palcové soustavě, což značně komplikuje návrh a výrobu modulu. K zařízení nebyly získány žádné výrobní výkresy, ani jiná podrobná dokumentace. Bylo nutné odměřit jednotlivé části. Naměřené hodnoty byly porovnávány vůči uměle vytvořené tabulce palcových rozměrů a určeny přesné rozměry přípojních bodů (Obr. 4-35).



Obr. 4-35 Metrologické měření rotačního modulu tribometru

Konečné řešení

Celý modul se skládá ze čtyř nenormalizovaných dílů (viz Obr. 4-32). Hlavní sestavou je nádoba na olej, která je složena ze dvou dílů, které mezi sebou odděluje těsnění (poz. 7). První je vanička o vnějším průměru 100 mm (poz. 2) s plochým dnem, ve kterém je vytvořen závit. Pomocí něho a šroubu s podložkami (poz. 10,11) je připevněn vzorek. Na vrchní hraně víka (poz. 3) je vytvořen zápich, který připomíná otočený okap. Slouží k ustálení stoupající hladiny oleje (poz. 14) a vrácení oleje zpět do středu nádoby. Skrz víko a vaničku jsou vyvrtané otvory pro provléknutí šroubů (poz. 9). Šroubují se do stojanu modulu (poz. 1), který funguje jako platle/matice. Stojan slouží zároveň jako redukce mezi palcovým a metrickým systémem, jako středící prvek a jako základna, kterou lze vyrovnávat. Díl je připojen palcovými šrouby (poz. 8) k rotačnímu modulu tribometru. Pin (poz. 6) je utažen stavěcím šroubem (poz. 13) k uchycení pinu (poz. 4). Uchycení pinu je připevněno původními metrickými šrouby (poz. 12) k naklápěcímu přípravku. Podrobněji viz výkresová dokumentace.

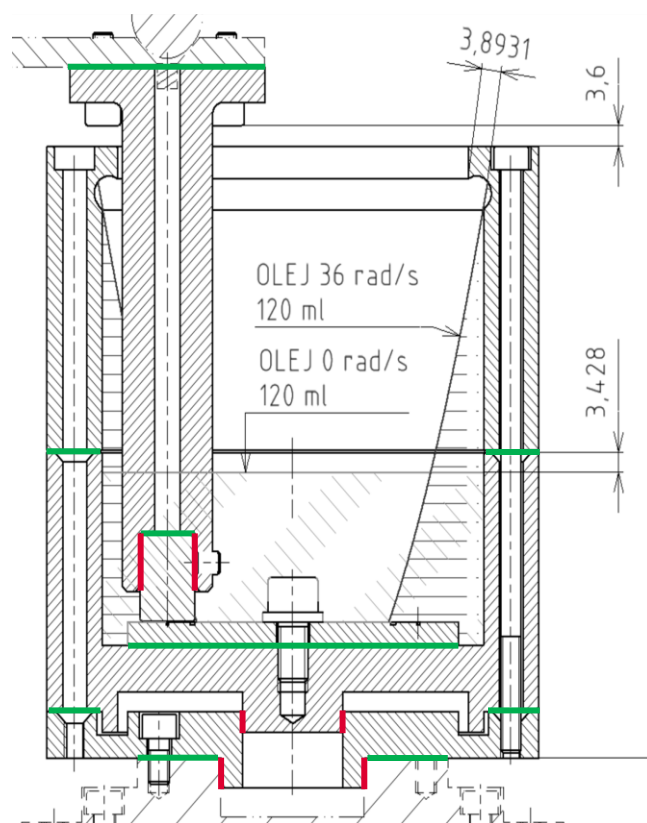


Obr. 4-36 Výkres sestavy modulu

Geometrické tolerance a tolerování rozměrů

Kvůli dodržení požadované přesnosti měření byly navrženy vhodné geometrické tolerance. U tribometru je měření radiální síly řešeno pomocí páky. Konfigurace se vyznačuje citlivostí na výrobní přesnost. Ta se projevuje vznikem parazitní radiální síly na tenzometru třecí síly. Lze naměřit nenulové tření i bez pohybu disku. Aby se chybě při měření předešlo, byl kladen důraz na uchycení pinu. Aby bylo dodrženo jeho uložení (11 H8/g6) a byl kolmý na dosedací plochu polohovacího přípravku.

Kvůli snížení házení kluzné plochy a opakovatelnosti měření jsou na spojovaných plochách sníženy tolerance rovinnosti a rovnoběžnosti. Aby bylo možné dosáhnout co nejvyšší rychlosti otáček a nedošlo k lokálnímu přetečení oleje hrany nádoby kvůli nesouososti, byly do návrhu přidány i tolerance souososti a přesné uložení (Obr. 4-37; podrobněji viz výkresová dokumentace). Celkové navržené maximální axiální házení na průměru 50 mm je 0,06 mm.



Obr. 4-37 Oblasti uložení jednotlivých dílů

4.6.10 Určení materiálu a specifikace výrobních technologií

Díly jsou v kontaktu s mazivem. Aby nedošlo k jeho kontaminaci, musely být vyrobeny z materiálu inertního vůči hydraulickému oleji HP 46. Nabízela se proto standardní konstrukční ocel. Pro jednodušší manipulaci byly některé díly vyrobeny z hliníkové slitiny. Jako těsnící prvek bylo použito těsnění vyrobené z materiálu NBR (těsnící guma).

Pro výrobu součástí bylo využito konvenčních technologií obrábění. Tvary dílů jsou upraveny pro soustružení. Polotovarem bude kulatina D100. Do dílů budou vyvrtány díry a vytvořeny závity pro spojování sestavy. Kontaktní plochy budou kvůli dodržení požadovaných vlastností broušeny stejně jako kluzné plochy pinu a vzorků.

4.6.11 Ergonomické řešení, bezpečnost a hygiena

Při návrhu byla soustředěna pozornost na jednoduchost a snížení času výměny vzorku. Vanička má vnější rozměr 98 mm, který je možné uchopit do jedné ruky. Její hmotnost byla snížena minimalizací objemu materiálu a volbou lehčí hliníkové slitiny. Na spodní části nádoby je vystouplý prstenec, který neslouží ke středění, ale k zaručení stability vaničky. Lze postavit na jakoukoli rovnou plochu a nedojde k jejímu převrácení. Na samotném stojanu je vytvořena plocha, aby bylo možné bezpečně vyjmout vaničku i s olejem bez vysokého rizika převrnutí nádoby a znečištění přístroje.

Zajištění modulu je řešeno třemi dlouhými šrouby. Šrouby není nutné celé vyndávat, stačí je vysunout pouze o 50 mm. Proto, aby v spojovací materiál zůstal na svém místě, byly z 3D tisku vytištěny deformovatelné úchyty (kolíčky). Při opětovném skládání stačí umístit vaničku na své místo a povolit kolíčky. Všechny díly mají stejný vnější průměr, díky čemuž je jednoduché je navzájem vystředit. Vzájemným otáčením dílů (max o 30°) šrouby díky zkosení zapadnou až do závitu a stačí dotáhnout.

Bezpečnost je řešena pomocí ochranného rámu a krytu celého zařízení. Zařízení s modulem může používat pouze proškolený personál.

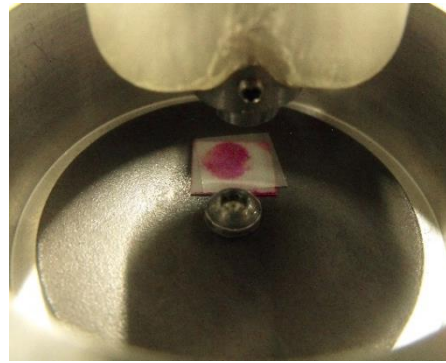
4.6.12 Testování a úpravy experimentálního modulu

Mezi návrhem modulu a jeho výrobou došlo k značným konstrukčním úpravám na tribometru kvůli poškození snímače třecí síly. Při opravě bylo využito jiného typu snímače (s ochranou proti přetížení), který měl odlišné zástavbové rozměry. Proto bylo upraveno celé zatěžovací rameno a změnil se tím rozsah využití rozsahu aktuátoru kvůli fyzické kolizi ramene v maximální pozici s rámem. Konstrukční chyba způsobuje znemožňuje vysunutí vaničky podle původně navrhovaných postupů. Třídílná konstrukce modulu dovoluje využít polohovacího systému tribometru pro ustavení celého stolu. Je možné posunout stůl o 100 mm mimo osu a celou nádobu vyjmout ve vodorovném stavu. Proces byl automatizován, vyjmutí je rychlé a jednoduché. Je však nutné dbát na správnou manipulaci s vaničkou, aby nedošlo ke vzpříčení dílů a následné kolizi.

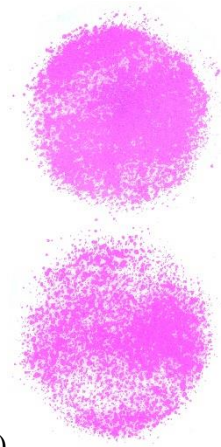
Díky naklápěcímu mechanismu bylo možné vyrovnat axiální házení pinu pod 0,01 mm pomocí vkládání kalibračních plíšků (Misumi) pod pin (Obr. 4-38a). Kontrola byla prováděna pomocí tlakově senzitivních folií (FUJIFILM Prescale, viz Obr. 4-38b,c).



a)



b)

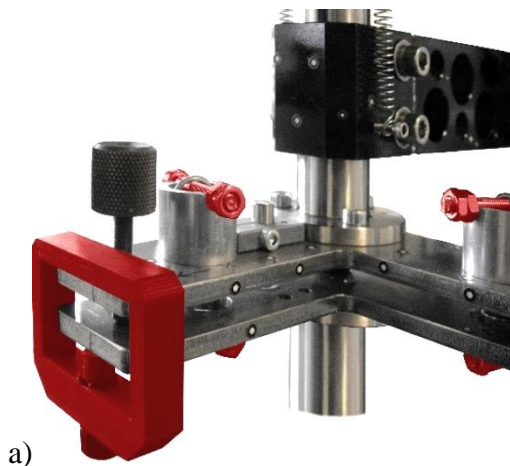


c)

Obr. 4-38 a) Kalibrační plíšky; b) kontrola kontaktu; c) výsledky z testování

Při otočení směru otáčení, při maximálním zatížení a rychlostech blízkých nule došlo k překonání síly dotlačování pružiny u naklápěcího mechanismu a k ztrátě stability celého přípravku (vybočení). Problém byl vyřešen využitím svěrky (Obr. 4-39a), která zde funguje při experimentu jako pojistka proti přetížení pružiny (snižuje požadavky na pružinu). Při dlouhodobých testech došlo k poruše, hladké kolíky se vlivem vibrací posunuly, což způsobilo selhání funkce součásti. Kvůli bezpečnosti byly hladké kolíky nahrazeny pomocí šroubů, u kterých bylo selhání pojištěno tvarovým prvkem.

Kvůli vysoké viskozitě oleje a vysoké kvalitě drsnosti a rovinnosti dílů není možné jednoduše oddělit po demontáži šroubu vzorek od vaničky. Po dotažení šroubu vzorku a proběhnutí testů je vytlačen vzduch mezi díly. Vzniká zde podtlak, který drží plochy u sebe. Bylo nutné do vaničky vyfrézovat drážku pro možnost podebrání vzorku (Obr. 4-39b). Byl vyroben háček pro snadné podebrání. Díky páce bylo možné překonat přítlačnou sílu a bez poškození dílů vyjmout vzorek. U vzorků vyrobených z plastů s nízkou tuhostí nebylo možné dosáhnout dostatečného předpětí upevnění šroubu, kvůli tvarovému zajištění vzorku byla do dna vyvrtána díra se závitem M3.



a)

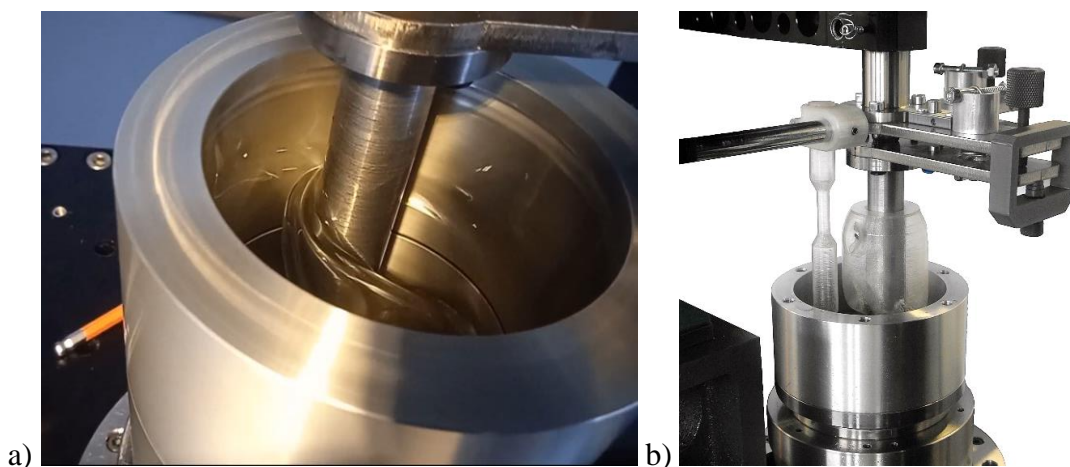


b)

Obr. 4-39 a) Upínací svěrka, náhrada kolíků; b) drážka pro vyjmutí vzorku a závitová díra

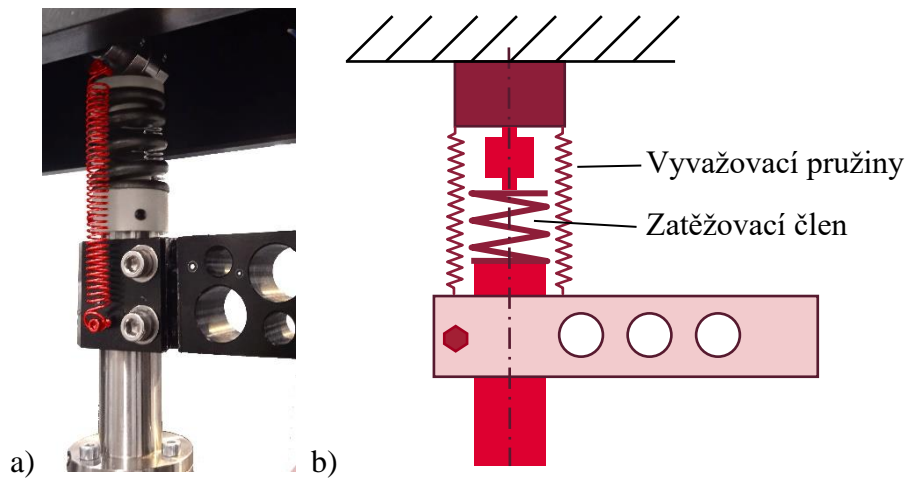
Nádoba byla navržena na maximální otáčky 344 rpm. Olej naráží do dříku, což nezvyšuje výšku hladiny, jak se původně předpokládalo, ale lokálně zpomaluje tok oleje (Obr. 4-40a). Olej se nedokáže ustálit a výška hladiny není schopná dosáhnout při těchto otáčkách horního okraje. Bylo testováno chování hladiny oleje v rozsahu 0-1000 rpm. Při postupném náběhu nedojde k vytečení oleje až do 700 rpm. Při 800 rpm se hladina stává nestabilní a začíná oscilovat ve štěrbině mezi dříkem a stěnou nádoby. Kolísání způsobuje náhlé vlny a deformaci vodní hladiny. Změna toku má za následek oddělení drobných kapek z olejového proudu a emisi oleje do okolí. Maximální rychlost modulu je proto dvojnásobná vůči očekávané. Je však nutné dbát na plynulý náběh rychlosti, jinak dojde k oddělení vodního proudu a přetečení hrany.

Při prvním škálování testů se ukázalo, že doba u nejpevnějšího materiálu (oceli), která je potřeba na určení dostatečné přesnosti opotřebení, je vyšší, než je časově možné provést. Doba testu je kvůli škálování díla a modelu značně delší, hlavním důvodem je doba, kdy je plocha vzorku (disku) v kontaktu. Pro snížení měřítka byl redukován nominální průměr otáčení z 50 na 22 mm. Bylo nutné vyrobit nový spojovací materiál, aby nedocházelo ke kolizi pinu a dříku. Vzdálení dříku od okraje nádoby zapříčinilo návrat maximálních otáček zpět na 344 rpm. Proto byly navrženy deflektory (Obr. 4-40b), které snižovaly rychlost kapaliny. Díky konstrukční úpravě byl modul schopný dosáhnout rychlosti až 1200 rpm bez přetečení hrany. Při urychlování docházelo k úniku oleje do prostoru, po vyladění pozice druhého deflektoru a změny objemu oleje (115 ml) už k emisi nedocházelo.



Obr. 4-40 a) Chování hladiny oleje; b) Deflektory oleje

Při montáži bylo zjištěno, že nový efektor naklápěcího přípravku kvůli zvýšení hmotnosti způsobuje přetížení vyvažovacích pružin, které udržují kontakt mezi aktuátorem a dříkem. Z důvodu zvýšení přítlaku byly vyměněny za pružiny s vyšší tuhostí (Obr. 4-41).



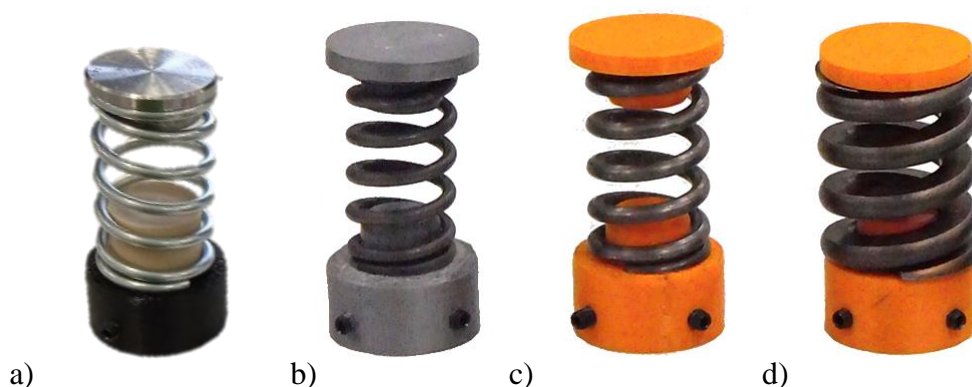
Obr. 4-41 a) Fotografie vrchní části zatěžovacího mechanismu; b) Schéma funkce

Při zatížení a roztočení celého zařízení v chodu dochází k silným oscilacím sil ve frekvenci otáček. Hlavním vlivem bylo označeno axiální házení rotační základny (Obr. 4-42). Pro vyrovnání bylo využito kalibrovaných ocelových pásků, kterými byl podkládán celý stojan modulu. Díky tomuto postupu bylo sníženo čelní házení na průměru 50 mm na 0,017 mm. Po vyladění soustavy došlo k snížení vlivu oscilací, ale byly stále významné.



Obr. 4-42 Vyrovnání stojanu modulu

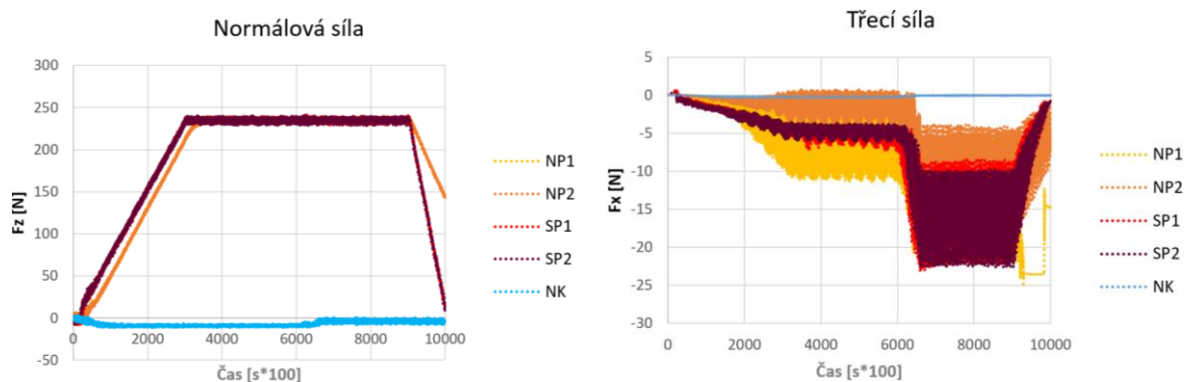
Jednou z možností vzniku vibrací je nevhodné udržování pinu v kontaktu. Pro snížení vlivu je v zatěžovací soustavě volně umístěný pružný zatěžovací člen. Jedná se o tlačnou šroubovitou pružinu s opracovanými konci. Pro 1 kN snímač se používá robustní pružina (Obr. 4-43d), u které se projevovala veliká vůle v upevnění náhlými skoky při zatížení. Proto byl navržen nový plastový přípravek se stavěcími šrouby, aby se vymezila vůle a nedocházelo k náhlým skokům v měření. Pro 100 N snímač se používá pružina s nižší tuhostí (Obr. 4-43a). Proběhlo testování pružin. Ukázalo se, že pružina s menším průřezem drátu není schopná dosáhnout požadované síly 236 N, už při 150 N se pružina blíží ke svému maximálnímu zatížení. Druhá pružina (Obr. 4-43d) má tak vysokou tuhost, že nereaguje na rychlé změny, které v kontaktu probíhají.



Obr. 4-43 Testované pružné zatěžovací členy

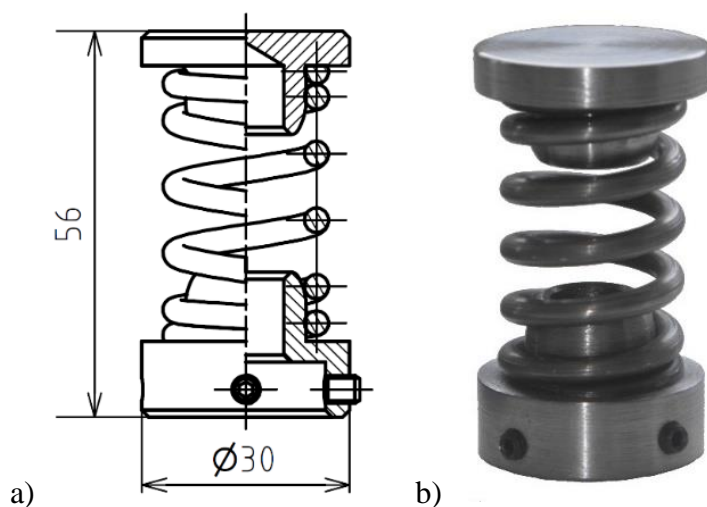
Bylo proto nutné navrhnout do mechanického obvodu novou pružinu, která stabilizuje kontakt. Byly použity dvě metody výpočtu. První na základě návrhu vhodné tuhosti dle vzoru výrobce (škálování). Druhá metoda hledala nejnižší tuhost pružiny, která je schopná přenést zatížení. Omezení vycházelo i ze zástavbových rozměrů. Výpočty vyšly rozdílně, a proto byly nakoupeny obě (Obr. 4-43b,c).

Pružiny byly testovány. Test spočíval v zatížení soustavy na 236 N a roztočení na 460 rpm. Po 30 sekundách byla snížena rychlost na 150 rpm a po dalších 30 sekundách byl test zastaven (Obr. 4-44). Při testu se hodnotila velikost vibrací (směrodatná odchylka). Nová pružina (Obr. 4-43b) nejlépe udržuje zatížení v kontaktu. Druhá navržená pružina má větší rozkmit zatěžovací síly (0,7 %), ale na senzoru třecí síly (důležitější veličiny) je amplituda nižší. Pro výzkum byla použita pružina s vyšší tuhostí (Obr. 4-43c).



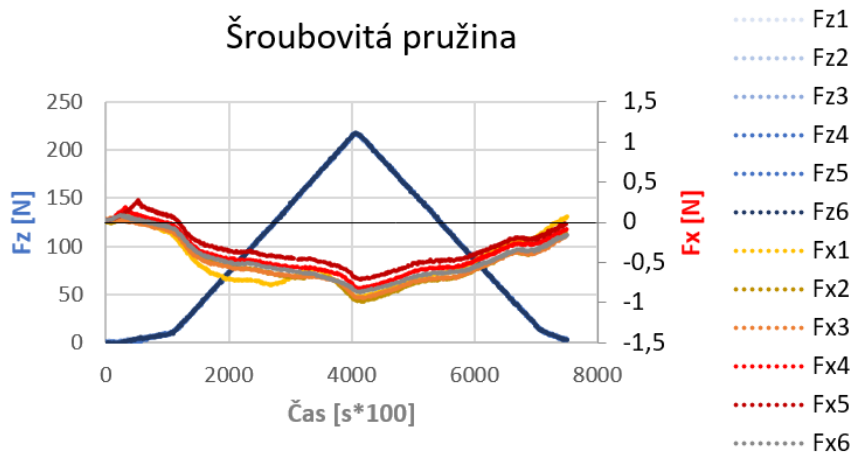
Obr. 4-44 Výsledky dynamického testu (NP – Nové pružiny; SP - Původní pružina; NK - měření bez zatížení)

Při delším zatěžování klesala zatěžovací síla. Hlavním důvodem byla elasticita 3D tištěných dílů. Řešením bylo vyrobit spojovací díly z oceli na soustruhu (Obr. 4-45) pro zaručení opakovatelnosti. Soustava se skládala ze spojky, pružiny a zatěžovací desky. Spojka byla oproti původní konstrukci obdařena přesným otvorem a stavěcími šrouby, které zabrání pootočení a zlepší opakovatelnost. Na dosedací desce byla broušena dosedací plocha. Na dílech byla vytvořena na upevňovacích trnech tečná zaoblení, aby nedocházelo při stlačení pružiny ke kolizi se závity. Díly byly ve svém středu odvrtány pro snížení hmotnosti. Nová pružina byla opakovaně testována, výsledek opakovatelnosti měření je 3,5 %.



Obr. 4-45 Pružný zatěžovací člen: a) výkres; b) foto

Kvůli zjištění přesnosti vyhodnocení třecí síly byl navržen test. Spočíval v zatížení na 250 N a zpět na nulu (Obr. 4-46). Byla sledována stabilita přitlačného prvku. Hodnotícím faktorem byla velikost parazitní síly na senzoru třecí síly. Při definovaném testu měla nová šroubovitá pružina velikost parazitní síly 0,4 % z celkové zatěžovací síly. Pro zvýšení přesnosti vyhodnocení byl test prováděn při každém testování. Postup umožnit chybu eliminovat.



Obr. 4-46 Parazitní síla na senzoru třecí síly při statickém zatěžování

4.6.13 Hodnocení klíčových parametrů

Podmínky experimentu

- Možnost řídit vzájemně tlak v kontaktu a kluznou rychlost: Splněno
- Schopnost simulovat dosednutí ploch při kritickém stavu VHSL: Splněno
 - Kontaktní tlak: 0-5 MPa (min. 2,5 MPa): Splněno 0-10 MPa
 - Opakovatelnost zatížení: $\pm 3 \%$ (max): Splněno $\pm 2 \%$
 - Kluzná rychlost: $0-1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (min. $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$): Splněno $0-1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
 - Přesnost nastavení rychlosti: $\pm 3 \%$ (max): Splněno $\pm 1,75 \%$
(Rozptyl síly 1,25 + Nepřesnost senzoru 0,1 % + Parazitní síla 0,4 %)
- Během experimentu musí být kontakt plně zaplaven mazivem: Splněno

Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000

- Omezení zástavbovými rozměry tribometru: Splněno
 - Maximální výška modulu: 160 mm: Splněno
 - Rozsah posunu aktuátoru: 50 mm (+20 mm; -30 mm): Splněno
- došlo ke konstrukční změně, nové řešení vyjmutí vaničky
 - Maximální délka: 270 mm: Splněno 100 mm
 - Maximální šířka: 150 mm: Splněno 100 mm
- Využití integrovaného zatěžovacího aktuátoru s tenzometrickým snímačem: Splněno
- Využití integrovaného tenzometrického snímače tření: Splněno
 - Přesnost vyhodnocení tření: $\pm 5 \%$ (max): Splněno $\pm 4,1 \%$
(Opakovatelnost naměřené hodnoty 3,5 %, Nepřesnost senzorů 2krát 0,1 %, Parazitní síla 0,4 %)

Rozebíratelnost a montáž

- Nesmí být proveden nevratný zásah do tribometru: Splněno

- Možnost výměny vzorků, pinu a maziva: Splněno
 - Možnost nastavení rovnoběžnosti kontaktu: Splněno
 - Efektivita vzhledem k vysokému počtu měření: výměna vzorku max. 300 s: Splněno 150 – 200 s
 - Minimální ztráty maziva během experimentu: Splněno
- Opakovatelnost měření po sestavení v toleranci 5 %: Splněno 5,2 %
 - Geometrická přesnost dílů: Splněno
 - Díly jsou vyrobené přesněji, než je rotační modul tribometru
- Možnost výměny vzorků, pinu a maziva: Splněno

Výrobní omezení

- Využití materiálů kompatibilních s hydraulickým olejem HPL 46: Splněno
- Vyrobitelnost a dostupnost technologií: Splněno
- Výrobní náklady: Vyrobeno: Splněno

Vyhodnocení

Tab. 4-14 Hodnocení konstrukčního návrhu po všech úpravách

Požadavky	Hodnocení
Podmínky experimentu	4
Kompatibilita s tribometrem Rtech MFT 5000	4
Rozebíratelnost a montáž	3
Výrobní omezení	3
SOUČET:	14

5 VÝSLEDKY

Výsledky experimentů jsou rozděleny do dvou částí. V první části je popsán postup přípravy experimentu a jeho provozní podmínky. V druhé části jsou výsledky jednotlivých experimentů a měření pro různé materiály.

5.1 Kalibrace měření

5.1.1 Příprava zkušebního zařízení pro experiment

Vyvážení stojanu modulu

Stůl rotačního modulu má při sepnutém motoru axiální házení až 0,05 mm. Stojan modulu má odchylku rovnoběžnosti funkčních ploch 0,06 mm. Redukci celkového házení lze snížit vhodným spojením dílů a vymezením kalibračními foliemi (0,01 mm). Celkové čelní házení lze na průměru 50 mm dostat až pod 0,015 mm (na nominálním průměru 22 mm je čelní házení 7 mikrometru).

Rovnoběžnost pinu

Po vyvážení je stojan modulu díky svému broušenému povrchu vhodnou plochou pro vyrovnání čelní plochy pinu. Vyrovnání je provedeno tak, že je dosaženo kontaktu mezi stojanem a pinem. Mezi tyto dvě plochy je vkládána kalibrační fólie (0,01 mm). Vždy ji lze z některé strany vložit do kontaktu. Podle směru vložení se otáčí šrouby na naklápěcím přípravku, až nelze plíšek vložit pod pin. V daný okamžik je úhel mezi rovinami méně než $0,06^\circ$.

Správná pozice pinu

Nejprve je potřeba najet pomocí strojního posuvu stolu tribometru pinem tak, aby byl souosý vůči upínacímu šroubu vzorku. Poté je zadán posun o 11 mm na ose Y. Je dosaženo výchozí pozice pinu experimentu. Jako kontroly je využito měřky. Před spuštěním rotace stolu je nutné ověřit, jestli nedochází ke kolizi mezi komponentami a všechny díly jsou na správné pozici. Kvůli riziku kolize šroubu s pinem je přesnost polohování ± 1 mm.

Další vlivy

Testy probíhaly při pokojové teplotě v rozmezí 20 až 22 °C. V laboratoři souběžně probíhaly další testy, což znemožňovalo použít hlukový senzor. Proto byl faktor hodnocen subjektivně na základě charakteristiky zvuku a jeho intenzity. Teplota kontaktu byla monitorována mezi testy pomocí teplotní sondy. Probíhala kontrola, zda olej nemá vyšší teplotu než 50 °C, teplota v místě kontaktu není známa.

Procedura vyvážení ramene

Po sestavení zařízení bylo nutné vyvážit rameno, aby byla zaručena dostatečná přesnost měření. Nastavení bylo prováděno pomocí změny pozice svěrného spoje mezi dřikem naklápěcího přípravku a ramenem. Vyvážení probíhalo pomocí digitální vodováhy. Díky této metodě bylo dosaženo rovnoběžnosti ramene s rovinou vzorku s přesností 0,02°. Pro dosažení vyšší přesnosti sloužil výše zmíněný statický test. Vyvažování probíhalo, dokud nebyla dosažena přesnost vyhodnocení tření pod 1 %. Následně bylo znovu provedeno vyrovnání pinu. Proběhla kontrola pomocí kalibračních folií.

Rotační test bez zatížení

Před každým testem byla testována funkce zařízení. Celá soustava byla spuštěna pomocí standardního programu, ale bez zatížení. Byla zkontrolována pozice všech komponent a případné kolize. Byly vystředěny díly a testováno chování oleje, aby nebylo nutné přerušovat probíhající test kvůli jeho úniku.

Kalibrační testy a ostré testy

Následně byly provedeny kalibrační testy, statický a rotační test pro softwarovou kompenzaci parazitních vlivů. Následně byl proveden jeden cyklus testu. Soustava byla následně otevřena a byly sledovány kontaktní plochy povrchů. Na základě změny lesklosti v místech kontaktu vzorků byla doladěna rovinnost a následně byla celá soustava podrobena celému testu. Během testování byla soustava pravidelně kontrolována kalibračními testy a v polovině rozebrána a byly zváženy vzorky.

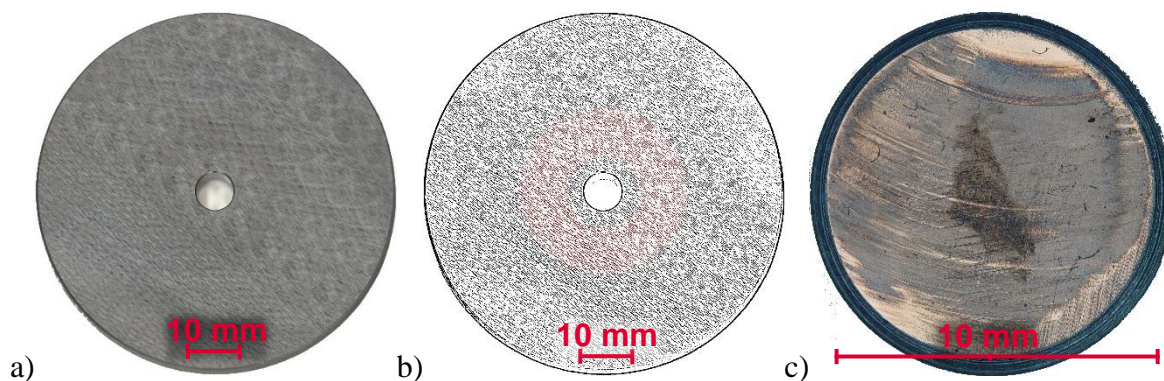
5.2 Jednotlivé materiály

5.2.1 Konstrukční ocel

Pro materiál ocel (S235) proběhlo celkem 5 testů. U prvního testu nebyla dodržena požadovaná rovinnost, a proto musel být vzorek vyřazen. Dále byly provedeny tři standardní testy (100 cyklů) vzorků při zatížení 5 MPa a jeden prodloužený test (260 cyklů) vzorku při 3 MPa.

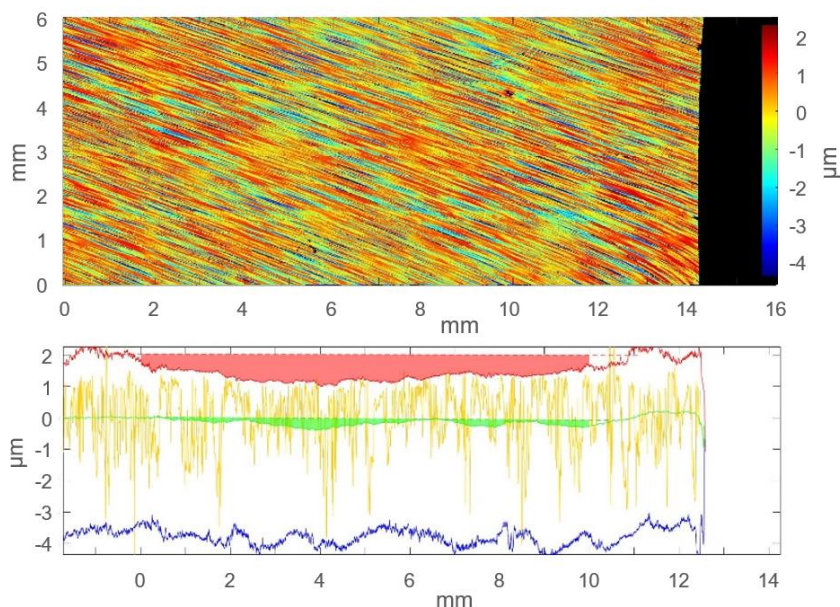
Úbytek materiálu

Kombinace materiálů ocel a ocel se v kontaktu chovala velice nestabilně a výsledek opotřebení byl závislý na dodržení rovinnosti. U disků (Obr. 5-1a), u kterých byla dodržena rovinnost, nebylo ze vzorku patrné žádné opotřebení, lze pouze pozorovat změnu odrazivosti v místě stopy. Naopak pin (Obr. 5-1c) jeví výrazné známky opotřebení. Je zde jasně viditelná oblast, která reprezentuje plochu kontaktu. Opotřebení je převážně adhezivní, je zde jasně rozpoznatelné vytrhávání materiálu. Na krajích pinu dochází k opotřebení abrazivnímu.



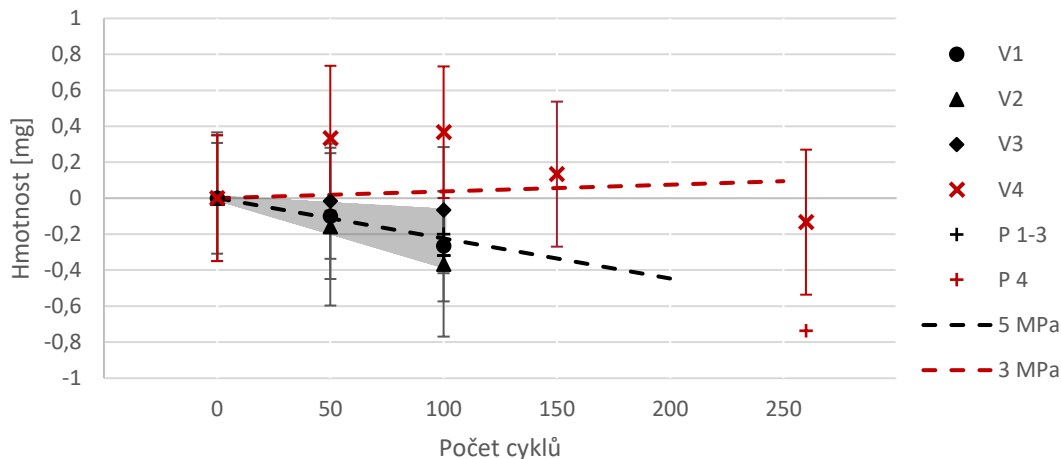
Obr. 5-1 Vzorky ocel x ocel: a) Ocelový disk barevně; b) adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu

Ani pomocí profilometru (Obr. 5-2) není rozpoznatelné, že došlo k opotřebení. Díky statistickému zpracování dat však lze najít geometrii drážky a kvantifikovat opotřebení u vzorků, kde při 5 MPa je opotřebení po přepočtu $(0,28 \pm 0,07)$ mg. Při zatížení 3 MPa lze opotřebení rozpoznat pouze v jednom ze tří skenů vzorku a je rovno 0,74 mg (pro 260 cyklů, pro 100 cyklů = 0,28 mg).



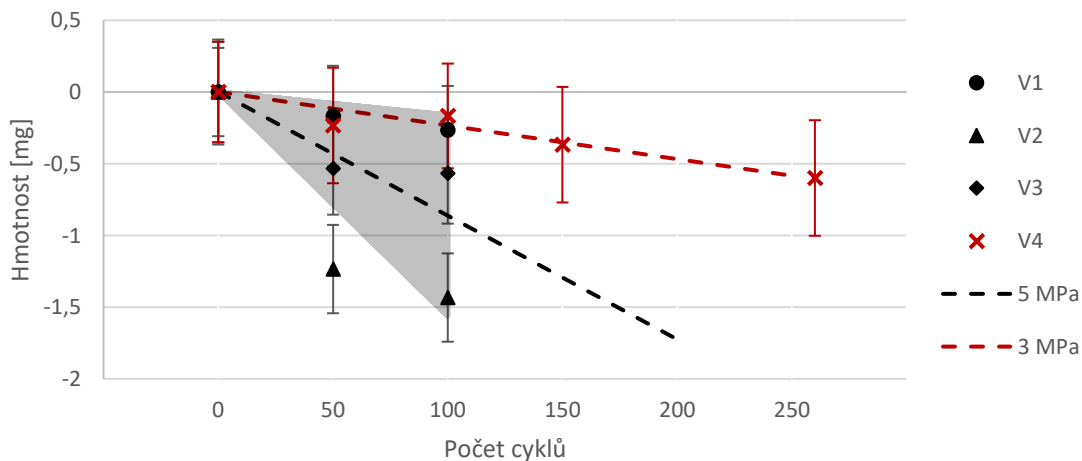
Obr. 5-2 Snímek ocelového disku na profilometru a statistické vyhodnocení dat

Nejlépe o opotřebení vypovídá gravimetrie (Obr. 5-3), díky které se povedlo určit míru opotřebení disků při 5 MPa ($0,22 \pm 0,15$) mg. U materiálu je odchylka 70 % nominální hodnoty. Přesnost váhy není v tomto případě dostatečná a dle metrologických pravidel není výsledek prokazatelný. Výsledek však koreluje s měřením z profilometru, je tedy potvrzena jeho platnost. U disku zatíženého 3 MPa je opotřebení pod přesností analytické váhy.



Obr. 5-3 Míra opotřebení ocelového disku

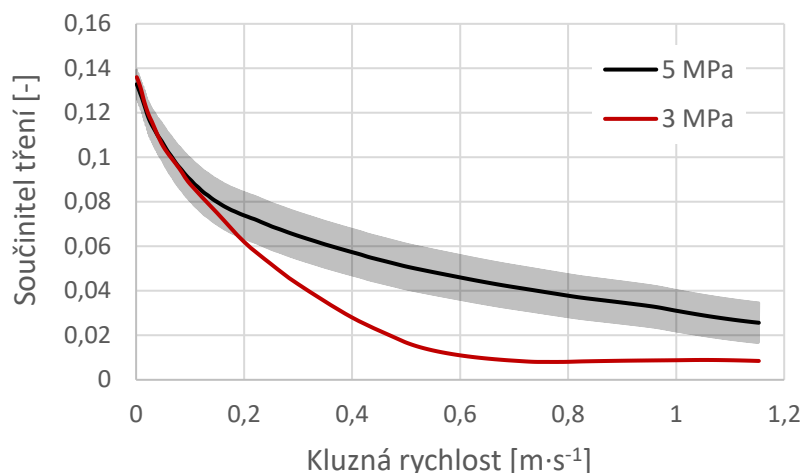
U pinu (Obr. 5-4) bylo opotřebení ($0,9 \pm 0,7$) mg při zatížení 5 MPa a ($0,23 \pm 0,15$) mg při 3 MPa. Dráha pinu v kontaktu je 7x delší než disku (7×10^4 m). Pokud přepočítáme hmotnost díky znalosti hustoty na specifickou míru opotřebení, tak pro disk je hodnota ($7,0E-8 \pm 4,7E-8$) $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ a pro pin ($3,9E-8 \pm 3,2E-8$) $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Opotřebení pinu a disku je řádově podobné, pro disk vyšší.



Obr. 5-4 Míra opotřebení pinu v kontaktu s konstrukční ocelí

Součinitel tření

Vyhodnocení tření (Obr. 5-5) proběhlo pro celý rozsah otáček. Velikost součinitele tření při nulové rychlosti (0,14) i při rychlosti $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (0,01-0,04) odpovídá předpokladům. Při 3 MPa je součinitel tření nižší díky lepší kvalitě mazání a udržování stabilního hydrodynamického filmu nad $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 5-5 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro ocel

Další pozorované jevy

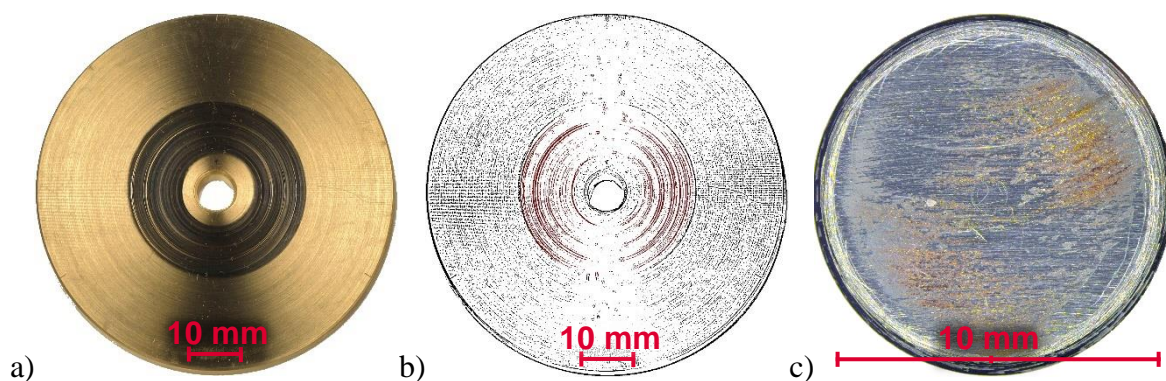
Teplota oleje se při testech mírně zvýšila, ovlivnění kontaktu minimální. Silné vibrace a výrazná zvuková emise při nižších otáčkách. Při hodnotách blízkých nule silné vrzání. Velká citlivost na rovinnost kontaktu. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testování byla $R_a 0,91 \mu\text{m}$ (3 MPa) a $R_a 0,63 \mu\text{m}$ (5 MPa).

5.2.2 Cínový bronz

Pro cínový bronz (CuSn12) proběhlo celkem 6 testů. První tři testy byly provedeny pro zatížení 5 MPa a zbylé pro 3 MPa. Každý vzorek byl simulován po dobu 100 cyklů.

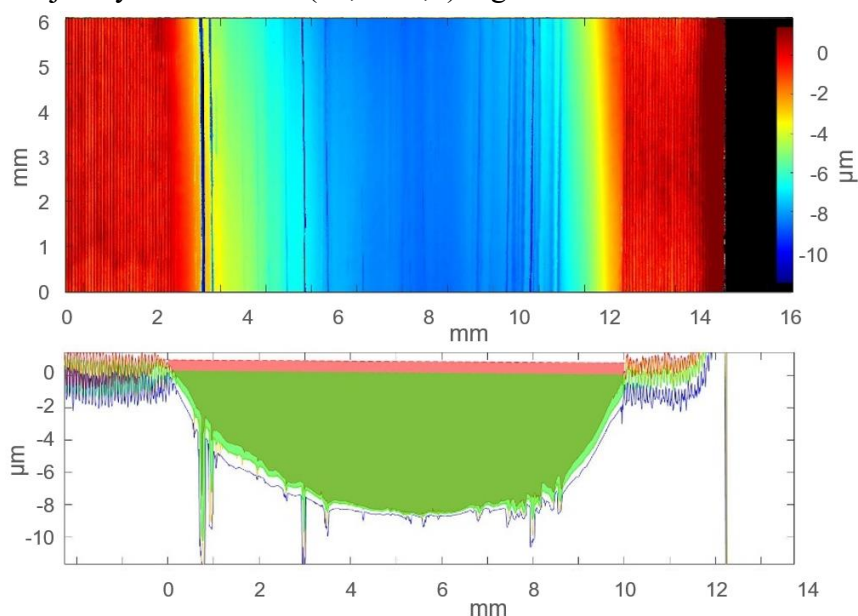
Úbytek materiálu

Kombinace materiálů ocel a cínový bronz se v kontaktu chovala velice stabilně, konformita povrchů byla zaručena poddajností bronzu. Stopa na disku (Obr. 5-6a) je rovnoměrná po celém obvodu a kopíruje nepřesnosti pinu. Opotřebení je jednoznačně rozlišitelné a dráhu lze nahmatat prstem. Jedná se především o abrazivní opotřebení. Na pinu (Obr. 5-6c) jsou vidět stopy opotřebení. Na ploše je nanesené značné množství cínového bronzu, které zakrývá opotřebovaný pin. Jedná se tedy i o adhezivní opotřebení. Materiál pevně drží na podkladu a lze ho sundat pouze mechanicky, čištění izopropylalkoholem a hadříkem nemá na vrstvu vliv.



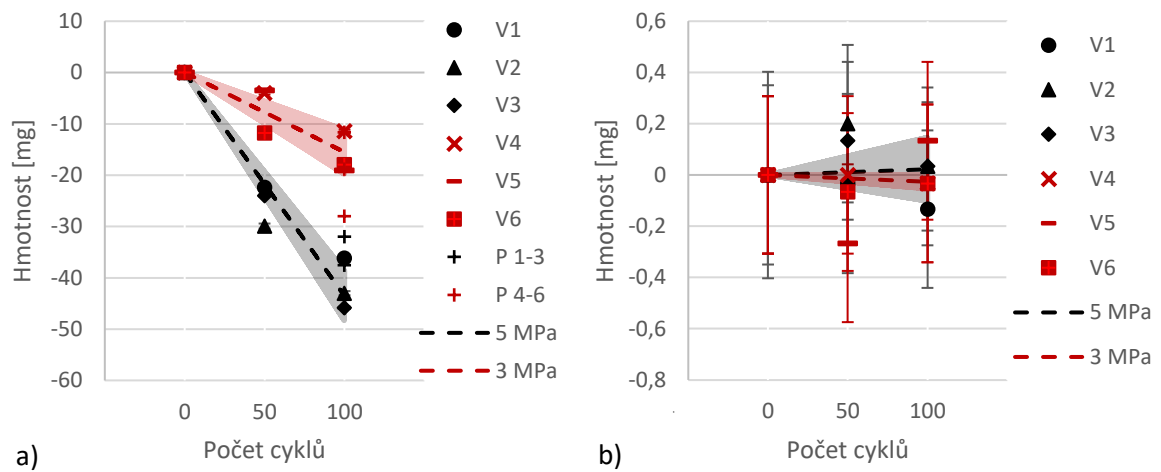
Obr. 5-6 Vzorky cínový bronz: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu

Na snímku z profilometru (Obr. 5-7) lze pozorovat stabilní dráhu po opotřebení, která má pro zatížení 5 MPa hloubku okolo 8 μm a opotřebení je rovno $(38,5 \pm 7,0)$ mg. Pro zatížení 3 MPa je úbytek materiálu $(19,5 \pm 8,2)$ mg.



Obr. 5-7 Snímek disku z cínového bronzu na profilometru a statistické vyhodnocení dat

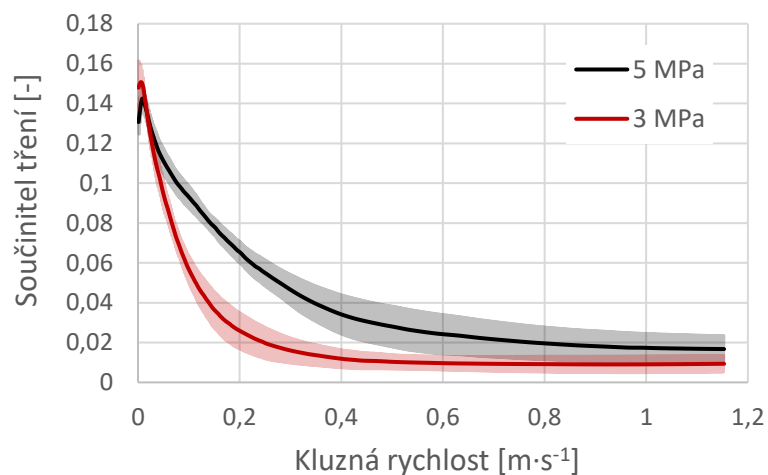
U cínového bronzu je rozlišitelnost váhy o tři řády nižší než samotná hmotnost, výsledky jsou velice přesné. Gravimetrie je přesnější než výsledky z profilometru. Úbytek hmotnosti pro disky (Obr. 5-8a) zatížené 5 MPa bylo $(43,5 \pm 4,9)$ mg a při 3 MPa $(15,5 \pm 4,2)$ mg, vypočítaná specifická míra opotřebení disku pro všechna měření je $(9,9\text{E-}6 \pm 1,2\text{E-}6)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Úbytek materiálu pinu (Obr. 5-8b) je těžké kvantifikovat, protože je na jeho povrch nanášena vrstva materiálu o neznámé hmotnosti. Hmotnost pinu kvůli opotřebení klesá, ulpíváním materiálu roste. Při zatížení 5 MPa hmotnost pinu dokonce vzrostla o $(0,02 \pm 0,15)$ mg. Při zatížení 3 MPa nedochází k tak výraznému nanášení bronzu na pin, a odchylka úbytku hmotnosti $(0,03 \pm 0,15)$ mg je proto výrazně nižší. Specifická míra opotřebení pinu je $(0,5\text{E-}9 \pm 3,8\text{E-}9)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 5-8 Míra opotřebení: a) disku z cínového bronzu; b) pinu

Součinitel tření

Vyhodnocení tření (Obr. 5-9) proběhlo pro celý rozsah otáček. Velikost součinitele tření je při nulové rychlosti 0,15. Při kluzné rychlosti $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ klesá až na 0,01-0,03. Při 3 MPa je součinitel tření nižší díky lepšímu parametru mazání a stabilnímu kluznému filmu.



Obr. 5-9 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro cínový bronz

Další pozorované jevy

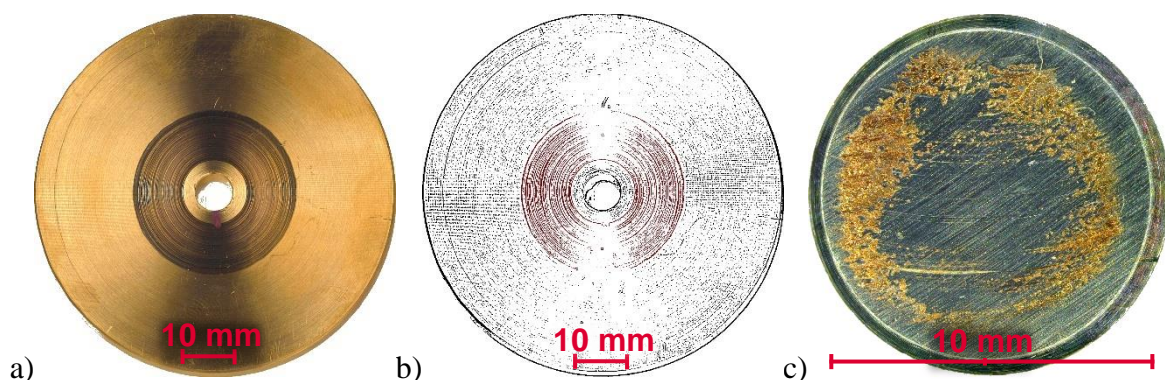
Teplota oleje se při testech zvýšila, ovlivnění kontaktu minimální. Vibrace a zvuková emise při nižších otáčkách. Při hodnotách blízkých nule silné vrzání. Uzpůsobení konformity povrchu při zhoršené rovinnosti. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testování byla Ra 0,22 μm (3 MPa) a Ra 0,29 μm (5 MPa).

5.2.3 Olověný bronz

Pro olověný bronz (CuSn7Zn4Pb7) proběhlo celkem 6 testů. Stejně jako u cínového bronzu první tři testy byly provedeny pro zatížení 5 MPa a zbylé pro 3 MPa. Každý vzorek byl simulován po dobu 100 cyklů.

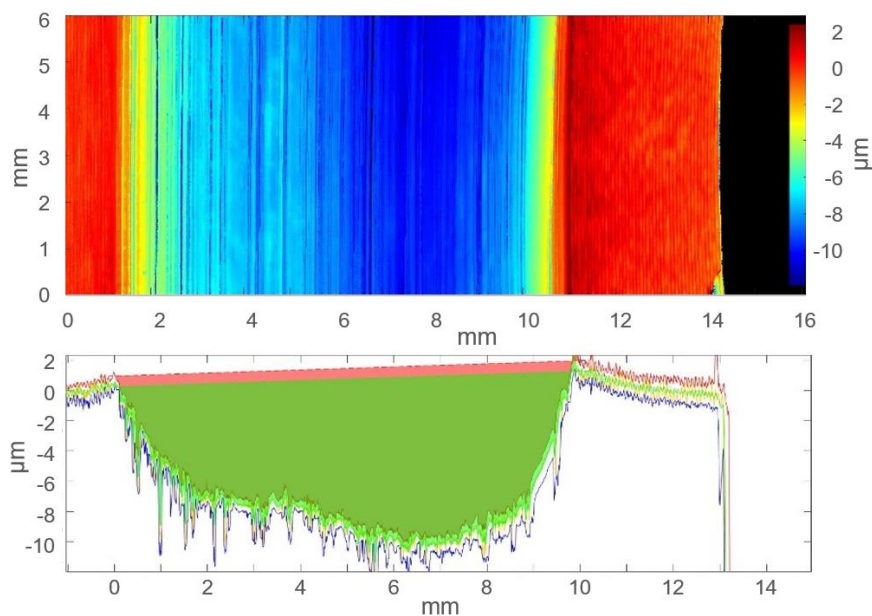
Úbytek materiálu

Materiálová kombinace konstrukční oceli s olověným bronzem se chovala podobně jako s cínovým bronzem. Jediný rozdíl je v hladkosti stopy. U olověného bronzu lze pozorovat větší množství nezacelených rýh (Obr. 5-10). Je zde také větší množství naneseného materiálu, z čehož lze usuzovat, že je zde větší množství adhezivního opotřebení.



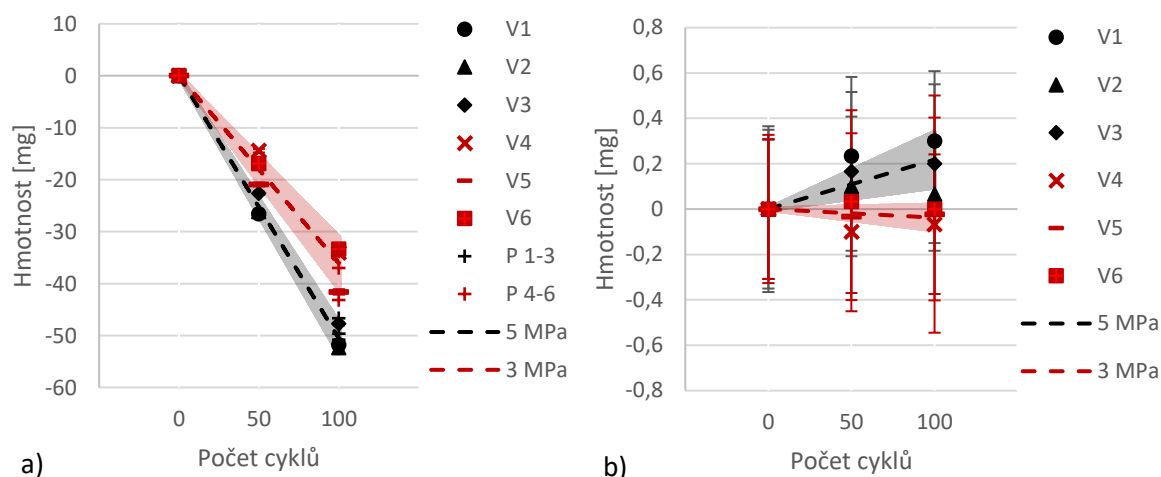
Obr. 5-10 Vzorky cínový bronz: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu

Na snímku z profilometru (Obr. 5-11) lze pozorovat stabilní dráhu po opotřebení, která pro zatížení 5 MPa má hloubku okolo 10 μm a opotřebení je rovno $(49,0 \pm 2,1)$ mg. Pro zatížení 3 MPa je úbytek materiálu $(38,0 \pm 4,7)$ mg. Ze skenu lze také odečíst náklon pinu 3 μm na 10 mm.



Obr. 5-11 Snímek disku z olověného bronzu na profilometru a statistické vyhodnocení dat

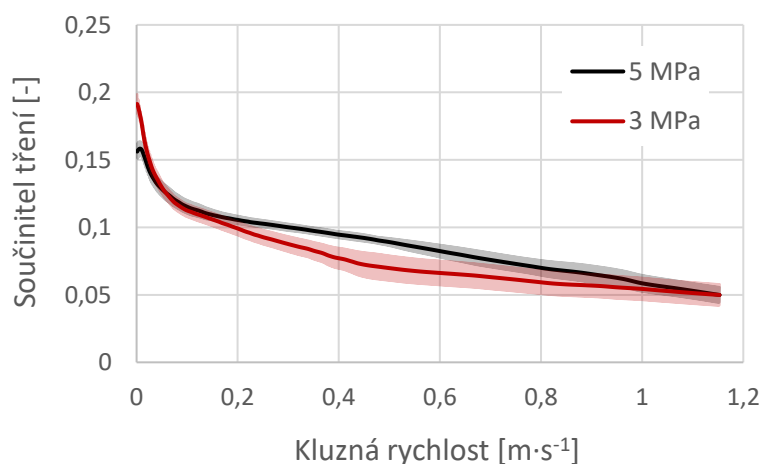
U olověného bronzu je rozlišitelnost váhy o tři řády nižší než samotná hmotnost, výsledky jsou velice přesné (Obr. 5-12). Gravimetrie je mnohem přesnější než výsledky z profilometru. Úbytek hmotnosti pro disky zatížené 5 MPa bylo $(50,6 \pm 2,9)$ mg a při 3 MPa $(36,1 \pm 4,9)$ mg, specifická míra opotřebení disku je $(15,4E-6 \pm 2,1E-6)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Je zde stejný problém s vyhodnocením úbytku materiálu pinu jako u cínového bronzu. Kvůli opotřebení klesá jeho hmotnost, ulpíváním materiálu roste. Při zatížení 5 MPa hmotnost pinu vzrostla o $(0,22 \pm 0,15)$ mg. Při zatížení 3 MPa nedochází k tak silnému nanášení bronzu na pin, a proto je pokles hmotnosti $(0,04 \pm 0,15)$ mg blízký nule. Specifická míra opotřebení pinu je kladná $(3,2E-9 \pm 7,3E-9)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 5-12 Míra opotřebení: a) disku z olověného bronzu; b) pinu

Součinitel tření

Vyhodnocení tření proběhlo pro celý rozsah otáček (Obr. 5-13). Velikost součinitele tření je při nulové rychlosti 0,15-0,2. Při kluzné rychlosti $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ klesá až na 0,04-0,07. Při 3 MPa je součinitel tření nižší. Stále klesající trend tření při vysokých otáčkách napovídá opotřebení i při vysokých otáčkách.



Obr. 5-13 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro olověný bronz

Další pozorované jevy

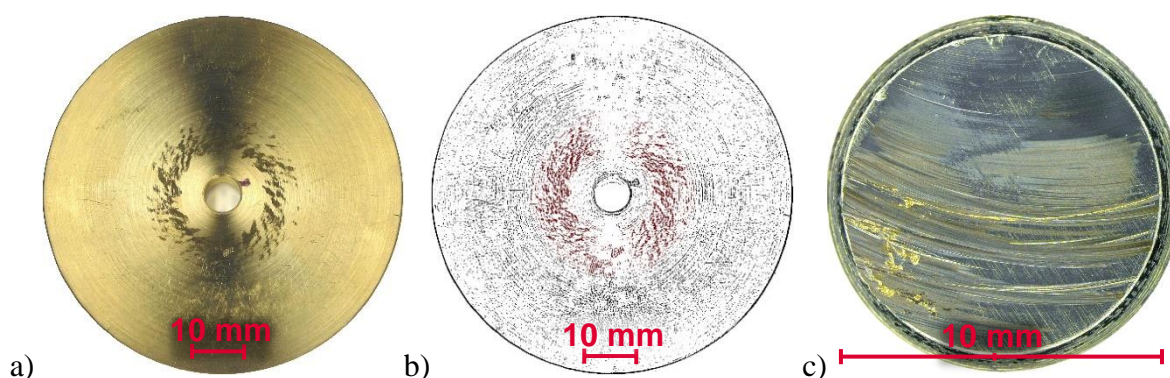
Teplota oleje se při testech výrazně zvýšila, riziko ovlivnění kontaktu. Vibrace a zvuková emise při nižších otáčkách byly nejvýraznější ze všech testovaných materiálů. Při hodnotách blízkých nule silné vrzání. Uzpůsobení konformity povrchu při zhoršené rovinnosti, vznik otisků ve stopě. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testování byla Ra 0,36 μm (3 MPa) a Ra 0,38 μm (5 MPa).

5.2.4 Hliníkový bronz

Se vzorkem z hliníkového bronzu (CuAl10Ni5Fe5) proběhly celkem 4 testy při zatížení 5 MPa. Druhý test byl kvůli nedodržení rovinnosti vyřazen. Každý vzorek byl simulován po dobu 100 cyklů.

Úbytek materiálu

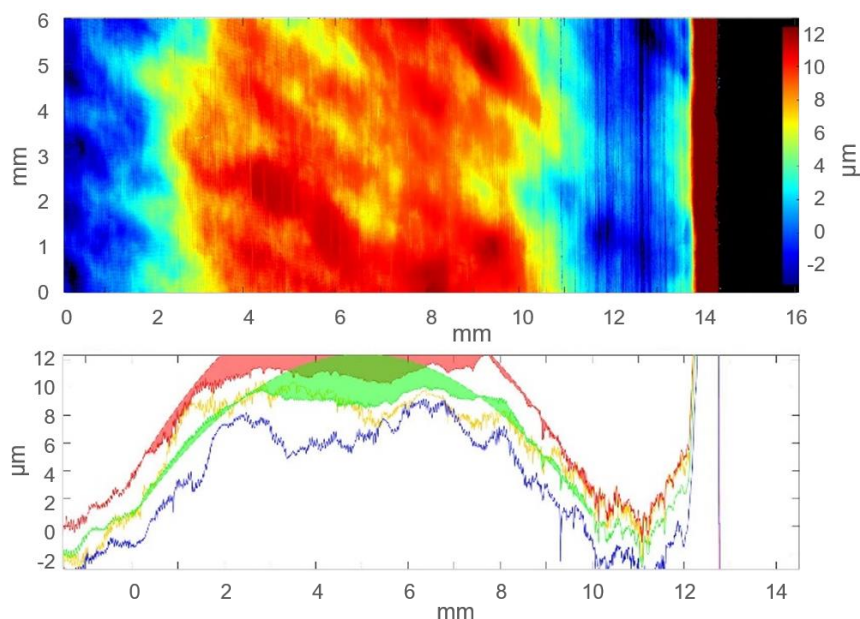
Kombinace materiálů ocel a hliníkový bronz se v kontaktu chovala velice nestabilně a výsledek opotřebení byl závislý na dodržení rovinnosti. Kvůli vysoké tvrdosti a špatné obrobitelnosti materiálu nebyla dodržena jakost povrchu. Je zde geometrická nepravidelnost povrchu v podobě povrchových vln. V místě stopy lze pozorovat tmavé skvrny (Obr. 5-14a). Jedná se o uhlazené vrcholky původní vlnitosti profilu (chyba výroby disku). Rozdíl v barvě zapříčiňuje lokální drsnost. V prohlubních je vysoká, na vrcholcích nízká, tím vzniká červeně zvýrazněný obrazec. Opotřebení je nízké, nižší než lokální makroskopická vlnitost. Na pinu jsou vidět stopy značného opotřebení. Na ploše je u jednoho ze vzorků nanesené značné množství hliníkového bronzu (Obr. 5-14c). Opotřebení je převážně abrazivní, kvůli nanesenému materiálu na povrchu se jedná i o adhezivní.



Obr. 5-14 Vzorky hliníkový bronz: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu

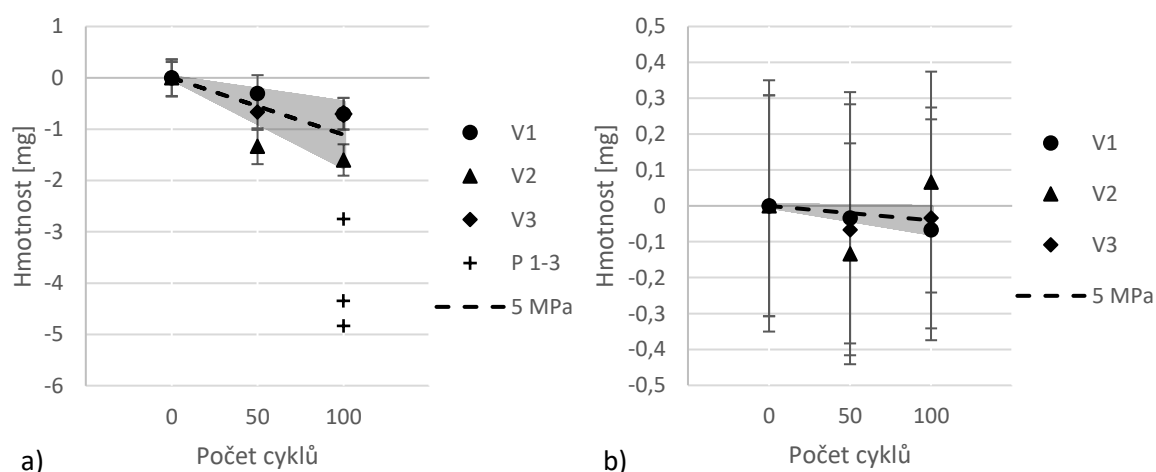
Na snímku z profilometru (Obr. 5-15) lze pozorovat vlnitost v místě dráhy stopy. Výroba a dokončovací operace byly vytvořeny na soustruhu, což způsobuje, že je profil v každém řezu podobný. Ze statistického vyhodnocení lze pozorovat, že se zde nachází vlna, ta je na svém vrcholu zarovnána. Vlna je původní tvar a zarovnání je hranice opotřebení. Geometrie

byla nasimulována kubickou křivkou a plocha integrována. Výsledné opotřebení je rovno $(4,0 \pm 1,1)$ mg, kvůli neznalosti přesného tvaru původního profilu se jedná pouze o odhad a je nutné výsledek ověřit gravimetrií.



Obr. 5-15 Snímek disku z hliníkového bronzu na profilometru a statistické vyhodnocení dat

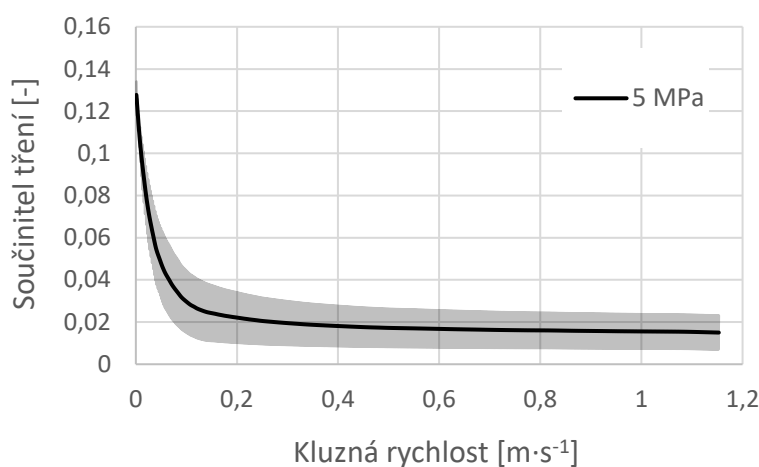
U hliníkového bronzu je hmotnostní úbytek disku (Obr. 5-16a) prokazatelně nad přesností váhy $(1,1 \pm 0,6)$ mg, specifická míra opotřebení je $(3,5E-7 \pm 2,0E-7)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Z grafu lze pozorovat jemný rozdíl mezi opotřebením po prvních padesáti cyklech a po následujících, jedná se o záběh kluzných povrchů. Úbytek materiálu pinu (Obr. 5-16b) se u jednotlivých vzorků mění, u jednoho jsou na jeho povrch nanесeny částice bronzu. Hmotnost pinu kvůli opotřebení klesá, ulpíváním materiálu roste. Průměrná změna hmotnosti je $(0,04 \pm 0,15)$ mg, specifická míra opotřebení je $(1,8E-9 \pm 6,8E-9)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 5-16 Míra opotřebení: a) disku z hliníkového bronzu; b) pinu

Součinitel tření

Vyhodnocení tření proběhlo pro celý rozsah otáček (Obr. 5-17). Velikost součinitele tření při nulové rychlosti je 0,13. Při kluzné rychlosti $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ klesá až na 0,01-0,03.



Obr. 5-17 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro hliníkový bronz

Další pozorované jevy

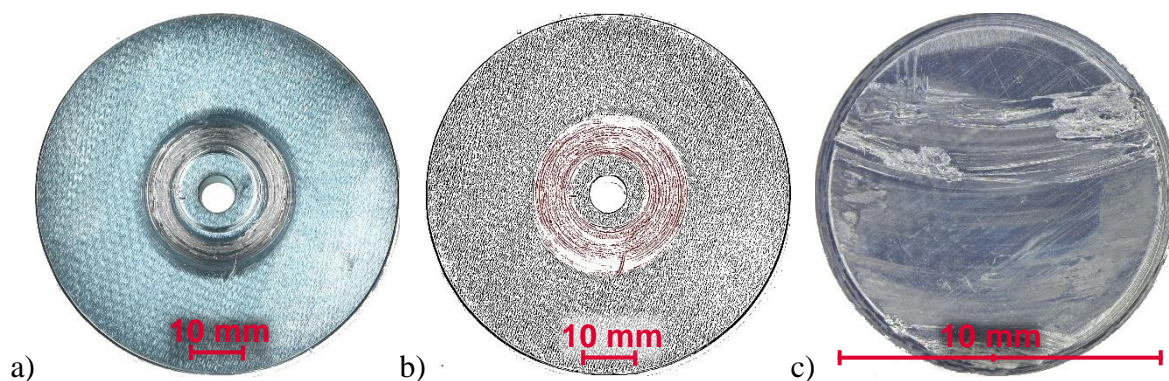
Teplota oleje se při testech mírně zvýšila, ovlivnění kontaktu minimální. Vibrace a zvuková emise při nižších otáčkách. Při hodnotách blízkých nule silné vrzání. Velká citlivost na rovinnost kontaktu. Kvůli vlnitosti nebylo možné ověřit gravimetrii pomocí optického profilometru. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testování byla $R_a 0,21 \mu\text{m}$ (5 MPa).

5.2.5 Pozinkovaná ocel

S pozinkovanou ocelí (DX51D+Z200) proběhly celkem 3 testy. První test byl pro zatížení 5 MPa a byl softwarem kvůli překročení definovaných limitů tření po 29. cyklu ukončen (došlo ke kolizi původní ocelové matrice a pinu). Dále byly provedeny dva testy při zatížení 3 MPa, jeden byl ukončen po 12 cyklech a druhý po 10 cyklech, aby nedošlo ke kontaktu matrice s pinem.

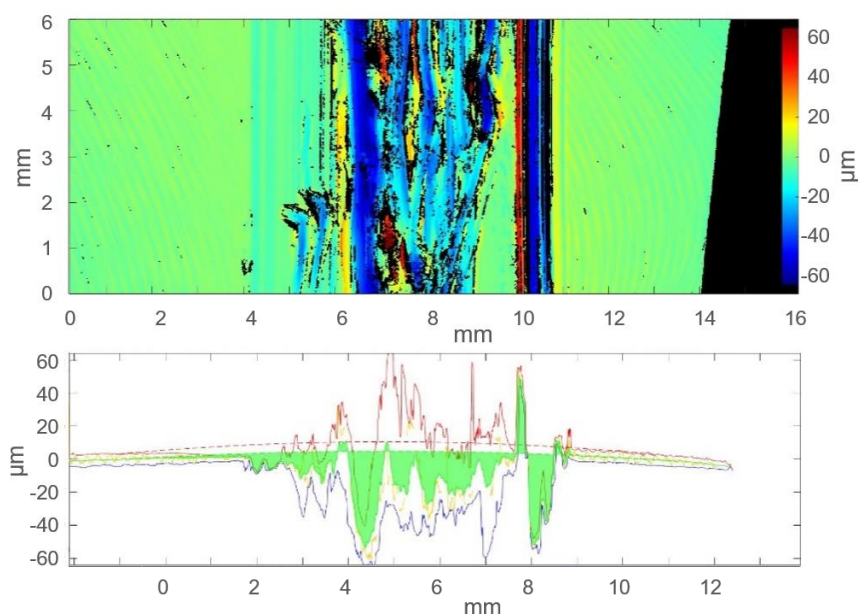
Úbytek materiálu

Kombinace materiálů ocel a ocel s antikorozií úpravou pozinkováním se v kontaktu chovala velice nestabilně. Kdyby nebyly nastaveny limity pro chování kontaktu a vytvořeny mechanické pojistky, mohlo dojít i k poškození zařízení. Opotřebení je jednoznačně rozlišitelné a dráhu lze nahmatat prstem, typ opotřebení je abrazivní. Na pinu jsou vidět stopy opotřebení pouze u testu při 5 MPa, kdy došlo ke kontaktu s matricí. Na ploše je nanesená značná vrstva zinku (Obr. 5-18c). Materiál pevně drží na podkladu a lze ho sundat pouze mechanicky, čištění izopropylalkoholem a hadříkem nemá na vrstvu vliv.



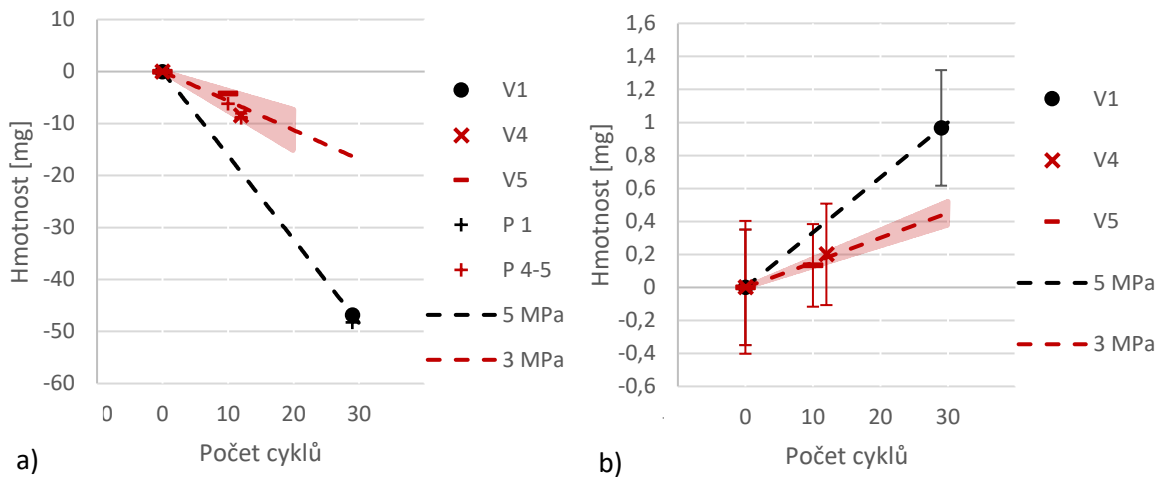
Obr. 5-18 Vzorky cínový bronz: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu

Na snímku z profilometru (Obr. 5-19) lze pozorovat dva stavy. Na levé straně je dráha poměrně rovnoměrná, v pravé části došlo ke kontaktu matrice, a dokonce k jejímu vytržení. Úbytek materiálu přepočítaný na 100 cyklů je 161 mg. Pro zatížení 3 MPa je úbytek přepočítaný na 100 cyklů materiálu ($68,1 \pm 8,7$) mg.



Obr. 5-19 Snímek pozinkovaného disku na profilometru a statistické vyhodnocení dat

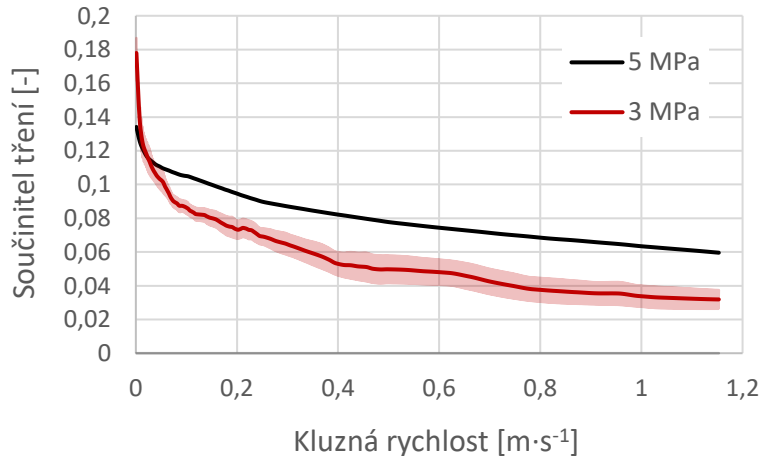
U pozinkované oceli je rozlišitelnost váhy o tři řády nižší než samotná hmotnost, výsledky jsou velice přesné (Obr. 5-20). Úbytek hmotnosti pro disk zatížený 5 MPa přepočtený na 100 cyklů byl 166 mg a při 3 MPa (56 ± 20) mg, specifická míra opotřebení disku je $(4,4E-5 \pm 1,5E-5) \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Při zatížení 5 MPa došlo k opotřebení a nanesení materiálu na pin, hmotnost vzrostla o 3,33 mg přepočteno na 100 cyklů. Při zatížení 3 MPa nedošlo k téměř žádnému opotřebení, ale na povrch pinu jsou nanášeny makroskopické částice zinku, jejich hmotnost byla $(1,5 \pm 0,24) \text{ mg}$. Specifická míra opotřebení (nanesení) pinu je kladná $(14,6E-8 \pm 2,6E-8) \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 5-20 Míra opotřebení: a) pozinkovaného disku; b) pinu

Součinitel tření

Vyhodnocení součinitele tření proběhlo pro celý rozsah otáček (Obr. 5-21). Velikost součinitele tření při nulové rychlosti je 0,13-0,19. Velikost součinitele tření při vysokých rychlostech 0,03-0,08 odráží značné opotřebení materiálu. Při 5 MPa je součinitel tření vyšší kvůli vyššímu opotřebení, výsledek může být ovlivněn kontaktem původní ocelové matrice s pinem. Pro 3 MPa bylo kontrolováno, aby k kolizi nedošlo. Nestabilita červené křivky je dána malým statistickým souborem dat kvůli nižšímu počtu cyklů.



Obr. 5-21 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro pozinkovanou ocel

Další pozorované jevy

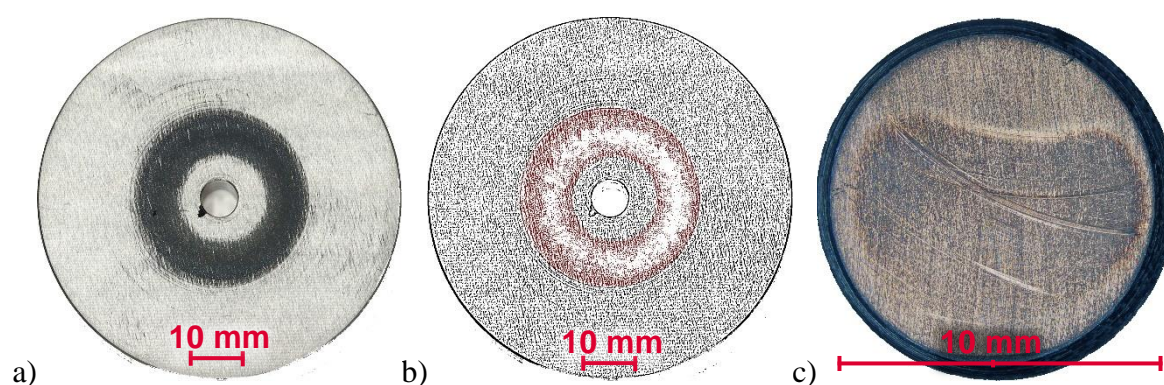
Teplota oleje se při testech zvýšila, ovlivnění kontaktu vysoké. Zvuk s odlišnými akustickými vlastnostmi. Při opotřebení vrstvy zinku dojde k zesílení a opět změně jeho charakteristiky, předznamenávající kolizi pinu a matrice. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testování byla Ra 1,12 μm (3 MPa) a Ra 9,84 μm (5 MPa).

5.2.6 Cínová kompozice

Pro cínovou kompozici stanit (SnSb10Cu3Ni) proběhlo celkem 6 testů. První tři testy byly provedeny pro zatížení 5 MPa a zbylé pro 3 MPa. Každý vzorek byl simulován po dobu 100 cyklů.

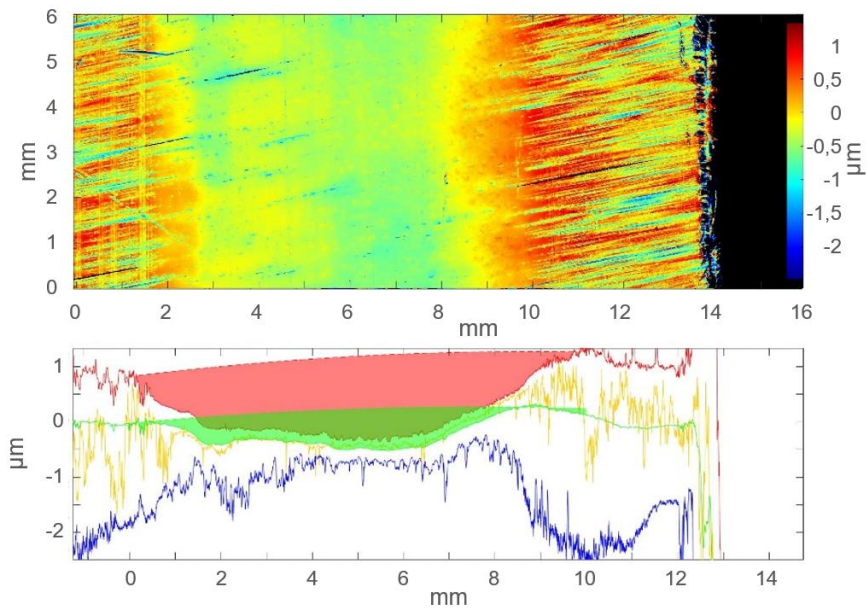
Úbytek materiálu

Kombinace materiálů ocel a ocel s nanesenou cínovou kompozicí se v kontaktu chovala velice stabilně, konformita povrchů byla zaručena poddajností výstelky. Stopa je rovnoměrná po celém obvodu, opotřebení je jednoznačně rozlišitelné kvůli hladkosti, která je prstem nahmatatelná. Na pinu je jasně vidět opotřebení, především abrazivní. Na rozdíl od ostatních zde nejsou známky přehřátí kontaktu (Obr. 5-22c).



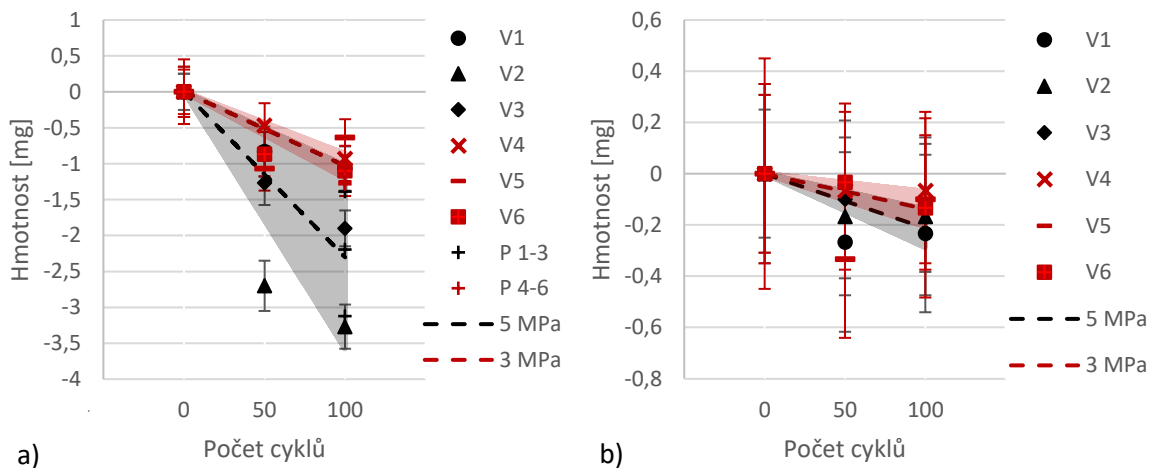
Obr. 5-22 Vzorok cínová kompozice: a) disk barevně; b) adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu

Na snímku z profilometru (Obr. 5-23) lze pozorovat stabilní dráhu po opotřebení, která ani při zatížení 5 MPa není větší než drsnost povrchu. Na statistickém vyhodnocení profilu lze pozorovat, že hloubka stopy (červená plocha) je 1 μm . Modrá křivka reprezentující spodní hranici drsnosti se zvedla také o 1 μm . Nedochozí k výraznému odebrání materiálu, ale k přenosu materiálu a zvýšení konformity kontaktu na mikroúrovni. Při záběhu však dojde k opotřebení, které je rovno $(2,2 \pm 0,9)$ mg při zatížení 5 MPa. Při zatížení 3 MPa je úbytek materiálu $(1,19 \pm 0,14)$ mg.



Obr. 5-23 Snímek disku s cínovou kompozicí na profilometru a statistické vyhodnocení dat

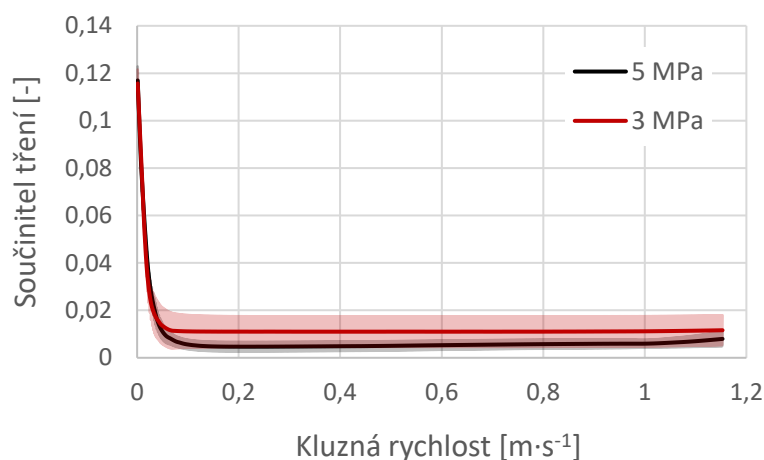
U cínové kompozice je rozlišitelnost váhy optimální pro vyhodnocení opotřebení (Obr. 5-24). Výsledky z gravimetrie a váhy dosahují podobných přesností. Úbytek hmotnosti pro disky zatížené 5 MPa bylo $(2,3 \pm 1,3)$ mg a při 3 MPa $(1,03 \pm 0,17)$ mg, specifická míra opotřebení disku je $(9,9E-6 \pm 1,2E-6)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Z grafu lze pozorovat, že rozdíl mezi opotřebením po prvních padesáti cyklech je podstatně vyšší než po zbylých, jedná se o záběh kluzných povrchů. Úbytek materiálu pinu je pod přesností přesné váhy, ale lze pozorovat trend jeho úbytku. Při zatížení 5 MPa hmotnost pinu klesá o $(0,21 \pm 0,15)$ mg a při zatížení 3 MPa o $(0,14 \pm 0,15)$ mg. Specifická míra opotřebení je $(10,7E-9 \pm 6,8E-9)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 5-24 Míra opotřebení: a) disku s cínovou kompozicí; b) pinu

Součinitel tření

Vyhodnocení tření proběhlo pro celý rozsah otáček (Obr. 5-25). Velikost součinitele tření při nulové rychlosti je 0,12. Při kluzné rychlosti $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ klesá až na 0,005-0,02. Při 5 MPa je součinitel tření nižší kvůli většímu poklesu drsnosti při záběhu.



Obr. 5-25 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro ocel s cínovou kompozicí

Další pozorované jevy

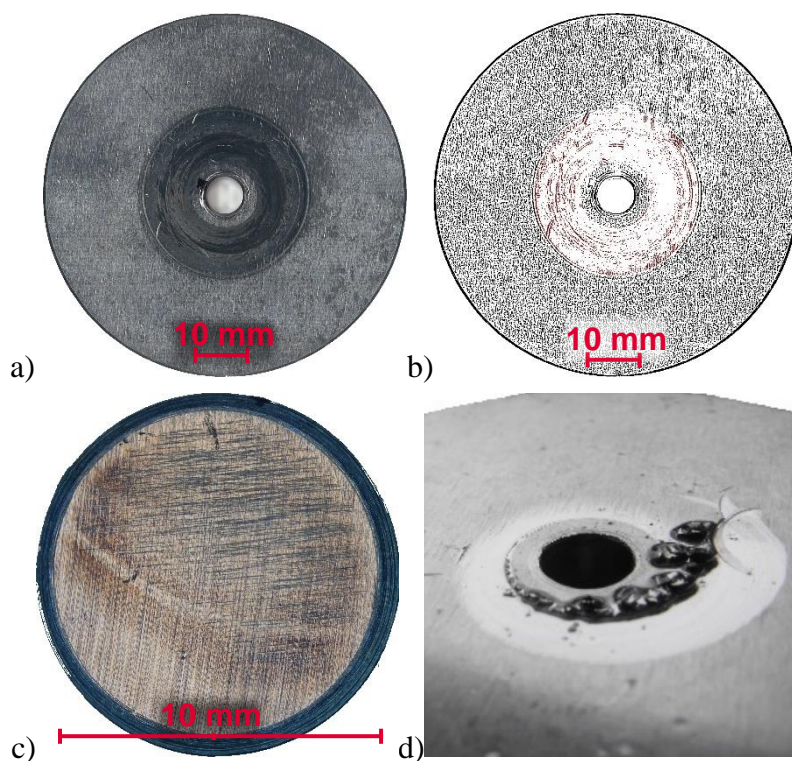
Teplota oleje se při testech nezvýšila, ovlivnění kontaktu nepatrné. Vibrace a zvuková emise je při nižších otáčkách podstatně nižší než pro ocel. Při hodnotách blízkých nule je slyšet jemné vrznutí. Nejlepší uzpůsobení konformity povrchu při zhoršené rovinnosti. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testování byla $R_a 0,14 \mu\text{m}$ (3 MPa) a $R_a 0,06 \mu\text{m}$ (5 MPa).

5.2.7 Olověná kompozice

Pro olověnou kompozici asmit ($\text{PbSn}_6\text{Sb}_{14}\text{CuAs}$) proběhlo celkem 5 testů. První tři testy byly provedeny pro zatížení 3 MPa a byly simulovány po dobu 100 cyklů. Zbylé dva vzorky byly testovány pro 5 MPa, tyto testy byly ukončené softwarovými pojistkami kvůli překonání zadaných limitů již během prvních cyklů. Materiál při těchto podmínkách není schopen přenést zatížení (viz Obr. 5-26 d).

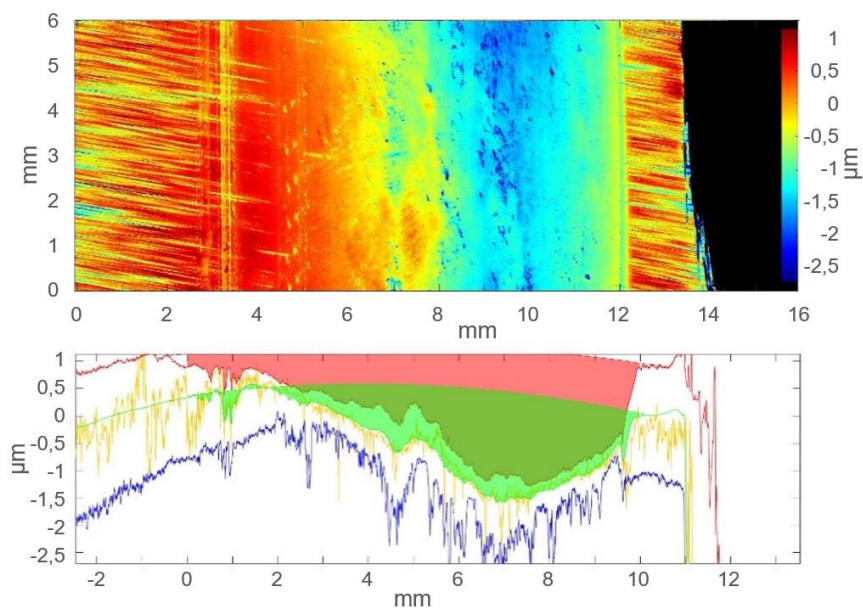
Úbytek materiálu

Kombinace materiálů ocel a ocel s nanesenou olověnou kompozicí se při 3 MPa chovala totožně jako cínová kompozice (Obr. 5-26).



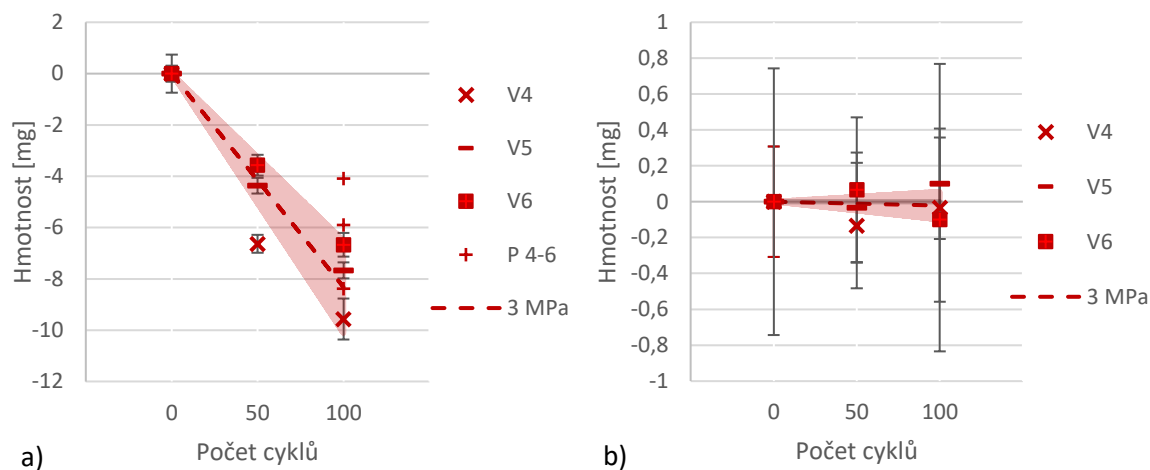
Obr. 5-26 Vzorky olověná kompozice: a) disk s olověnou kompozicí při 3 MPa barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu; d) fotografie disku po zastavení testu při 5 MPa

Na snímku z profilometru (Obr. 5-27) lze pozorovat stabilní dráhu po opotřebení, která je větší než drsnost povrchu. Na statistickém vyhodnocení profilu lze pozorovat, že naklonění pinu bylo $2 \mu\text{m}$. Úbytek materiálu je roven $(6,1 \pm 2,2) \text{ mg}$.



Obr. 5-27 Snímek disku s olověnou kompozicí na profilometru a statistické vyhodnocení dat

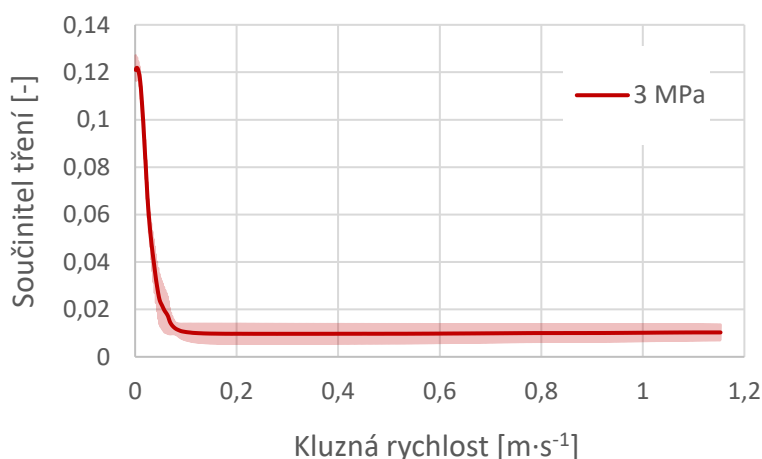
U olověné kompozice je rozlišitelnost váhy optimální pro vyhodnocení opotřebení (Obr. 5-28). Výsledky z gravimetrie a váhy dosahují podobných přesností. Úbytek hmotnosti pro disky zatížené 5 MPa bylo $(2,3 \pm 1,3)$ mg a při 3 MPa $(1,03 \pm 0,17)$ mg, specifická míra opotřebení disku je $(9,9E-6 \pm 1,2E-6)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Úbytek materiálu pinu je pod hladinou opakovatelnosti přesné váhy. Lze ale pozorovat trend jeho úbytku. Při zatížení 5 MPa hmotnost pinu klesá o $(0,21 \pm 0,15)$ mg a při zatížení 3 MPa o $(0,14 \pm 0,15)$ mg. Specifická míra opotřebení je $(10,7E-9 \pm 6,8E-9)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 5-28 Míra opotřebení: a) disku s cínovou kompozicí; b) pinu

Součinitel tření

Vyhodnocení tření proběhlo pro celý rozsah otáček (Obr. 5-29). Velikost součinitele tření při nulové rychlosti je 0,13. Při kluzné rychlosti $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ klesá až na 0,005-0,015 kvůli nízkému opotřebení a drsnosti povrchu.



Obr. 5-29 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro ocel s cínovou kompozicí

Další pozorované jevy

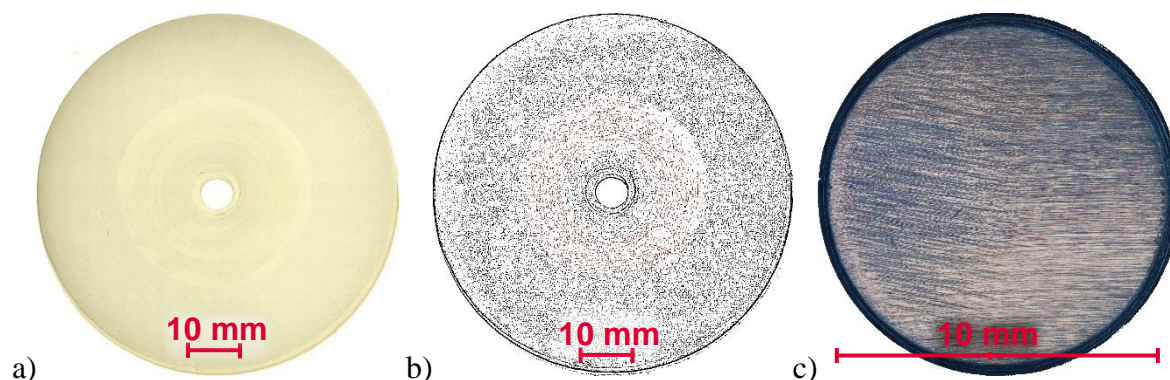
Teplota oleje se při testech nezvýšila, ovlivnění kontaktu nepatrné. Vibrace a zvuková emise při nižších otáčkách vyšší než u cínové kompozice. Při hodnotách blízkých nule vrže. Nejlepší uzpůsobení konformity povrchu při zhoršené rovinnosti. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testování byla Ra 0,12 μm .

5.2.8 Vysokomolekulární polyetylen

Pro materiál UHMWPE (PE1000) proběhlo celkem 5 testů. V prvním testu došlo při testování k náhlému snížení tření, které neodpovídalo předpokladům, a vzorek byl vyrazen. Důvodem bylo špatné uchycení vzorku. U dalších tří testů měl test trvání 100 cyklů, pátý test byl prodloužen na 200 cyklů. Všechny testy byly simulovány pod zatížením 5 MPa.

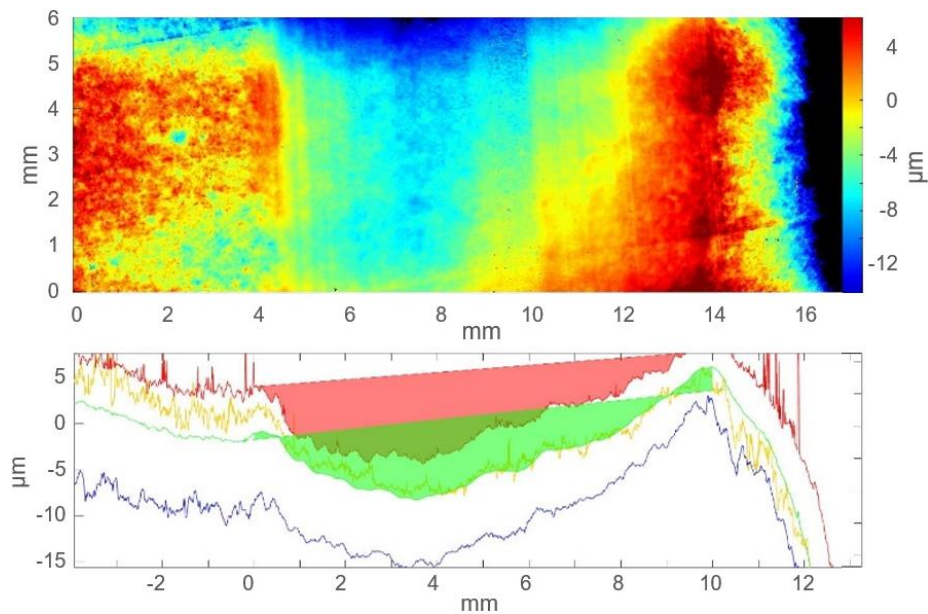
Úbytek materiálu

Kombinace materiálů ocel a vysokomolekulárního polyetylen (UHMWPE) se v kontaktu chovala odlišně než ostatní materiály, ale přitom byla dodržena opakovatelnost. Na disku je jasně viditelné opotřebení (Obr. 5-30a) a lze ho i nahmatat, kvůli průsvitnosti materiálu je obtížné ho zaznamenat. Naopak na pinu nejsou znatelné vůbec žádné známky opotřebení (Obr. 5-30c).



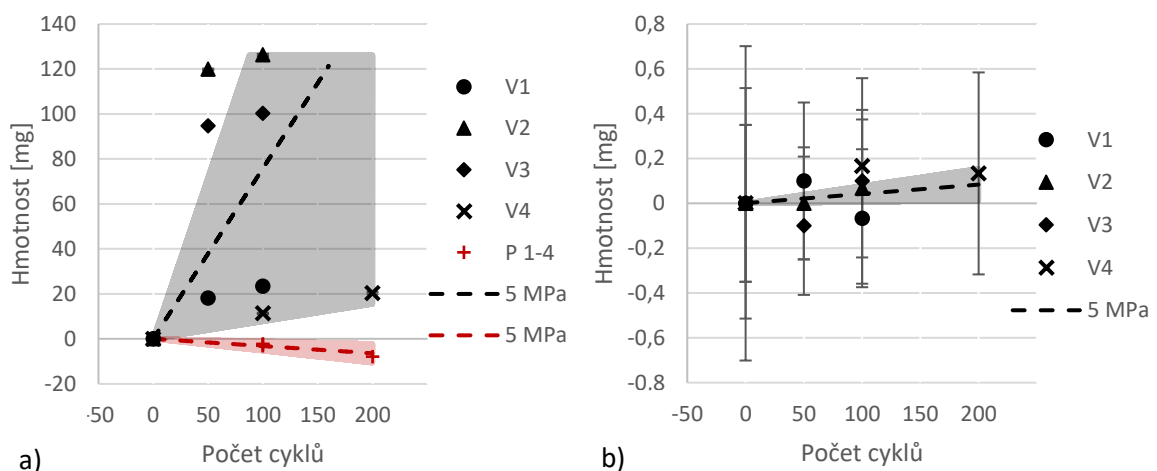
Obr. 5-30 Vzorky UHMWPE: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu

Pomocí profilometru je velice obtížné správně vyhodnotit dráhu opotřebení (Obr. 5-31). U vyrobených vzorků byla vyšší drsnost než u ostatních vzorků a nedodržena geometrická přesnost požadovaná pro vzorek. Odchytky souvisí s výrobním procesem tepelným ovlivněním. Je proto těžké odhadovat původní geometrii povrchu. Je zde velká nejistota přesnosti vyhodnocení. Úbytek materiálu byl odhadnutý na $(3,2 \pm 2,1)$ mg, odpovídá specifické míře opotřebení $(8,4\text{E-}6 \pm 5,4\text{E-}6)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 5-31 Snímek disku z polyetylenu na profilometru a statistické vyhodnocení dat

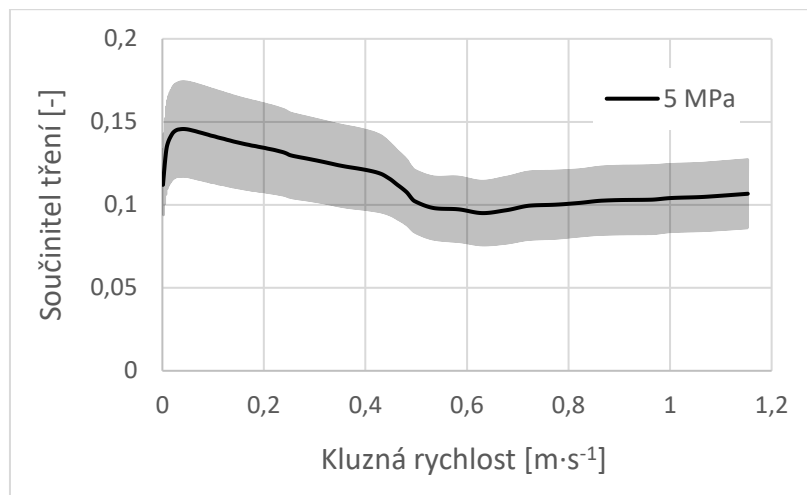
Tento polymer při ponoření do oleje zvyšuje svou hustotu kvůli své pórovitosti. Důkladné očištění polárním, ani nepolárním rozpouštědlem není dostačující pro odebrání oleje ze vzorku. Opětovné čištění izopropylalkoholem a hadříkem opotřebovává povrch vzorku a snižuje jeho hmotnost. Jak lze vidět z grafu (Obr. 5-32a), gravimetrie pro UHMWPE selhala, a proto je nutné vycházet pouze z výsledků naměřených na profilometru v grafu (Obr. 5-32a) červenou barvou. U měření hmotnosti pinu (Obr. 5-32b) lze pozorovat rostoucí trend, který naznačuje, že je na jeho povrchu tenká vrstva naneseného materiálu ($0,04 \pm 0,15$) mg, přepočítáno na specifickou míru opotřebení ($1,9E-9 \pm 6,8E-9$) $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Z makroskopického pohledu dostupnými metodami není průsvitný materiál pozorovatelný.



Obr. 5-32 Míra opotřebení: a) disku z UHMWPE; b) pinu

Součinitel tření

Vyhodnocení tření proběhlo pro celý rozsah otáček (Obr. 5-33). Velikost součinitele tření je nejvyšší ze všech materiálů, při nulových rychlostech je 0,13-0,17. Při kluzné rychlosti $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je 0,08-0,13. Materiál se při otáčkách vyšších $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ chová jinak, než se předpokládalo.



Obr. 5-33 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro UHMWPE

Další pozorované jevy

Teplota oleje se při testech výrazně zvýšila, vysoké riziko ovlivnění kontaktu. Zcela tichý chod. Nutnost úpravy upínání vzorku kvůli uvolnění šroubového spoje za chodu. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testování byla $R_a 0,53 \mu\text{m}$.

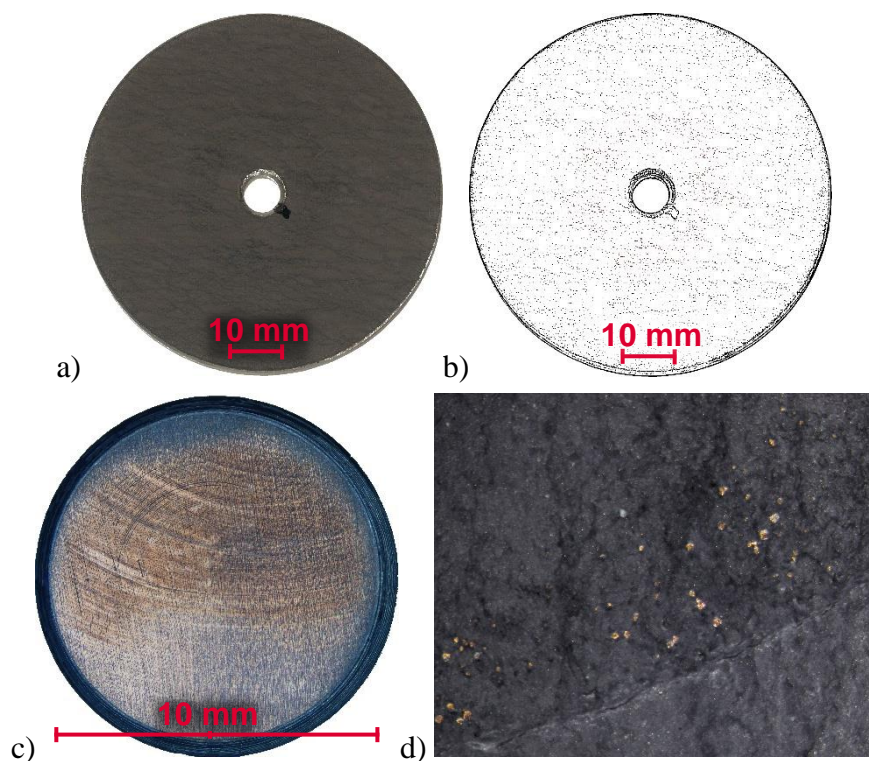
5.2.9 Kompozit PTFE

Pro kompozitní materiál PTFE (s olovem) proběhly celkem 4 testy pod zatížením 5 MPa. U prvních tří testů byla délka testu 100 cyklů, čtvrtý test byl prodloužen na 200 cyklů.

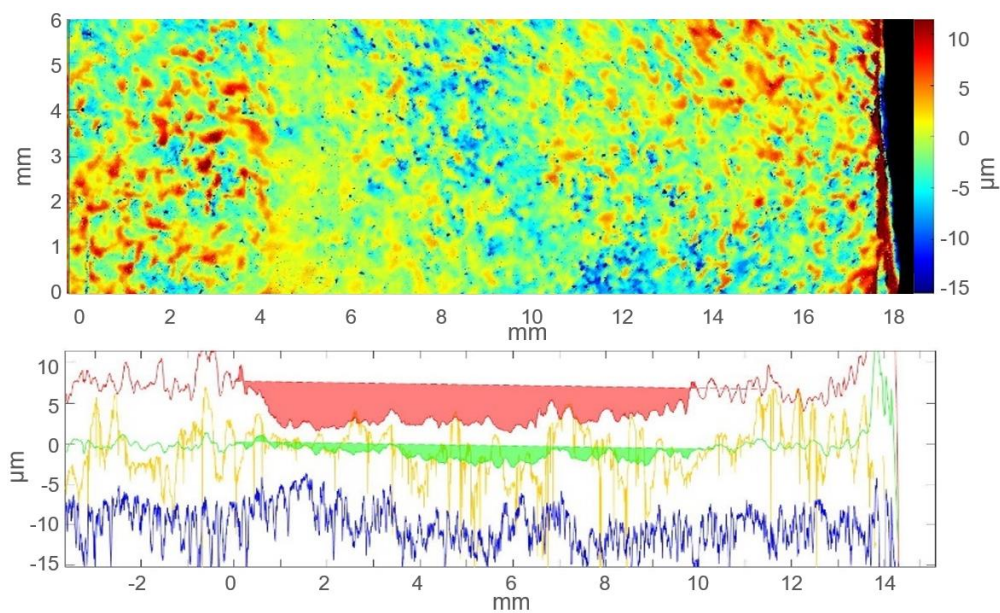
Úbytek materiálu

Kontakt oceli a kompozitního teflonu se choval podobně jako u cínové kompozice. Materiál je v místě kontaktu hladký, nelze rozpoznat, jestli je opotřebený, nebo uválcovaný (Obr. 5-34a). U čtvrtého testu, kdy testování probíhalo dvojnásobný čas, byl materiál opotřeben až na pórovitý bronz (Obr. 5-34d). Potvrdilo se, že u disků dochází k úběru materiálu.

Metoda nanášení teflonu na pórovitý bronz způsobuje, že drsnost povrchu je větší než u ostatních materiálů (Obr. 5-35). Tím, že je původní matrice z oceli, je dodržena rovinnost a lze vyhodnotit stopu po opotřebení i v rámci drsnosti. Úbytek materiálu ($3,7 \pm 2,8$) mg, odpovídá specifické míře opotřebení ($-2,6\text{E}-6 \pm 1,9\text{E}-6$) $\text{mm}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.

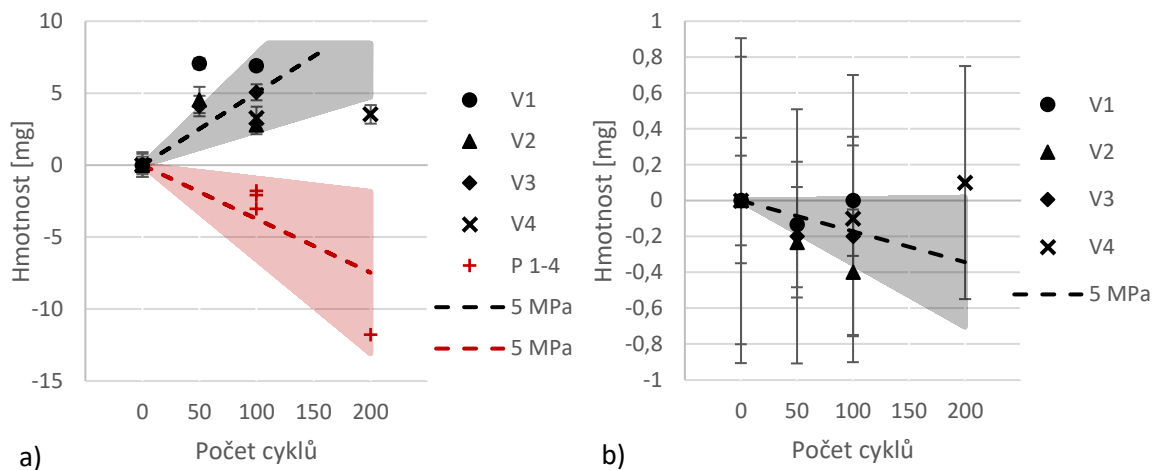


Obr. 5-34 Vzorky PTFE: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování;
c) snímek pinu z mikroskopu; d) detail stopy



Obr. 5-35 Snímek disku z PTFE na profilometru a statistické vyhodnocení dat

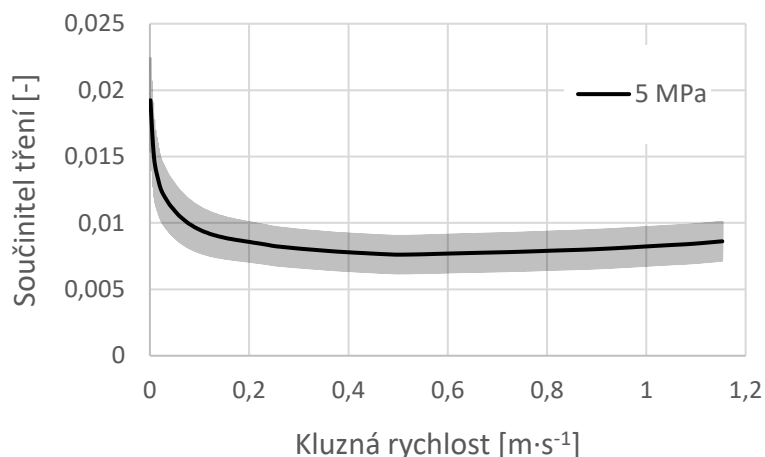
Metoda vyhodnocení pomocí gravimetrie selhala u PTFE stejně jako u UHMWPE (Obr. 5-36). U měření hmotnosti pinu bylo naměřeno opotřebení $(0,17 \pm 0,18)$ mg, přepočítáno na specifickou míru opotřebení $(7,8E-9 \pm 8,2E-9)$ $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 5-36 Míra opotřebení: a) disku z teflonového kompozitu; b) pinu

Součinitel tření

Vyhodnocení tření proběhlo pro celý rozsah otáček (Obr. 5-37). Velikost součinitele tření (0,15) při nulové rychlosti je nejnižší ze všech materiálů. Součinitel tření pro vysoké rychlosti je 0,007-0,01.



Obr. 5-37 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro PTFE

Další pozorované jevy

Teplota oleje se při testech nezvýšila. Vibrace a zvuková emise byla pouze při otáčkách blízkých nule. Drsnost plochy disku v místě kontaktu po testu byla Ra 1,54 μm. Materiál citlivý na ostré hrany.

5.3 Souhrnné výsledky

V této kapitole jsou prezentována naměřená data pro všechny zkoumané materiály v tabulkách.

5.3.1 Opotřebení

V Tab. 5-1 jsou výsledné hodnoty opotřebení pro všechny měřené materiály včetně jejich přesnosti vyhodnocení (rozptyl a přesnost měření).

Tab. 5-1 Opotřebení vzorků pro 100 cyklů

Materiál	Analytická váha				Profilometr		Specifiická míra opotřebení	
	[mg]				[mg]		[mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹]	
	Disk		Pin		Disk		Disk	Pin
	5 MPa	3 MPa	5 MPa	3 MPa	5 MPa	3 MPa	3-5 Mpa	3-5 Mpa
Konstruk. ocel	-0,22 ±0,15	0,04 -	-0,9 ±0,7	-0,23 -	-0,28 ±0,07	-0,28 -	-7,0E-8 ±4,7E-8	-3,9E-8 ±3,2E-8
Cínový bronz	-43,5 ±4,9	-15,5 ±4,3	0,02 ±0,15	-0,03 ±0,15	-43,5 ±7,0	-19,5 ± 8,2	-9,9E-6 ±1,2E-6	-0,5E-9 ±6,8E-9
Olověný bronz	-50,6 ±2,9	-36,1 ±4,9	0,22 ±0,15	-0,04 ±0,15	-49,0 ±2,1	-38,0 ± 4,7	-15,4E-6 ±2,1E-6	3,2E-9 ±7,3E-9
Hliníkový bronz	-1,1 ±0,6	-	-0,04 ±0,15	-	-4,0 ±1,1	-	-3,5E-7 ±2,0E-7	-1,8E-9 ±6,8E-9
Pozink. ocel	-161 -	-56 ±20	3,33 -	1,5 ±0,24	-166 -	-68,1 ± 8,7	-4,4E-5 ±1,5E-5	14,6E-8 ±2,6E-8
Cínová kompozice	-2,3 ±1,3	-1,03 ±0,17	-0,21 ±0,15	-0,14 ±0,15	-2,2 ±0,9	-1,19 ± 0,14	-6,6E-7 ±2,9E-7	-10,7E-9 ±6,8E-9
Olověná kompozice	-	-8,3 ±1,8	-	-0,02 ±0,15	-	-6,1 ± 2,2	-34,7E-7 ±7,6E-7	-1,7E-9 ±6,8E-9
UHMWPE	-	-	0,04 ±0,15	-	-3,2 ±2,1	-	-8,4E-6 ±5,4E-6	1,9E-9 ±6,8E-9
Kompozit PTFE	-	-	-0,17 ±0,18	-	-3,7 ±2,8	-	-2,6E-6 ±1,9E-6	-7,8E-9 ±8,2E-9

5.3.2 Tření

V Tab. 5-2 jsou průměrné hodnoty součinitele tření za definovaný cyklus pro všechny měřené materiály včetně jejich přesnosti vyhodnocení (rozptyl a přesnost měření). Tabulka také obsahuje drsnost materiálu před a po testech.

Tab. 5-2 Opotřebenění vzorků pro 100 cyklů

Materiál	Součinitel tření				Drsnost Ra		
	[-]				[μm]		
	Vážený průměr		Při 1 m·s ⁻¹		Disk		
	5 MPa	3 MPa	5 MPa	3 MPa	5 MPa	3 MPa	Původní
Konstrukční ocel	0,073 ±0,010	0,065 -	0,031 ±0,009	0,009 -	0,63	0,91	0,66
Cínový bronz	0,064 ±0,006	0,039 ±0,008	0,017 ±0,007	0,009 ±0,003	0,29	0,22	0,40
Olověný bronz	0,103 ±0,004	0,097 ±0,005	0,059 ±0,008	0,054 ±0,009	0,38	0,36	0,26
Hliníkový bronz	0,029 ±0,013	-	0,016 ±0,007	-	0,21	-	0,51
Pozinkovaná ocel	0,092 -	0,072 ±0,005	0,063 -	0,034 ±0,006	9,84	1,12	1,03
Cínová kompozice	0,010 ±0,002	0,015 ±0,007	0,006 ±0,001	0,011 ±0,006	0,06	0,14	0,40
Olověná kompozice	-	0,017 ±0,005	-	0,003 ±0,004	-	0,12	0,36
UHMWPE	0,127 ±0,028	-	0,104 ±0,018	-	0,53	-	0,97
Kompozit PTFE	0,009 ±0,002	-	0,008 ±0,001	-	1,54	-	1,84

6 DISKUZE

V této kapitole jsou prezentovány nejvýznamnější výsledky a diskutují se limity výzkumu. Jsou porovnány vůči získaným informacím z rešerše a diskutuje se nad širšími souvislostmi. Na konci jsou zhodnoceny nevhodnější materiály dle vzniklého výzkumu.

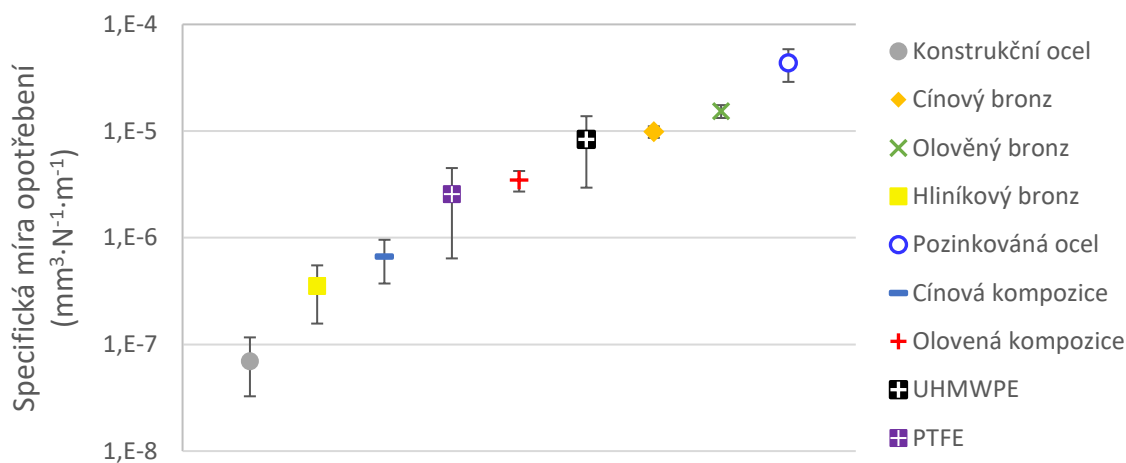
6.1 Interpretace výsledků

Výsledky z jednotlivých měření vykazují poměrně vysokou variabilitu, což ztěžuje jejich vyhodnocení. Díky opakovaným měřením a věnování dostatečného času každému vzorku (10-11 hodin) bylo možné získat dostatečně velkou statistickou množinu, která přispěla ke zvýšení přesnosti a lepší predikci chování. Během experimentu byly dodrženy podmínky, které mohou nastat v hydrostatickém ložisku, včetně rychlosti, tlaku, mazání, konformity a drsnosti reálných materiálů.

Rozdíl mezi reálnou součástí a modelem je především v zanedbání výrobních a montážních chyb. Jedná se o chyby vzniklé špatným spojením segmentů. Může docházet ke špatné návaznosti kluzných ploch, jako je přesazení a špatná rovnoběžnost jednotlivých segmentů. Pouze v případě nedostatečné rovinnosti dosáhnuté při experimentu může dojít k podobným podmínkám jako v provozu. Dalším rozdílem je tuhost soustavy, kvůli možnosti měření pomocí tenzometru je zde snižená tuhost, která se projevuje při otáčkách blízkých nule zvýšenými vibracemi.

6.1.1 Opotřebení

Na Obr. 6-1 je na logaritmické stupnici znázorněna specifická míra opotřebení pro všechny testované materiály včetně jejich rozptylu a nejistoty měření. Nejmenší opotřebení mají při experimentech nejtvrďší materiály ocel a hliníkový bronz. Oba materiály mají velkou citlivost na rovinnost a další podmínky, jako například čistotu kontaktu. Při testování se to projevilo markantními rozdíly v opotřebení. Tyto vzorky byly kvůli nedodržení podmínek vyřazeny a materiály byly označeny jako nevhodné pro ložiska s většími výrobními vadami. V pořadí za těmito materiály jsou kompozitní výstelky a technické plasty. Nejlépe z nich dopadla cínová kompozice. U nanášené vrstvy bylo největší opotřebení pozorované na začátku testu, naměřené opotřebení je převážně záběh. Další v pořadí je PTFE kompozit, u technických plastů selhalo vyhodnocení pomocí gravimetrie, odchylka je podstatně větší než u ostatních materiálů. Další skupinou materiálů jsou měkké bronzy. Nejhuře dopadla antikorozi ochrana povrchu pozinkováním.



Obr. 6-1 Míra opotřebení disků

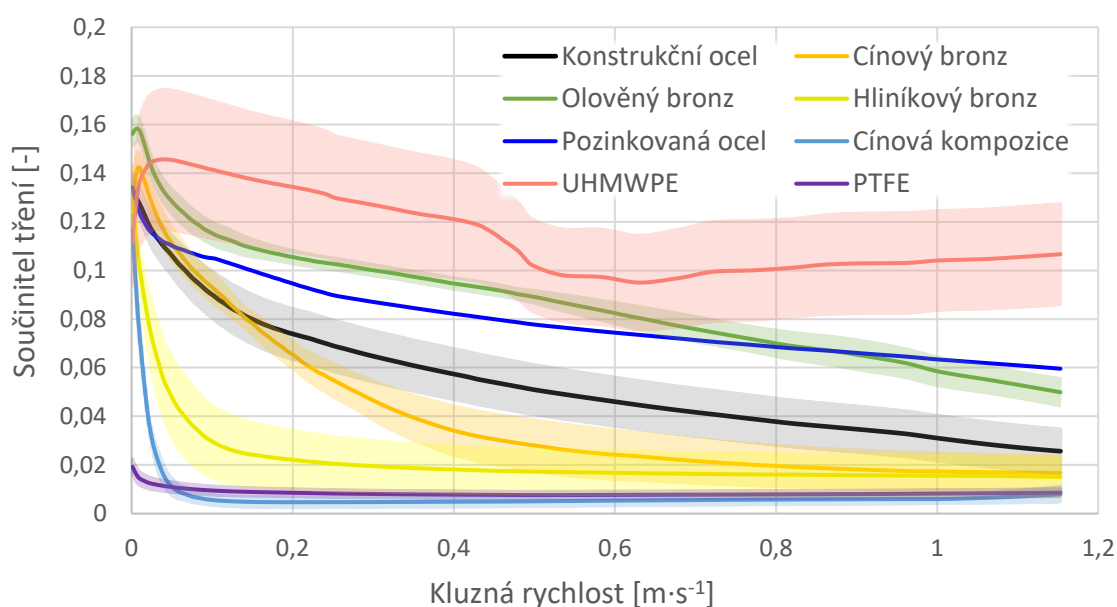
Na grafu Obr. 6-2 jsou vyneseny hodnoty specifické míry opotřebení (záporné hodnoty) či nanášení (kladné hodnoty) pro piny od všech zástupců seřezaných od největšího nanášení až po největší opotřebení materiálu. Největší nanášení materiálu bylo pozorované u pozinkované oceli, liší se o celý řád. Nanášení bylo velice nestabilní. Nanášení materiálu probíhalo i u bronzů. Nejvýrazněji se nanášení projevovalo při 5 Mpa. U olověného bronzu nanášení převažuje nad opotřebením, u cínového bronzu je to v rovnováze a u tvrdého hliníkového bronzu je výraznější opotřebení. U UHMWPE je opotřebení nepatrné a pomocí gravimetrie je detekovatelné nesení polymeru na pinu, hodnoty jsou pod přesností přesné váhy. U teflonu je jasně identifikovatelné opotřebení materiálu. U cínové kompozice je opotřebení větší než přesnost váhy. Opotřebení je při prvních padesáti cyklech výraznější než při dalších padesáti. Jedná se tedy o záběh, který přispívá k zvýšení konformity na mikroúrovni. U konstrukční oceli je výrazné opotřebení.



Obr. 6-2 Míra změny hmotnosti pinů (nanášení a úbytek materiálu)

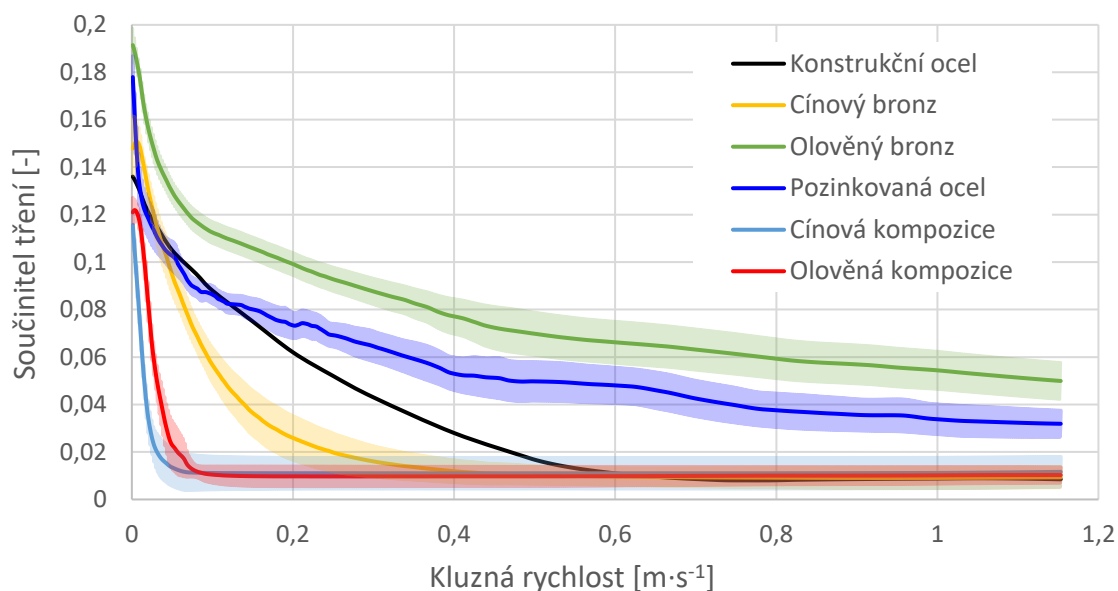
6.1.2 Součinitel tření

Na Obr. 6-3 je graf průběhu tření pro rozsah kluzných rychlostí 0 až 1,1 m pro materiály testované při zatížení 5 MPa včetně odchylky. Nejlepších výsledků dosáhly dva materiály, cínová kompozice a PTFE kompozit. Mezi těmito materiály jsou však velké rozdíly v chování. Cínová kompozice má nižší koeficient tření při vyšších rychlostech, při nízkých otáčkách dochází k razantnímu zvýšení tření kvůli meznímu mazání. Teflon má samomazné schopnosti, díky čemuž má podstatně nižší součinitel tření při kluzných rychlostech blízkých nule. Ocel v rozsahu otáček zůstala ve smíšeném mazání stejně jako olověný bronz. Ostatní bronzy hydrodynamického mazání dosáhly. U pozinkované oceli nebylo kvůli riziku poškození stroje opakováno měření, proto zde není uvedena odchylka. Nejhorší dopadl vysokomolekulární polyetylen.



Obr. 6-3 Vývoj součinitele tření v kontaktu při 5 MPa

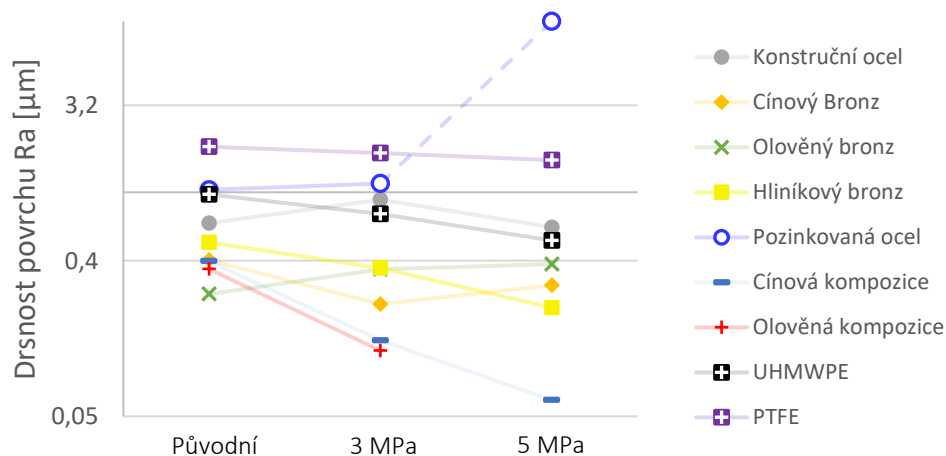
Na Obr. 6-4 je graf průběhu tření pro rozsah kluzných rychlostí 0 až 1,1 m pro materiály testované při zatížení 3 MPa včetně odchylky. V grafu je navíc vynesena i olověná kompozice. Při snížení zatížení se posouvá přechod ze smíšeného mazání do hydrodynamického do nižších kluzných rychlostí. Jev lze pozorovat například u oceli, která při daných podmínkách už dosáhla hydrodynamického mazání. U pozinkované oceli a olověného bronzu tomu tak není. Jedním z hlavních důvodů může být zvýšená drsnost povrchu pinu vlivem nanesené vrstvy. U těchto dvou materiálů dochází k trvalému opotřebování materiálu, které se projevuje i na tření. Olověný bronz má vyšší pevnost než pozinkovaná vrstva, což je jeden z důvodů, proč je součinitel u olověného bronzu vyšší. Vlnitost křivky pozinkované oceli je způsobena sníženým počtem cyklů (10krát méně), z důvodů měření součinitele tření povrchové vrstvy a vyloučení kontaktu pinu s ocelovou maticí. Ocelový vzorek byl testován pouze jednou, proto u něj není vykreslený rozptyl. Měření bylo 3krát delší a má vyšší vypovídající hodnotu.



Obr. 6-4 Vývoj součinitele tření v kontaktu při 3 MPa

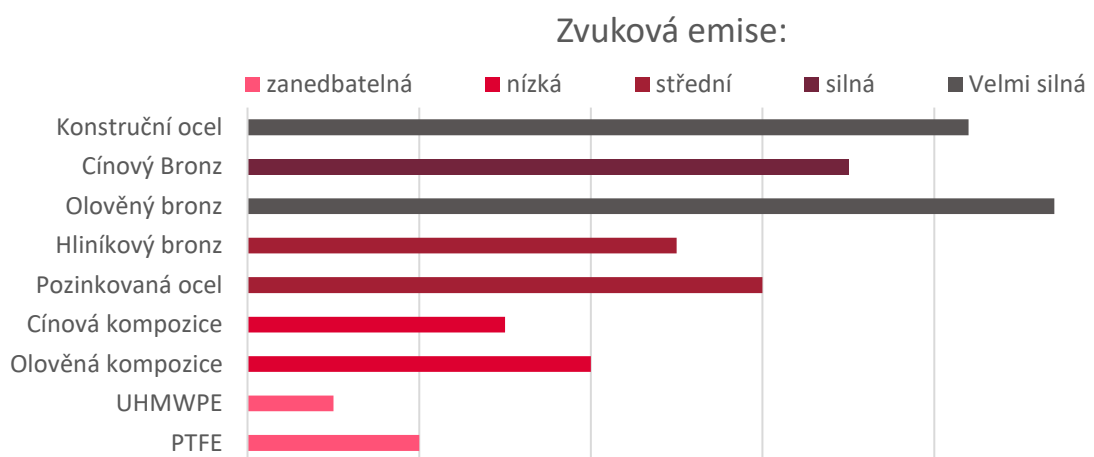
6.1.3 Další pozorované jevy

Mezi další pozorované jevy patří i drsnost povrchu. Vždy na začátku před testy, po testech při 3 MPa a po testech při 5 MPa (Obr. 6-5). Drsnost je hlavní vlastnost materiálu, která ovlivňuje režim a kvalitu mazání. U kompozitních výsterek (cínová a olověná) dochází k razantnímu snižování drsnosti povrchu, které zlepšuje mazání při menší tloušťce vrstvy oleje. Materiál přechází z hydrodynamického mazání do smíšeného mazání při nižších otáčkách, což snižuje tření a opotřebení. Snižování drsnosti povrchu je pozorovatelné i u technických plastů (UHMWPE a PTFE) a některých bronzů (hliníkový a cínový). U olověného bronzu drsnost výrazně roste, kvůli tomu kombinace materiálu přechází do hydrodynamického režimu mazání až při vyšších rychlostech.



Obr. 6-5 Drsnost povrchu před testem, po testech při 3 MPa a 5 MPa

Hluková emise (Obr. 6-6) je prvním vodítkem pro rozpoznání kritického stavu. Při experimentech jednotlivé materiály produkovaly jinou intenzitu hluku. Nízká tuhost experimentálního vybavení měla nízkou tuhost, což může bránit v přenositelnosti výsledků na reálný stroj. Hodnocení bylo subjektivní. U aplikací, kde je nutné dbát na snížení hlučnosti (například divadelní točny), je vhodné znát intenzitu zvuku, kterou kombinace materiálů při vzájemném kontaktu produkuje. Nízkou hlučností vynikají technické plasty kvůli nízké tuhosti a schopnosti tlumit vibrace. Při použití těchto materiálů je však nutné provádět pravidelné kontroly, protože při případném kritickém stavu materiály na kolizi povrchů zvukovou emisí neupozorní. Při přehlédnutí může dojít k rozsáhlejším škodám než u ostatních materiálů.



Obr. 6-6 Hlučnost kontaktu při kritickém stavu

6.1.4 Srovnání výsledků a řešerše

Tato kapitola popisuje významné informace zjištěné o materiálech během výzkumu a jsou porovnány s výsledky vyhledaných publikací.

Konstrukční ocel a antikoroziční úpravy

Ze všech testovaných materiálů dopadla standardní ocel z pohledu opotřebení materiálu disku nejlépe, naopak opotřebení pinu bylo největší. U pinu lze také pozorovat u 100 cyklového testu zabíhání. U prodlouženého testu pro 260 cyklů je už patrné pravidelné opotřebení, a dokonce zvýšení drsnosti. Tato materiálová kombinace se používá hlavně kvůli nízkým nákladům na výrobu, při opravách je však nutné renovovat kapsu i běhoun. U VHSL může docházet k výrobním chybám při montáži, což snižuje konformitu a může docházet k lokálnímu zvýšení tlaku. Při testování nebyla dodržena u jednoho vzorku požadovaná rovinnost. Výsledné opotřebení bylo řádově vyšší. Materiál kvůli své tvrdosti špatně snáší nekonformní styk, dochází k odírání, které se na rozdíl od ostatních materiálů hromadí a zhoršuje tribologické vlastnosti kontaktu. Materiál je nevhodný pro VHSL.

Antikoroziční úprava žárovým zinkováním byla testována kvůli studii P. Sanyama a kol., kde byla testována v kombinaci s UHMWPE. Bylo prokázáno, že zinek v podobě povrchové úpravy snižuje tření [31]. Při testování v laboratoři v kombinaci s ocelí muselo být předčasně ukončeno. Materiál se nestabilně přenáší z jednoho povrchu na druhý a brání pohybu, což se projevuje zvýšením tření hlavně při nižších otáčkách. Úbytek objemu materiálu je enormní a během krátkého času dochází ke kontaktu výchozí matrice s druhým materiálem. Kombinace materiálu ocel a pozinkovaná ocel použitá v tomto výzkumu není vhodná pro kluzná ložiska.

Bronzy

Z předešlých výzkumů bronzových kluzných ložisek je velikost míry opotřebení cínové kompozice (CuSn10) $10E-6 \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ [28]. Míra opotřebení disků při testování VHSL je $9,9E-6 \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Výsledky jsou téměř totožné, což poukazuje na správné provedení testovacího procesu. Blízkost výsledků je spíš náhodná kvůli tomu, že je materiál vystaven rozdílným podmínkám. U testování kluzných ložisek je materiál vystaven podstatně nižšímu konstantnímu zatěžování při rychlosti $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Mazané je prováděno olejem s vyšší viskozitou. Oproti tomu při testech VHSL je zatěžování tranzientní. Chování materiálu je ustálené a lehce predikovatelné. Materiál je vhodný pro VHSL.

Bronzová slitina s zinkem a olovem (CuSn7Zn4Pb7) je chemickým složením podobná cínovému bronzu. Slitina se na výrobu kluzných ploch používá kvůli svým mechanickým vlastnostem, dostupnosti a obrobitelnosti. Při testování měla vyšší míru opotřebení i součinitel tření. Materiály obsahující olovo nejsou příhodné z hlediska dopadů na životní prostředí, je vhodné vybírat jiné bezolovnaté slitiny a škodlivé látky používat pouze v aplikacích, kde je zaručeno, že nemůže dojít jejich úniku.

Dle dostupných publikací zaměřených na kluzná ložiska hliníkové slitiny a bronzy snižují opotřebení [28,29]. Při testování byla zvolena dostupná slitina s tvrdostí podobné oceli. Opotřebení je oproti dalším materiálům řádově nižší, došlo zde však k podobnému jevu jako při testování s konstrukční ocelí. Materiál je citlivý na konformitu kontaktu, pokud není dodržena, roste jeho opotřebení (Obr. 6-7). Proto je tato konkrétní slitina nevhodná pro použití u kluzných ploch VHSL.



Obr. 6-7 Foto vyřazeného testu

Kompozitní ložiskové výstelky

Cínová kompozice byla při rešerši trhu označena jako nejvíce zastoupený materiál při výrobě HD ložisek, což v dnešním neregulovaném trhu ukazuje na její vhodnost [14-26]. Míra opotřebení je mezi nalezenými publikacemi řádově odlišná, rozdíl je způsoben rozdílnými podmínkami a délkou testu (kvůli nelinearitě opotřebení). Při podmínkách HD ložisek (nižší tlak a vyšší rychlosti) z dostupných publikací vychází z pohledu tření a opotřebení lépe kompozitní polymery [32, 33]. Při testování kritického stavu VHSL se ukázalo, že výsledky vychází opačně. Materiál má při hodnotách blízkým nule vyšší součinitel tření než teflonové kompozity, ale při vyšších otáčkách je tomu naopak. Hlavním důvodem je schopnost cínové kompozice uzpůsobovat svůj povrch pro zvýšení konformity kontaktu. Na začátku experimentu dojde k záběhu disku i pinu a následně je opotřebení minimální. Materiál je pro VHSL velice vhodný kvůli nízké míře opotřebení, nízkému součiniteli tření a drsnosti povrchu po záběhu.

Olověná kompozice se chová podobně, rozdíl je v chemickém složení, určeného pro nižší kontaktní tlaky. Materiál je velmi vhodný pro použití u VHSL s ohledem na jeho výhody, které zahrnují nízkou míru opotřebení, nízký součinitel tření a drsnost povrchu po záběhu. Nicméně kvůli negativním dopadům na životní prostředí je výhodné preferovat jiné bezolovnaté slitiny a olověnou kompozici používat pouze v aplikacích, kde je zajištěna bezpečnost a minimalizováno riziko úniku škodlivin.

Polymery a kompozitní materiály

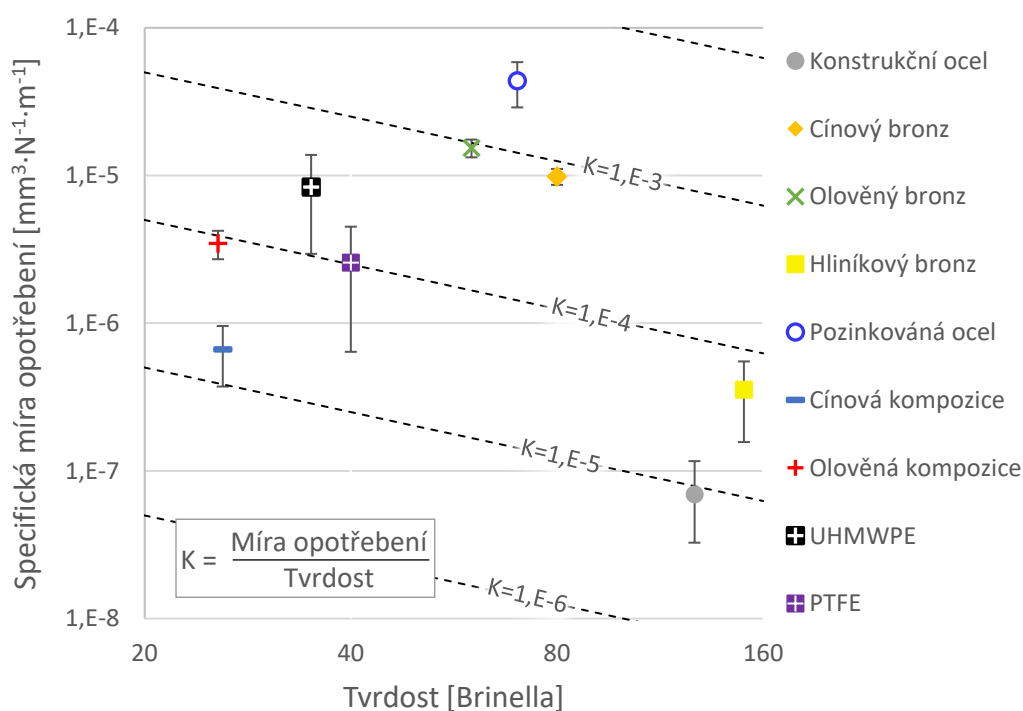
Vysokomolekulární polyetylen (UHMWPE) je často používaným materiálem při revitalizaci poškozených ložisek hlavně z důvodů své odolnosti a možností technologického zpracování. Materiál má v kombinaci s ocelí vysoký součinitel tření. Energie se přeměňuje převážně na teplo. Materiál je tepelný izolant a má nízkou teplotu tání. Z těchto důvodů může docházet k deformaci povrchu, nebo dokonce k jeho roztavení. Nízká tuhost disku a tepelné ovlivnění znemožňuje kontaktu přejít do hydrodynamického mazání, kvůli tomu součinitel tření při vyšších rychlostech neklesá. Z pohledu výsledků opotřebení je materiál vhodný pro VHSL, při jejich návrhu je však nutné dbát na zaručení odvodu tepla a jeho udržení pod kritickou hodnotou. Snížení teploty lze dosáhnout i nanesením pozinkovaného povlaku na kontaktní plochu [31].

Kompozit PTFE představuje technologicky nejnovější materiál z testovaného souboru. Jeho chemické složení a struktura se však liší v závislosti na výrobci a lokalitě, což komplikuje přímé srovnávání výsledků výzkumů. Publikace zaměřené na opotřebení materiálů při nedostatečném mazání tvrdí, že teflonové kompozice s přísadou plniva vykazují lepší tribologické vlastnosti než cínová kompozice [33]. Naopak při testování za kritických podmínek v hydrostatických ložiscích bylo zjištěno vyšší opotřebení u kompozitu PTFE než u cínové kompozice. Tento jev nemusí být pouze způsoben podmínkami, ale závisí také na

konkrétním složení povrchové vrstvy. Kompozit PTFE vykazuje nízký součinitel tření, který je dokonce nejnižší při rychlostech blízkých nule ve srovnání s ostatními testovanými materiály. Materiál je velmi vhodný pro aplikace v VHSL, je však důležité se vyvarovat ostrých hran, které by mohly materiál poškodit.

Tvrdość a opotřebení

Tvrdość je mechanická vlastnořt materiálu vyjadřující odpor proti vnikání cizího tělesa do povrchu. V dalřím grafu jsou vyneseny hodnoty specifické míry opotřebení jednotlivých materiáluů na tvrdořti (Obr. 6-8). Tvrdość nebyla fyzicky měřena na vzorcích, je daná výrobcem a její zobrazení na grafu je především pro ilustraci. Pro různé skupiny materiáluů se často používají odlišné metody pro stanovení tvrdořti. Proto je nutné brát v úvahu, že hodnoty tvrdořti v grafu jsou pouze orientační a mohou se liřit v závislosti na specifické metodě přepočtu. Pokud materiály vyneseme do grafu závislosti míry opotřebení a tvrdořti, není zde pozorovatelný žádný trend, pouze u materiáluů z jednotlivých skupin. Do grafu jsou také vyneseny vrstevnice konstanty opotřebení K. Míra opotřebení, která je korigována tvrdořtí materiálu, lépe reflektuje tribologické vlastnořti daného materiálu.



Obr. 6-8 Míra opotřebení disků v závislosti na tvrdořti materiálu

Specifické podmínky kritického stavu VHSL značně mění podobu a rozložení mapy opotřebení materiálu. Pokud ji porovnááme vůči materiálové databázi GRANTA, můžeme zde pozorovat značné rozdíly [37]. Opotřebení plastů je o jeden až dva řády vyšší. Rozdíl mezi bronzy a hliníkovou slitinou je o dva řády, předpoklad byl řád pouze jeden.

6.2 Verifikace hypotéz

Tato kapitola odpovídá na vědeckou otázku: O1: Jaký vliv má volba materiálu a typu povrchové úpravy na redukci poškození kluzné plochy u velkorozměrového hydrostatického ložiska v případě poruchy dodávky tlakového oleje?

Provedené testy a analýzy potvrzují, že volba materiálu a typ povrchové úpravy mají zásadní vliv na míru opotřebení kluzné plochy velkorozměrového hydrostatického ložiska v případě poruchy dodávky tlakového oleje. Zjištění naznačují, že volba materiálu ovlivňuje míru opotřebení minimálně v rozsahu tří řádů. Vliv závisí na kombinaci pevnosti, tvrdosti, tribologických vlastností, tepelné stability, odolnosti vůči otěru a dalších vlastnostech, které se projevují během kritického stavu.

Doporučené materiály pro VHSL

Na základě stanovené metodiky byla sestavena Tab. 6-1 a vyhodnoceny klíčové tribologické vlastnosti materiálů. Vlastnosti byly ohodnoceny bodovým systémem na základě pořadí, váhy kritérií a následně seřazeny podle jejich hodnocení. Jedná se o doporučení, které je nutné přizpůsobit konkrétním návrhovým požadavkům. Hodnocení neobsahuje ekologické dopady, odolnost vůči prostředí nebo například ekonomický dopad na výrobu a údržbu. Je vhodné získané informace využít v kombinaci s diskuzí.

Tab. 6-1 Bodové hodnocení materiálů

Materiál	Opotřebení	Tření	Drsnost	$\sum(k_i \cdot n_i)$
Konstrukční ocel	9	4	3	60
Cínový Bronz	3	5	5	35
Olověný bronz	2	2	2	18
Hliníkový bronz	8	6	7	65
Pozinkovaná ocel	1	3	1	15
Cínová kompozice	7	8	9	68
Olověná kompozice	5	7	8	54
UHMWPE	4	1	6	29
PTFE	6	9	4	61
Váha kritéria (k_i)	5	3	1	-

Kvůli riziku selhání materiálu při kritickém stavu byla vyřazena konstrukční ocel a hliníkový bronz. Důvodem je selhání materiálu (v 1 ze 4 případů) při nízké konformitě. V těchto podmínkách se materiály chovaly nepředvídatelně, bylo zde pozorováno nadměrné opotřebení. Z podobného důvodu byla vyřazena i pozinkovaná ocel, je zde riziko zadření kontaktu kapsy s běhounem.

Tab. 6-2 Doporučení volby materiálu

Pořadí	Materiál	Doporučení
1.	Cínová kompozice	Vhodné
2.	PTFE	
3.	Olověná kompozice	
4.	Cínový Bronz	
5.	UHMWPE	
6.	Olověný bronz	
7.	Tvrdý hliníkový bronz	Nevhodné
8.	Konstrukční ocel	
9.	Pozinkovaná ocel	

H1: Cíleným použitím nových materiálů a nanášením povrchových vrstev se specifickými vlastnostmi na kluzné povrchy velkorozměrových hydrostatických ložisek lze snižovat míru jejich opotřebení při poruše dodávky tlakového oleje.

Hypotéza předpokládá, že nové materiály s odlišnými charakteristikami budou překonávat tradiční cínové kompozice. Nicméně v průběhu provedených experimentů se ukázalo, že tyto materiály dosahují parametrů, které jsou podobné vlastnostem cínové kompozice. Nejlepších výsledků dosáhl kompozit PTFE. Rozdíl mezi cínovou kompozicí a kompozitu PTFE není kvůli rozptylům statisticky významný, ale je patrné, že cínová kompozice dosahuje nižší míry opotřebení.

Žádný z materiálů vhodných pro kritický stav výpadku tlakového oleje VHSL nedosahuje vyšší míry opotřebení než cínová kompozice. I na základě bodového vyhodnocení dopadla cínová kompozice nejlépe, z tohoto důvodu byla hypotéza zamítnuta. Nicméně výsledek je podmíněn výběrem a dostupností konkrétních materiálů. Nové materiály stále představují potenciál pro snížení míry opotřebení kluzných ploch v případě poruchy dodávky tlakového oleje.

7 ZÁVĚR

V této práci byl zkoumán vliv volby materiálů a typu povrchových úprav na tření a opotřebení pomocí experimentu v kontrolovaných laboratorních podmínkách. Podmínky reflektovaly charakteristiky kritického stavu výpadku tlakového oleje u velkorozměrového hydrostatického ložiska (VHSL).

Inovativní přínosy práce

- Experimentální modul pro testování kluzných povrchů VHSL
- Metoda optického vyhodnocení opotřebení pod úrovní drsnosti povrchu
- Soubor materiálů vhodných pro kluzné povrchy VHSL
- Míra opotřebení materiálů pro predikci životnosti kluzných povrchů VHSL

Na základě vypracované rešerše vznikl soubor použitelných materiálů a provozních podmínek. Byla navržena metodika výzkumu a vytvořeny specifikace experimentálních testů. Pro výzkum vznikl nový testovací modul, ve kterém lze testovat tribologické vlastnosti kluzných povrchů při vysokých rychlostech s mazivem o nízké viskozitě. Experimentální modul byl využit jako simulátor kritického stavu výpadku tlakového oleje u VHSL. Návrh splnil nutné podmínky pro experimenty, díky čemuž úspěšně proběhl výzkum. Modul může být použit pro další studium tribologických vlastností i pro další aplikace, které vyžadují vysoké podmínky zatížení a udržení maziva v kontaktu i při vysokých rychlostech.

Kvůli potřebě zvýšit přesnost a opakovatelnost výsledků byla navržena nová metoda vyhodnocení míry opotřebení. Ta využívá 3D geometrie naskenovaného povrchu opotřebené stopy. Na základě zakřivení drážky vytvoří statistický soubor dat pro zpracování. Díky vzniklé metodě lze získat tvar a míru opotřebení povrchu i v případech, kdy je hloubka stopy po opotřebení menší než výška profilu drsnosti povrchu. Z důvodu provádění vysokého počtu cyklů experimentů jsou výsledky míry opotřebení přesné a díky opakovaným měřením je znám i rozptyl pro každý materiál. Z výsledků lze predikovat životnost a navrhnout optimální termíny údržby.

Výsledkem experimentů je závislost tření na kluzné rychlosti, míra opotřebení a další jevy naměřené pro statistický soubor vzorků pro vybrané materiály. Vzniká tak seznam charakteristik, omezení a doporučení pro testované kluzné materiály, který lze použít k efektivnějšímu návrhu a provozu velkorozměrných hydrostatických ložisek. Díky informovanému rozhodovacímu procesu lze správně odhadnout, zda je vhodné investovat do materiálu odolnějšímu opotřebení, nebo provádět pravidelné odstávky zařízení. Informace mohou přispět k prosazení ložisek do nových oborů a aplikací, jako jsou například větrné elektrárny.

Nejlepších výsledků dosáhli zástupci kompozic (Stanit), polymerů (kompozit PTFE) a bronzů (cínových), kteří vykazovali nejlepší vlastnosti při definovaných parametrech v laboratorním testu. Tyto materiály mají nejlepší chování z pohledu tribologických vlastností při kritickém stavu výpadku tlakového oleje u VHSL.

Jako návrh dalšího zaměření výzkumu je možné zvážit provedení testování materiálu kluzných ploch za přítomnosti montážních chyb VHSL. Tím by bylo možné získat poznatky ohledně vlivu těchto chyb na výsledky opotřebení. Dalším zajímavým směrem výzkumu je technologie texturování povrchu, která se jeví jako vhodná povrchová úprava pro HS ložiska kvůli snížení negativních dopadů při podmínkách výpadku tlakového oleje. Inovativní technologie může dát kluznému povrchu další přidanou hodnotu. Povrchové důlky mohou sloužit jako zásobníky maziva, ze kterých při nedostatku emituje olej do místa kontaktu. Důlky zvyšují tepelnou kapacitu kluzných ploch (kvůli mazivu) a slouží jako pohlcovače částic opotřebení.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Hydrostatic Lubrication. *Engineering TriBology*. Elsevier, 1993, 1993, 307-334. Tribology Series. ISBN 9780444892355. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-8922(08)70580-7
2. LIU, Zhifeng, Yumo WANG, Ligang CAI, Yongsheng ZHAO, Qiang CHENG a Xiangmin DONG. A review of hydrostatic bearing system: Researches and applications. *Advances in Mechanical Engineering*. Elsevier, 2017, 1993, **9**(10), 936-958. Tribology Series. ISBN 9780444892355. ISSN 1687-8140. Dostupné z: doi:10.1177/1687814017730536
3. BASSANI, Roberto a B. PICCIGALLO. *Hydrostatic Lubrication*. 22nd ed. Amsterdam, The Neatherland: Elsevier science publishers B.V, 1992. ISBN 9780080875866.
4. MICHALEC, Michal, Petr SVOBODA, Ivan KŘUPKA a Martin HARTL. A review of the design and optimization of large-scale hydrostatic bearing systems: Researches and applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Elsevier, 2021, 1993, **24**(4), 936-958. Tribology Series. ISBN 9780444892355. ISSN 22150986. Dostupné z: doi:10.1016/j.jestch.2021.01.010
5. HAMROCK, Bernard J, Steven R SCHMMID a Bo O JACOBSON. *Fundamentals of fluid film lubrication*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2004, xiv, 699 s., : il. ISBN 0-8247-5371-2.
6. Pouring the New Grout: PIA13272. In, Michael McAuley. *Photojournal: NASA's Image* [online]. 2010-07-15, CL#97-1196 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA13272>
7. MICHALEC, Michal, Vojtěch POLNICKÝ, Jan FOLTÝN, Petr SVOBODA, Petr ŠPERKA a Jakub HURNÍK. The prediction of large-scale hydrostatic bearing pad misalignment error and its compensation using compliant support. *Precision engineering* [online]. Elsevier, 2022, **75**, 67-79 [cit. 2022-05-15]. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2022.01.011
8. Poznatky v oblasti hydrostatických ložisek. *MM Průmyslové spektrum* [online]. © 2001 - 2022 Copyright, 13. 11. 2002, #**11**(2002) [cit. 2022-05-15]. Kód článku: 21119. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/poznatky-v-oblasti-hydrostatickych-lozisek>
9. FOLTÝN, Jan. *Konstrukce hydrostatického uložení divadelní točny* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131965>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Svoboda.

10. PRIESTER A KOLEKTIV. Klzné ložiská. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury SNTL, 1981.
11. VINŠ, Jindřich. *Kluzná ložiska*. 2. přep.vyd. Praha: SNTL, 1971, 373 s.
12. SANTOS, Nathália Duarte Souza Alvarenga, Vínicius Rückert ROSO a Marco Tulio C FARIA. Review of engine journal bearing tribology in start-stop applications. *Engineering failure analysis* [online]. Elsevier, 2020, **108**, 104344 [cit. 2021-12-05]. ISSN 1350-6307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2019.104344
13. HUTCHINGS, Ian a Philip SHIPWAY. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Second edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017, xi, 388 stran : ilustrace (některé barevné). ISBN 978-0-08-100910-9.
14. ZOLLERN: *Hydrostatic rotary tables* [online]. Germany: ZOLLERN GmbH & Co., © 2022 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: www.zollern.com
15. *GTW Bearing s.r.o.* [online]. Příšov: ANTstudio, © GTW TECHNIK s.r.o. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.gtw.cz/>
16. *Metso:Outotec: Hydrostatic Bearing Upgrade* [online]. Metso Outotec, Copyright © 2022 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: www.mogroup.com/portfolio/hydrostatic-bearing-upgrade/
17. *Waukesha Bearings: Hydrostatic Bearing Upgrade* [online]. USA: Waukesha Bearings, © 2021 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: www.waukbearing.com
18. *Miba: Inovation in motion* [online]. © Miba AG 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.miba.com/en/product-areas/industrial-bearings>
19. *Kingsbury, Inc.®* [online]. USA: Kingsbury, ©2021 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: www.kingsbury.com
20. *Professional Instruments Company: Pursuit of precision* [online]. USA, 2021 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: www.airbearings.com
21. *Devitt Machinery Co.* [online]. USA, Copyright © 2020 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: www.moglice.com
22. *Wheeler Industries Inc.: Precision Components for Rotating Equipment* [online]. USA: Wheeler Industries, © 2016 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <http://wheelerfluidfilmbearings.com/>
23. *Pioneer Motor Bearing* [online]. USA [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.pioneer1.com/>
24. *Fusion Babbiting CO., INC.: Babbitt Bearing Repair & Manufacturing* [online]. USA: Fusion Babbiting CO., Copyright 2019 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://fusionbabbiting.com/>

25. *Lignum Vitae: Water Lubricated Bearings* [online]. USA, © 2022 [cit. 2022-05-03].
Dostupné z: <https://lignumvitaesolutions.com/>
26. *Diversified Bronze & Manufacturing Inc.: Babbitt Bearing Repair & Manufacturing* [online]. USA: Diversified Bronze & Manufacturing, Copyright © 2022 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: www.diversifiedbronze.com
27. FROST, Jacek a Wojciech LITWIN. Comparative Wear Test of Journal Sliding Bearings with Sintered Bronze and Babbitt Alloy Bushes Lubricated by Environmentally Acceptable/Adapted Lubricants (EAL). *Tribology Transactions*. 2023, **66**(3), 443-452. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2022.2155281
28. ÜNLÜ, Bekir Sadik. Investigation of tribological and mechanical properties of metal bearings. *Bulletin of Materials Science*. 2009, **32**(4), 451-457. ISSN 0250-4707. Dostupné z: doi:10.1007/s12034-009-0066-0
29. SINGH, Ramesh Chandra, Rajiv CHAUDHARY a Vipin Kumar SHARMA. Fabrication and sliding wear behavior of some lead-free bearing materials. *Materials Research Express*. 2019, **6**(6). ISSN 2053-1591. Dostupné z: doi:10.1088/2053-1591/ab0be4
30. ÜNLÜ, Bekir Sadik, Enver ATIK a Sinan KÖKSAL. *Tribological properties of polymer-based journal bearings*. 2009, **30**(7), 2618-2622. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2008.11.018
31. SAMYN, P., L. VAN SCHEPDAEL, J.S. LEENDERTZ, A. GERBER, W. VAN PAEPEGEM, P. DE BAETS a J. DEGRIECK. Large-scale friction and wear tests on a hybrid UHMWPE-pad/primer coating combination used as bearing element in an extremely high-loaded ball-joint. *Tribology International*. 2006, **39**(8), 796-811. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2005.07.009
32. RUTKEVIČIUS, Marius, Jimmy DONG, Darren TREMELLING, Julia VIERTTEL a Samuel BECKFORD. Low friction bio-inspired polydopamine/polytetrafluoroethylene coating performance in hydrodynamic bearings. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2021, **74**(8), 950-955. ISSN 0036-8792. Dostupné z: doi:10.1108/ILT-04-2021-0103
33. MCCARTHY, D. M. C. a S. B. GLAVATSKIH. Assessment of polymer composites for hydrodynamic journal-bearing applications. *Lubrication Science*. 2009, **21**(8), 331-341. ISSN 09540075. Dostupné z: doi:10.1002/lis.92
34. KATSAROS, Konstantinos, Dimitrios BOMPOS, Pantelis NIKOLAKOPOULOS a Stephanos THEODOSSIADES. Thermal–Hydrodynamic Behaviour of Coated Pivoted Pad Thrust Bearings: Comparison between Babbitt, PTFE and DLC. *Lubricants*. 2018, **6**(2). ISSN 2075-4442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants6020050

35. JAHANMIR, Said, Andrew Z. HUNSBERGER a Hooshang HESHMAT. Load Capacity and Durability of H-DLC Coated Hydrodynamic Thrust Bearings. *Journal of Tribology*. 2011, **133**(3). ISSN 0742-4787. Dostupné z: doi:10.1115/1.4003997
36. WASILCZUK, Michał, Michał WODTKE a Leszek DĄBROWSKI. Large Hydrodynamic Thrust Bearings and Their Application in Hydrogenerators. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA: Springer US, 2013, 2013, 1912-1926. ISBN 978-0-387-92896-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-92897-5_749
37. GRANTA CES EduPack 2010: 2 Material and Process Selection Charts [online]. January 2010. © Copyright Granta Design Ltd. United Kingdom: GRANTA, 42 s. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: www.grantadesign.com
38. LU, Ping a Robert J K WOOD. Tribological performance of surface texturing in mechanical applications—a review. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2020, **8**(4). ISSN 2051-672X. Dostupné z: doi:10.1088/2051-672X/abb6d0
39. AGGARWAL, Shipra a R.K. PANDEY. Performance investigation of micro-pocketed textured pad thrust bearing. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2018, **70**(8), 1388-1395. ISSN 0036-8792. Dostupné z: doi:10.1108/ILT-10-2017-0302
40. WANG, Lin, Zhanhai HAN, Guoding CHEN a Hua SU. Thermo-hydrodynamic analysis of large-eccentricity hydrodynamic bearings with texture on journal surface. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018, **232**(19), 3564-3569. ISSN 0954-4062. Dostupné z: doi:10.1177/0954406217739646
41. YADAV, Saurabh Kumar a Satish C. SHARMA. Performance of Hydrostatic Textured Thrust Bearing with Supply Holes Operating with Non-Newtonian Lubricant. *Tribology Transactions*. 2016, **59**(3), 408-420. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2015.1083065
42. MARIAN, Victor Gabriel, Dumitru GABRIEL, Gunter KNOLL a Salvatore FILIPPONE. Theoretical and Experimental Analysis of a Laser Textured Thrust Bearing. *Tribology Letters*. 2011, **44**(3), 335-343. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-011-9857-8
43. GALDA, Lidia, Jaroslaw SEP, Artur OLSZEWSKI a Tomasz ZOCHOWSKI. Experimental investigation into surface texture effect on journal bearings performance. *Tribology International*. 2019, **136**(3), 372-384. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.03.073
44. HSU, Stephen M, Yang JING, Diann HUA a Huan ZHANG. Friction reduction using discrete surface textures: principle and design. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014, **47**(33), 372-384. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/47/33/335307

45. HSU, Stephen M, Yang JING a Fei ZHAO. Self-adaptive surface texture design for friction reduction across the lubrication regimes. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2016, 4(1). ISSN 2051-672X. Dostupné z: doi:10.1088/2051-672X/4/1/014004
46. OLCHEIN, Arash. *Polymeric Materials for Bearing Applications: Tribological Studies in Lubricated Conditions* [online]. Luleå, Švédsko, 2015 [cit. 2022-12-31]. ISBN 978-91-7583-297-5. Dostupné z: www.ltu.se. Doktorální práce. Luleå University of Technology, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Division of Machine Elements
47. White Light Interferometry. *NanoScience Instruments* [online]. Phoenix, USA, © 2022 [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/white-light-interferometry/>
48. Coherence Scanning Interferometry. *The John A. Dutton e-Education Institute* [online]. The Pennsylvania State University: PennState, © 2020 [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/mcl-optpro/theory/node795>
49. KAŠČÁK, Pavol, Matúš SCHÄFFER, Markéta SCHMIDTOVÁ a Jakub SOMORA. *Testování kluzných kontaktů na pin-on-disk zařízení*. Brno, 2019. Technická zpráva ZKP. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Šperka.
50. WIKES, James O. *Fluid Mechanics for Chemical Engineers: with Microfluidics, CFD, and COMSOL Multiphysics 5*, 3rd Edition. 3rd Edition. Jul 31, 2017, 816 s. ISBN 978-0-13-471282-6.
51. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

A	aktuátor
C	konstanta
D_N	nominální průměr experimentu
D_P	nominální průměr podložky
F_N	normálová síla
$F_{p,c}$	návrhová síla predpětí
F_S	smyková síla
F_t	třecí síla
F_X	třecí síla
F_Z	zatěžovací síla
g	tíhové zrychlení
HD	hydrostatická (ložiska)
HS	hydrostatická
IF	impact factor
K	konstanta opotřebení
k_{sy}	součinitel tvaru drážky
M	motor
M_A	moment v bodě A
M_k	kroučící moment
n	počet
p	tlak
$P1-P6$	výsledky měření z optického profilometru
r	poloměr
Ra	průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti

<i>Scop.</i>	Scopus
<i>Schol.</i>	Google Scholar
<i>VI-V6</i>	výsledky měření gravimetrie
<i>VHSL</i>	velkorozměrová hydrostatická ložiska
<i>WOS</i>	Web of Science
γ_{M3}	součinitel typu spoje
μ	součinitel tření
ω	úhlová rychlost

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Radioteleskop pro hluboké vesmírné spojení a vynucená generální oprava, kvůli které byly půl roku omezeny vybrané mise vesmírných satelitů [6].....	15
Obr. 2-1 PRISMA diagram.....	17
Obr. 2-2 a) Zastoupení typu literatury; b) Rozdělení článků podle data publikování; c) Lokace článků	18
Obr. 2-3 Rozdělení článků dle: a) množství citací; b) impact factoru; c) H – indexu	18
Obr. 2-4 Výzkum publikovaný mezi roky 1990 až 2016 [2].....	19
Obr. 2-5 Schéma principu hydrostatického ložiska.....	20
Obr. 2-6 Schéma principu hydrostatického ložiska [14].....	20
Obr. 2-7 Tlakový profil v hydrostatickém ložisku při chodu stroje [1].....	21
Obr. 2-8 Provozní stavy ložiska	21
Obr. 2-9 Geometrické nepřesnosti ložiska [7].....	22
Obr. 2-10 Kritický stav ložiska a rozložení tlaku	23
Obr. 2-11 Obrázek ložiska v testovacím zařízení [9]	24
Obr. 2-12 Porovnání základních ložiskových slitin (1 - cínové kompozice; 2 - olovené kompozice; 3 - hliníkové ložiskové slitiny; 4 - olovené bronzy; 5 - cínové bronzy) [11].....	25
Obr. 2-13 Zastoupení materiálu na trhu u specializovaných firem na HS a HD ložiska [14-26].....	26
Obr. 2-14 Porovnání ložiskových slitin a) Tření; b) Opotřebení [28].....	28
Obr. 2-15 Porovnání bezolovnatých ložiskových slitin a) Tření; b) Opotřebení [29]	28
Obr. 2-16 Porovnání polymerů a) Tření; b) Opotřebení [30].....	29
Obr. 2-17 Vývoj záběhového tření polymeru UHMWPE s kluznou vzdáleností [31]	29
Obr. 2-18 Porovnání kompozitních materiálů a) Chemické složení; b) Opotřebení [33] .	30
Obr. 2-19 Porovnání kompozitních materiálů a) Chemické složení; b) Opotřebení [36] .	30
Obr. 2-20 Porovnání opotřebení a tvrdosti materiálů [37]	31
Obr. 2-21 (a) Počet prací publikovaných o tribologickém povrchovém texturování od roku 1996 (b) Rozložení různých zemí/regionů (c) Hlavní oblasti využití těchto publikací [38]	32

Obr. 2-22 (a) Typické rozložení tlaku pro jednu texturu s kavitací (b) Textura funguje za podmínek hladovějícího mazání (c) Typické rozložení tlaku přes stupňovitý a částečně texturovaný jezdec. [38]	32
Obr. 2-23 Definice geometrií a parametrů důlků. [38]	33
Obr. 2-24 (a) Změna zatížení a koeficientu tření s mikrokapsami různých tvarů průřezu; (b) profily tlaku ve střední rovině toku maziva v obvodovém směru s mikrokapsami různých tvarů průřezu; c) porovnání výkonnostních parametrů s různými texturami; e) změny výkonnostních parametrů s hloubkou kapsy; [39].....	33
Obr. 2-25 Změna výkonových ztrát třením (P) s hloubkou textury [41].	34
Obr. 2-26 Změna třecího momentu v závislosti na rychlosti otáčení. [42].....	34
Obr. 2-27 Porovnání Striebeckových křivek radiálních ložisek s různým povrchem. [43]	35
Obr. 2-28 Koeficienty tření jako funkce rychlosti při zatížení 15 N [44].....	35
Obr. 2-29 Návrhy povrchových textur, základní vzory a jejich kombinace [45]	35
Obr. 2-30 Rozdělení experimentálních zařízení z článků rešerše	36
Obr. 2-31 Mapa možných materiálových kombinací	39
Obr. 4-1 Schéma metodiky řešení výzkumu	45
Obr. 4-2 Tribometr Rtec MFT-5000	46
Obr. 4-3 Experimentální modul: a) fotografie; b) schéma	47
Obr. 4-4 a) Optický mikroskop Delta s fotoaparátem Nikon D5300; b) Profilometr Bruker Contour GT-X; c) Analytická váha KERN ABJ 320-4NM.....	48
Obr. 4-5 Schéma vybraných materiálových kombinací	48
Obr. 4-6 a) Výkres pinu; b) Foto pinů.....	49
Obr. 4-7 a) Výkres vzorku; b) Foto vzorků	50
Obr. 4-8 a) Ideální cyklus zatěžování vzorku b) Skutečný zatěžovací cyklus vzorku.....	51
Obr. 4-9 a) Silové působení pin-on-disk	52
Obr. 4-10 a) Schéma optické části zařízení; b) Vizualizace interferometrie bílého světla; c) Proces snímání [47,48]	53
Obr. 4-11 Výsledky gravimetrie (V1-V6) a profilometru (P1-P6) s lineární regresí	54
Obr. 4-12 a) Schéma měření, b) Vyhodnocení z tribometru c) Statisticky zpracovaná data..	54
Obr. 4-13 a) Šablona; b) Šablona s posunutým středem; c) Původní obraz; d) Deformovaný obraz	55

Obr. 4-14 a) Vyhodnocení topografie drážky.....	56
Obr. 4-15 a) Data ze simulace kritického stavu.....	57
Obr. 4-16 a) Statistický soubor dat (cykly).....	57
Obr. 4-17 Parazitní vlivy: a) vliv zatížení; b) vliv oleje	58
Obr. 4-18 a) Korigovaná data; b) Vyhodnocené tření	59
Obr. 4-19 Statistické zpracování a prezentace dat	59
Obr. 4-20 Strom cílů a omezení (světle cíle, červeně omezení).....	63
Obr. 4-21 Black box a glass box funkcí produktu	64
Obr. 4-22 Ilustrace konfigurace pin-on-plate a předběžný návrh.....	65
Obr. 4-23 Ilustrace konfigurace pin-on-disk a předběžný návrh.....	65
Obr. 4-24 Ilustrace konfigurace disk-on-disk a předběžný návrh	66
Obr. 4-25 Naklápěcí přípravek.....	67
Obr. 4-26 a) Přesný otvor a stavěcí šroub; b) Upínací čelisti; c) Objímka; d) Kleština	68
Obr. 4-27 Upínání a) jedním šroubem; b) více šrouby; c) jemným závitem mezi díly; d) upínkou.....	68
Obr. 4-28 a) Nádoba se dnem; b) Nádoba se dnem i okrajem; c) Bezedná s okrajem; d) Dvoudílná nádoba	68
Obr. 4-29 a) Nucený oběh maziva; b) Oběh pomocí kanálků; c) Gravitační plnění	69
Obr. 4-30 a) Ilustrace konceptu 1; b) předběžný návrh	70
Obr. 4-31 Funkce a princip kanálků a) $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; b) $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; c) $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; d) $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	71
Obr. 4-32 a) Ilustrace konceptu 2; b) předběžný návrh	72
Obr. 4-33 a) Ilustrace konceptu 3; b) předběžný návrh	73
Obr. 4-34 Foto tvorby modelu objemu oleje.....	77
Obr. 4-35 Metrologické měření rotačního modulu tribometru	78
Obr. 4-36 Výkres sestavy modulu	79
Obr. 4-37 Oblasti uložení jednotlivých dílů.....	80
Obr. 4-38 a) Kalibrační plíšky; b) kontrola kontaktu; c) výsledky z testování.....	82
Obr. 4-39 a) Upínací svěrka, náhrada kolíků; b) drážka pro vyjmutí vzorku a závitová díra.	82
Obr. 4-40 a) Chování hladiny oleje; b) Deflektory oleje	83
Obr. 4-41 a) Fotografie vrchní části zatěžovacího mechanismu; b) Schéma funkce	84

Obr. 4-42 Vyrovnání stojanu modulu	84
Obr. 4-43 Testované pružné zatěžovací členy	85
Obr. 4-44 Výsledky dynamického testu (NP – Nové pružiny; SP - Původní pružina; NK - měření bez zatížení)	86
Obr. 4-45 Pružný zatěžovací člen: a) výkres; b) foto	86
Obr. 4-46 Parazitní síla na senzoru třecí síly při statickém zatěžování	87
Obr. 5-1 Vzorčky ocel x ocel: a) Ocelový disk barevně; b) adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu	91
Obr. 5-2 Snímek ocelového disku na profilometru a statistické vyhodnocení dat	91
Obr. 5-3 Míra opotřebení ocelového disku	92
Obr. 5-4 Míra opotřebení pinu v kontaktu s konstrukční ocelí	92
Obr. 5-5 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro ocel	93
Obr. 5-6 Vzorčky cínový bronz: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu	94
Obr. 5-7 Snímek disku z cínového bronzu na profilometru a statistické vyhodnocení dat	94
Obr. 5-8 Míra opotřebení: a) disku z cínového bronzu; b) pinu	95
Obr. 5-9 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro cínový bronz	95
Obr. 5-10 Vzorčky cínový bronz: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu	96
Obr. 5-11 Snímek disku z olověného bronzu na profilometru a statistické vyhodnocení dat	96
Obr. 5-12 Míra opotřebení: a) disku z olověného bronzu; b) pinu	97
Obr. 5-13 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro olověný bronz	97
Obr. 5-14 Vzorčky hliníkový bronz: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu	98
Obr. 5-15 Snímek disku z hliníkového bronzu na profilometru a statistické vyhodnocení dat	99
Obr. 5-16 Míra opotřebení: a) disku z hliníkového bronzu; b) pinu	99
Obr. 5-17 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro hliníkový bronz	100
Obr. 5-18 Vzorčky cínový bronz: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu	101

Obr. 5-19 Snímek pozinkovaného disku na profilometru a statistické vyhodnocení dat .	101
Obr. 5-20 Míra opotřebení: a) pozinkovaného disku; b) pinu	102
Obr. 5-21 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro pozinkovanou ocel	102
Obr. 5-22 Vzorky cínová kompozice: a) disk barevně; b) adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu.....	103
Obr. 5-23 Snímek disku s cínovou kompozicí na profilometru a statistické vyhodnocení dat	104
Obr. 5-24 Míra opotřebení: a) disku s cínovou kompozicí; b) pinu	104
Obr. 5-25 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro ocel s cínovou kompozicí.	105
Obr. 5-26 Vzorky olověná kompozice: a) disk s olověnou kompozicí při 3 MPa barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu; d) fotografie disku po zastavení testu při 5 MPa.....	106
Obr. 5-27 Snímek disku s olověnou kompozicí na profilometru a statistické vyhodnocení dat	106
Obr. 5-28 Míra opotřebení: a) disku s cínovou kompozicí; b) pinu	107
Obr. 5-29 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro ocel s cínovou kompozicí.	107
Obr. 5-30 Vzorky UHMWPE: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu	108
Obr. 5-31 Snímek disku z polyetylenu na profilometru a statistické vyhodnocení dat ...	109
Obr. 5-32 Míra opotřebení: a) disku z UHMWPE; b) pinu	109
Obr. 5-33 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro UHMWPE	110
Obr. 5-34 Vzorky PTFE: a) disk barevně; b) disk adaptivní prahování; c) snímek pinu z mikroskopu; d) detail stopy.....	111
Obr. 5-35 Snímek disku z PTFE na profilometru a statistické vyhodnocení dat.....	111
Obr. 5-36 Míra opotřebení: a) disku z teflonového kompozitu; b) pinu.....	112
Obr. 5-37 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti pro PTFE.....	112
Obr. 6-1 Míra opotřebení disků.....	116
Obr. 6-2 Míra změny hmotnosti pinů (nanášení a úbytek materiálu).....	116
Obr. 6-3 Vývoj součinitele tření v kontaktu při 5 MPa.....	117
Obr. 6-4 Vývoj součinitele tření v kontaktu při 3 MPa.....	118
Obr. 6-5 Drsnost povrchu před testem, po testech při 3 MPa a 5 MPa	118
Obr. 6-6 Hlučnost kontaktu při kritickém stavu	119

Obr. 6-7 Foto vyřazeného testu.....	120
Obr. 6-8 Míra opotřebení disků v závislosti na tvrdosti materiálu	122

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Počet nalezených článků ve vědeckých databázích	18
Tab. 2-2	Lokalizované firmy.....	19
Tab. 2-3	Konkrétní parametry provozu VHSL	37
Tab. 2-4	Výběr materiálů pro experimentální ověření	39
Tab. 3-1	Přehled atributů a cílů: C-cíle,F-funkce,O-omezení, P-prostředky.....	43
Tab. 4-1	Vlastnosti drsnosti povrchu jednotlivých vzorků	50
Tab. 4-2	Hodnocení vhodnosti materiálu.....	61
Tab. 4-3	Tabulka hodnocení VDI 2225	64
Tab. 4-4	Hodnocené oblasti návrhu	64
Tab. 4-5	Hodnocení konfigurace modulu	66
Tab. 4-6	Výběr konstrukčních modifikací	69
Tab. 4-7	Konfigurace konceptu 1 s možnými modifikacemi	70
Tab. 4-8	Konfigurace konceptu 2 s možnými modifikacemi	71
Tab. 4-9	Konfigurace konceptu 3 s možnými modifikacemi	72
Tab. 4-10	Hodnocení konceptu 1	73
Tab. 4-11	Hodnocení konceptu 2	74
Tab. 4-12	Hodnocení konceptu 3	75
Tab. 4-13	Hodnocení konceptu 3	75
Tab. 4-14	Hodnocení konstrukčního návrhu po všech úpravách	88
Tab. 5-1	Opotřebení vzorků pro 100 cyklů	113
Tab. 5-2	Opotřebení vzorků pro 100 cyklů	114
Tab. 6-1	Bodové hodnocení materiálů.....	123
Tab. 6-2	Doporučení volby materiálu.....	124

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	EXPMOD50V09.pdf
Příloha 2	EXPMOD50V09-01A3.pdf
Příloha 3	EXPMOD50V09-02A3.pdf
Příloha 4	EXPMOD50V09-03A3.pdf
Příloha 5	EXPMOD50V09-04A4.pdf
Příloha 6	EXPMOD50V09-05A3.pdf
Příloha 7	EXPMOD50V09-06A4.pdf
Příloha 8	EXPMOD50V09-07A4.pdf
Příloha 9	ZATEZCLEN56.pdf
Příloha 10	ZATEZCLEN56-01A4.pdf
Příloha 11	ZATEZCLEN56-02A4.pdf