



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty V KLUZNÝCH KONTAKTECH

CONTACTLESS TEMPERATURE MEASUREMENT IN SLIDING CONTACTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Knoth

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Omasta, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Tomáš Knoth
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Milan Omasta, 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:

Bezkontaktní měření teploty v kluzných kontaktech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Chování kluzných ložisek a kontaktů je významně ovlivněno teplotními jevy odehrávajícími se v olejovém filmu. Přímé měření teploty maziva je složité, ale může přinést cenné poznatky pro pochopení různých mechanismů, např. spojených s vlivem texturování povrchů. Na Ústavu konstruování byla vyvinuta metoda IR termografie pro stanovení distribuce teploty v bodovém kontaktu. Podstata práce spočívá v implementaci této metody na konformní kluzný kontakt a realizaci výzkumu zaměřeného na vliv texturování povrchu.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je implementovat metodu IR termografie pro bezkontaktní měření teploty v kluzném konformním kontaktu a posoudit přítomnost termálních jevů u texturovaných povrchů.

Díličí cíle diplomové práce:

- navrhnout konstrukční úpravy experimentálního zařízení,
- implementovat IR termografii pro měření rozložení teploty v kontaktu,
- vytvořit postup kalibrace pro měření teploty v konformním kontaktu,
- experimentálně popsat výskyt termálních jevů u texturovaných povrchů,
- vyhodnotit výsledky a zpracovat publikaci.

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–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0750678364.

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 zabývá implementací infračervené termografie na detailní mapování teplot v konformních kluzných kontaktech v konfiguraci pin-on-disc. Dále je implementovaná metoda využita ke studiu texturovaných kluzných kontaktů. Tato metoda může přinést unikátní poznatky o rozložení teploty v kontaktech s texturovanými povrchy, kde hrají termální jevy zásadní roli. Současný stav poznání v této oblasti se opírá zejména o numerické simulace, a proto je absence experimentálních poznatků zásadní mezerou v poznání.

Kladené výzkumné otázky se věnují rozložení teploty v kontaktu a prokázání výskytu tzv. jevu viskozitního klínu. Hypotézy jsou stavěny na základě prací, které se problematikou zabývají prostřednictvím numerických simulací.

Implementace metody vychází z postupu kalibrace a měření z oblasti bodových kontaktů, kde je využívána konfigurace ball-on-disc. Tento způsob kalibrace byl konfrontován s aplikací na konformní texturované povrchy a následně upravován dle identifikovaných potřeb.

V druhé části práce jsou implementovanou metodou analyzovány kontakty s texturovanými povrchy. Předmětem zájmu jsou zde kontakty paralelní a blízké paralelním. Na korekci Stribeckovy křivky dle skutečné teploty maziva je demonstrováno, že znalost skutečné teploty maziva v kontaktu je pro jeho studium zásadní. Projevy termálních jevů však v rozsahu experimentálních podmínek nebylo možné prokázat.

KLÍČOVÁ SLOVA

infračervená termografie, textury, paralelní povrchy, viskozitní klín

ABSTRACT

This work deals with the implementation of infrared thermography for detailed temperature mapping in conformal sliding contacts in a pin-on-disc configuration. The implemented method is then applied for study of textured sliding contacts. This method can bring unique insights into the temperature distribution in contacts with textured surfaces, where thermal phenomena play a crucial role. The current state of knowledge in this area relies mainly on numerical simulations, which is why the absence of experimental knowledge is a fundamental gap in knowledge.

The research questions are devoted to the temperature distribution in contact and the demonstration of the occurrence of the so-called viscosity wedge effect. Hypotheses are built on the basis of works that study the issue using numerical simulations.

The implementation of the method is based on the calibration and measurement procedure from the area of point contacts, where the ball-on-disc configuration is used. This method of calibration was confronted with applications on conformal textured surfaces and subsequently modified according to identified needs.

In the second part of the work, contacts with textured surfaces are analyzed using the implemented method. The subject of interest here is parallel and near-parallel contacts. On the correction of the Stribeck curve according to the actual temperature of the lubricant, it is demonstrated that knowledge of the actual temperature of the lubricant in contact is essential for its study. However, the occurrence of thermal phenomena could not be proven in the range of experimental conditions.

KEYWORDS

infrared thermography, textures, parallel surfaces, viscosity wedge

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KNOTH, Tomáš. *Bezkontaktní měření teploty v kluzných kontaktech*. Brno, 2023, 78 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Milanovi Omastovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Petrovi Šperkovi, Ph.D. za odborné konzultace v průběhu řešení. Poděkování patří také doc. Ing. Vojtěchovi Enevovi, Ph.D. z FCH VUT za pomoc s proměřením IR filtrů.

Své přítelkyni a rodině děkuji za podporu, kterou mi po celou dobu studia dopřávali.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Milana Omasty, 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	16
2.1	Rešeršní metody	16
2.2	Kritická rešerše	17
2.2.1	Úvod do IR termografie v tribologii	17
2.2.2	IR termografie a kluzné kontakty	18
2.2.3	Úvod do texturování povrchů	21
2.2.4	Termální jevy a texturované kluzné kontakty	22
2.2.5	Texturované kontakty a viskozitní klín	24
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	27
2.3.1	IR termografie a kluzné kontakty: shrnutí	27
2.3.2	Termální jevy a texturované kluzné kontakty: shrnutí	28
2.3.3	Texturované kontakty a viskozitní klín: shrnutí	29
2.4	Mezera v poznání	29
3	CÍLE PRÁCE	30
3.1	Cíle výzkumu	30
3.2	Výzkumné otázky	30
3.3	Hypotézy	30
4	MATERIÁL A METODY	31
4.1	Metodika	31
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	32
4.2.1	Tribometr	32
4.2.2	Kamera	32
4.2.3	Kalibrační sestava	33
4.3	Materiál a testovací podmínky	34
4.4	Metody	36
4.4.1	IR Termografie	36
4.4.2	Kalibrace IR kamery pro bodové kontakty	38
4.4.3	Okrajově využívané metody	41
4.5	Testované predikce	41
5	VÝSLEDKY	42

5.1	Implementace metody	42
5.1.1	Testování kalibračního přípravku	42
5.1.2	Volba infračervených filtrů	44
5.1.3	Volba kalibračního tělesa	45
5.1.4	Postup a výsledky kalibrace	48
5.1.5	Implementace filtrace při měření Stribeckových křivek	53
5.1.6	Interpretace jevů sledovaných IR kamerou	55
5.2	Analýza kontaktů	56
5.2.1	Tření	56
5.2.2	Tloušťka mazacího filmu a únosnost	57
5.2.3	Rozložení teploty v kontaktu	60
6	DISKUSE	65
6.1	Interpretace výsledků	65
6.1.1	Implementace metody	65
6.1.2	Termální jevy v paralelních kontaktech	66
6.2	Verifikace hypotéz	66
6.3	Nejistoty v měření a další vývoj	67
6.3.1	Nehomogenita obrazu	67
6.3.2	Součinitel $k(t)$	68
6.3.3	Ustavení pinu	68
6.3.4	Házení disku	69
7	ZÁVĚR	70
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	71
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	75
10.1	Příklady použitých fyzikálních veličin	75
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	76
12	SEZNAM TABULEK	80
13	SEZNAM PŘÍLOH	81

1 ÚVOD

S mazanými kluznými kontakty s hydrodynamickým režimem mazání se můžeme setkat v různých strojírenských aplikacích, jako jsou radiální a axiální kluzná ložiska, těsnění, přítlačné podložky apod. Moderním způsobem, jak vlastnosti těchto kontaktů vylepšit je texturování povrchu. Jisté vylepšení vlastností kontaktů s texturovanými povrchy je skutečně pozorováno, avšak pochopení mechanismů jevů, které jej umožňují dosud není zcela prozkoumáno. Jedním z takových jevů je i tzv. efekt viskozitního klínu (angl. viscosity wedge effect), který může výrazně zvýšit nosnost kontaktu. Základem pro bližší pochopení mechanismů těchto jevů je znalost detailního rozložení teplot mazacího filmu. Současné informace o detailním rozložení teplot v texturovaných kontaktech vycházejí téměř výhradně z numerických simulací. Chybí tedy experimentálně získaná data, která by výsledky jiných přístupů potvrdila, vyvrátila, nebo příp. rozšířila. Metodou s velkým potenciálem v této oblasti je infračervená termografie.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

Cílem provedené systematické rešerše bylo zmapovat aplikace IR termografie, ze kterých lze čerpat užitečné poznatky pro její implementaci na detailní mapování teplot v kluzných pin-on-disc kontaktech. Dále se rešerše zabývá vlivem teplotních jevů na chování texturovaných kluzných kontaktů a hledá odpověď na otázku, zda lze u texturovaných kluzných kontaktů očekávat viskozitní klín (na lokální úrovni).

Dotazy kladené v rešerši byly formulovány následovně:

- 1) Jak aplikovat metodu IR termografie k detailnímu měření teplot u kluzných kontaktů v konfiguraci pin-on-disc?
- 2) Jaký je vliv termálních jevů na chování texturovaných kluzných kontaktů?
- 3) Lze u texturovaných konformních kontaktů očekávat výskyt viskozitního klínu (na lokální úrovni)?

Za relevantní byly považovány informační prameny všech druhů (články, akademické práce, knihy apod.). Rešerše byla limitována na práce psané v anglickém jazyce. Pro první rešeršní dotaz týkající se IR termografie byly za relevantní považovány články starší i novější, jelikož metoda je v podobných aplikacích používána již od 70. let 20. století. U dalších dvou dotazů byly preferovány spíše články novější vzhledem k aktuálnosti a rozvoji poznání v problematice.

Pro hledání informačních pramenů byly využity online databáze Scopus, soubor databází Web of Science a vyhledávač Google Scholar. Rešeršní dotazy byly formulovány takto:

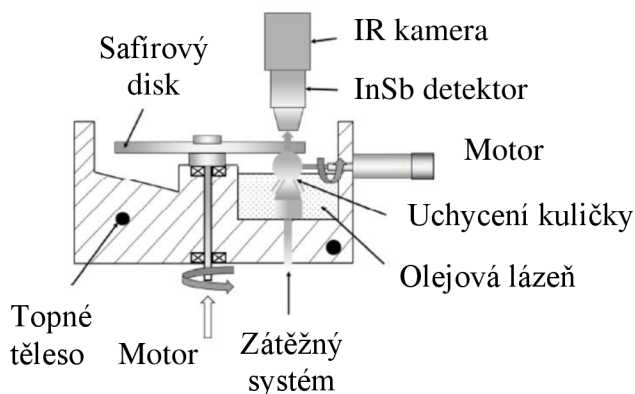
- 1) TITLE-ABS-KEY (("IR" OR "infrared") AND (temperature OR thermal) AND ("sliding contact" OR "slider bearing" OR "pin-on-disc" OR "pin-on-plate" OR "pin-on-flat" OR "pin on disc" OR "pin on plate" OR "pin on flat") AND NOT "plasma" AND NOT "spectroscopy")
- 2) "thermal effects" AND "sliding contact" AND "surface texture"
- 3) (texture OR textured OR texturing) AND (conformal OR sliding) AND contact AND "viscosity wedge"

Pro podrobnější analýzu bylo vybráno deset informačních pramenů, z toho devět článků a jedna disertační práce (kompilace šesti článků). Pět článků bylo vydáno v Tribology International, zbylé články pochází po jednom z periodik Measurement, International Journal of Thermal Sciences, Friction a International Journal of Heat and Mass Transfer. Disertační práce je zde uvedena jako celek, jelikož obsahuje kromě kompilace článků také konečné ucelené závěry z nich vyvozené.

2.2 Kritická rešerše

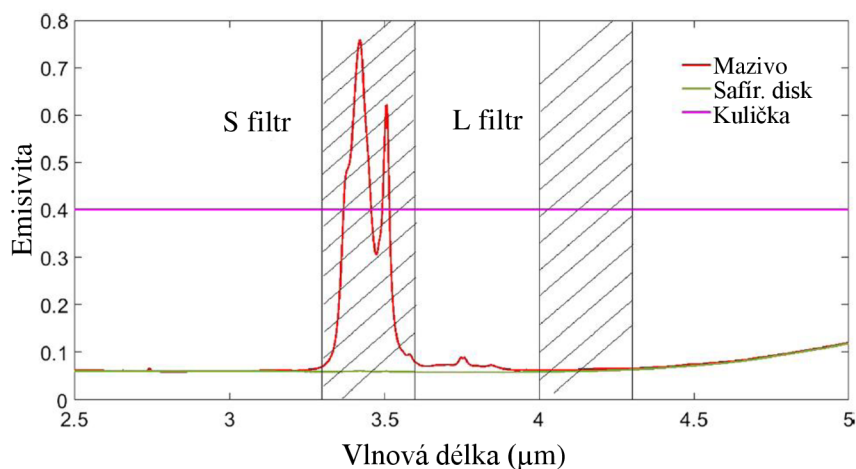
2.2.1 Úvod do IR termografie v tribologii

K mapování teplot (angl. temperature mapping) v tribologii aplikoval poprvé infračervenou termografií v 70. letech Turchina [1] pro popis kontaktu typu ball-on-disc. Ocelová kulička se odvaluje po safírovém disku, skrze který je kontaktní oblast snímána IR kamerou. V této konfiguraci jsou většinou obdobná měření prováděna dodnes, viz Obr. 2-1.



Obr. 2-1 IR termografie v tribologii, příklad konfigurace zařízení pro měření EHD kontaktu s kuličkou [2]

Ausherman [3] zavedl užití pásmových IR filtrů, pomocí kterých jsou rozlišena záření povrchu kuličky a mazacího filmu (záření od safírového disku bylo původně vzhledem k nízké emisivitě zanedbáno), viz Obr. 2-2. První filtr má střed pásma propustnosti kolem 3400 nm a propouští záření od oleje i ocelového tělesa. Druhý filtr má střed pásma propustnosti kolem 4200 nm a propouští dominantně záření od ocelového tělesa. Rozdělení záření je potom možné díky rozdílu ve vlnových délkách vyzařovaných olejem a kuličkou. Zatímco olej vyzařuje záření v poměrně úzkém rozpětí vlnových délek, kulička se chová jako šedé těleso.



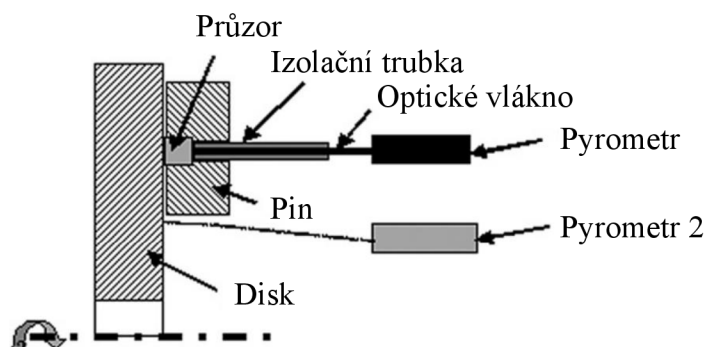
Obr. 2-2 Spektra emisivity ocelové kuličky, maziva, safírového disku a propustnost S a L filtrů [4]

U pozdějších prací se pro izolování samotného záření safírového disku využívá např. tenký chromový povlak nanesený na spodní stranu disku, který nepropustí záření od kuličky ani maziva [5, 6]. Zatímco teplota maziva ve většině prací představuje průměrnou hodnotu po celé tloušťce maziva v daném místě, Lu [2] vyvinul metodu, kterou zjistil rozložení teplot v mazacím filmu ve 3D, tedy vytvořil matematický model, který určuje teplotní profil přes tloušťku maziva na základě teplot kuličky, mazacího oleje (průměrné teploty na tloušťce v daném místě) a safírového disku naměřených pomocí IR termografie.

2.2.2 IR termografie a kluzné kontakty

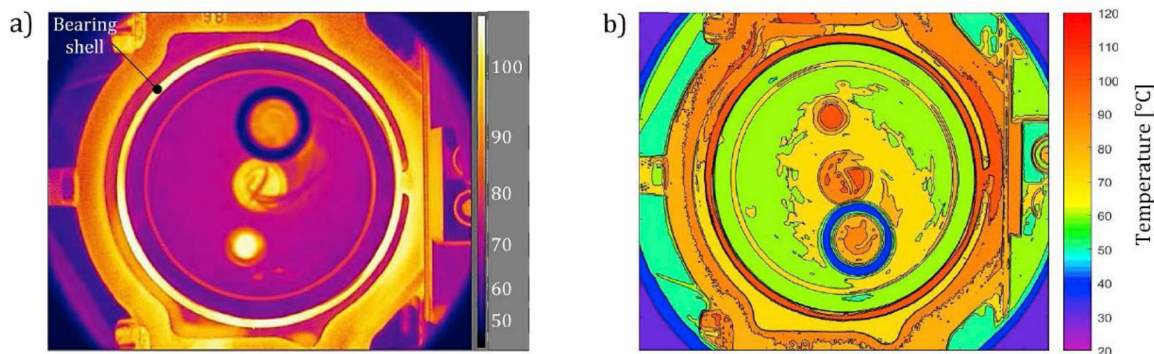
V této kapitole jsou popsány práce nalezené v rámci systematické rešerše, které kloubí užití IR termografie a třecí kontakty. Články se věnují rozdílným oblastem výzkumu a není mezi nimi zřejmá návaznost. Účelem této kapitoly je především získání přehledu o metodách a postupech, které byly v pracích aplikovány. Podává také přehled o tom, v jak omezené míře byla IR termografie doposud v problematice třecích kontaktů využita.

Siroux [7] popsala metodu na principu pyrometrie (bodové měření podobné IR termografii) pro určení lokálních teplot v kluzném kontaktu na pin-on-disc tribometru. Byl použit pyrometr, disk a speciální pin s průzorem (fluorid vápenatý) a optickým vláknem, viz Obr. 2-3. Pin (kromě průzoru) i disk byly vyrobeny z materiálů standardně používaných v brzdných systémech v kolejové dopravě, jelikož tato oblast byla předmětem výzkumu. Dvoubarevný pyrometr byl kalibrován pomocí průzoru z fluoridu vápenatého a černého tělesa. Průzor byl umístěn mezi pyrometr a černé těleso a kalibrace proběhly před a po měření, aby byl určen vliv povrchových úprav průzoru na zesilovací konstantu každého detektoru. Teplota černého tělesa byla zvyšována z 200 °C do 500 °C pro korcích 50 °C. Pro každou teplotu bylo pořízeno 10 snímků. Po několika testech se hodnota zesilovací konstanty ustálila. Výsledky měření byly porovnány s analytickým výpočtem s dobrou výslednou shodou. Dále byla měřena a korekcí upřesněna teplota disku na výstupu z kontaktu (těsně za pinem). Zjištěný rozdíl mezi změřenou teplotou v kontaktu a teplotou disku za pinem byl malý.



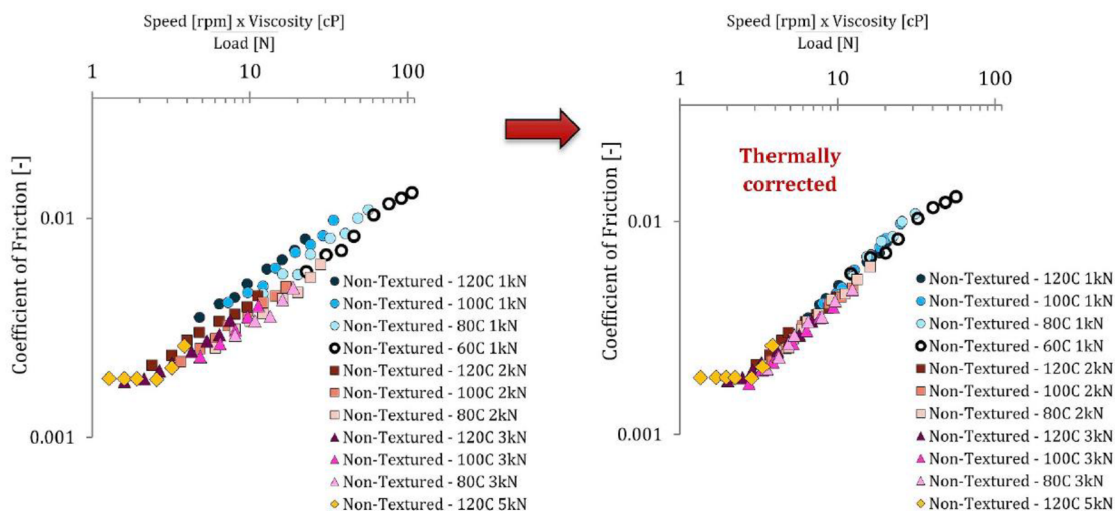
Obr. 2-3 Konfigurace pin-on-disc a pyrometrů dle Siroux [7]

Vlădescu [8] studoval vliv textur na vlastnosti kluzného ložiska (ze spalovacího motoru). Testování probíhalo na speciálním zařízení (JBM – journal bearing machine) za různých zátěží a rychlostí s různě viskózními mazivy a pro tři typy textur (rozdíly v hustotě textur a rozsahu texturované plochy). IR termografií byla zaznamenána teplota na povrchu ložiska. Ložisko bylo snímáno ze strany, viz Obr. 2-4.



Obr. 2-4 Snímek z měření Vlădescu [8]; a) původní snímek, b) snímek zpracovaný v Matlab

Znalost teploty maziva byla dále použita pro korekci sestavených Stribeckových křivek tak, aby bylo eliminováno zkreslení výsledků způsobené teplotou, která se promítá do viskozity maziva (horizontální osa na Obr. 2-5). Ložisko s konkrétní texturou po celém obvodu dosahovalo až o 18 % menší míry tření než ložisko bez textury. Míra tření je tím nižší, čím větší je vrstva maziva v kontaktu.

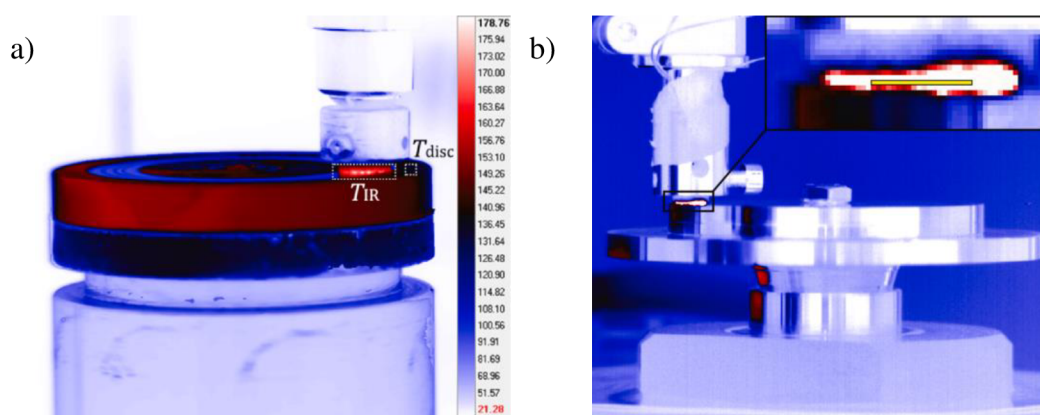


Obr. 2-5 Korekce Stribeckovy křivky vzhledem k znalosti teploty v kontaktu [8]

Nosko [9] ve své práci představil a studoval speciální „jehlicovité třecí“ termočlánky (angl. acicular grindable thermocouples) určené k měření teploty v kluzných kontaktech. Tzv. měřicí spoj u nich vzniká vlivem deformace termočlánku, který je uložen do jednoho z těles v kontaktu (v této práci pin) při tření se s druhým tělesem (v této práci disk). IR termografie byla použita okrajově. Kontakt byl snímán ze strany a poměrně z dálky, viz Obr. 2-6a.

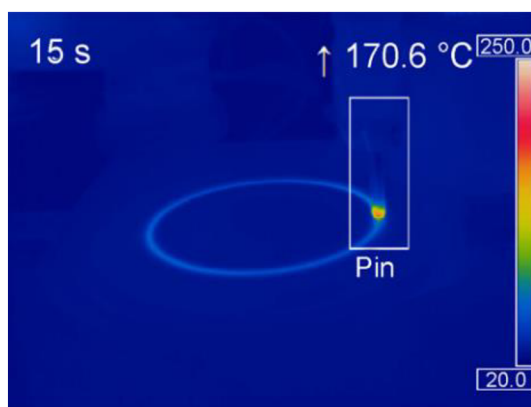
Výsledky měření teploty pinu pomocí těchto termočlánků, běžných termočlánků a IR termografie byly následně porovnány. Hlavní závěr byl ten, že termočlánkem byla zjištěna o cca 30 % vyšší teplota než IR termografií a teplotu zjištěnou IR termografií lze se zvýšenou přesností odhadnout užitím kombinace speciálního a konvenčního termočlánku.

Ve svém dalším článku [10] se tentýž autor věnoval vývoji matematického algoritmu pro zjišťování teploty v kluzném kontaktu na základě znalosti teploty ve dvou bodech tělesa (v tomto případě pinu) získané pomocí termočlánků umístěných ve dvou různých vzdálenostech od místa kontaktu. Takto zjištěné hodnoty teplot byly následně porovnány s teplotami zjištěnými IR termografií. IR termografie byla využita pouze okrajově, kamera snímala pin ze značné vzdálenosti a ze strany, viz Obr. 2-6b. Výsledné hodnoty dosahovaly shody s rozdílem cca 5-7 %.



Obr. 2-6 Snímky z měření Noska; a) [9], b) [10]

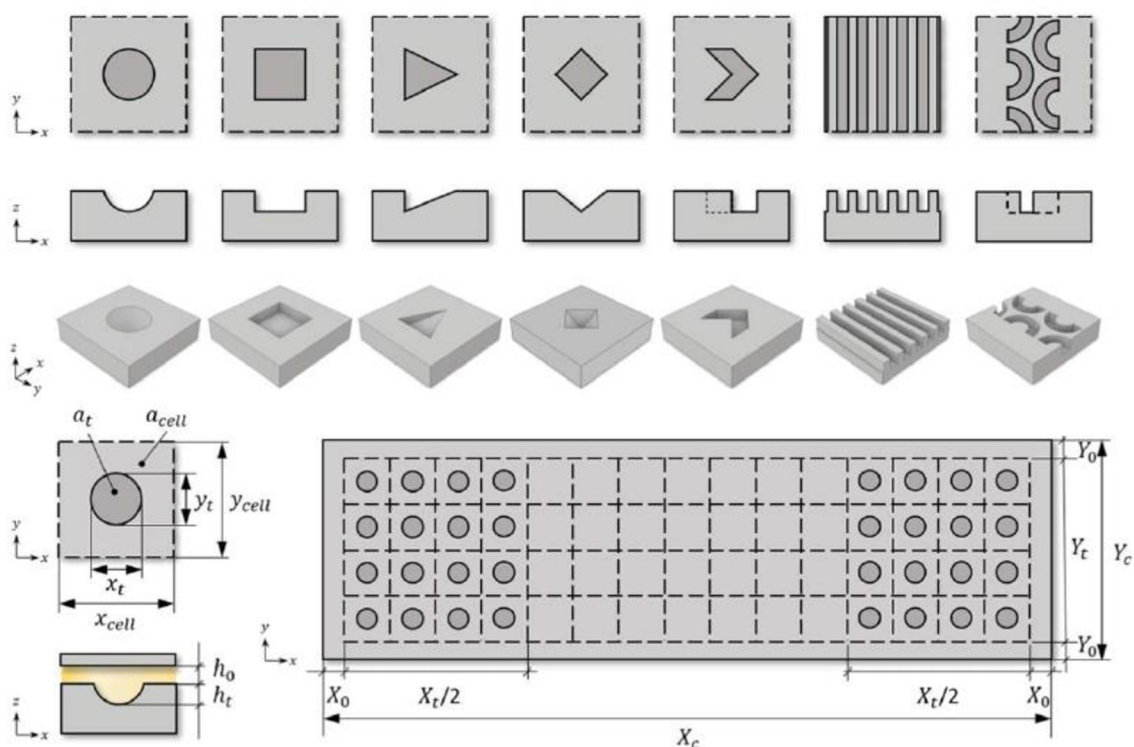
Abdullah [11] určoval teploty v suchém kontaktu typu pin-on-disc pomocí numerického modelu kontaktu (MKP). IR termografie byla využita pro porovnání výsledků. Pin byl snímán ze značné vzdálenosti a pod neurčeným úhlem (Obr. 2-7). Výsledky dosažené oběma přístupy byly porovnány s dobrou shodou.



Obr. 2-7 Snímek z práce Abdullaha [11]

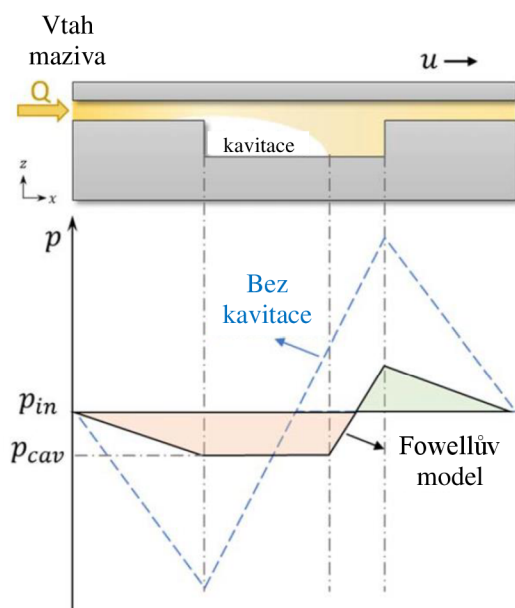
2.2.3 Úvod do texturování povrchů

S mazanými kluznými kontakty s hydrodynamickým režimem mazání se můžeme setkat v různých strojírenských aplikacích, jako jsou radiální a axiální kluzná ložiska, těsnění, přítlačné podložky apod. Moderním způsobem, jak vlastnosti těchto kontaktů vylepšit je texturování povrchu. Přítomnost textur na kluzných površích přitom může mít vliv pozitivní i negativní. Proto je volba správné geometrie a uspořádání prvků textur pro konkrétní aplikaci klíčová, přičemž geometrií a proměnných parametrů textur je celá řada. Přehled základních geometrií a parametrů je na Obr. 2-8. Mechanismy mazání, které podporují pozitivní vliv textur jsou tedy v současnosti předmětem intenzivního zájmu [12].



Obr. 2-8 Přehled vybraných geometrií a základních parametrů povrchových textur [12]

Už v 60. letech popsal Hamilton a spol. [13], že mikro nerovnosti povrchu mohou v kontaktu generovat vyšší hydrodynamický tlak, a tak působit jako mikro hydrodynamická ložiska zvyšující nosnost kontaktu. Tento jev byl původně připisován kavitaci. Dle Fowella a spol. [14] mohou textury a s nimi spojené kavitace snížit tlak v kontaktu natolik, že je do kontaktu vtahováno větší množství maziva (viz Obr. 2-9), což má pozitivní vliv zejména na paralelní povrchy. Některé práce však popisují naopak negativní vliv příliš intenzivní kavitace a vylučují její přínos pro nosnost [15]. Z přehledových studií vyplývá, že doposud byl v oblasti kluzných kontaktů s texturovanými povrchy proveden rozsáhlý výzkum [12]. Porovnání výsledků výzkumu je však problematické kvůli rozdílům v metodikách užívaných různými výzkumnými týmy.



Obr. 2-9 Fowellův model vtahu tahu maziva do paralelního kontaktu vlivem podtlaku [12]

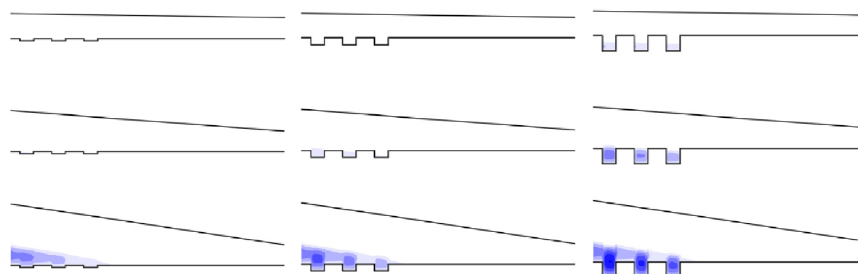
2.2.4 Termální jevy a texturované kluzné kontakty

V posledních letech bylo zjištěno, že vliv teplotních jevů na chování mazaných kluzných kontaktů může být větší, než bylo dříve uvažováno. Základem této problematiky je fakt, že tření v kapalině způsobuje zvýšení teploty. Teplota v kontaktu se zvyšuje s vyšší rychlostí a větším zatížením. Toto zvýšení teploty má zásadní vliv na vlastnosti maziva (viskozitu, hustotu, měrnou tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost), což následně dále mění nosnost kontaktu a třecí sílu v něm [16]. Největší změnu s teplotou lze sledovat u viskozity maziva. Hydrodynamický kontakt se může dokonce vlivem poklesu viskozity změnit na smíšený (ztráta viskozity způsobí porušení filmu a vzájemný dotyk třecích ploch).

V disertační práci Cupillarda [16] (kompilace šesti článků) byla provedena řada CFD simulací chování texturovaných axiálních kluzných ložisek. Nejdříve byl za izotermálních podmínek zkoumán vliv sklonu segmentů ložiska na jevy v mazivu a chod ložiska. Poté byly přidány textury a zkoumány možnosti optimalizace textur z hlediska hloubky důlků a umístění textury. Nakonec byly simulace rozšířeny o termální jevy.

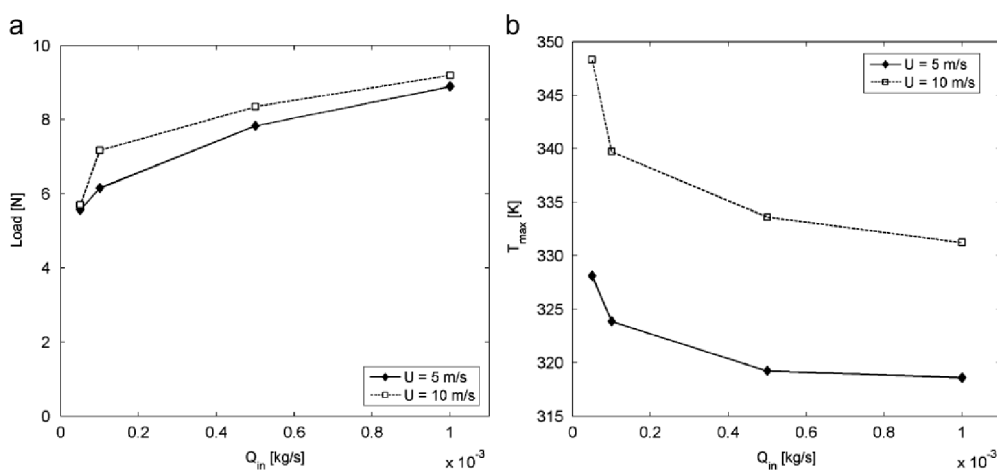
Míru sklopení segmentu popisuje tzv. convergence ratio k (zjednodušeně úhel sklonu plochy segmentu, viz Obr. 2-10). Bylo zjištěno, že u hladkých povrchů se zvětšujícím se k klesají ztráty mechanické energie v mazivu. Zvětšuje se tak množství mechanické energie na vstupu do kontaktu, čímž se zvětší tlakový gradient a nosnost kontaktu. Pokud je k příliš veliké ($k > 1$), na vstupu se utvoří nežádoucí recirkulační zóna (lokální zpětné proudění maziva). Stejný princip platí při použití textur. Důlek lokálně snižuje rychlost a následné ztráty. Tlakový gradient se potom lokálně zvětšuje a s ním roste nosnost kontaktu. Pro zvyšování nosnosti kontaktu lze hloubku důlku zvyšovat do okamžiku, než se na jeho dně začne

objevovat recirkulace. Existuje tedy optimální hloubka důlku, která maximalizuje nosnost. Přílišné zvětšení hloubky důlku má stejný princip a důsledek, jako příliš vysoké convergence ratio k . Ztráty lze do větší míry snížit texturou při nízkých hodnotách k , což poskytuje větší rozsah pro zvýšení zatížení.



Obr. 2-10 Výskyt recirkulačních zón (řádky shora dolů – zvětšující se convergence ratio, sloupce zleva doprava – zvětšující se hloubka důlků) [16]

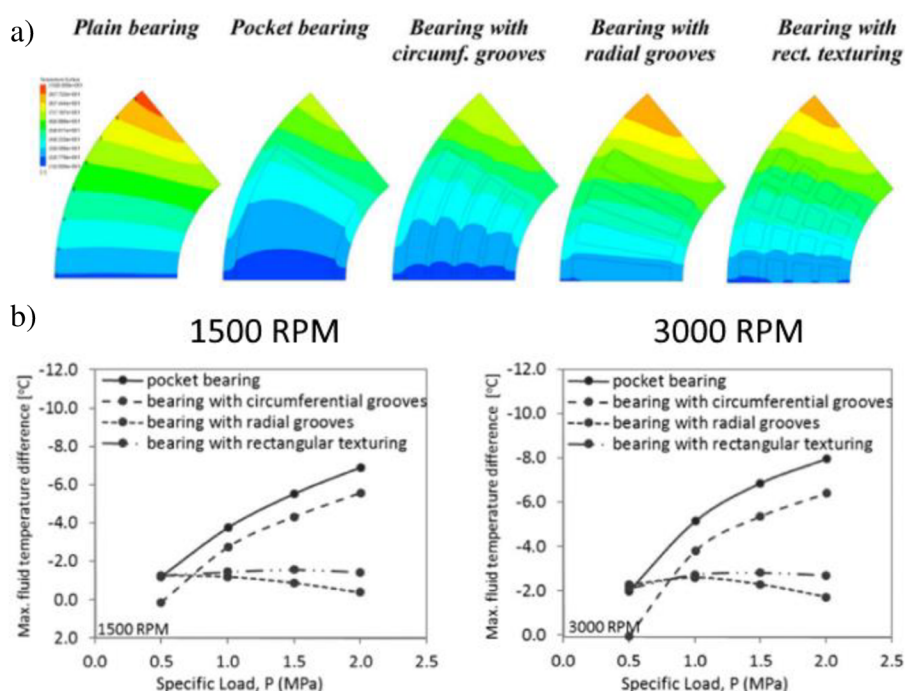
Výsledky dále ukázaly, že tyto pozitivní účinky textur na nosnost kontaktu jsou při uvažování termálních jevů posíleny. Uvádí se zvýšení až o 110,4 % při $k=0,1$; 5,3 % při $k=1$ a 0,9 % při $k=2$ (čím menší je úhel v mezeře, tím razantnější je zvýšení nosnosti). Do drážky před kontaktem bylo dodáváno chladnější mazivo, které se mísilo s teplým mazivem. Pokud se změní skluzová rychlost a hmotnostní průtok na vstupu do kontaktu, mění se míchání teplého a chladného maziva. Následky jsou vidět na Obr. 2-11, kde jsou nosnost kontaktu a maximální teplota maziva v kontaktu zobrazeny jako funkce hmotnostního průtoku na vstupu pro rychlosti skluzu 5 m/s a 10 m/s a $k=1$. Při rychlosti skluzu 10 m/s jsou nosnost i maximální teplota vyšší. Zvýšení teploty je následkem tření v kapalině, které generuje teplo. Pro dané dvě rychlosti má snížení hmotnostního průtoku na vstupu za následek zvýšení maximální teploty a zároveň snížení nosnosti.



Obr. 2-11 Nosnost kontaktu a maximální teplota maziva v kontaktu jako funkce hmotnostního průtoku na vstupu pro rychlosti skluzu 5 m/s a 10 m/s a $k=1$ [16]

Také bylo pozorováno, že důlky zvyšují nosnost pro celé zkoumané rozmezí rychlostí skluzu. Po dosažení maximální hodnoty nosnost začne pomalu s časem klesat. To je dáno silnou generací tepla u výstupu z kontaktu.

V práci Zouzoulase [17] bylo taktěž numerickými simulacemi potvrzeno, že správně navržená textura může významně zlepšit vlastnosti ložiska. Lze dosáhnout větší tloušťky mazacího filmu, mohou být sníženy energetické ztráty třením a maximální teplota maziva. Na Obr. 2-12a je zobrazena distribuce teploty na rozhraní mazivo-segment ložiska pro různé typy textur. Na Obr. 2-12b je vidět rozdíl maximální teploty maziva v texturovaných ložiskách oproti hladkému ložisku pro dvě rychlosti otáčení. Je zřejmé, že s některými typy textur („Pocket bearing“ a „Bearing with circumferential grooves“) lze dosáhnout nižších teplot po celé ploše segmentu. Snížení maximální teploty v mazivu se pohybovalo kolem 5-7 °C.

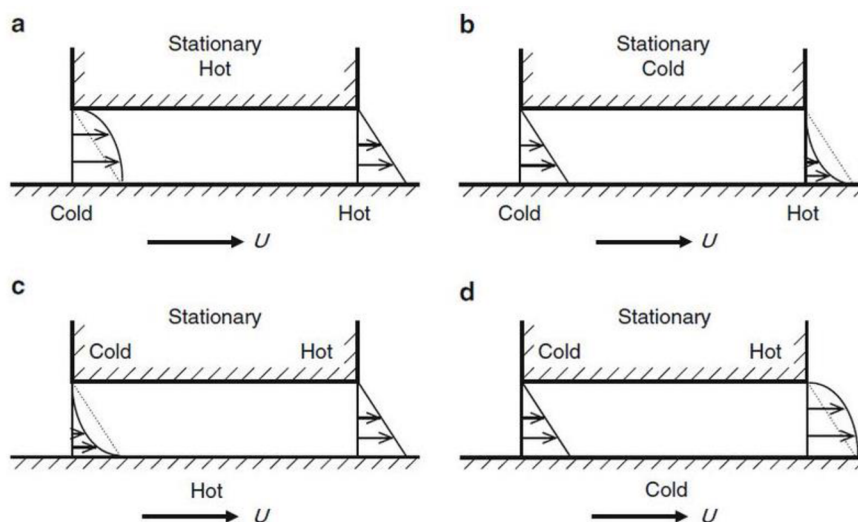


Obr. 2-12 Teploty v axiálních ložiskách; a) rozložení teplot na rozhraní segment-mazivo; b) rozdíl maximální teploty maziva v texturovaných ložiskách oproti hladkému ložisku [17]

2.2.5 Texturované kontakty a viskozitní klín

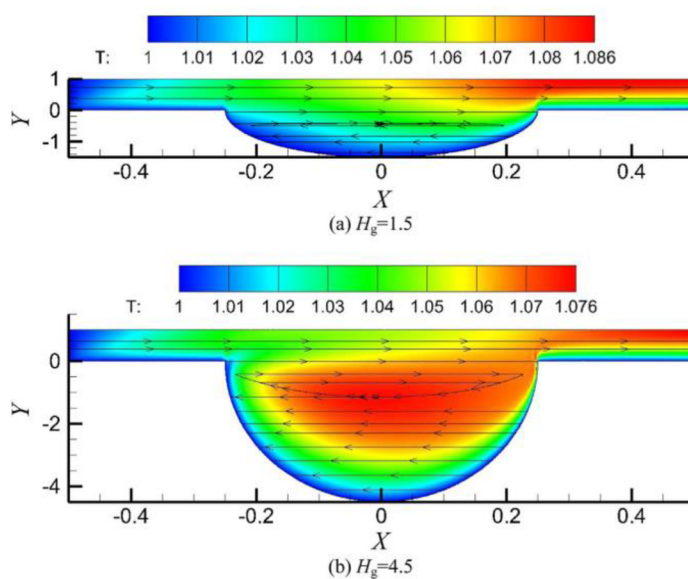
Dle klasické teorie mazání je pro vznik mazacího filmu v hydrodynamickém režimu nutná klínová spára mezi kontaktními povrchy. V experimentech a aplikacích však bylo pozorováno, že mazací film se značnou únosností může vzniknout také mezi paralelními povrchy. To bylo připisováno tzv. jevu viskozitního klínu (někdy uváděn jako teplotní klín, nebo teplotně-viskozitní klín). Tento jev popsal na teoretické úrovni jako jeden z prvních v 60. letech Cameron [18]. Později byl studován pomocí numerických simulací, a to pro hladké i texturované povrchy. Experimentální popis jevu však chybí. Viskozitní klín je

důsledkem rozdílné teploty povrchů těles v kontaktu a teplotního gradientu napříč mazacím filmem [19], viz Obr. 2-13.



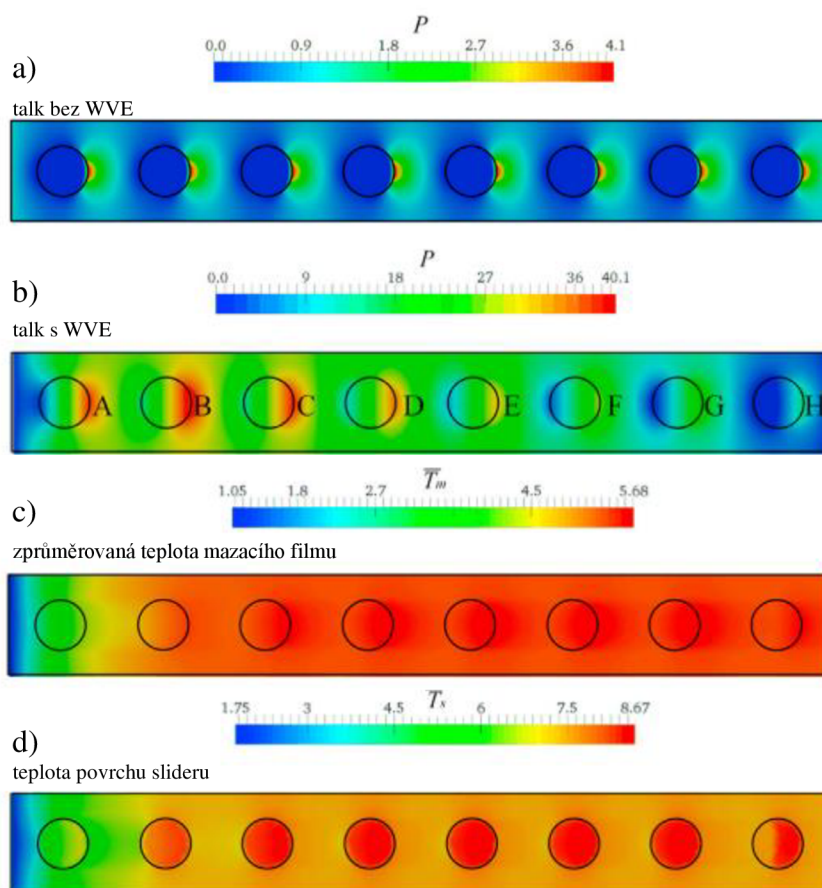
Obr. 2-13 Schéma vzniku viskozitního klínu v kluzném kontaktu [20]

Problematiku výskytu viskozitního klínu u texturovaných povrchů studoval Meng [21, 22] pomocí termohydrodynamických MKP modelů. Nejdříve byl modelován povrch s jedním důlčkem, v němž byl vliv viskozitního klínu detailně studován [21]. Bylo zjištěno, že viskozitní klín má významný podíl na nosnosti texturovaného povrchu typu „důlky“. Dle Obr. 2-14 se u mělkého důlku generuje v horní vrstvě maziva více tepla třením, což zvyšuje rozdíl teplot napříč mazivem a podporuje mechanismus viskozitního klínu. S vyšší hloubkou důlku dochází k větší recirkulaci maziva, teplejší mazivo se přesunuje do středu důlku a mechanismus viskozitního klínu postupně zaniká.



Obr. 2-14 Rozložení teploty a rychlostí v mazacím filmu v oblasti důlku textury [21]

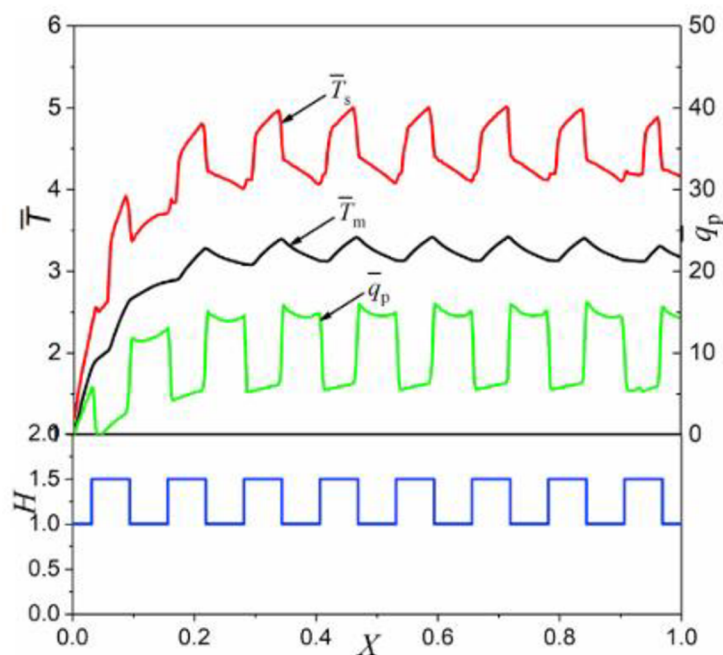
V další Mengově práci [22] byl studován "slider" s řadou důlků a jejich geometrické parametry byly optimalizovány tak, aby byla zvýšena nosnost kontaktu a snížen součinitel tření. Proti slideru klouzala hladká deska. Dále byl sledován tlak a teplota v kontaktu. Oproti předchozí práci byl také model rozšířen o kavitační efekt. Dle výsledků má viskozitní klín u texturovaných sliderů mnohem větší vliv na nosnost kontaktu a součinitel tření než kavitační jevy. V řešeném případě se nosnost kontaktu s uvažováním viskozitního klínu zvýšila 28krát oproti simulaci bez uvažování viskozitního klínu. V důsledku tohoto efektu se značně zvyšuje tlak jak v hladkých oblastech slideru, tak zejména maxima tlakového profilu v důlcích slideru, viz Obr. 2-15a, b.



Obr. 2-15 Bezrozměrné rozložení a) tlaku bez uvažování viskozitního klínu; b) tlaku s uvažováním viskozitního klínu; c) zprůměrovaná teplota mazacího filmu; d) teplota povrchu slideru [22]

Mazací film lze rozdělit na „zónu rostoucí teploty“ (na Obr. 2-16 do X cca 0,2) a „zónu ustálené teploty“ (od X cca 0,2 dále). V prvním případě dominuje při nárůstu teploty efekt konvekce v kapalině a disipace tepla. V druhém je disipace tepla vyvážena kondukcí tepla, což udržuje v zóně ustálenou teplotu. Lokální odvod tepla z mazacího filmu v místě důlku je menší než v zóně bez důlku, což vede k tomu, že teplota filmu v důlku je vyšší pro „zónu ustálené teploty“. Nedostatkem těchto výsledků je, že teplota filmu je zde zprůměrována přes tloušťku filmu. Tím pádem simulace ve srovnání s 3D CFD simulací neposkytuje velmi přesné rozložení teploty v místních důlkových zónách, protože současný model nemůže

ukázat „skutečný“ efekt recirkulace a detailní chování proudění, což může mít velký vliv na mechanismus viskozitního klínu.



Obr. 2-16 Teplota a lokální tepelný tok na střednici (\bar{T}_s je teplota slideru, \bar{T}_m je teplota maziva a \bar{q}_p je lokální tepelný tok do hladké desky) [22]

2.3 Shrnutí hlavních zjištění

2.3.1 IR termografie a kluzné kontakty: shrnutí

V systematické rešerši byly nalezeny práce zabývající se různými problémy spojenými s kluznými kontakty. Ve čtyřech pracích byl zkoumán kontakt typu pin-on-disc a v jedné radiální kluzné ložisko. Detailní popis metodiky měření byl hlavním předmětem pouze jednoho článku. Ostatní práce metodu využily pouze okrajově, většinou pro porovnání výsledků s jiným způsobem zjišťování teploty (termočlánky, numerické simulace). U těchto prací je zároveň pin-on-disc soustava snímána IR kamerou ze strany nebo pod neurčitým úhlem a z příliš velké vzdálenosti na to, aby mohla být teplota studována detailněji (což nebylo cílem těchto prací), viz Obr. 2-3-Obr. 2-7 a přehled v Tab. 2-1.

Z hlediska pohledu do kontaktní oblasti je z vybraných článků nejzajímavějším metoda dle Siroux [7], kde je využit pin s průřezem a je snímána přímo rovina kontaktu. V této práci je však využit pyrometr, takže teplota je měřena pouze bodově a není studováno rozložení teplot v kontaktu. Stručně je popsáno, jak byl pyrometr kalibrován vzhledem k povrchovým úpravám průřezu, které mohou zkreslovat naměřené hodnoty. Pokud by měl být podobný přístup využit pro IR termografii, bylo by potřeba využít dostatečně velkého průřezu

(jednotky mm), což by mohlo být problematické při měření s piny vzhledem k jejich rozměrům.

Dá se tedy konstatovat, že metodika využití IR termografie pro detailní měření rozložení teplot v kontaktu v pin-on-disc konfiguraci dosud nebyla vyvinuta. Vhodným způsobem, jak metodu IR termografie aplikovat je úprava stávajících metod pro mapování teplot v EHD kontaktech. Zde je využit safírový disk, skrz který je snímána kontaktní oblast. Hlavním informačním pramenem pro její vývoj tak budou práce popisující metodu měření u EHD kontaktu [1-5].

Tab. 2-1 Zkoumané aplikace IR termografie v problematice kluzných kontaktů

Práce	Typ kontaktu	Směr pozorování	Metoda
[7]	pin-on-disc	v rovině kontaktu	Pyrometrie
[11]	pin-on-disc	ze šikma	<i>IR term.</i>
[8]	kluzné ložisko	ze strany	<i>IR term.</i>
[9]	pin-on-disc	ze strany	<i>IR term.</i>
[10]	pin-on-disc	ze strany	<i>IR term.</i>

2.3.2 Termální jevy a texturované kluzné kontakty: shrnutí

Práce, které spojují jevy v texturovaných kluzných kontaktech s termálními jevy jsou téměř výhradně řešeny numerickými simulacemi. Většinou se práce zabývají určitou problematikou spojenou s texturami a termální jevy uvažují pro zdokonalení numerického modelu, ale jejich objasnění nebývá hlavní náplní. Detailnějším průzkumem teplotních jevů by mělo být možné lépe definovat vztahy mezi termálními a ostatními jevy, jako jsou recirkulace maziva, kavitační jevy apod.

Detailní popis jevů v rovinném texturovaném kluzném kontaktu nabízí Cupillard [16]. Důlek textury lokálně snižuje rychlost maziva a následně ztráty mechanické energie. Tlakový gradient se lokálně zvětšuje a s ním roste nosnost kontaktu. Pro zvyšování nosnosti kontaktu lze hloubku důlku zvyšovat do okamžiku, než se na jeho dně začne objevovat recirkulace. Existuje tedy optimální hloubka důlku, která maximalizuje nosnost. Výsledky ukázaly, že pozitivní účinky textur na vlastnosti kontaktu jsou při uvažování termálních jevů posíleny. Určité textury jsou zároveň schopny celoplošně teploty v kontaktu snížit [17].

Numerické simulace jsou však prováděny za poměrně vysokých skluzových rychlostí (např. Cupillard 5 m/s a 10 m/s, Meng 16 m/s a 50 m/s), kterých může být obtížné experimentálně dosáhnout. To by mohlo zkomplikovat porovnávání výsledků s experimentálními výsledky. Popsané jevy jsou totiž závislé i na skluzové rychlosti a s nižšími rychlostmi nemusí být tak průkazné, příp. jejich vliv tak znatelný.

2.3.3 Texturované kontakty a viskozitní klín: shrnutí

Malé množství nalezených prací ilustruje fakt, že tato problematika v současnosti není příliš probádána. Hlavním informačním zdrojem spojujícím problematiku viskozitního klínu s texturovanými povrchy jsou práce Menga [21, 22]. Na základě numerických simulací s jedním důlkem byl viskozitní klín na lokální úrovni v oblasti důlku textury potvrzen [21]. Bylo zjištěno, že je silnější u mělkých důlků. S větší hloubkou důlků dochází k recirkulaci maziva. Mazivo s vyšší teplotou se přesouvá více do středu důlku a efekt viskozitního klínu se snižuje/ztrácí. Dále byl studován slider s více důlky v řadě [22]. Výskyt viskozitního klínu byl sledován jak na hladkých oblastech kontaktu, tak lokálně v důlcích, přičemž v důlcích byl tento efekt značně výraznější. Nedostatkem práce je, že teplota filmu byla zprůměrována přes tloušťku filmu. Tím pádem simulace ve srovnání s 3D CFD simulací neposkytuje velmi přesné rozložení teploty v místních důlkových zónách, což je pro viskozitní klín zásadní.

2.4 Mezera v poznání

Jak vyplývá s výše uvedené rešerše, mezerou v poznání je absence experimentálně získaných informací o rozložení teploty v kluzném kontaktu s texturovaným povrchem. Tato informace může potvrdit nebo naopak vyvrátit dosavadní výsledky výzkumů, které problematiku zkoumaly pomocí numerických simulací a teoretických úvah.

S rozložením teploty v kontaktu souvisí i jev viskozitního klínu. V současnosti je obecně uvažováno, že tepelné účinky ovlivňují nosnost kontaktů mazaných kapalnými mazivy negativně. Nedávné studie však naznačují, že teplotní rozdíl napříč mazacím filmem by mohl mít pozitivní účinek díky působení viskozitního klínu. Je tedy zapotřebí hlubší porozumění tomuto jevu a jeho výhodám v texturovaných hydrodynamických kontaktech.

Aby bylo možné potřebné informace získat, je potřeba nalézt vhodný způsob měření detailního rozložení teploty v kontaktu. V této práci se jedná o aplikaci infračervené termografie pro tribometrickou konfiguraci pin-on-disc, ve které doposud nebyla aplikována. Ta umožní přímý vhled do kontaktu a jeho detailní zkoumání.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Cíle výzkumu

Hlavním cílem je implementovat metodu IR termografie pro bezkontaktní měření teploty v kluzném konformním kontaktu a posoudit přítomnost termálních jevů u texturovaných povrchů. Dílčími cíli jsou návrh konstrukční úpravy experimentálního zařízení, stanovení postupu kalibrace pro měření teploty v konformním kontaktu, experimentální popis výskytu termálních jevů u texturovaných povrchů a zpracování publikace.

Tato práce se zabývá základním výzkumem a je spojena s projektem č. 22-29874S s názvem *Termohydrodynamické účinky mezného skluzu a texturování povrchu kluzných kontaktů* podporovaným GAČR.

3.2 Výzkumné otázky

Výzkumné otázky byly formulovány následovně:

- OT1: Jak je rozložena teplota mazacího filmu a povrchu pinu v okolí prvků typu „důlek“ na texturovaném povrchu?
- OT2: Dochází u paralelních nebo mírně nakloněných povrchů k výskytu jevu teplotně viskozitního klínu?

3.3 Hypotézy

Na základě systematické rešerše byla k otázce OT1 formulována hypotéza o rozložení teploty oleje a texturovaného povrchu, která byla rozdělena na tři části, a to H1a, H1b a H1c. Všechny tři části hypotézy vychází z poznatků Menga a spol. [21, 22], který problematiku studoval s použitím numerických výpočtů. Hypotézy ilustrují Obr. 2-15 a Obr. 2-16.

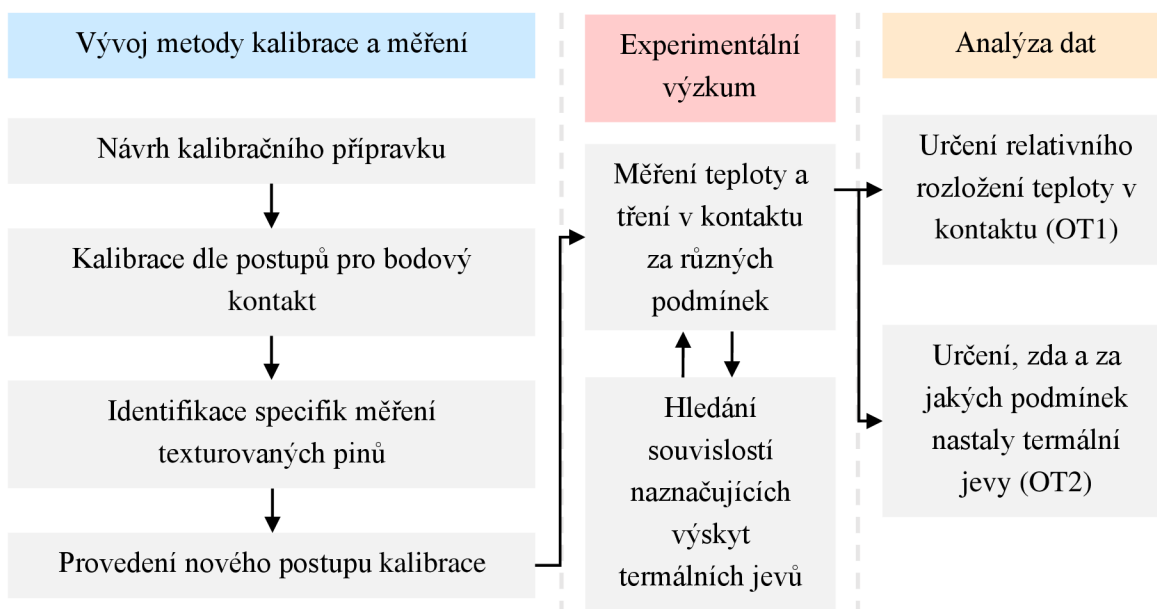
- H1a: Teplota texturovaného povrchu je v místě důlku vyšší než mimo důlky.
- H1b: Teplota oleje je globálně uniformní bez ohledu na výskyt důlku.
- H1c: Teplota oleje má v místě důlku lokálně rostoucí průběh a mezi důlky lokálně klesající průběh ve směru toku.
- H2: Za podmínek dostatečně velkého tepelného výkonu kontaktu dochází k nárůstu únosnosti mazacího filmu, který lze přisuzovat existenci teplotně-viskozitního klínu.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika

Problematika rozložení teploty v kontaktu je deskriptivním problémem. Popsání vztahu mezi výskytem termálních jevů a rozložením teploty představuje relační problém. Při výzkumu, který byl kvantitativní z hlediska měření konkrétních hodnot zkoumaných veličin, byla využita především empirická metoda měření tření a teploty. Schéma postupu řešení je zobrazeno na Obr. 4-1.

Prvním krokem při řešení je implementace metody IR termografie na měření v pin-on-disc konfiguraci. V rámci tohoto kroku byl vyvinut kalibrační přípravek, který umožňuje kalibraci IR kamery přímo na tribometru. Na něm byly testovány dva různé přístupy ke kalibraci pro měření teploty oleje, kdy byla využita kulička a pin podkládaný plíšky. Také byly testovány dva přístupy k filtraci záření, a to filtrace se dvěma a s jedním IR filtrem. Na pracovišti dostupné filtry byly pečlivě analyzovány, aby mohla být využita jejich nejefektivnější kombinace. Postup kalibrace je detailně popsán v kap. 5.1.4. Dále proběhlo měření na tribometru, kdy byla sledována třecí síla a rozložení teploty v kontaktu. Jelikož je potřeba znát i tloušťku mazacího filmu, proběhla za vybraných podmínek také fluorimetrická měření. V naměřených datech byla hledána souvislost mezi rozložením teploty maziva a změnami třecí síly za účelem potvrzení výskytu termálních jevů.

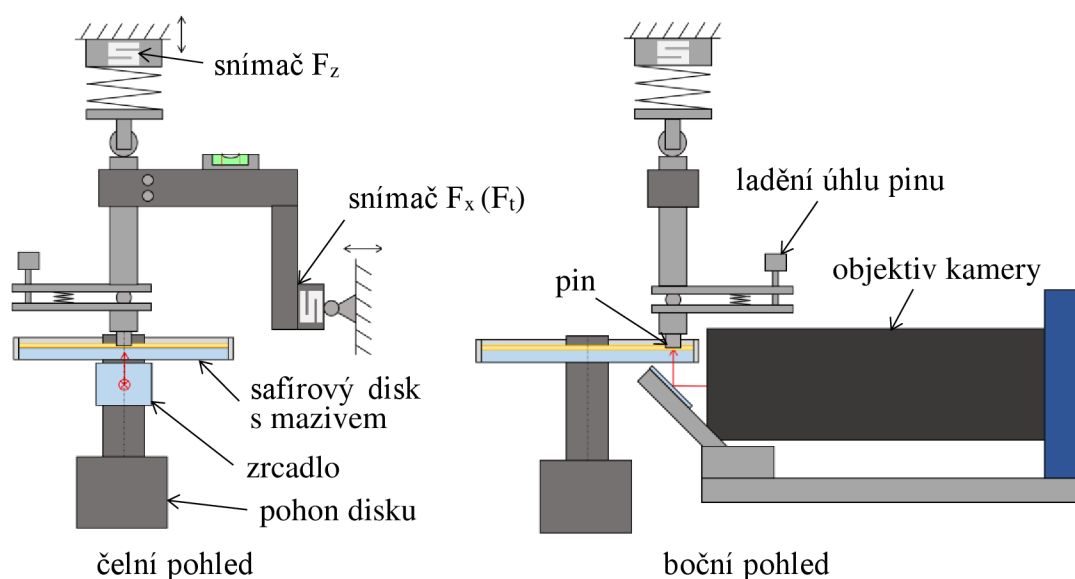


Obr. 4-1 Schéma postupu práce

4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

4.2.1 Tribometr

Všechna měření byla provedena na modifikovaném multifunkčním tribometru Rtec MFT-5000 v konfiguraci pin-on-disc (Obr. 4-2). Zřízení je vybaveno tenzometrickými snímači síly a přesným polohováním ve třech osách pomocí měřicího softwaru. Maximální rychlost otáčení disku je 8 000 ot/min. Úpravy tribometru spočívají především v nastavci pro upínání safírových disků, modulu pro upínání pinu umožňujícím manuální naklápění a nastavců pro infračervenou kameru a kameru pro fluorimetrická měření.



Obr. 4-2 Schéma měřicí soustavy tribometru a kamery

4.2.2 Kamera

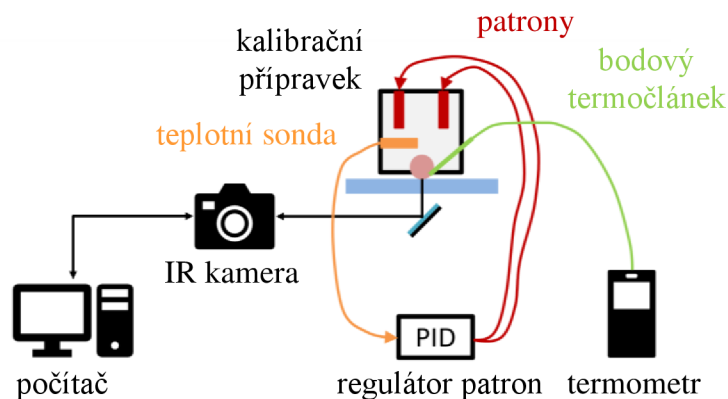
K měření teploty byla využita kamera FLIR SC5000 s mikroskopickým objektivem FLIR Microscope lens X3. Základní parametry kamery s objektivem jsou uvedeny v Tab. 4-1. Snímky z kamery byly vyhodnocovány v softwarech FLIR ResearchIR, ATILA a Matlab.

Tab. 4-1 Parametry kamery a objektivu

Parametr	Hodnota
Rozsah měřitelných vlnových délek	2,5 – 5,1 μm
Pixelové rozlišení	320 x 256
Přesnost měření	$\pm 1^\circ\text{C}$ nebo $\pm 1\%$
Zorné pole při vzdálenosti objektu 35 mm	3,2 x 2,4 mm

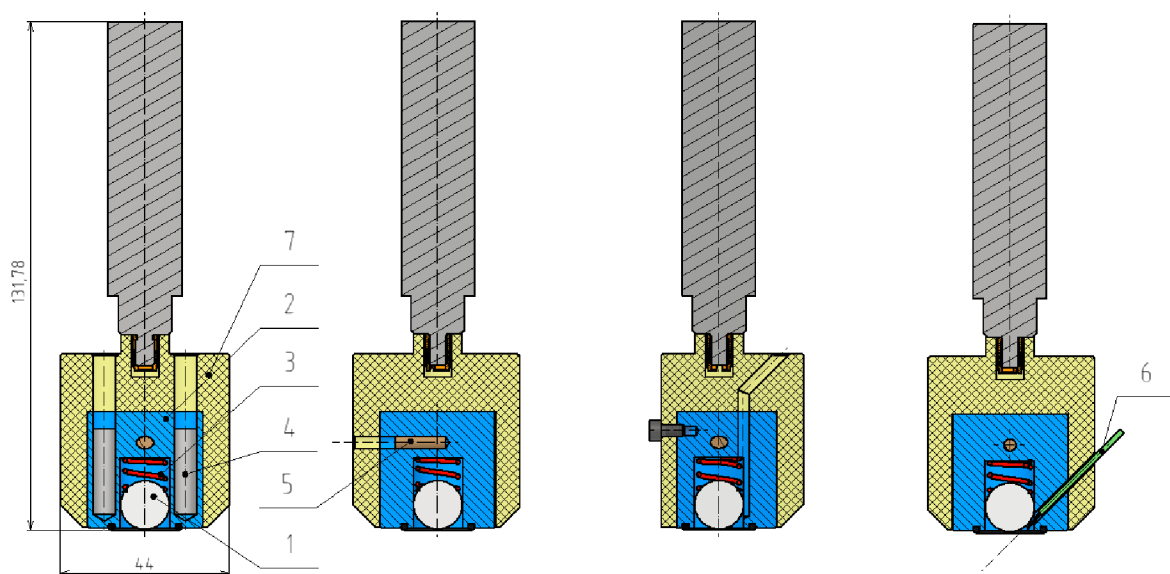
4.2.3 Kalibrační sestava

Kalibrace byla prováděna pomocí sestavy na Obr. 4-3. Kamera byla řízena z počítače v softwaru Research IR, kde byla také částečně zpracovávána veškerá data. Ohřev kalibračního tělesa patronami řídil PID regulátor, který získával zpětnou vazbu o teplotě přípravku z teplotní sondy.



Obr. 4-3 Schéma kalibrační sestavy

Pro účel kalibrace kamery přímo na tribometru byl vyvinut kalibrační přípravek, viz Obr. 4-4. Do přípravku může být vložena jako kalibrační těleso ocelová ložisková kulička (pozice 1), nebo pin. Kalibrační těleso je vloženo do jádra z hliníkové slitiny (pozice 2) a pružinou (pozice 3) přitlačeno k safírovému disku na tribometru. Kontakt tělesa s diskem je utěsněn o-kroužkem, aby mohl být prostor vyplněn olejem. V tělese jsou umístěny dvě patrony (pozice 4) a jeden termočlánek (pozice 5), který slouží jako zpětná vazba o teplotě patron, resp. jádra přípravku. Druhý termočlánek (pozice 6) je vložen skrze otvor do oblasti kontaktu tak, aby se nedotýkal disku ani kuličky a měřil teplotu oleje. Těleso je vloženo do sklotextitového termoizolačního pouzdra (pozice 7).



Obr. 4-4 Kalibrační přípravek

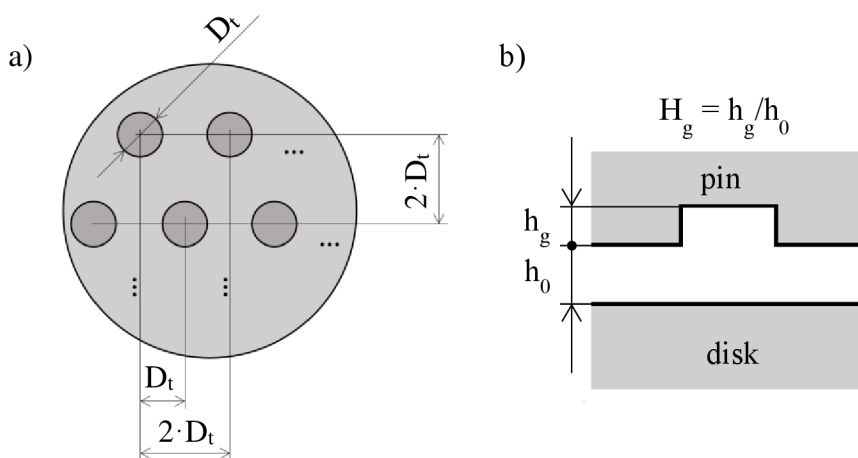
4.3 Materiál a testovací podmínky

Testovací podmínky byly voleny tak, aby bylo možné otestovat hypotézy stanovené na základě výsledků Menga [22] a tedy se podmínkám z jeho práce přiblížit. Rychlost otáčení disku byla variována mezi 50 až 2000 ot/min, což představuje rychlosti skluzu pinu po disku 0,3 až 8,1 m/s. Vyšších rychlostí nebylo dosahováno kvůli dynamickým projevům soustavy. Měření probíhalo za okolní pokojové teploty. Jako mazivo byl využit olej FVA4 o kinematické viskozitě 460 mm²/s při 40°C.

Limitujícím faktorem byly především dostupné texturované piny, které se od těch použitých Mengem liší v rozměrech a tvaru textur. K dispozici byla sada pinů s texturovaným čelním povrchem. Všechny textury mají kruhový půdorys. Uspořádání prvků textur na pinu je trojúhelníkové. Rozměry textur jsou uvedeny v Tab. 4-2 a na Obr. 4-5a. Podle literatury jsou pro navození termálních jevů vhodnější piny o větším průměru. Proto byly pro měření využity především piny o průměru 800 μm. Podle Menga [21] je jedním z rozhodujících faktorů poměr hloubky důlku textury h_g a vzdálenosti pinu od hladkého povrchu h_0 , tedy $H_g = h_g/h_0$ (Obr. 4-5b).

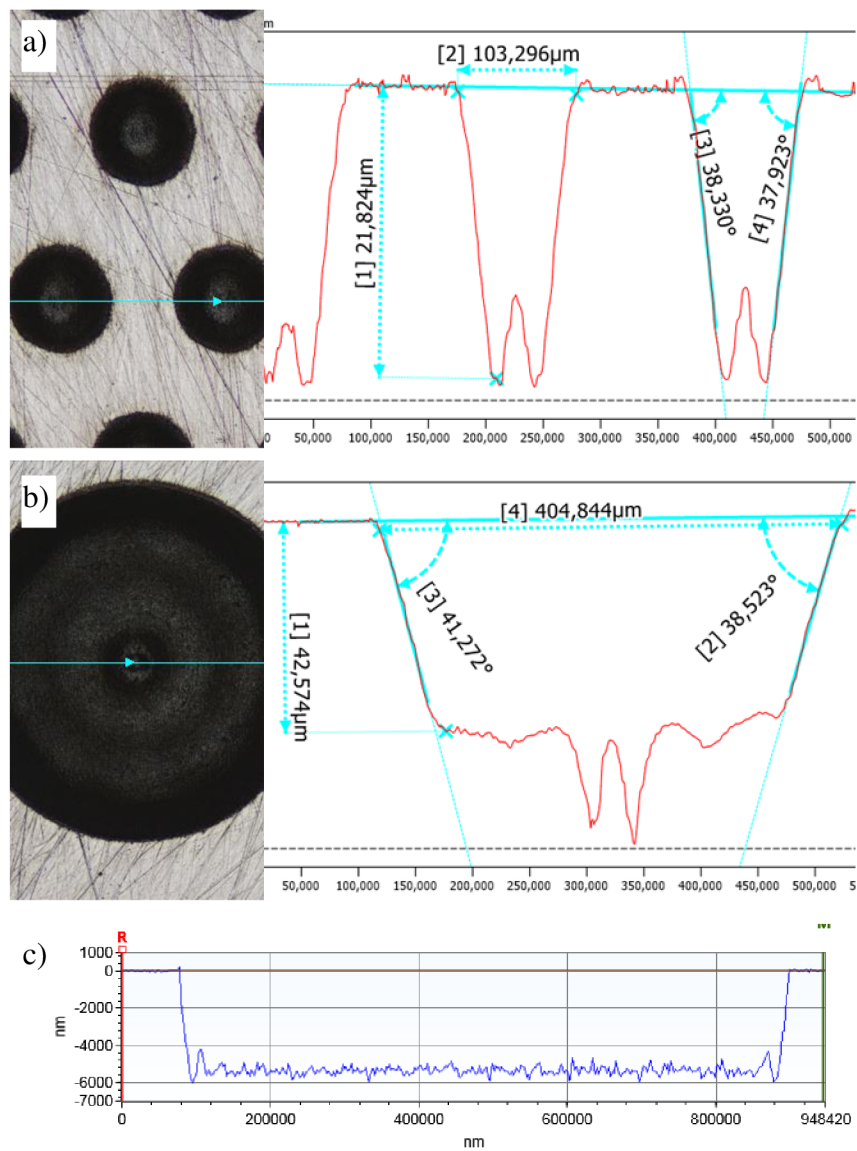
Tab. 4-2 Rozměry textur dostupných pinů a jejich označení na pracovišti

	Průměr D_t			
	100 μm	200 μm	400 μm	800 μm
Hloubka h_g				
5 μm				Pin 7
10 μm	Pin D2	Pin A4		Pin 9
20 μm	Pin A3	Pin A5	Pin C5	
40 μm		Pin C6	Pin C6	



Obr. 4-5 Texturované piny; a) rozměry textur pinů; b) ilustrace poměru $H_g = h_g/h_0$

Problematickou vlastností skutečných textur vyráběných laserovým vypalováním je profil dna textury. Ten se výrazně liší od ideálních textur, se kterými počítají všechny numerické simulace nalezené v systematické rešerši, viz Obr. 4-6. Tento problém je výraznější u textur s menším průměrem. To je další důvod, proč byly při měření preferovány piny o průměru 800 μm .



Obr. 4-6 Profily dna laserovaných textur; a) $\varnothing 103 \mu\text{m}$, b) $\varnothing 404 \mu\text{m}$, c) $\varnothing 800 \mu\text{m}$

4.4 Metody

4.4.1 IR Termografie

IR Termografie je metoda, která se zabývá měřením infračerveného záření emitovaného povrchy těles a jeho přepočtem na teplotu povrchu. Záření, resp. energie zachycená IR kamerou zahrnuje emisi od objektu, odraženou emisi z okolí a emisi od okolní atmosféry podle rovnice

$$W_{celk} = W_1 + W_2 + W_3 \quad (1)$$

kde W_{celk} je celková energie zachycená IR kamerou, W_1 je emise objektu, W_2 je odražená emise okolí a W_3 je emise okolní atmosféry.

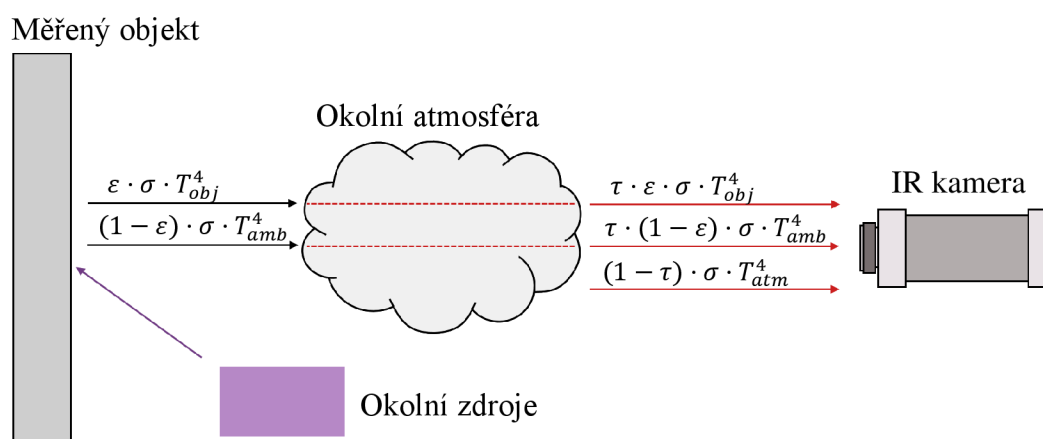
Rovnice (2) až (4) pro jednotlivé příspěvky vycházejí ze Stefanova – Boltzmannova zákona.

$$W_1 = \tau \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{obj}^4 \quad (2)$$

$$W_2 = \tau \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sigma \cdot T_{amb}^4 \quad (3)$$

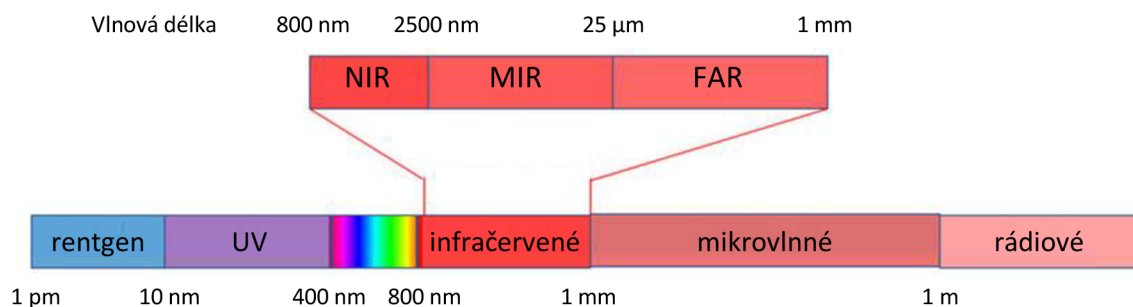
$$W_3 = (1 - \tau) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad (4)$$

kde τ je propustnost okolní atmosféry, ε je emisivita objektu, σ je Stefanova – Boltzmannova konstanta, $(1-\varepsilon)$ je odrazivost objektu, $(1-\tau)$ je emisivita atmosféry a T_{obj} , T_{amb} a T_{atm} jsou teploty objektu, okolí a atmosféry. [23]



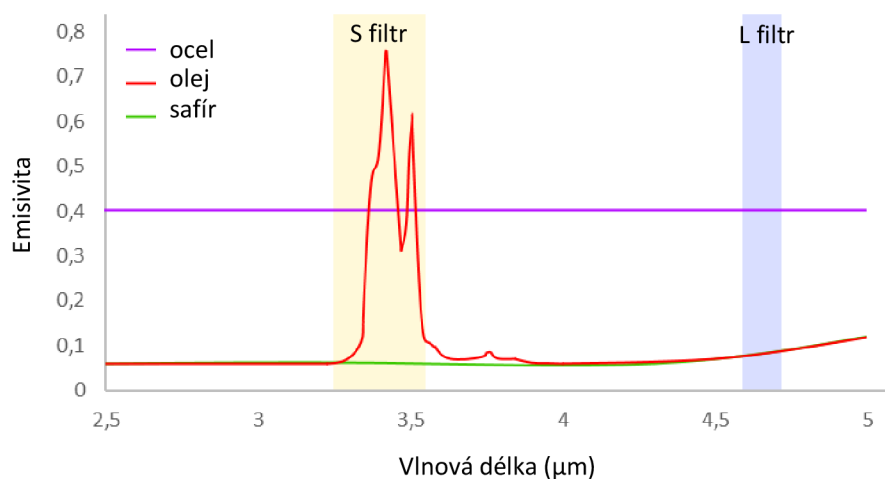
Obr. 4-7 Princip infračervené termografie [23]

Rozsah záření, se kterým se při měření pracuje spadá do tzv. střední infračervené oblasti (angl. mid infrared, MIR), která zahrnuje vlnové délky od 2,5 μm do 25 μm (Obr. 4-8). IR kamera FLIR SC5000 snímá záření v rozsahu vlnových délek 2,5 až 5,1 μm .



Obr. 4-8 Infračervené záření v elektromagnetickém spektru a jeho dělení na MIR, NIR a FAR [24]

Pro rozdělení zdrojů záření se dle kapitoly 2.2.1 standardně používají dva pásmové filtry. Toto rozdělení je možné díky rozdílu ve vlnových délkách vyzařovaných mazacím olejem a kuličkou. Zatímco mazací olej je selektivní zářič (hustota intenzity záření u něj závisí na vlnové délce záření), kulička se chová jako šedé těleso (její emisivita je pro všechny vlnové délky uniformní). U oleje lze nalézt i další pásma vlnových délek s významnou emisivitou, avšak tato pásma jsou nad rozsah snímání kamerou (tj. nad 5,1 μm). Obdobně také safír vyzařuje intenzivněji ve vlnových délkách nad rozsah kamery. Na základě analýzy pěti na pracovišti dostupných filtrů byl v této práci jako S filtr zvolen filtr s označením 3410-290 (značeno jako střed pásma-šířka pásma) a jako L filtr 4672-140. Bližší je výběr těchto filtrů odůvodněn v kapitole 5.1.2.

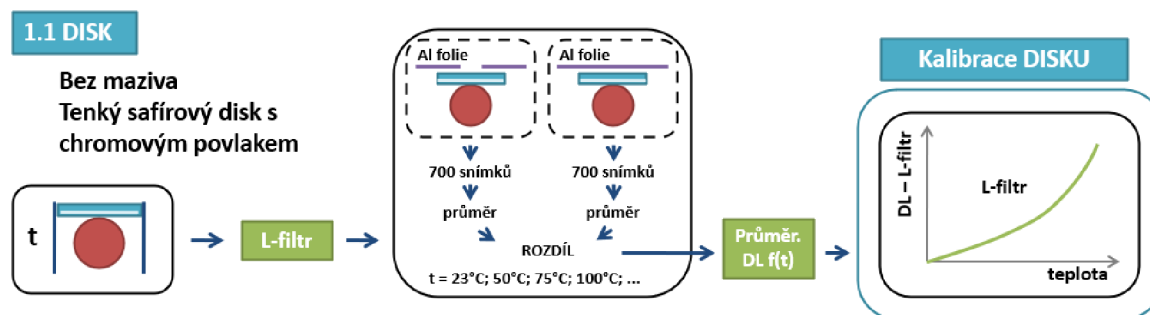


Obr. 4-9 Emisivita zdrojů a pásma užitých filtrů (upraveno dle [4])

4.4.2 Kalibrace IR kamery pro bodové kontakty

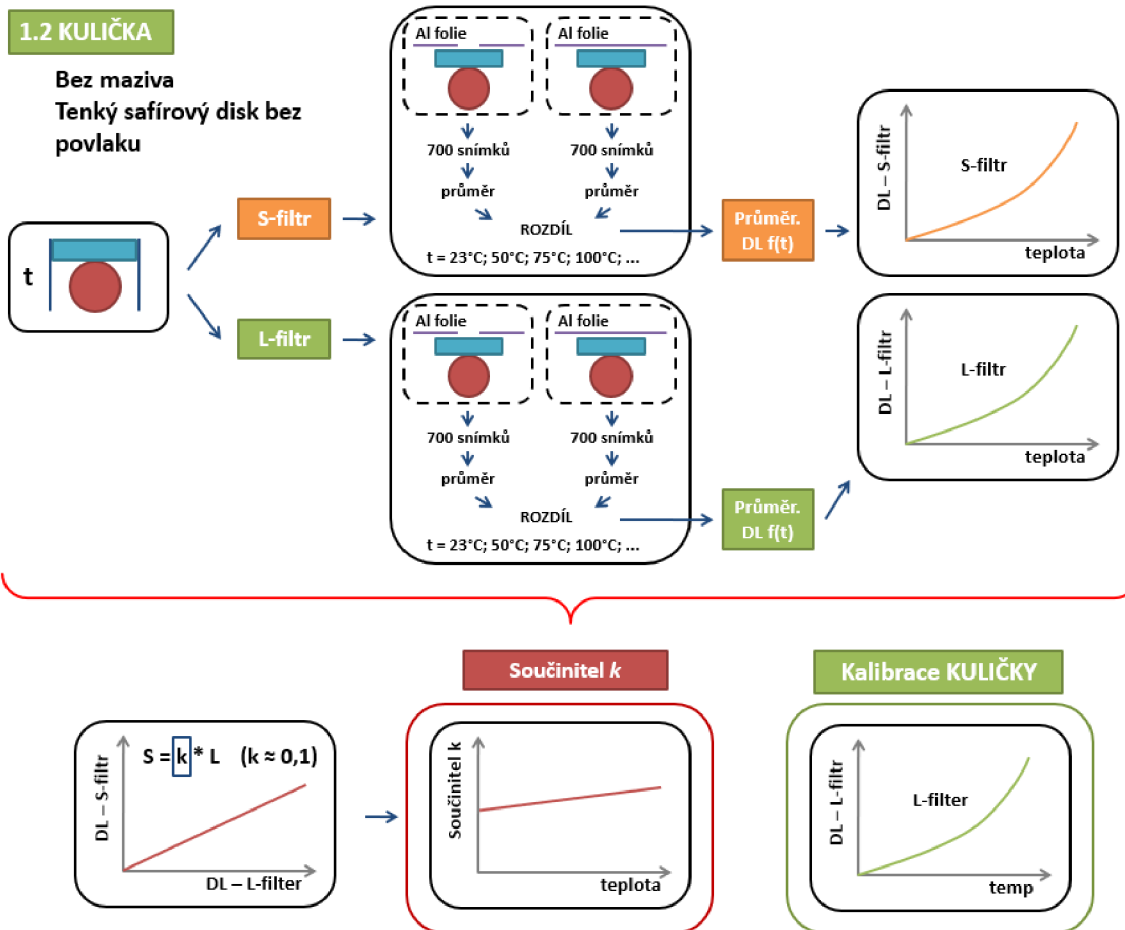
Při měření IR kamerou je hodnota infračerveného záření emitovaného povrchu těles zapsána do hodnot tzv. digital levelu (dále DL), který je poté potřeba převést na teplotu povrchu tělesa nebo kapaliny. Úkolem kalibrace je stanovit teploty odpovídající naměřeným hodnotám DL a to pro jednotlivé zdroje záření. DL od různých zdrojů záření jsou rozdělovány podle použitého IR filtru, případně po přepočtu mezi filtrovanými DL. V této kapitole je představen postup kalibrace z oblasti bodových kontaktů, který byl zaveden na pracovišti a využit v předchozích pracích, které zkoumaly EHD kontakty v ball-on-disc konfiguraci [25, 26]. Tento postup sloužil jako výchozí metoda, která byla aplikována na texturovanou pin-on-disc konfiguraci a dále upravena podle identifikovaných nedostatků. Kalibrace pro bodové kontakty probíhala ve speciálním kalibračním zařízení s vyhřátou kuličkou přitlačenou na safírový průzor a měla tři hlavní části: 1) kalibrace teploty disku, 2) kalibrace teploty kuličky a 3) kalibrace teploty oleje.

Prvním krokem kalibrace bylo určení vztahu teploty a záření disku (Obr. 4-10). Ta probíhala bez maziva a s použitím safírového disku s chromovou vrstvou na straně kontaktu, čímž bylo odstíněno záření od kuličky. Kulička byla postupně zahřívána od pokojové teploty po teploty nad 100 °C. V každém teplotním kroku bylo pořízeno dvakrát 700 snímků s L filtrem, které byly zprůměrovány. Jednou byly snímky pořízeny s hliníkovou fólií s otvorem umístěnou před kontaktem, která měla minimalizovat parazitní okolní záření. Podruhé byl kontakt zakryt fólií bez otvoru, čímž byl sejmут referenční snímek. Odečtením referenčního snímku od snímku kontaktu byla získána relativní hodnota DL v každém kroku. Výsledkem je kalibrační křivka pro disk.



Obr. 4-10 Kalibrace pro bodový kontakt – disk

Obdobným způsobem byla získána kalibrační křivka pro kuličku (Obr. 4-11). Použit byl safírový disk bez chromového povlaku. Tentokrát byly pořízeny snímky s L filtrem i S filtrem. Výsledná křivka pro L filtr byla kalibrační křivkou kuličky. Z podílu DL_S/DL_L byl získán přepočtení součinitel k , který je funkcí teploty. Součinitel k umožňuje přepočet mezi hodnotami naměřenými L a S filtrem, které mají rozdílné propustnosti. Tento koeficient je později využit při kalibraci teploty oleje a při vyhodnocování snímků.

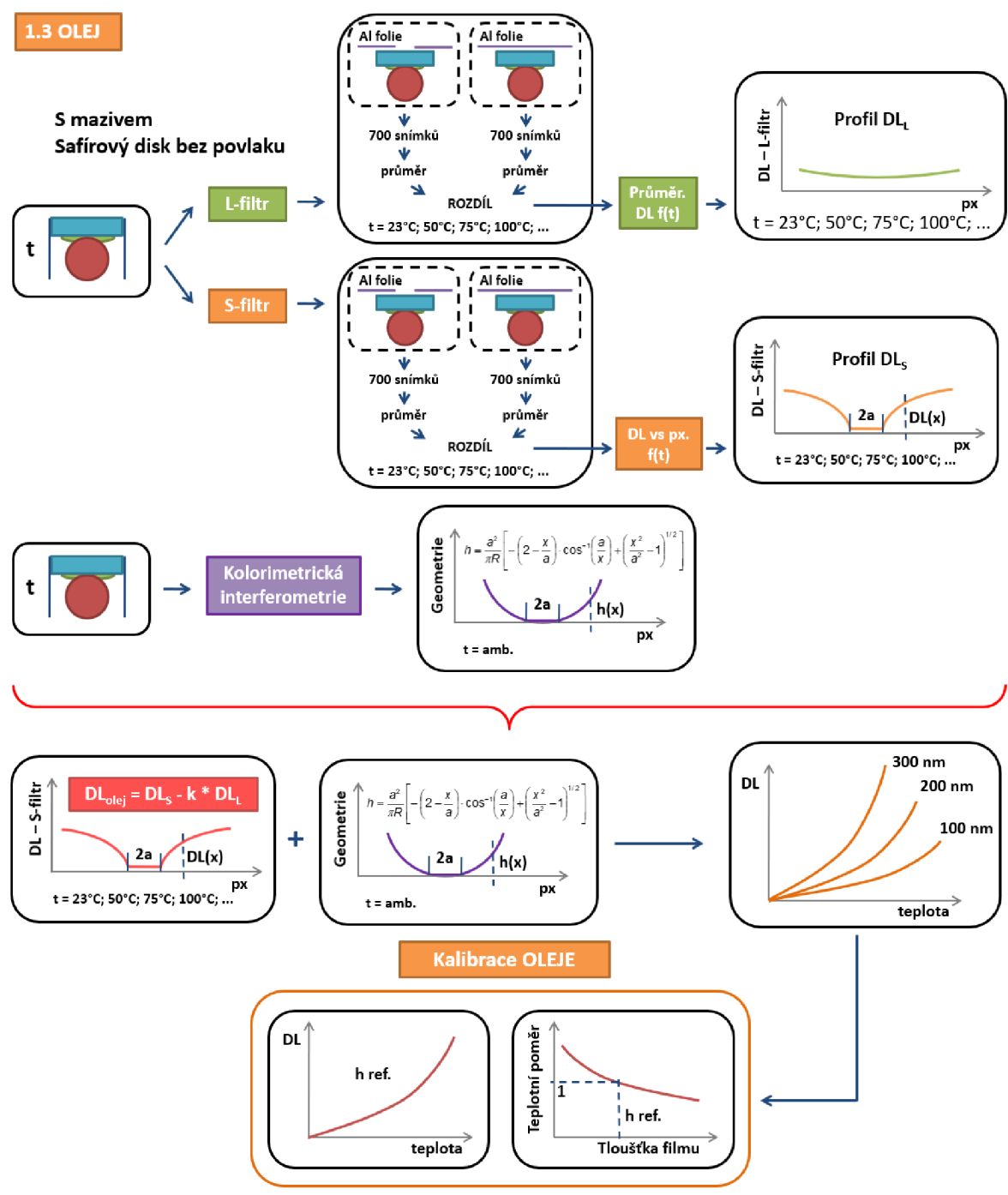


Obr. 4-11 Kalibrace pro bodový kontakt – kulička a k faktor

U kalibrace teploty oleje (Obr. 4-12) je potřeba zohlednit, jak ovlivňuje tloušťka vrstvy oleje intenzitu záření. Měřením přes L filtr a S filtr byly získány profily DL v radiálním směru od středu kontaktu. DL oleje byl získán přepočtem $DL_{olej} = DL_S - DL_L \cdot k(t)$. Tloušťka olejové vrstvy je dána geometrií kuličky, kterou lze popsat analytickým vztahem. Rozměr kontaktní oblasti byl určen kolorimetrickou interferometrií. Na základě těchto informací byly sestrojeny křivky určující vztah mezi DL, teplotou a tloušťkou maziva. Výsledkem kalibrace je potom závislost DL na teplotě pro referenční tloušťku maziva a funkce pro přepočet výsledné teploty dle tloušťky maziva.

Při vyhodnocování veškerých závislostí v kalibraci i měření se pracuje s relativními hodnotami DL i teploty. To znamená, že od každé hodnoty DL se odečítá hodnota získaná při referenční teplotě, typicky pokojové teplotě. Stejně tak jsou relativní teploty nárůstem od referenční teploty. Absolutní hodnoty DL se pohybují v řádech tisíců, např. u L filtru kolem 8 nebo 9 tisíc. Relativní hodnoty DL jsou však násobně menší, a to pro L filtr při rozsahu relativních teplot od 0 °C do 76 °C v rozmezí cca 0 až 350 a pro S filtr v rozmezí cca 0 až 110. Nižší citlivost kamery na změnu teploty je dána užitím filtrů a jejich různou propustností. Z toho důvodu je potřeba kalibraci provádět pečlivě a důsledně prokládat kalibrační body vhodnými funkcemi.

1.3 OLEJ



Obr. 4-12 Schéma kalibrace teploty oleje

4.4.3 Okrajově využití metody

Fluorimetrie

Fluorimetrie je metoda využívající jevu fotoluminiscence. V tribologii se využívá k měření tloušťky mazacího filmu. Mazivo je smícháno s barvivem, které je při měření excitováno monochromatickým světlem, v případě laserem indukované fluorescence laserem o vhodné frekvenci. Excitované barvivo poté promaří část energie ve formě fotonu. Toto záření je zaznamenáno kamerou a na základě světlosti pixelů je dopočítána tloušťka vrstvy maziva.

Kolorimetrická interferometrie

Kolorimetrická interferometrie je metoda určená k stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu (zejména bodové kontakty s kuličkou) s vysokou přesností a prostorovou rozlišitelností [27]. Základem metody je přiřazování známých tlouštěk maziva k barvům interferenčních proužků zaznamenaných na interferogramu. Proužky vznikají interferencí světla, které je namířeno do kontaktu. Část světla se odráží od disku s chromovým povlakem, se kterým je kulička v kontaktu. Zbytek paprsku se odráží zpět od povrchu kuličky. Interakcí těchto dvou paprsků vznikají interferenční proužky zaznamenané na interferogramu.

4.5 Testované predikce

Hypotéza H1 (H1a, H1b a H1c) popisuje predikované chování teploty v mazivu a na povrchu pinu. Součástí predikce je, že popsany průběh teplot ve směru vzájemného pohybu pinu a disku bude výraznější při vyšších poměrech H_g (kolem 1,8) a mírnější při nižších poměrech H_g (kolem 0,2). Dále u textur s větší hloubkou h_g bude oproti texturám s menší hloubkou při zachování h_0 pozorovatelný přesun teplotního maxima v mazivu ze zadní části důlku ke středu a zároveň dojde ke zvýšení třecí síly F_t

5 VÝSLEDKY

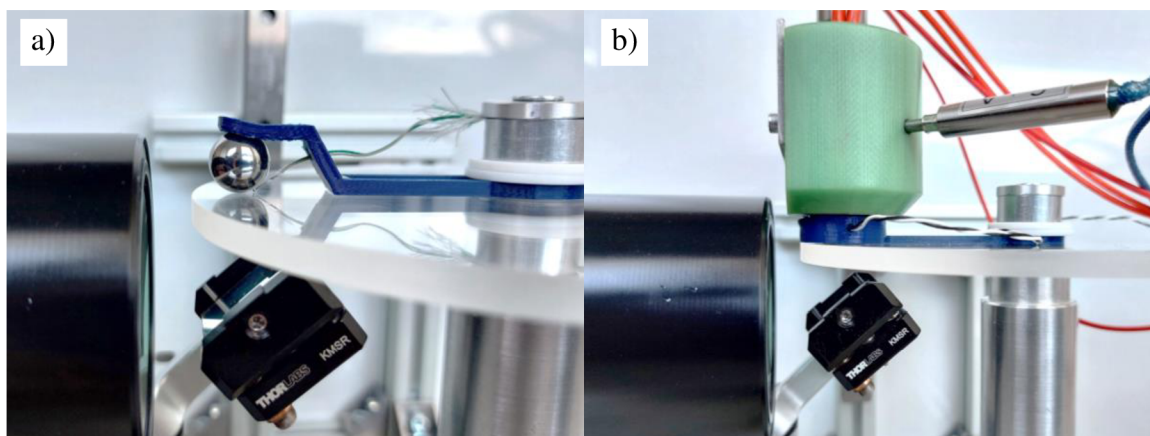
V této kapitole jsou popsány výsledky práce, které lze rozdělit do dvou kategorií. První kategorií jsou poznatky o aplikaci IR mikroskopie pro zkoumání kluzných kontaktů s texturovanými povrchy. Tyto poznatky mají často praktický charakter a měly by v dalším výzkumu usnadnit průběh kalibrace i měření a orientaci v pořízených snímcích. Druhou kategorií výsledků tvoří poznatky o chování kontaktů s přihlédnutím k vlivu ohřevu v kontaktní oblasti a případných termálních jevů.

5.1 Implementace metody

Značná část této kapitoly je věnována kalibraci, která tvořila majoritní část práce. Jsou zde představeny zejména poznatky o volbě vhodného tělesa pro kalibraci a filtraci zdroje záření. Z praktických důvodů neprobíhala kalibrace přímo na tribometru, ale na provizorním stojanu se safírovým diskem.

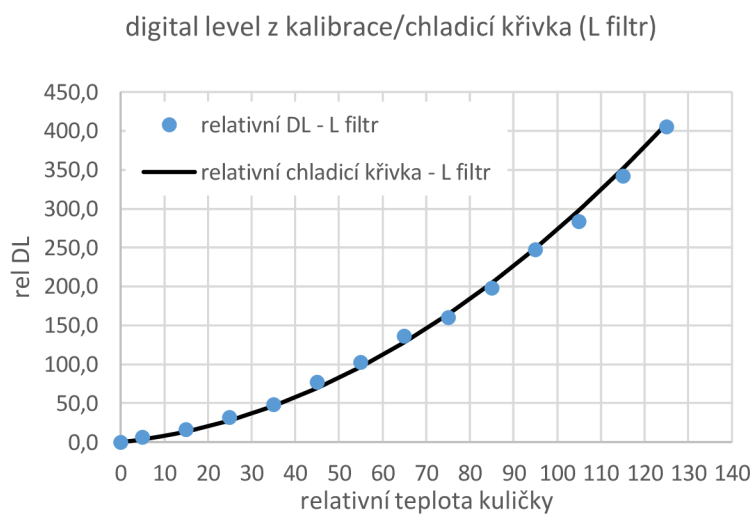
5.1.1 Testování kalibračního přípravku

Navržený kalibrační přípravek je vybaven dvěma termočládky, viz Obr. 4-4. Termočládková sonda je uložena do jádra přípravku a slouží k regulaci teploty patron pomocí PLC. Druhý termočládek (bodový) měl sloužit pro určení skutečné teploty kalibračního tělesa (kulička nebo pin) nebo oleje. Je tedy potřeba jej pečlivě vsunout do přípravku. Při měření se ukázalo využití bodového termočládku jako nepraktické a potenciálně nepřesné. Při mírném pohybu s termočládkem byla sledována změna zaznamenané teploty v řádu vyšších jednotek. Tato hodnota byla vždy nižší než teplota zaznamenaná sondou. To je problematické, jelikož laborant není schopen zajistit přesně polohovaný a stabilní kontakt termočládku s kuličkou. Zvolen byl tedy přístup, kdy byla na PLC nastavena požadovaná teplota a následovala prodleva pro vytemperování kuličky/pinu. Předpoklad byl takový, že těleso se vyhřeje na požadovanou teplotu, pokud se hodnota digital levelu (DL) na kameře ustálí. Tato hypotéza byla testována pomocí křivky chladnutí kuličky. Nejdříve byla provedena běžná kalibrace, kdy byl zaznamenán DL na vrchlíku kuličky a teplota nastavená na PLC. Dále byla kulička vytemperována na cca 150 °C, upevněna na disk pomocí jednoduchého přípravku (viz Obr. 5-1a) a její teplota byla snímána termočládkem (v tomto případě šlo snadno zajistit kontakt termočládku s kuličkou poblíž kontaktu s diskem).



Obr. 5-1 Testování kalibračního přípravku

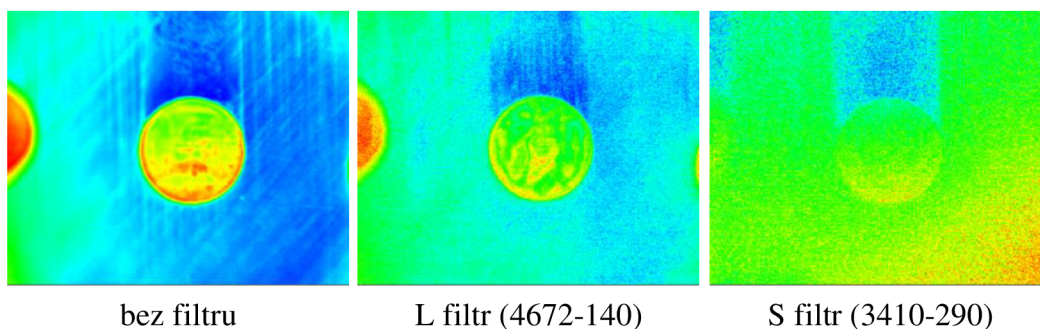
Dle výsledku testu na Obr. 5-2 vykazují přístup se zápisem teplot dle sondy a PLC dobrou shodu s měřením chladicí křivky pomocí termočlánku. Proto byl tento přístup dále využíván a od využití bodového termočlánku bylo upuštěno. Tento test také prokázal, že na vrchlíku kuličky není sledováno významné zkreslení způsobené zářením od vyhřátého kalibračního přípravku. Obdobným způsobem byl také testován vliv kontaktu kuličky se safírovým diskem, který je jednak chladnější než kulička a dále se také ohřívá. Kulička byla podložena dalším přípravkem tak, aby se při suché kalibraci disku nedotýkala viz, Obr. 5-1b. Dle výsledků nemá kontakt kuličky se safírem na kalibraci pozorovatelný vliv.



Obr. 5-2 Porovnání teploty z PLC s výsledky testu s chládnoucí kuličkou

5.1.2 Volba infračervených filtrů

Dle metodiky popsané v kapitole 4.4 se pro rozdělení záření v případě EHD kontaktů užívají dva pásmové IR filtry. Užití filtrů pro kluzné konformní kontakty je vůči nekonformním EHD kontaktům specifické tím, že teplotní gradienty v rámci jednoho snímku kontaktu nejsou tak výrazné. To způsobuje, že snímky pořízené přes některé filtry (zejména S filtr) jsou významně zašuměné, jelikož záření je slabší a více uniformní, viz Obr. 5-3. Z tohoto důvodu je s nimi detailní pozorování kontaktu za nižších teplot problematické.



Obr. 5-3 Snímky běžícího kontaktu pořízené s různou filtrací (celková teplota kolem 60°C)

Z výše uvedených důvodů byly zvažovány dva přístupy k filtraci záření:

- 1) S filtr (záření od oleje + oceli) a L filtr (záření od oceli)
- 2) Bez filtru (všechny zdroje záření) a L filtr (záření od oceli).

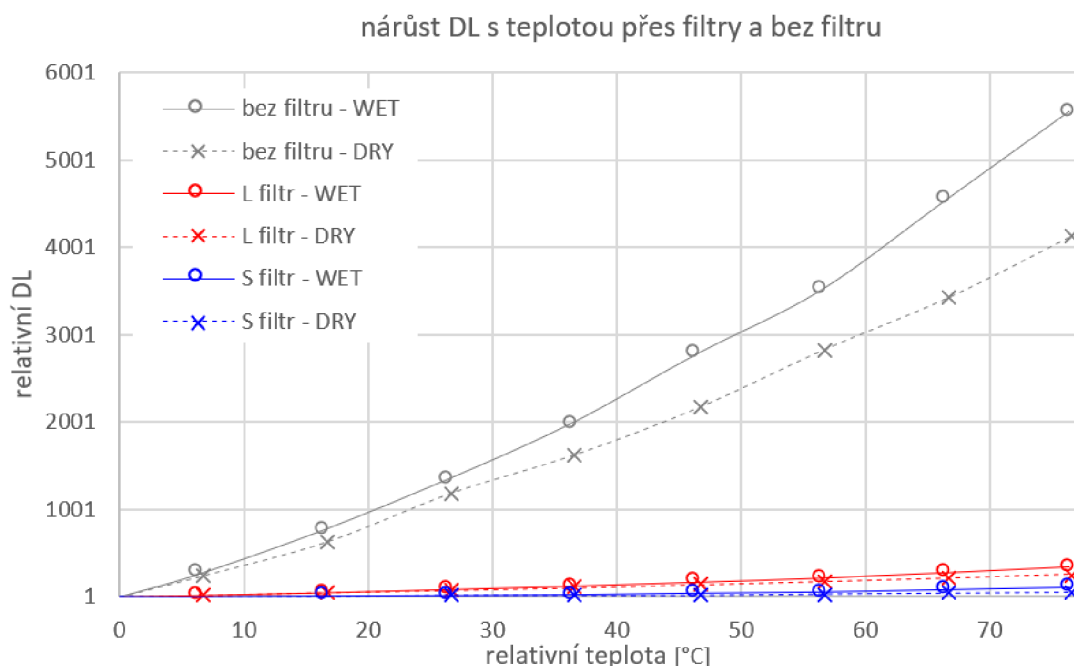
Užití dvou filtrů minimalizuje nebezpeční zkreslení výsledků záření od parazitních zdrojů (safír, okolní zdroje apod.). Snímky bez filtru však vykazují největší rozdíl při kalibraci s olejem (dále WET) a na sucho (dále DRY), což indikuje, že záření oleje je na nich intenzivně zaznamenáno, viz Obr. 5-4. Při výběru filtrů je však vhodné brát v úvahu také rozdíl v relativních hodnotách DL, který kamera skrze filtr (příp. bez filtru) zaznamenává. Každý filtr má totiž jinou šířku pásma propustnosti a jinou procentuální propustnost. Aby byl možný přepočítání mezi snímky s různými filtry (příp. bez filtru), je potřeba stanovit přepočítací součinitel $k(t)$, viz rovnice (1) a (2). Součinitel $k(t)$ je určen DRY kalibrací, vyjadřuje poměr DL_S/DL_L (příp. $DL_L/DL_{bez\ filtru}$) a je funkcí teploty. Pokud je rozdíl mezi relativními DL na snímcích vysoký, jako je např. rozdíl mezi „bez filtru – WET“ a „L filtr – WET“ na Obr. 5-4, chybovost výpočtu výrazně roste s nepřesností určeného $k(t)$ součinitele. Z toho důvodu byla zvolena standardní metoda filtrace s užitím dvou filtrů. Snímky bez filtru byly použity pouze pro měření celkové teploty v kontaktu.

Rozdělení záření od ocelového pinu a oleje bylo tedy provedeno dle rovnic

$$DL_{pin} = DL_L \quad (5)$$

$$DL_{olej} = DL_S - DL_L \cdot k(t) \quad (6)$$

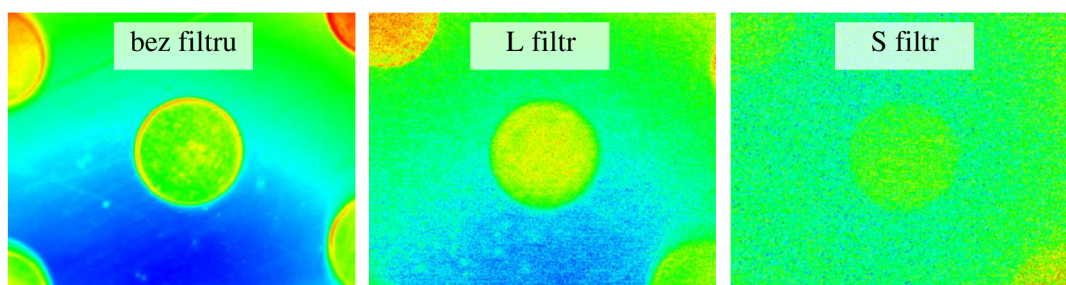
kde DL_S je záření naměřené přes S filtr (olej + ocel), DL_L je záření naměřené přes L filtr (pouze ocel) a $k(t)$ je přepočtení faktor pro kompenzaci různých propustností filtrů.



Obr. 5-4 Nárůst DL s filtry a bez filtru

5.1.3 Volba kalibračního tělesa

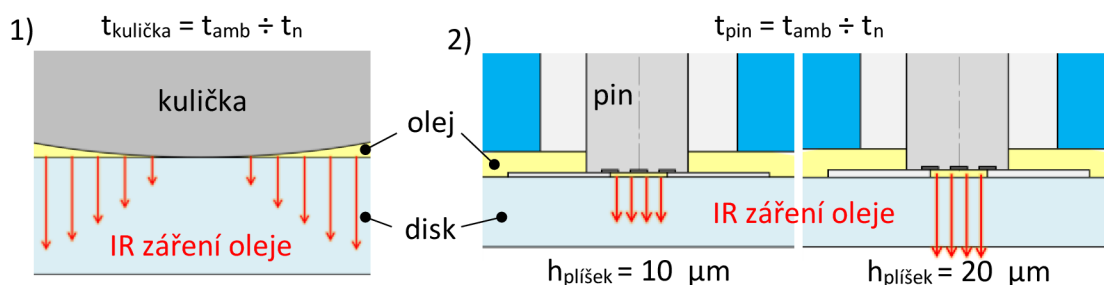
Kalibrace je prováděna pro stanovení vztahu mezi naměřeným digital levelm (DL) a teplotou v kontaktu, případně teplotou povrchu pinu a teplotou oleje. Kalibrace pro povrch pinu byla provedena přímo na pinu, jelikož umožňuje zohlednit různou emisivitu hladkého povrchu pinu a povrchu laserovaných důlků textury. Ta se projevuje tak, že v místě důlku se jeví povrch jako teplejší (intenzivněji září), viz Obr. 5-5.



Obr. 5-5 Vliv rozdílné emisivity povrchu pinu a důlku na DL (snímky ze suché kalibrace, teplota 23 °C)

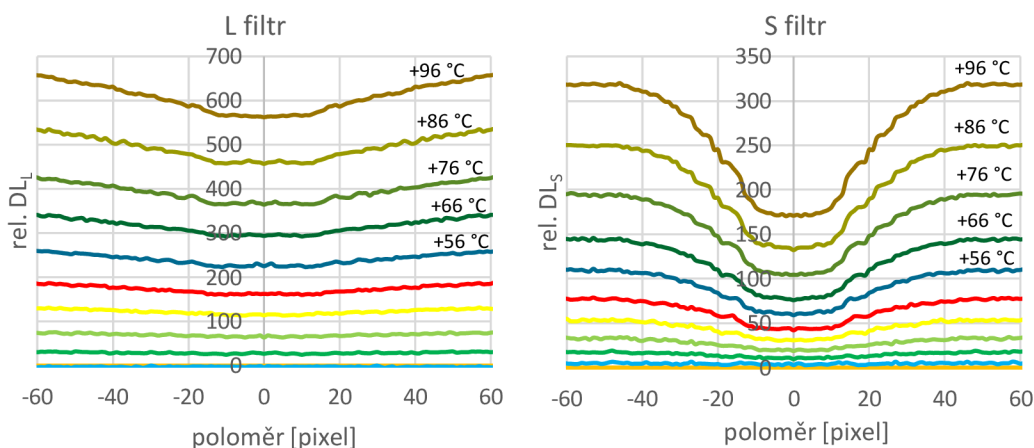
Kalibrační přípravek byl navržen tak, aby umožňoval dva různé přístupy ke kalibraci teploty oleje:

- 1) Kalibrace s kuličkou. Z jednoho snímku pro danou teplotu lze díky geometrii kuličky získat obecnou informaci o záření oleje v určitém rozsahu tloušťek vrstvy.
- 2) Kalibrace s pinem podloženým plíšky o různých tloušťkách. Méně obecná informace, ale přímočařejší a lépe simuluje podmínky při měření.



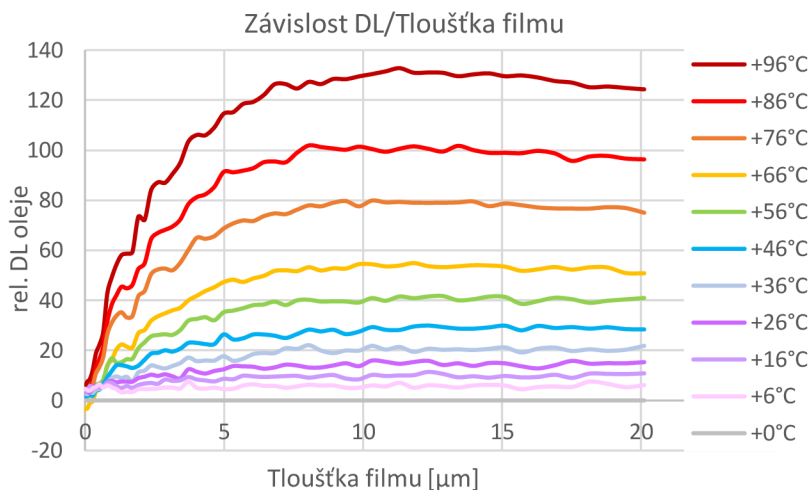
Obr. 5-6 Přístupy ke kalibraci oleje; 1) kalibrace s kuličkou; 2) kalibrace s piny a plíšky

Provedeny byly oba způsoby kalibrace oleje. Při kalibraci s kuličkou (Obr. 5-7 a Obr. 5-8) byla využita kolorimetrická interferometrie, pomocí které byl stanoven poloměr stykové plochy kuličky a safirového disku a dle něj geometrie spáry h mezi kuličkou a diskem. Dle Hertzovy teorie je $h = u \cdot (x - v)^{3/2}$, kde x je vzdálenost od středu kontaktu a u a v jsou konstanty. Na Obr. 5-7 jsou vykresleny profily DL na průřezu kontaktem (vždy průměrováno ze čtyř řezů). Na profilu z L filtru je zřejmý nárůst v radiálním směru. Ten může být způsoben například odrazem parazitního záření od kuličky nebo jednoduše zářením od oleje (filtrace není dokonalá). Stejně tak jsou profily z S filtru postupně odsazené ve směru svíslé osy, jelikož S filtr propouští také záření od kuličky (viz Obr. 4-9).



Obr. 5-7 Dílčí výsledky zkušební kalibrace s kuličkou

Při přepočtu výsledků na DL_{olej} dle rovnice (6) bylo zjištěno, že po dosazení $k(t)$ faktoru získaného z kalibrace s kuličkou na sucho se hodnoty DL_{olej} při nulové tloušťce nescházejí v nule. Proto byl využit $k(t)$ faktor získaný z poměru relativních DL_L a DL_S ve středu kontaktu, kde by měla být nulová vrstva maziva (Obr. 5-7). Výsledek zkušební kalibrace oleje pomocí kuličky je na Obr. 5-8.



Obr. 5-8 Výsledek zkušební kalibrace oleje pomocí kuličky

Kalibraci s kuličkou lze využít pro kvalitativní popis závislosti DL na tloušťce oleje. Dle Obr. 5-8 roste DL od nulové tloušťky po tloušťku 10 μm . U vrstev větších než 10 μm se jeví DL stabilně. Pro účely kvantitativního vyhodnocování teploty v kontaktu bylo užití kuličky vyhodnoceno jako nevhodné. Obr. 5-7 ilustruje, že filtrace zdroje záření není dokonalá. Proto se do výsledků kalibrace oleje promítají také vlastnosti kalibračního tělesa jako parazitního zdroje záření. Z toho důvodu je vhodné situaci při kalibraci co nejvíce přiblížit situaci při měření použitím pinu, aby byla minimalizována chyba při filtraci. Závěr je tedy takový, že ideálním přístupem je kombinace obou kalibračních těles, kdy jsou na základě kalibrace s kuličkou získány informace o vlivu tloušťky na intenzitu záření a na základě kalibrace s pinem jsou získány konkrétní hodnoty DL oleje. Postup kalibrace s pinem je detailně popsán v následující podkapitole.

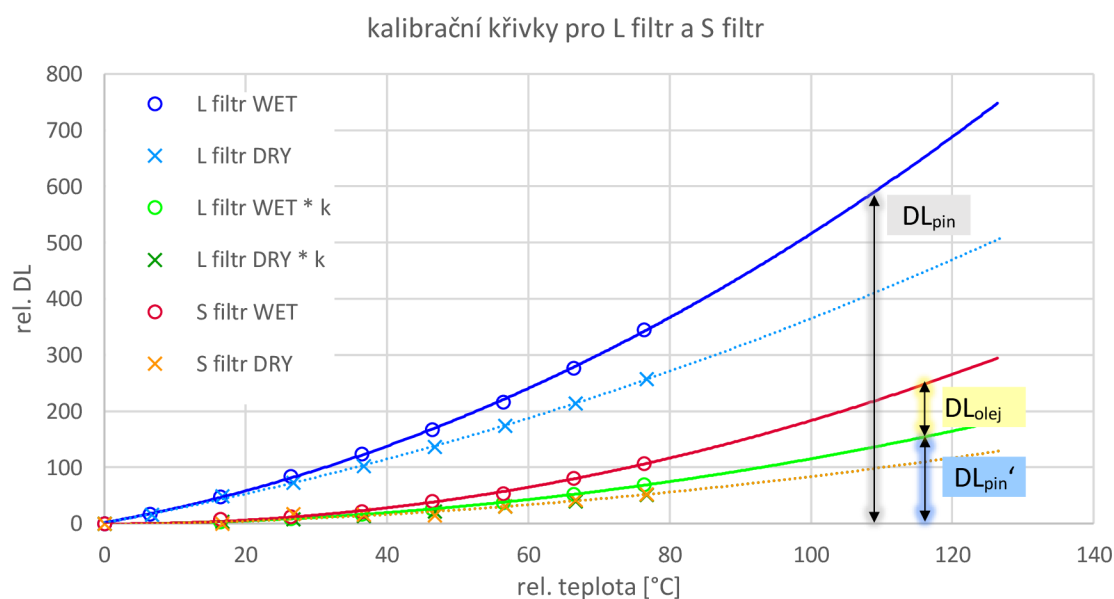
5.1.4 Postup a výsledky kalibrace

Kalibrace byla prováděna pro snímky bez filtru, s L filtrem a s S filtrem, a to jednou s kontaktem bez oleje a dále s olejem, kdy byl pin podložen plíšky, aby bylo změřeno více tloušťek vrstvy oleje. Postup výpočtu jednoho průběhu relativního DL je znázorněn v Tab. 5-1. Relativní teplota a relativní DL představují nárůst vůči teplotě a DL za počátečních podmínek v místnosti (kolem 23 °C). Jelikož kalibrace je časově náročná kvůli temperování tělesa v přípravku a bylo vyzorováno, že absolutní hodnota DL se při pozorování tělesa o stálé teplotě v čase mění (pravděpodobně se zahříváním kamery a filtrů), byl vždy s kalibračním snímkem kontaktu sejmout také snímek DL – pozadí. Kamera se odsunula z kontaktu a byl pořízen snímek stropu místnosti, resp. pozadí místnosti, kde byly po čas kalibrace stálé podmínky. Z těchto snímků byl pro každý krok vypočítán OFFSET. Povrch laserovaných textur na pinech má jinou emisivitu než hladký povrch pinu, a proto jsou vyhodnoceny dvě kalibrační křivky pinu pro hladký povrch a důlek.

Tab. 5-1 Vzorce výpočtu kalibračních křivek

t abs.	t rel.	DL abs.	DL - pozadí	OFFSET	DL rel.
t_0	$t_{0rel} = 0$	DL_0	DL'_0	$OFF_0 = 0$	$DL_{rel0} = 0$
t_1	$t_{1rel} = t_1 - t_0$	DL_1	DL'_1	$OFF_1 = DL'_1 - DL'_0$	$DL_{rel1} = DL_1 - DL_0 - OFF_1$
t_2	$t_{2rel} = t_2 - t_0$	DL_2	DL'_2	$OFF_2 = DL'_2 - DL'_0$	$DL_{rel2} = DL_2 - DL_0 - OFF_2$

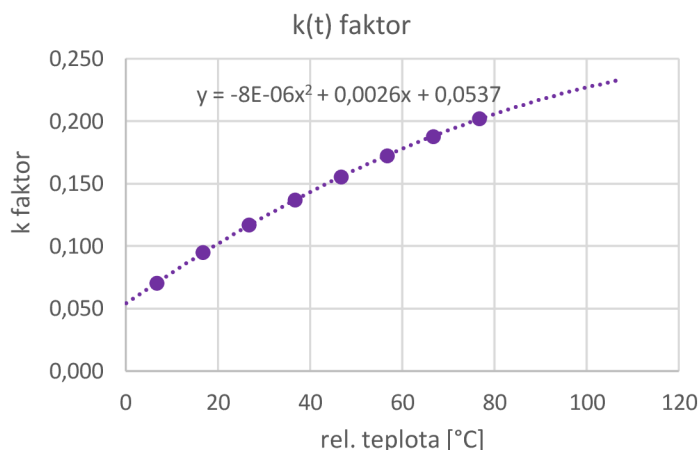
Na obrázku Obr. 5-9 jsou vykresleny křivky získané při kalibraci na sucho (DRY) a s olejem o tloušťce vrstvy 20 μm (WET) s L filtrem a s S filtrem. Naměřené body byly proloženy polynomy druhého řádu. Křivky ze suché kalibrace slouží primárně k určení přepočteního $k(t)$ faktoru (Obr. 5-10). Křivky z mokré kalibrace slouží k určení kalibračních křivek pinu a oleje.



Obr. 5-9 Získané kalibrační křivky pro L filtr a S filtr

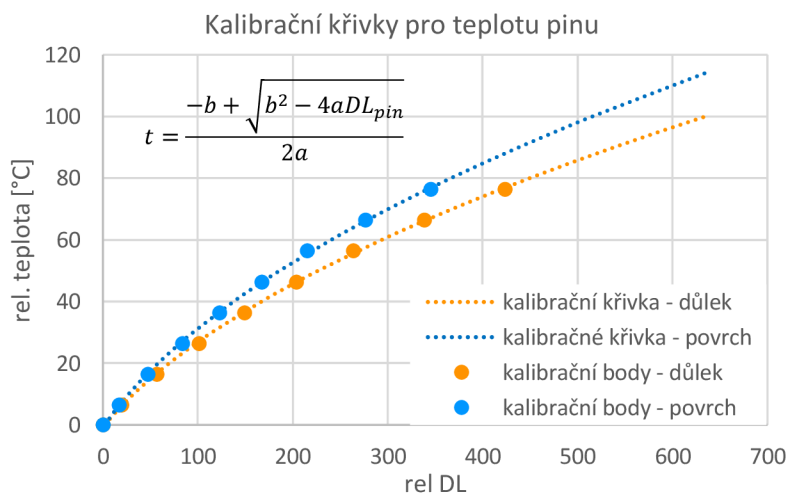
Z křivek pro *L filtr WET* a *L filtr DRY* je zřejmé, že přítomnost oleje má na záření naměřené přes L filtr vliv. Dle teorie by měl být tento vliv minimální, jelikož L filtr by neměl záření oleje propouštět (viz Obr. 4-9), ale dle naměřených dat relativní DL při měření s olejem vůči měření za sucha vzrostl o cca 40 % (pro 100 °C).

V kalibraci a měření teploty oleje se s DL z L filtru pracuje po vynásobení $k(t)$ faktorem, viz rovnice (6). Faktor $k(t)$ byl získán podílem bodů z kalibračních křivek pro DL_L a DL_S za sucha a jeho předpisem je polynom druhého stupně. Faktor $k(t)$ tedy nebyl určen přímo z podílu naměřených hodnot, ale až po proložení dat polynomem. Více je tento krok rozebrán v diskusi práce.



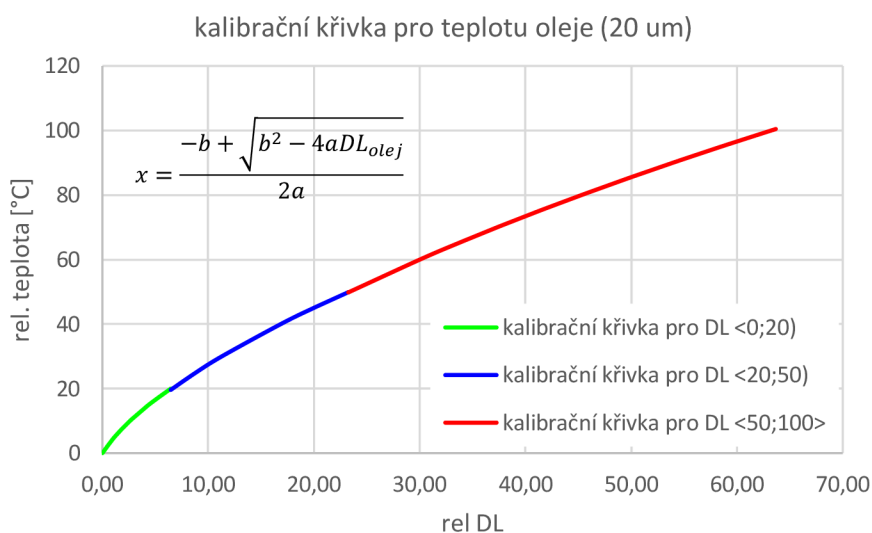
Obr. 5-10 k(t) faktor pro přepočítání mezi DL s L filtrem a S filtrem

Výsledné kalibrační křivky pro ocelový pin jsou na Obr. 5-11. Záření od pinu je stanoveno z Obr. 5-9 jako $DL(L filtr WET)$. Závislosti DL na teplotě byly v prostředí Matlab proloženy kvadratickým polynomem. Proto mají výsledné kalibrační křivky popisující přepočítání DL zpět na teplotu tvar kořenu kvadratického polynomu. Z křivek je zřejmý rozdíl v DL zaznamenaném kamerou pro povrch pinu a povrch dříčku.



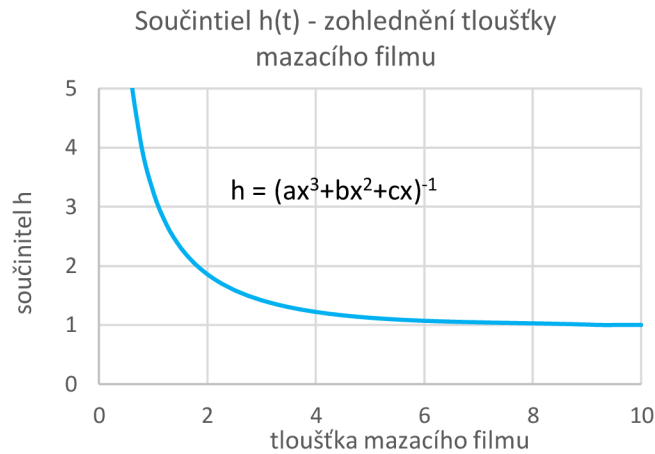
Obr. 5-11 Kalibrační křivka ocelového pinu

Obdobně je na Obr. 5-12 vykreslena kalibrační křivka pro olej (vrstva 20 μm). Záření oleje je z Obr. 5-9 získáno jako $DL(S\ filtr\ WET) - DL(L\ filtr\ WET) \cdot k(t)$. Výsledky při podložení plíšky o tloušťce 10 a 20 μm vykazovaly dobrou shodu, což koresponduje s poznatkami o vlivu tloušťky vrstvy maziva na záření, viz Obr. 5-8. Kalibrační body byly získány z kalibračních křivek dle rovnice $DL_{olej} = DL_S - DL_L \cdot k(t)$. Křivka byla pro zpřesnění přepočtu z nižších DL rozdělena na tři úseky, které se liší konstantami v předpisu funkce. Snímky s S filtrem vykazovaly minimální rozdíl mezi oblastmi hladkého povrchu a důlku, kdy $DL_{S_důlek}/DL_{S_povrch} = 1,023$. Takový rozdíl byl vyhodnocen jako zanedbatelný i vzhledem k tomu, že je pod úrovní šumu snímků s S filtrem (pro L filtr měl obdobný podíl hodnotu 1,228). To v podstatě znamená, že vliv rozdílné emisivity povrchu důlku se po zalití olejem minimalizuje. Pro teplotu oleje lze tedy se zanedbatelnou chybou využít jednu kalibrační křivku získanou v oblasti hladkého povrchu. Také to znamená, že při aplikaci vztahu (6) při vyhodnocování měření je potřeba od hodnot DL_S na povrchu i v důlku odečítat pouze hodnoty DL_L z povrchu, jelikož vyšší DL_L v důlku by způsobil ve výpočtu chybu.



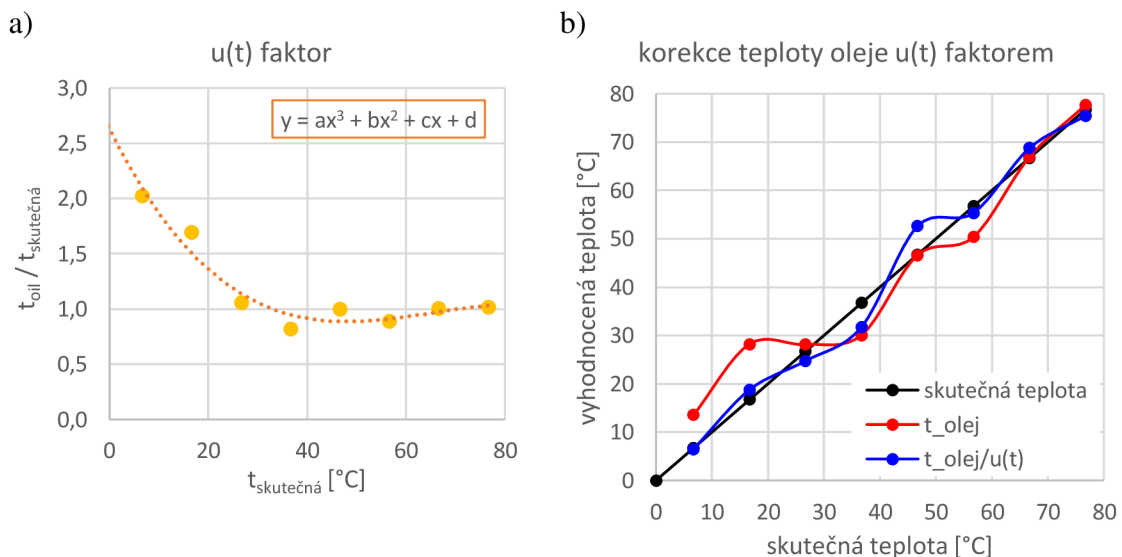
Obr. 5-12 Kalibrační křivka oleje

Z výsledků kalibrace s kuličkou (kapitola 5.1.3) byl vyhodnocen součinitel zohledňující tloušťku maziva při přepočtu DL na teplotu. Relativní teplota oleje je jím korigována dle vzorce $t_{olej}' = t_{olej} \cdot h(t)$. Průběh součinitele v závislosti na relativní teplotě je na Obr. 5-13.



Obr. 5-13 Součinitel $h(t)$ zohledňující tloušťku maziva při přepočtu DL na teplotu

Výsledky kalibrace a postup filtrace byly následně ověřeny zpětným vyhodnocením snímků z kalibrace, kde byla známa teplota pinu i oleje. Na Obr. 5-14b je vykreslena skutečná známá teplota oleje (černá přímka) a vyhodnocená teplota oleje (červená křivka). Bylo zjištěno, že vlivem přepočtů dílčích DL dle rovnice (6) na DL_{olej} a dále přepočtu DL_{olej} na teplotu oleje vzniká ve výsledné vyhodnocené teplotě chyba, kdy hodnoty teploty oleje oscilují kolem skutečné hodnoty. Tato nepřesnost se nejvíce projevuje při nižších teplotách. Proto byl zaveden faktor $u(t)$, který vyjadřuje vztah podílu $t_{olej}/t_{skutečná}$ vůči $t_{skutečná}$, viz Obr. 5-14a. Korekce tedy probíhá dle vztahu $t_{olej}' = t_{olej} \cdot h(t) / u(t)$ a výsledek korekce je ilustrován modrou křivkou na obrázku. Korekci lze zpřesnit rozdělením $u(t)$ a více úseků teplot s různými předpisy. Pro účely práce byla představená korekce vyhodnocena jako dostatečná. Navrhovaný postup kalibrace, měření a vyhodnocení dat je potom shrnut na Obr. 5-15 a Obr. 5-16.

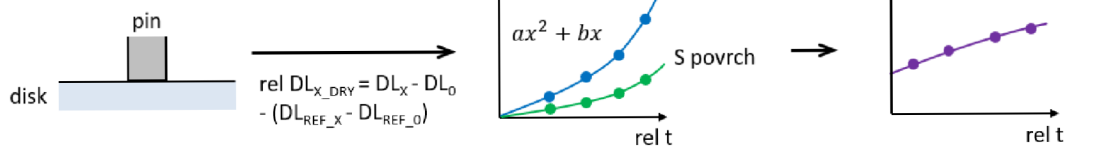


Obr. 5-14 Korekce teploty oleje $u(t)$ faktorem; a) $u(t)$ faktor, b) korekce teploty pinu pomocí $u(t)$ faktoru

1) KALIBRACE

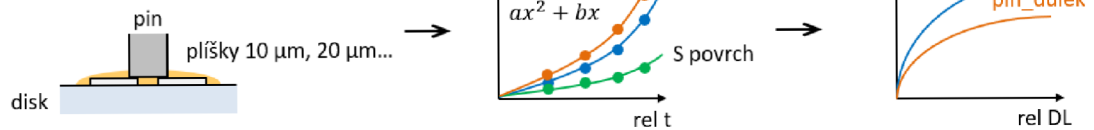
1.1 - SUCHÁ

- a) kontakt
- b) referenční snímek (např. stálé pozadí)

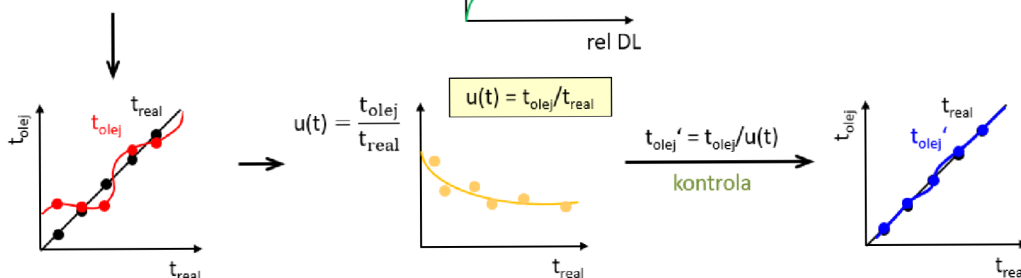


1.1 MOKRÁ

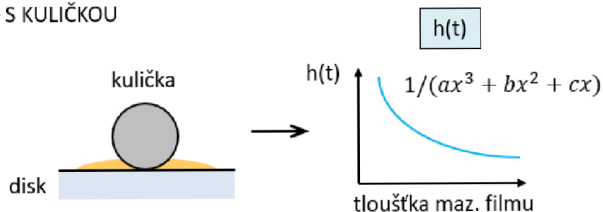
- a) kontakt
- b) referenční snímek (např. stálé pozadí)



Zpětné vyhodnocení t_{olej} ze snímků z kalibrace při znalosti skutečné teploty t_{real} a po stanovení $k(t)$, DL_{pin} a DL_{olej}



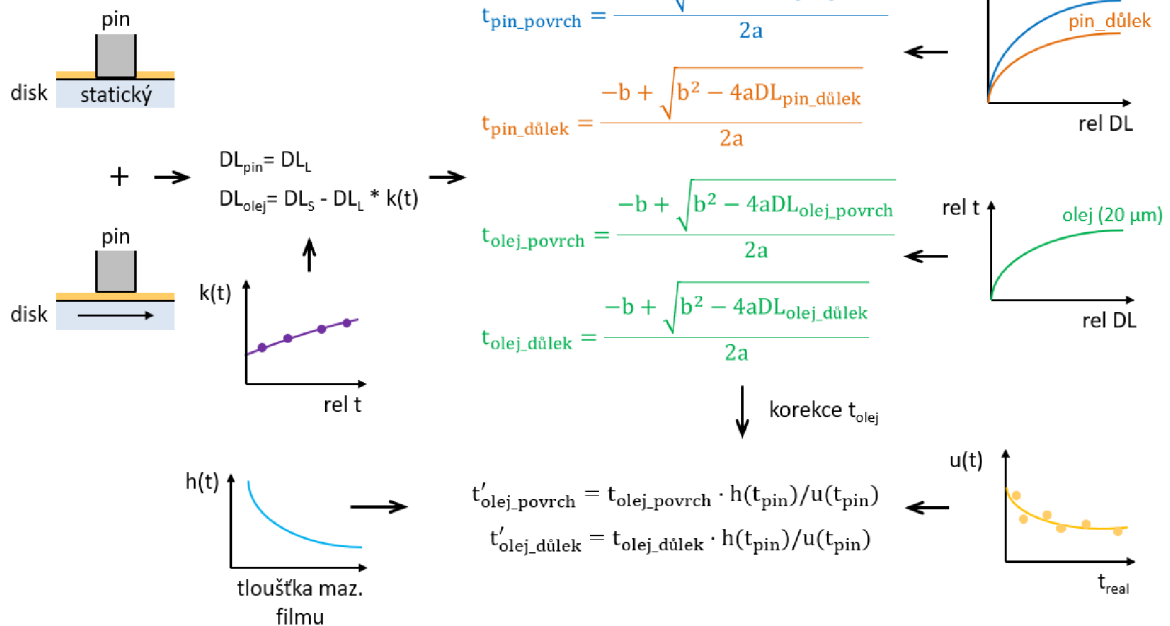
1.3 – S KULIČKOU



Obr. 5-15 Schéma postupu kalibrace texturovaných pinů a oleje

2) MĚŘENÍ

- statický kontakt (referenční snímek)
- kontakt v chodu



Obr. 5-16 Schéma postupu měření a vyhodnocení teploty texturovaných pinů a oleje

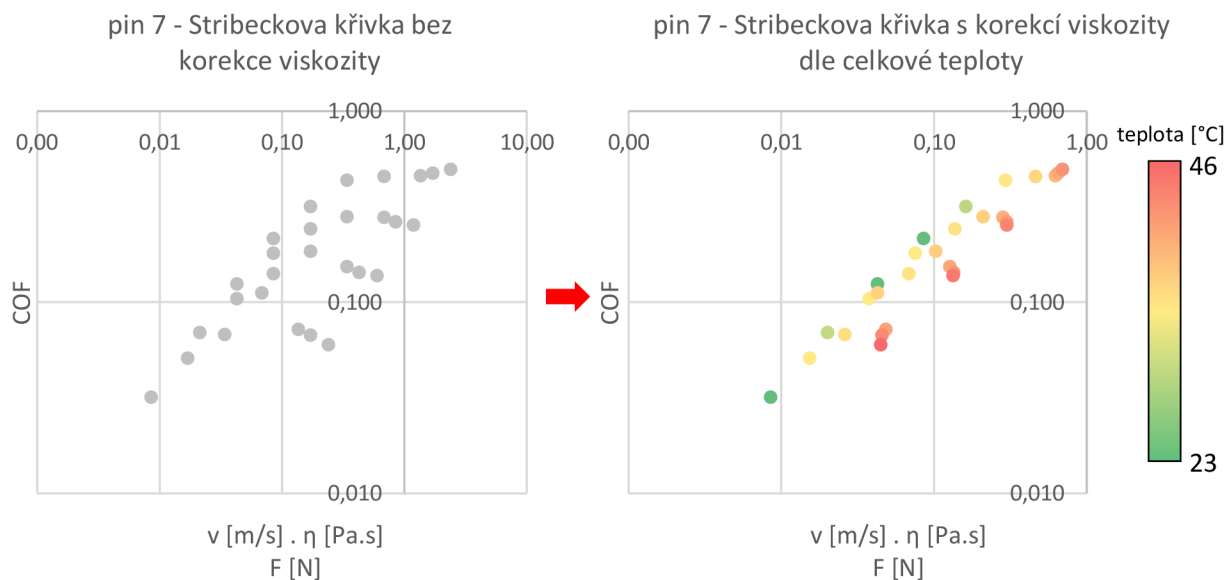
5.1.5 Implementace filtrace při měření Stribeckových křivek

Popsaná metoda filtrace byla aplikována na vyhodnocení Stribeckových křivek. Teplota v kontaktu byla snímána IR kamerou a využita ke korekci křivek vzhledem ke změně viskozity maziva s teplotou obdobně jako v práci Vlădesca [8]. Tentokrát však byla porovnána korekce dle celkové teploty v kontaktu pořízené bez filtrace a dle teploty oleje získané filrací. Cílem bylo zjistit, jak významný je rozdíl v těchto přístupech při měření za daných podmínek. Dynamická viskozita maziva byla určena dle Vogelova modelu ve tvaru

$$\eta = A \cdot e^{\frac{B}{T+C}} \quad (7)$$

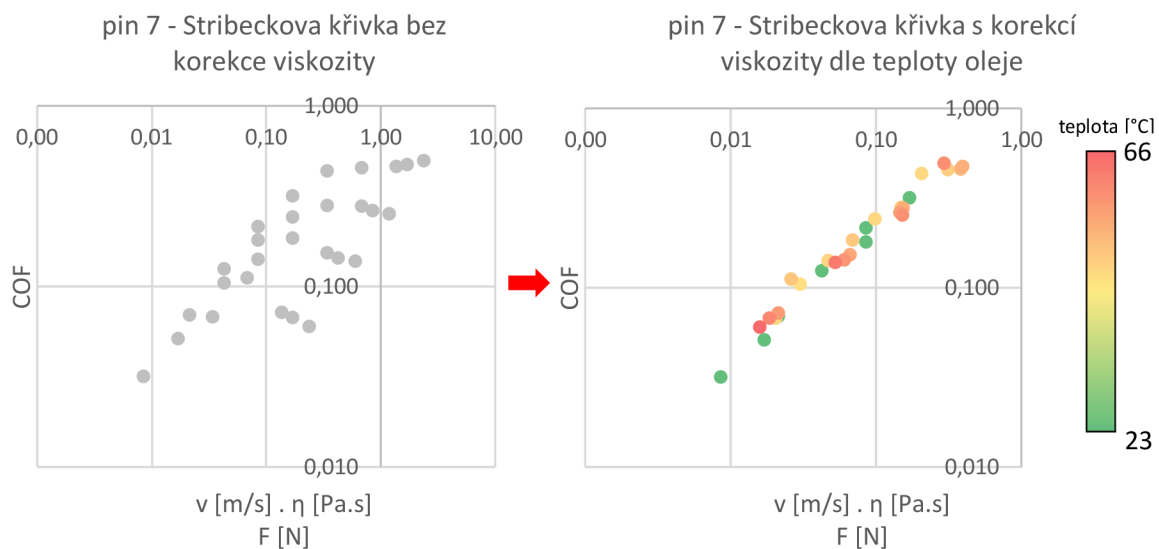
kde η je dynamická viskozita maziva v Pa·s, T je teplota maziva ve °C a konstanty A , B a C mají hodnoty $A = 3,72 \cdot 10^{-5}$, $B = 1,33 \cdot 10^3$ a $C = 1,03 \cdot 10^2$.

Na Obr. 5-17 je zobrazen výsledek korekce dle celkové teploty bez filtrace pro pin 7. Na křivce před korekcí lze pozorovat postupný odklon bodů od předpokládaného lineárního průběhu. Tento odklon nastává zejména za vyšších skluzových rychlostí (každá ze čtyř větví odpovídá měření za při jednom zatížení, tj. 5 N, 10 N, 20 N a 50 N). Z obrázku je zřejmé, že pokud nedošlo v kontaktu k nestandardním jevům, tato korekce nebyla dostatečná.



Obr. 5-17 Korekce Stribeckovy křivky dle celkové teploty v kontaktu – pin 7, paralelní povrchy

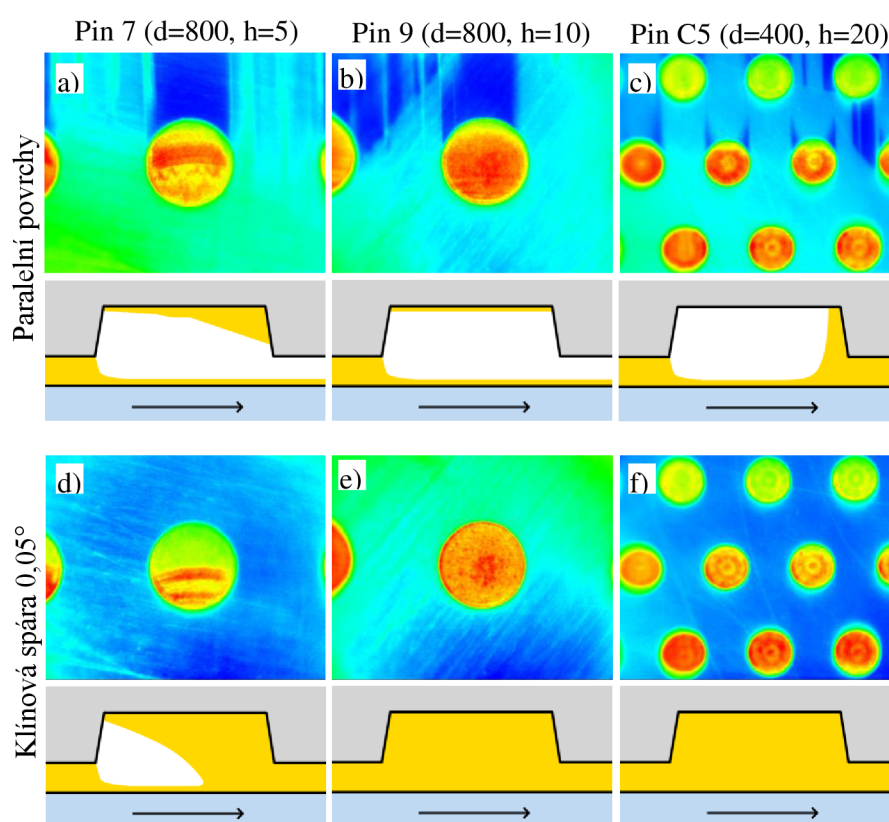
Na Obr. 5-18 je korekce s užitím teploty oleje. Je zřejmé, že tato korekce byla významně úspěšnější než korekce celkovou teplotou. Na základě výsledků lze tedy potvrdit funkčnost prezentované metody. Je potřeba zmínit, že takto významný rozdíl v těchto dvou přístupech nebyl sledován ve všech měřeních. Zejména u kontaktů se spárou, kdy jsou rozdíly teplot oleje a pinu menší dosahuje také korekce celkovou teplotou dobrých výsledků.



Obr. 5-18 Korekce Stribeckovy křivky dle teploty oleje – pin 7, paralelní povrchy

5.1.6 Interpretace jevů sledovaných IR kamerou

Pro studium termálních jevů v kontaktu je potřeba správně interpretovat jevy zachycené na snímcích z IR kamery. V této podkapitole jsou představeny některé jevy související s kavitací v textuře, jejichž interpretace může být pro laboranta zprvu problematická. Interpretace snímků na Obr. 5-20 byly provedeny na základě videozáznamů, na kterých lze například lépe posoudit, zda v důlku je nebo není mazivo. Na snímku a) je vidět kavitace v důlku. Pruhy v textuře byly interpretovány jako interferenční proužky dané rostoucí tloušťkou vrstvy maziva uvízlého na dvě kontakty. Na snímku b) je kavitace bez interferenčních pruhů, takže množství maziva na dně důlku bylo minimální, případně žádné. Na snímku c) je kavitace v důlcích částečná. Na snímku d) jsou opět v kavitaci interferenční proužky. Snímky e) a f) zachycují kontakt bez kavitace v důlcích.

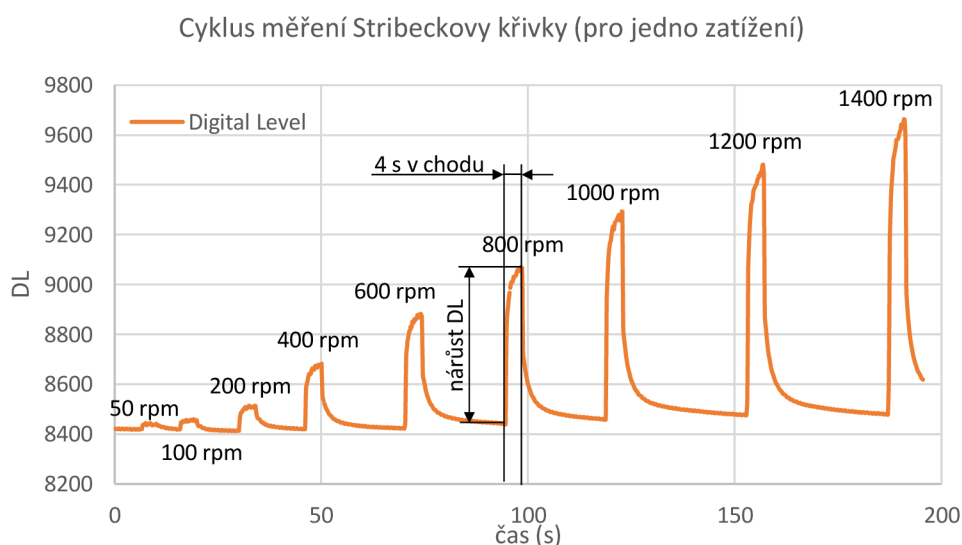


Obr. 5-19 Náhled do kontaktů s kavitací, zatížení 50 N (2,4 MPa), rychlost 8,1 m/s (rozměry důlků v μm)

5.2 Analýza kontaktů

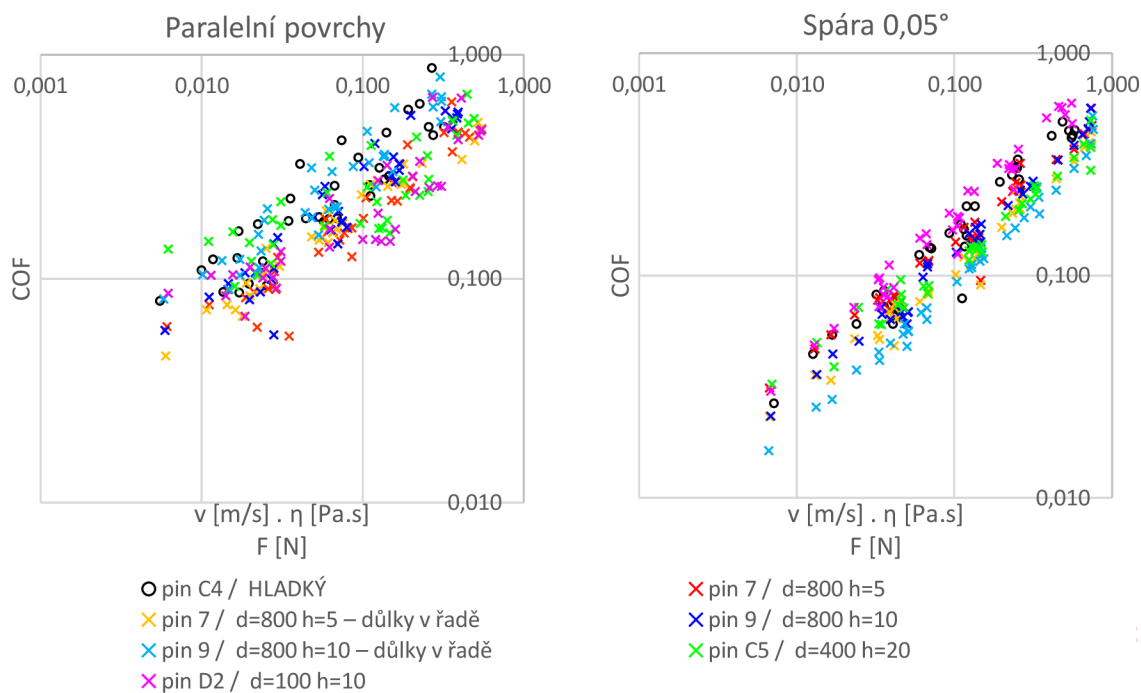
5.2.1 Tření

Na tribometru byla provedena sada měření, jejichž účelem bylo sestavení Stribeckových křivek pro různé texturované piny. Na těchto křivkách měly být identifikovány podmínky naznačující výskyt termálních jevů zlepšujících nebo zhoršujících vlastnosti kontaktu. Testy probíhaly při zatížení pinů 5 N, 10 N, 20 N a 50 N (to odpovídá nominálním tlakům 0,2 MPa, 0,5 MPa, 0,9 MPa a 2,4 MPa). Skluzová rychlost byla odstupňována mezi 0,3 m/s až 8,1 m/s. Každý krok měření probíhal 4 sekundy a mezi kroky byla prodleva 20 až 40 sekund pro minimalizaci postupného ohřevu v kontaktu, takže byl měřen téměř okamžitý nárůst teploty v kontaktu. Průběh jednoho měřicího cyklu pro jedno zatížení je ilustrován záznamem DL na Obr. 5-20 Každý pin byl testován dvakrát a to tak, aby jednou tvořil s diskem paralelní dvojici povrchů a podruhé klínovou spáru pod úhlem cca 0,05°.



Obr. 5-20 Půběh měření Stribeckovy křivky pro jedno zatížení (na obrázku pro 50 N)

Na Obr. 5-21 jsou souhrnné Stribeckovy křivky pro vybrané piny. Tyto křivky ilustrují, že chování kontaktů se spárou bylo obecně stabilnější. Dle očekávání dosahují kontakty s klínovou spárou za jinak stejných podmínek nižších hodnot součinitele tření (COF). Některé texturované povrchy dosáhly mírně nižšího tření než hladký pin. Korekce viskozity proběhla na základě vztahu teploty oleje a pinu sledované u pinů 7 a 9, jelikož proměření celé sady s kompletní filtrací nebylo z praktických důvodů možné. Je potřeba zmínit, že ustavení paralelní orientace pinu vůči disku bylo operativně realizováno tak, že pin byl zatížen silou F_z kolem 20 N a naklápěním pinu bylo dosaženo pozice s nejnižší hodnotou F_z s přesností na jednotky setin Newtonu, čímž mělo být dosaženo paralelních povrchů. Rozdíly mezi jednotlivými piny tedy mohou být částečně způsobeny nepřesným ustavením pinu, kterému byla věnována značná pozornost, ale jeho přesnost nebylo možné přímo kvantifikovat.

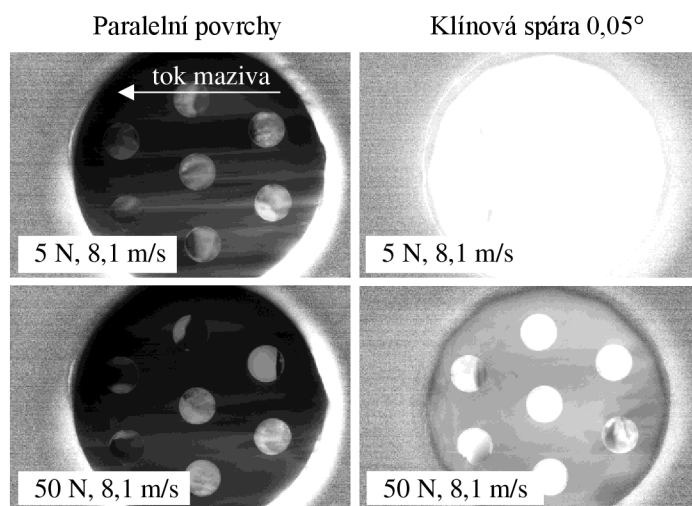


Obr. 5-21 Souhrnné Stribeckovy křivky pro paralelní povrchy a povrchy s klínovou spárou

U paralelních povrchů byla vždy sledována výrazná kavitace v důlcích proměnná v závislosti na otáčení disku, viz Obr. 5-19. Vznik a zánik kavitací v rámci jedné otáčky disku byl způsoben házením disku. U kontaktů se spárou byla sledována částečná kavitace v důlku textury, nebo kavitace sledována nebyla. Hladování kontaktu pozorováno nebylo. U paralelních povrchů byly pozorovány také dynamické projevy, a to zejména výraznější vibrace při otáčkách 600 a 1200 ot/min (rychlosti 3,5 a 6,9 m/s). Z toho bylo usouzeno, že se zde frekvence házení disku blíží vlastní frekvenci pružiny na držáku tribometru. U jednoho z pinů (C5) dokonce nebylo měření paralelních povrchů při zátěži 50 N dokončeno, jelikož došlo k automatickému ukončení testu, pravděpodobně právě kvůli zatížení snímače síly v důsledku těchto dynamických projevů.

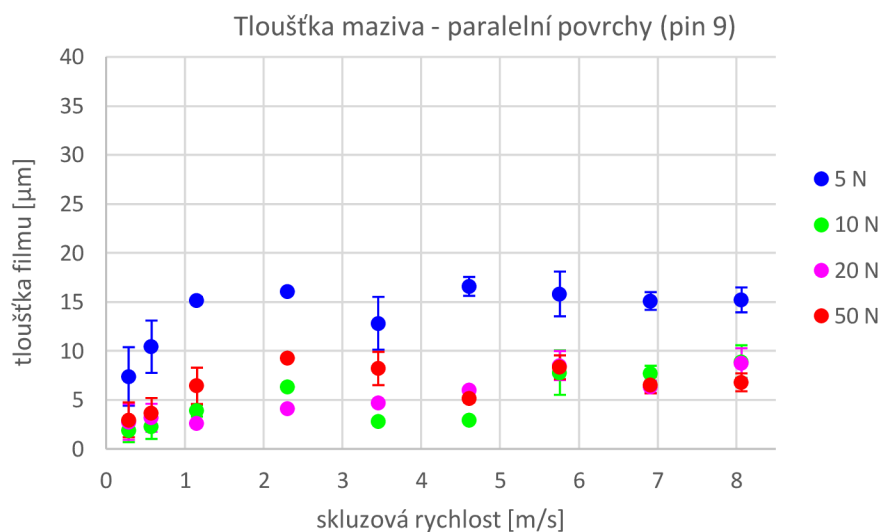
5.2.2 Tloušťka mazacího filmu a únosnost

Problém při měření v paralelní konfiguraci představuje nestabilita kontaktu. Tloušťka mazacího filmu je malá a vlivem kavitací je při vyšších rychlostech vrstva maziva neuniformní, jak ilustrují snímky z měření tloušťky mazivového filmu metodou laserem indukované fluorescence na Obr. 5-22. Rozložení maziva se přitom mění i v rámci jedné otáčky disku vlivem mírného házení. Při malých tloušťkách filmu ovlivňují distribuci maziva také rýhy v pinu vzniklé opotřebením během náročných testů.

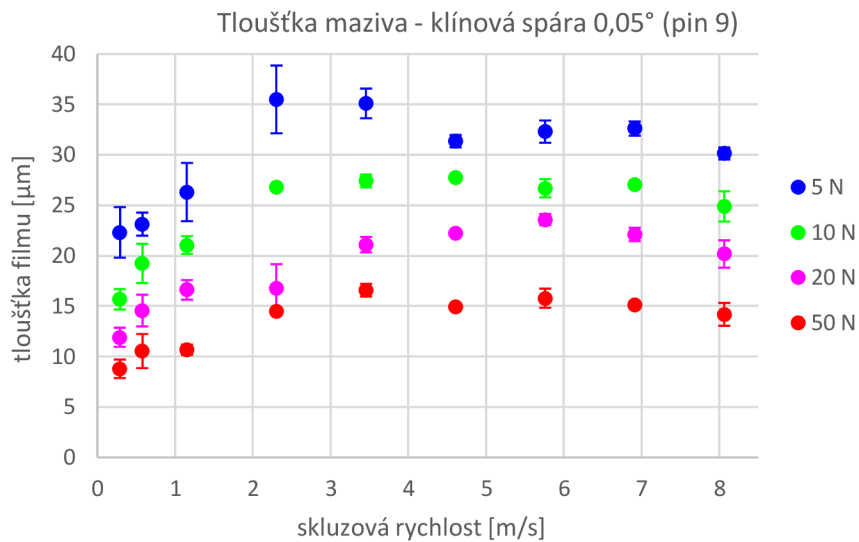


Obr. 5-22 Mazivo v kontaktu s paralelními povrchy a klínovou spárou (laserem indukovaná fluorescence – intenzita záření nabarveného maziva koresponduje s tloušťkou mazacího filmu)

Přehledy naměřených tlouštěk pro obě konfigurace jsou na Obr. 5-23 a Obr. 5-24. U paralelních kontaktů se tloušťky filmu při daných podmínkách pohybují převážně do 10 μm , což je dle Obr. 5-8 oblast citlivá na tloušťku maziva z hlediska měření teploty oleje. U klínové spáry 0,05° jsou naopak tloušťky maziva nad 10 μm a vykazují stabilnější trend pro všechny čtyři zátěže.

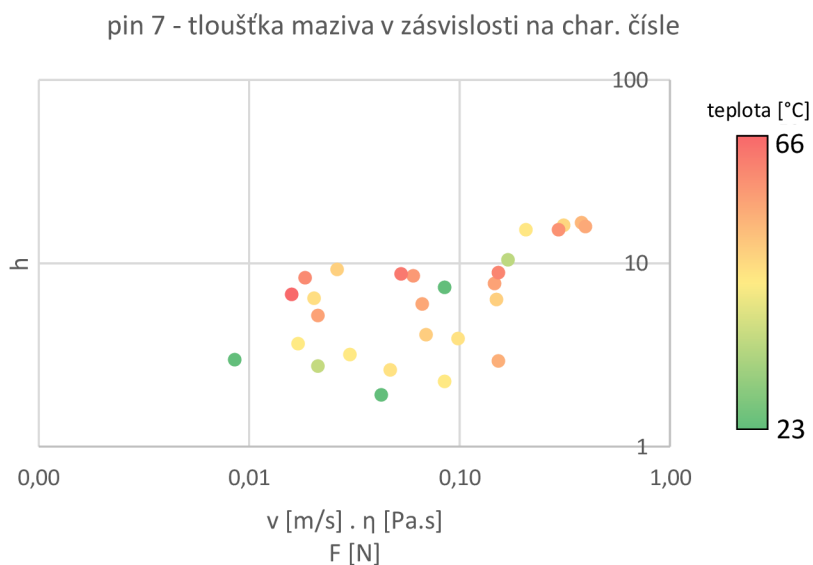


Obr. 5-23 Tloušťka maziva v kontaktu s paralelními povrchy (pin 9)



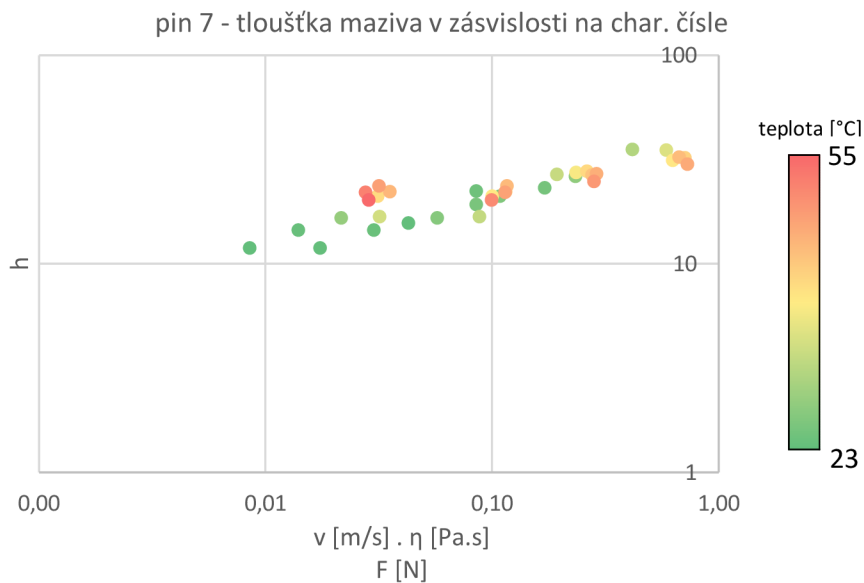
Obr. 5-24 Tloušťka maziva v kontaktu s klínovou spárou 0,05° (pin 9)

Na základě tloušťky mazacího filmu lze vyjádřit jeho únosnost. Závislost tloušťky mazacího filmu na charakteristickém čísle pro paralelní povrchy je na Obr. 5-25. Dle teorie mazání by měly být body seřazeny do exponenciálního průběhu (s logaritmičnými souřadnicemi do linie). Z grafu je patrné, že popis chování paralelních povrchů je z hlediska únosnosti problematický vzhledem k výše popsaným problémům s kavitací a rozložením maziva, viz skoky v tloušťce maziva na Obr. 5-23.



Obr. 5-25 Tloušťka mazací vrstvy v závislosti na charakteristickém čísle u paralelního kontaktu

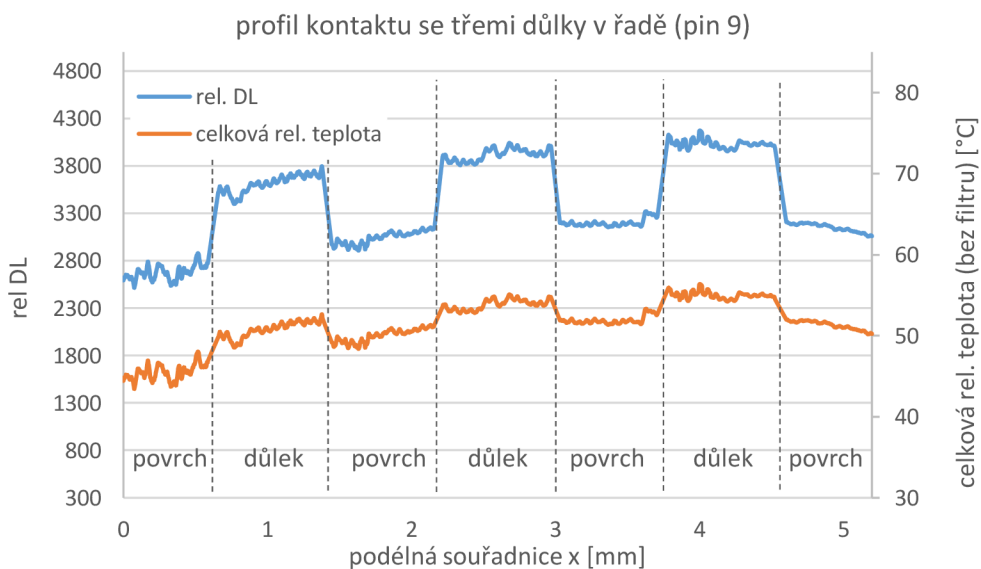
Stejná závislost pro kontakt s klínovou spárou je na Obr. 5-26. Z téměř lineárního průběhu lze usoudit, že v mazacím filmu nedocházelo k nestandardním termálním jevům. V případě vzniku viskozitního klínu by mělo dojít k náhlému zvětšení tloušťky mazacího filmu, což v měřeních pozorováno nebylo.



Obr. 5-26 Tloušťka mazací vrstvy v závislosti na charakteristickém čísle u kontaktu se klínovou spárou

5.2.3 Rozložení teploty v kontaktu

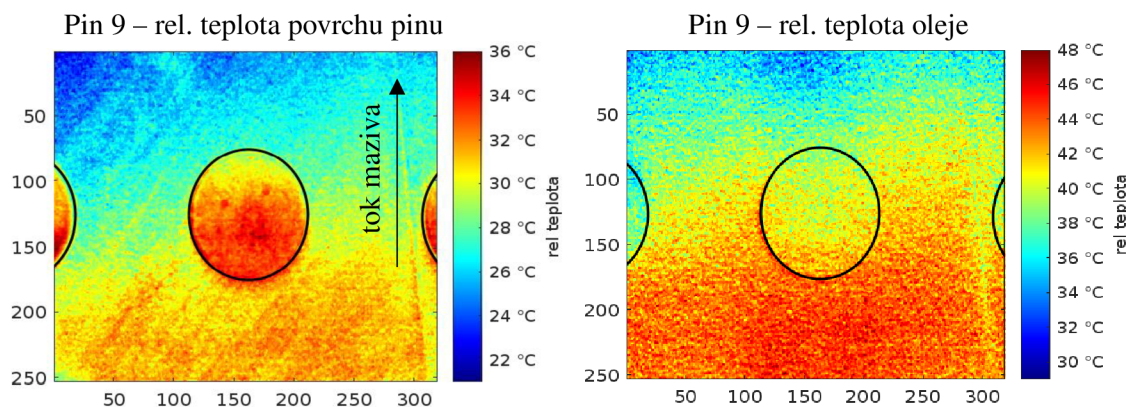
Dle Menga [21, 22] je podélný teplotní profil kontaktu rozdělen na zónu s rostoucí teplotou a zónu ustálené teploty, viz Obr. 2-16. V této práci je žádoucí zkoumat oblast ustálenou. Proto byl získán profil v kontaktu se třemi důlky v řadě (pin 9), viz Obr. 5-27. Jedná se o celkovou teplotu v kontaktu určenou bez filtrace. Profil byl pořízen přejezdem kamery ve směru podélné osy tak, aby byl zaznamenán pin po celé délce (zorné pole kamery je cca 3,2 mm, průměr pinu je 5,2 mm). Dle profilu je výraznější nárůst sledován v první třetině důlku. Dále je profil poměrně ustálený.



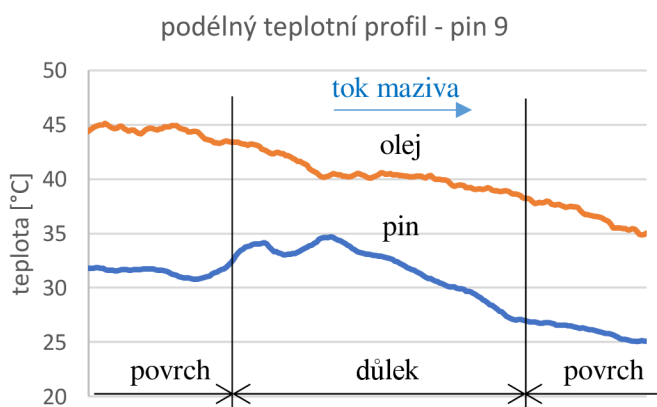
Obr. 5-27 Profil teploty v kontaktu se třemi důlky na podélné ose po dvou minutách v chodu (pin 9, rychlost 8,1 m/s, zatížení 50 N)

Snímky z měření Stribeckových křivek byly zpracovány v prostředí Matlab dle popsaného principu filtrace. Nejdříve byly od snímků kontaktu s L a S filtrem odečteny referenční snímky statického kontaktu. V tomto kroku byla také provedena manuální registrace obrazu (sesazení snímků s referenčními snímky). Dále byly provedeny přepočty na DL_{pin} a DL_{olej} dle rovnic (5) a (6). Nakonec byly hodnoty digital levelu přepočítány na teplotu dle kalibračních křivek, a to v případě pinu separátně pro oblast hladkého povrchu a oblast důlku.

Typický zpracovaný snímek z měření je na Obr. 5-28. Na snímcích nebyla v rozsahu testovacích podmínek pozorována akumulace teplotního maxima povrchu pinu nebo oleje v konkrétním místě. Zdánlivý pokles teploty pinu a oleje ve směru toku maziva je spíše projevem nehomogenity obrazu referenčního snímku, který byl odečítán od snímku kontaktu v pohybu. Na snímku je vidět, že teplota pinu v důlku je vyšší než mimo důlek. Teplota maziva je uniformní. Teplotní profil na podélné ose je na Obr. 5-29.

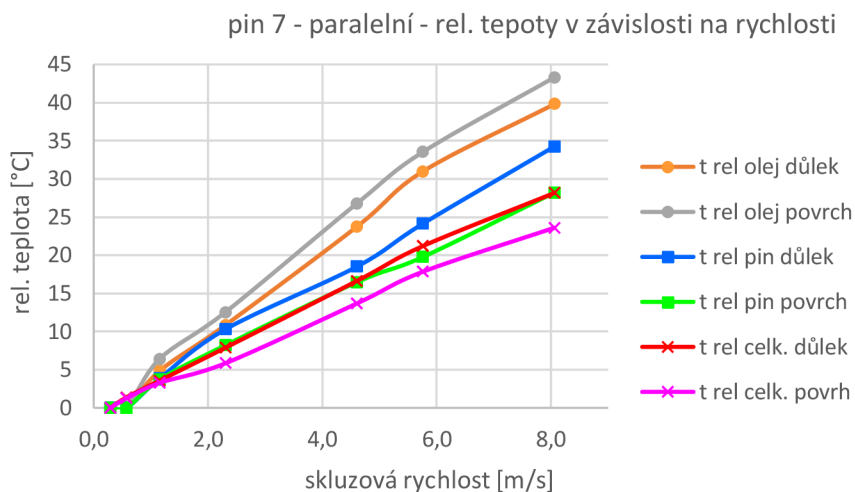


Obr. 5-28 Snímky z kontaktu s filtrací na pin a olej v prostředí Matlab (pin 9, 50 N, 8,1 m/s)

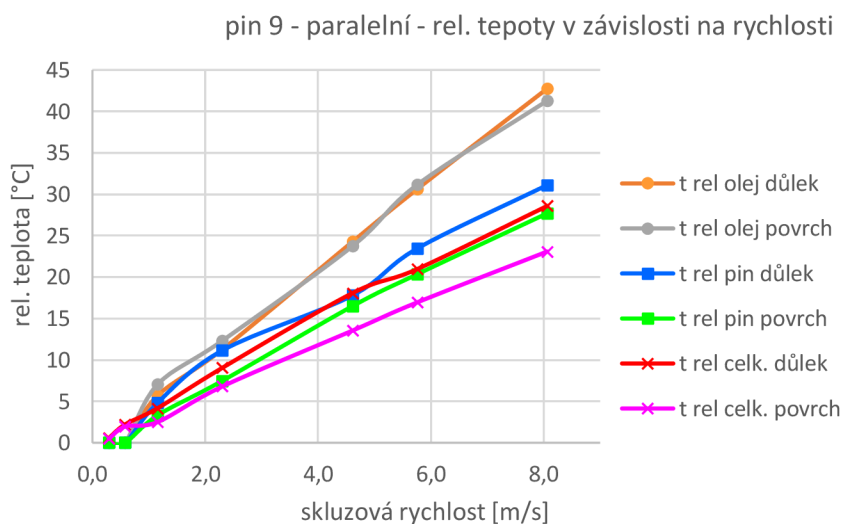


Obr. 5-29 Podélný profil teploty pinu a oleje ze snímků na Obr. 5-28 (pin 9, 50 N, 8,1 m/s)

Na Obr. 5-30 až Obr. 5-33 jsou v grafech kvantifikovány teploty v kontaktech s piny 7 a 9 v závislosti na skluzové rychlosti, a to pro paralelní povrchy a konvergentní povrchy (klínová spára $0,05^\circ$) při zatížení 50 N. Dle grafů je v paralelních kontaktech relativní teplota oleje v průměru 1,4krát vyšší než teplota pinu. U kontaktů s klínovou spárou je teplota oleje cca 1,3krát vyšší než pinu. V případě pinu 7 v paralelní konfiguraci se jeví teplota oleje mimo důlky vyšší než v místě důlku. V ostatních případech je teplota oleje téměř uniformní. Teplota pinu je o jednotky $^\circ\text{C}$ vyšší v místech důlku než u hladkého povrchu. Obdobná je situace i v případě celkové teploty. Hodnoty celkové teploty získané bez filtrace jsou nižší, než teplota pinu i oleje, což poukazuje na nepřesnost metody.

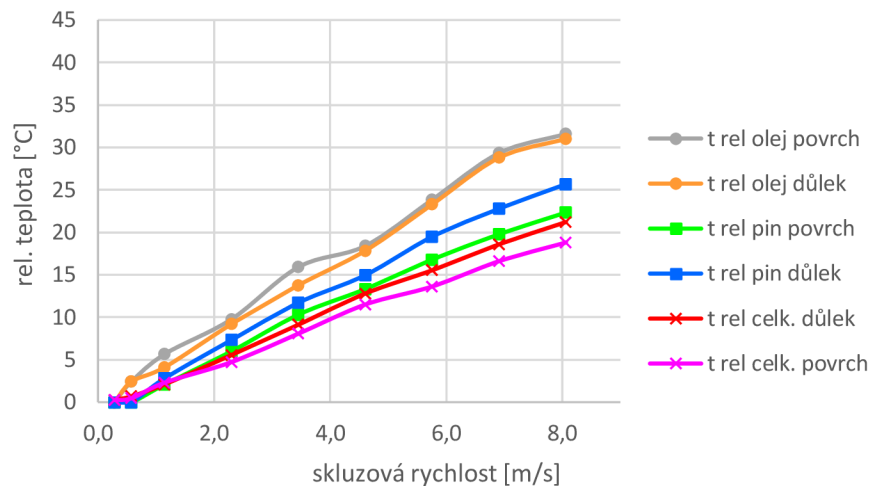


Obr. 5-30 Celkové rel. teploty a rel. teploty pinu a oleje v kontaktu - pin 7 - paralelní (50 N, $h_0=5 \mu\text{m}$)



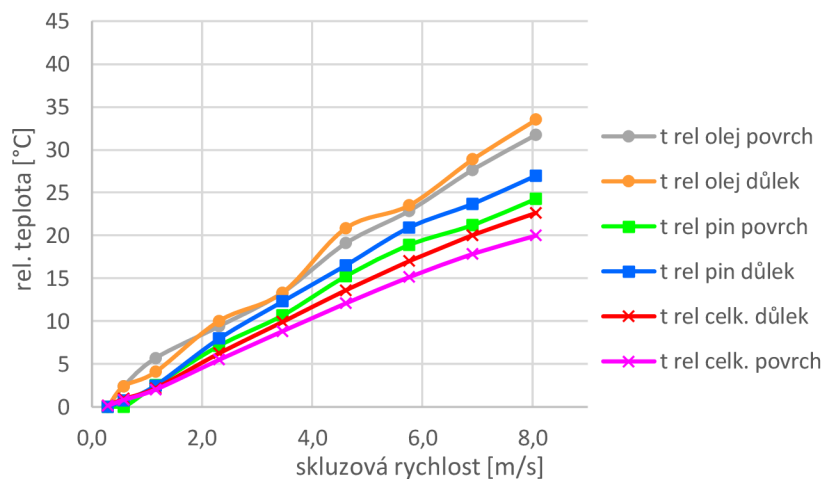
Obr. 5-31 Celkové rel. teploty a rel. teploty pinu a oleje v kontaktu – pin 9 paralelní povrchy (50 N, $h_0=10 \mu\text{m}$)

pin 7 - klínová spára - rel. teploty v závislosti na rychlosti



Obr. 5-32 Celkové rel. teploty a rel. teploty pinu a oleje v kontaktu – pin 7 – klínová spára (50 N, $h_0=5 \mu\text{m}$)

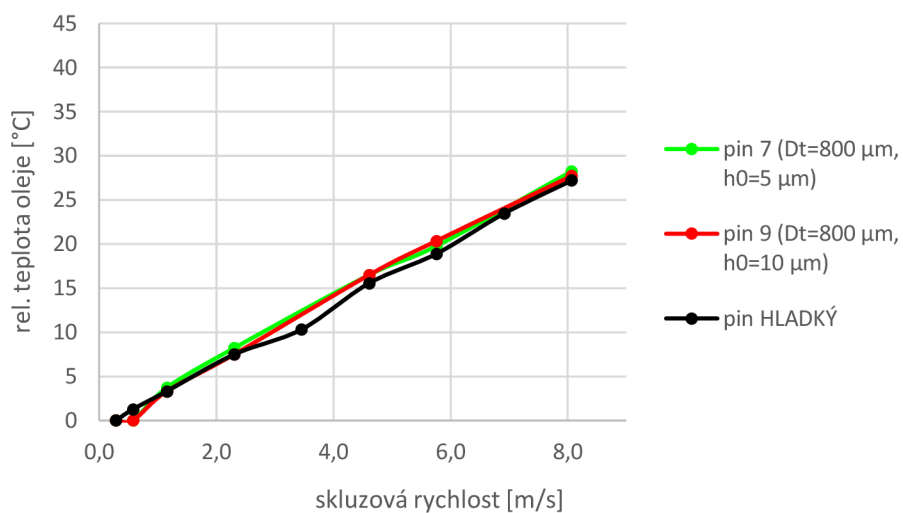
pin 9 - klínová spára - rel. teploty v závislosti na rychlosti



Obr. 5-33 Celkové rel. teploty a rel. teploty pinu a oleje v kontaktu – pin 9 – klínová spára (50 N, $h_0=10 \mu\text{m}$)

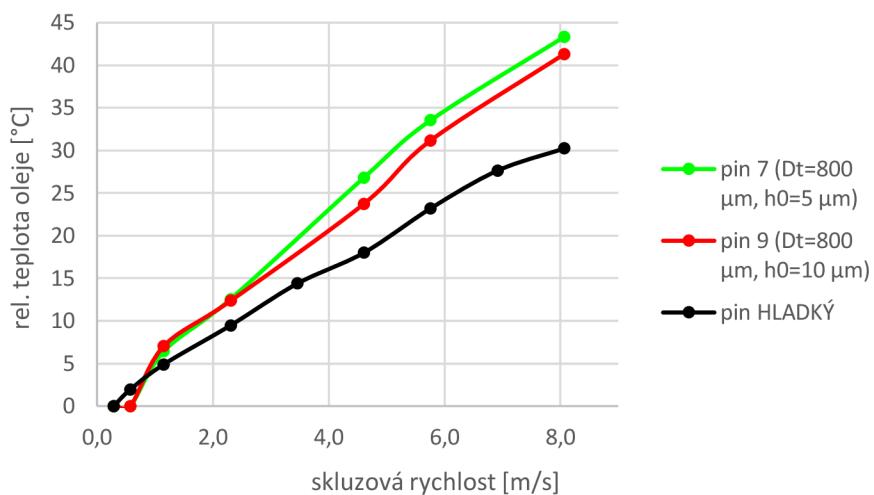
Nárůsty teploty oleje a pinu s texturovanými piny 7 a 9 byly porovnány s nárůstem při užití netexturovaného pinu. Dle Obr. 5-34 nebyl pozorován vliv textur na teplotu povrchu pinu. Dle Obr. 5-35 však byla teplota oleje u texturovaných pinů vyšší než u hladkého pinu.

Srovnání teplot pinů - paralelní povrchy



Obr. 5-34 Porovnání teplot pinu 7, pinu 9 a hladkého pinu – paralelní povrchy (50 N)

Srovnání teploty oleje - paralelní povrchy



Obr. 5-35 Porovnání teplot oleje – pin 7, pin 9 a hladký pin – paralelní povrchy (50 N)

6 DISKUSE

6.1 Interpretace výsledků

6.1.1 Implementace metody

Hlavní cíl práce, kterým byla implementace metody byl splněn. V kapitole 5.1 byla podrobně popsána implementace metody IR termografie pro měření teplot v kluzných kontaktech s texturami v konfiguraci pin-on-disc. Oproti zavedenému postupu z oblastí bodových kontaktů se zdá být studovaný systém komplexnější, což přináší řadu výzev. Také kalibrace pro rozdělení záření dle zdroje je náročnější, jelikož kombinuje využití kuličky i pinu jako kalibračního tělesa a přináší do výpočtu nové součinitele. Zároveň je třeba dbát na přesnost kalibrace vzhledem k nižším teplotám, se kterými se většinou u konformních kontaktů pracuje. V nižších teplotách tkví také omezení metody, jelikož zejména při užití optických filtrů je signál zaznamenaný čipem kamery slabší, a to činí vyhodnocování nízkých ohřevů (jednotky °C) problematickým.

Na základě pozorování byly také v kapitole 5.1.6 interpretovány některé jevy spojené s kavítací, které se nejeví na snímcích zcela intuitivně a mohou z počátku činit nezkušené obsluze kamery potíží. Všechny pozorované jevy však objasněny nebyly. Například se zdá, že sčítání intenzit záření při filtraci je komplexnější, než bylo předpokládáno. Pravděpodobně dochází ke změnám intenzity nejen při průchodu médiiem (mazivo, safír, vzduch), ale také na rozhraních ocel-mazivo, mazivo-safír a safír-vzduch.

Nedostatkem metody je, že pro filtraci IR filtry je potřeba testy opakovat, aby mohly být zaznamenány s různými filtry. Z toho důvodu je problematické, pokud je požadováno mít záznamy z různých filtrů synchronizované, aby mohl být zkoumán konkrétní moment testu, resp. konkrétní snímek. Rozložení maziva je totiž za některých podmínek nepředvídatelné a neopakovatelné, a proto nemusí být takové porovnání možné.

Metoda byla aplikována pro korekci Stribeckových křivek paralelních i konvergentních kontaktů. Křivky, které před korekcí vykazovaly nestandardní průběh byly korigovány do očekávané formy. Na základě toho bylo vyhodnoceno, že správné určení teploty oleje je pro studium texturovaných kontaktů zcela zásadní a IR termografie je pro řešení vhodnou metodou. To platí zejména pro paralelní povrchy, kde se okamžitá teplota maziva významně liší od teploty okolní, což se projevuje změnou jeho viskozity.

6.1.2 Termální jevy v paralelních kontaktech

V práci byla provedena analýza paralelních kontaktů s texturovanými povrchy, kdy byly sledovány parametry potenciálně indikující nestandardní změnu únosnosti kontaktu, nebo součinitele tření. Dle Stribeckových křivek ani tloušťky mazacího filmu nebyl v rámci experimentálních podmínek výskyt zvláštních termálních jevů prokázán.

Při studiu paralelních povrchů byla vždy sledována výrazná kavitace, a to zejména v oblasti textur a za nimi. Tato kavitace vznikala a zanikala vlivem házení disku, které již nebylo možné více optimalizovat. Proměnlivost rozložení mazacího filmu v kontaktu může mít za následek, že termální jevy jako viskozitní klín nemají dostatečný prostor pro ustálení, a tudíž není možné je pořádně zkoumat. Stejná situace platí pro rozložení teploty v rámci důlku, kdy má dle Menga [21, 22] posun teplotního maxima napomáhat vzniku lokálního viskozitního klínu. Přestože je tedy dle některých teorií kavitace jevem umožňujícím mazací mechanismy paralelních povrchů [14], v přílišné míře by mohla zamezovat jiným podpůrným jevům.

Rozložení teploty v kontaktech nevykazovalo kvalitativní změny při změnách podmínek (rychlost, zatížení, náklon), teplota se měnila pouze kvantitativně. Teplota pinu byla v místě důlku o jednotky °C vyšší než mimo důlek. Teplota oleje byla vždy uniformní a vyšší než teplota pinu, patrně vlivem kapalinového tření jakožto dominantního zdroje tepla. Výjimkou byl pouze výsledek měření pinu 7, který při nejvyšších rychlostech vykazoval mírně nižší teplotu oleje v důlku než mimo důlek.

6.2 Verifikace hypotéz

H1a: Teplota texturovaného povrchu je v místě důlku vyšší než mimo důlky.

První část hypotézy H1 byla přijata, viz kapitola 5.2.3.

H1b: Teplota oleje je globálně uniformní bez ohledu na výskyt důlku.

Druhá část hypotézy H1 byla přijata, viz kapitola 5.2.3.

H1c: Teplota oleje má v místě důlku lokálně rostoucí průběh a mezi důlky lokálně klesající průběh ve směru toku.

Třetí část hypotézy H1 nebyla přijata. V rozsahu experimentálních podmínek nebyly sledovány popsané gradienty teploty.

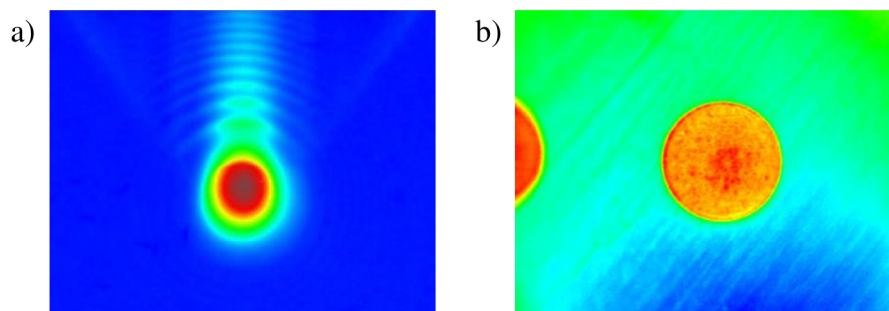
H2: Za podmínek dostatečně velkého tepelného výkonu kontaktu dochází k nárůstu únosnosti mazacího filmu, který lze přisuzovat existenci teplotně-viskozitního klínu

Druhá hypotéza nebyla přijata. Na základě průběhu tloušťky maziva v kontaktu a korigované Stribeckovy křivky nebylo možné prokázat výskyt viskozitního klínu v rozsahu experimentálních podmínek.

6.3 Nejistoty v měření a další vývoj

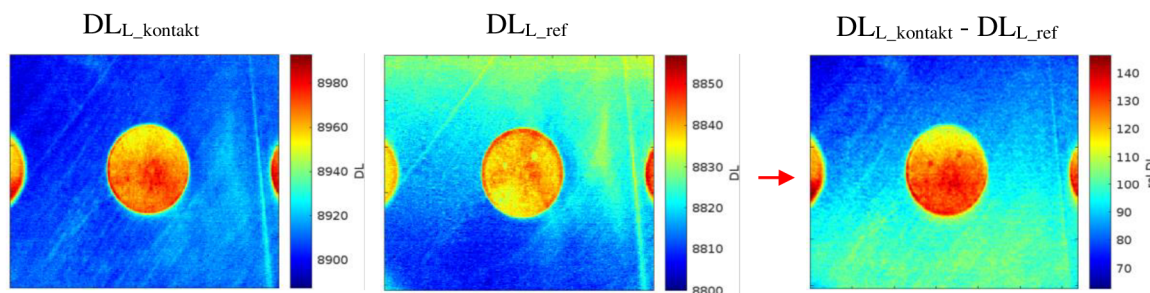
6.3.1 Nehomogenita obrazu

V konformním kontaktu je rozložení teploty na zorném poli $2,4 \times 3,2$ mm z hlediska teploty téměř uniformní, a tedy se do snímků více promítá nehomogenita obrazu, viz Obr. 6-1. Nehomogenita pravděpodobně vzniká někde na optické cestě mezi čipem kamery a kontaktem, avšak v rámci práce s ji nepodařilo zcela eliminovat.



Obr. 6-1 Snímky z měření; a) v ball-on-disc konfiguraci [26] a b) pin-on-disc konfiguraci s texturami

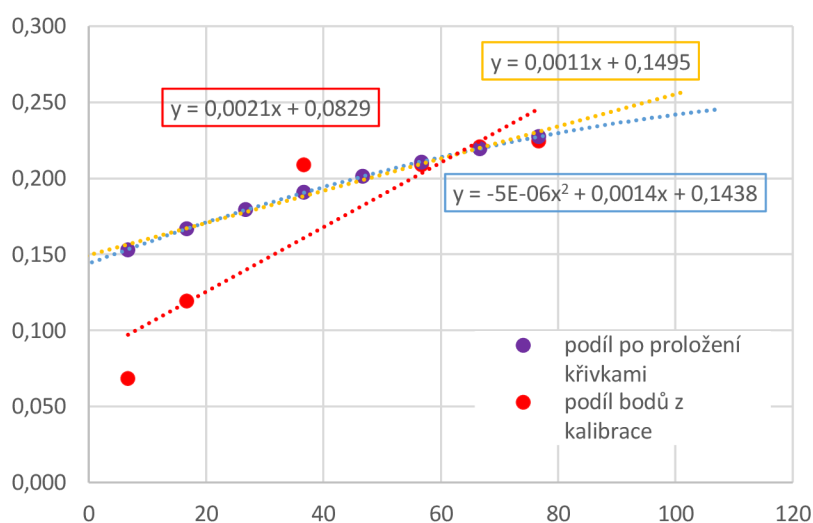
Tato nehomogenita může způsobit značné zkreslení při zpracování snímků, kdy bývá od snímku kontaktu odečítán referenční snímek statického kontaktu, viz Obr. 6-2, a dále při filtraci, kde jsou prováděny další přepočty mezi snímky. V dalším vývoji je tedy vhodné zaměřit se na eliminaci tohoto zkreslení buď odstraněním nehomogenity, nebo kompenzací při vyhodnocování.



Obr. 6-2 Problematika nehomogenity snímků

6.3.2 Součinitel $k(t)$

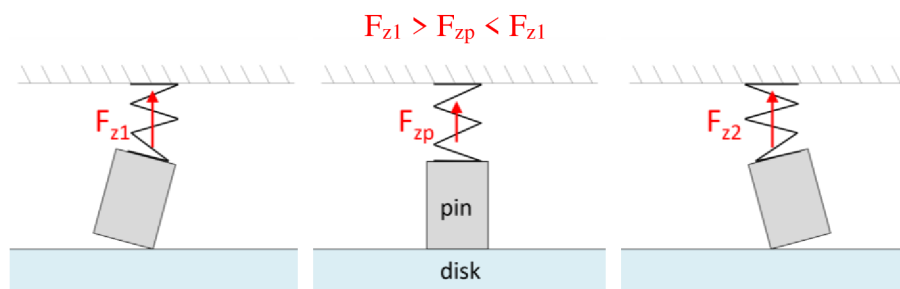
Potenciálně nejvýznamnějším zdrojem chyby při vyhodnocování dat může být součinitel $k(t)$ užívaný při kalibraci a vyhodnocení teploty oleje. Ten je určen z kalibrace za sucha jako podíl DL_S/DL_L . V předešlých pracích zhotovených na pracovišti byl tento součinitel stanoven jako lineární funkce teploty přímo z bodů naměřených při kalibraci (Obr. 6-3, červené body). V této práci byl součinitel $k(t)$ určen až po proložení bodů z kalibrace polynomy (fialové body). Jako předpis součinitele byl zvolen polynom druhého stupně (na obrázku modrá křivka). Tento způsob určení $k(t)$ vedl na uspokojivější výsledky kalibrace, než lineární předpis určený z původních bodů.



Obr. 6-3 $k(t)$ součinitel - různé přístupy

6.3.3 Ustavení pinu

Při měření pinů metodou IR termografie představuje značný problém ustavení paralelní, nebo jiné přesně definované pozice pinu vůči disku. V rámci řešení bylo ozkoušeno více přístupů k polohování, kdy musela být kamera demontována z tribometru a byla využita jiná zobrazovací technika. Pin byl například ustavován pomocí běžné kamery s mikroskopickým objektivem dle interferenčních proužků, nebo pomocí fluorescence. Tyto přístupy však byly časově velmi náročné a v rámci této práce bylo jejich aplikování pro všechny testy neuskutečnitelné i vzhledem k vytížení zobrazovací techniky na pracovišti. Proto byl pin ustavován alternativním způsobem, kdy bylo předpokládáno, že při dosažení paralelních povrchů je síla F_z minimalizována (s přesností na jednotky setiny Newtonu), viz Obr. 6-4. Po minimalizaci F_z byl disk otáčen střídavě ve směru hodinových ručiček a zpět. Sklon byl jemně upravován tak, aby byl COF pro oba směry otáčení stejný a chování na IR kameře ekvivalentní (např. kavitace).



Obr. 6-4 Princip ustavení paralelního povrchu při měření

Přesnost této metody je však nejistá, přitom ustavení přesné paralelní konfigurace je naprosto klíčové a chování kontaktu je v její blízkosti velmi citlivé na minimální odchyšky. Dalším prioritním krokem při zdokonalování metody by tak mělo být zakomponování sofistikovanější a přesnější metody ustavení pinu.

6.3.4 Házení disku

Významným negativním faktorem pro měření je házení disku tribometru. V současnosti je házení optimalizováno ručně podkládáním disku plíšky. I po této optimalizaci jsou však na záznamech z kamery zřejmé projevy házení, kdy v kontaktu vznikají a zanikají kavítace. Je tedy možné, že pin dokonce ztrácí v některých úsecích otočky s diskem kontakt. Házení navíc vede na významnější dynamické projevy soustavy. Měření při 600 ot/min a 1200 ot/min byly vyloučeny ze souboru dat s paralelními povrchy, jelikož při jejich měření docházelo ke značným vibracím a výsledky byly zavádějící.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá implementací infračervené termografie na mapování teplot v konformních kontaktech v konfiguraci pin-on-disc s přítomností povrchových textur. Tato metoda umožňuje přímý a detailní pohled do kontaktu skrze safírový disk. Dále je pomocí této metody experimentálně zkoumáno rozložení teploty v kontaktech s texturovanými povrchy. Předmětem výzkumu jsou zejména paralelní povrchy, u kterých je sledován potenciál k vzniku podpůrných termálních jevů, jako je například lokální viskozitní klín.

Navržená metoda kalibrace a měření vychází z postupů z oblasti bodových kontaktů, kde je IR termografie již běžně užívána. Jednotlivé kroky kalibrace však byly uzpůsobeny potřebám měření s texturovanými piny. Návrh nového kalibračního přípravku navíc umožňuje provedení kalibrace přímo na tribometru. Po provedení úspěšné kalibrace je touto metodou možné rozlišovat teplotu oleje a pinu. Určení správné teploty oleje se u paralelních kontaktů ukázalo jako klíčové k správnému posouzení jejich vlastností, což bylo demonstrováno korekcí sestavené Stribeckovy křivky dle změny viskozity s teplotou oleje.

Možnost měřit teplotu v kontaktu byla dále využita při analýze paralelních texturovaných povrchů. Z hlediska rozložení teploty nebyly v rozmezí experimentálních podmínek (skluzová rychlost 0,3 až 8,1 m/s, zatížení 5 až 50 N, tj. 0,2 až 2,4 MPa) pozorovány přesuny lokálního maxima teploty v mazivu, které by naznačovaly výskyt viskozitního klínu tak, jak jej popisují práce s využitím numerických simulací. Nebyly pozorovány ani podélné gradienty teploty v rámci důlků. Shodu s těmito pracemi představuje rozložení teploty texturovaného povrchu, kde bylo pozorováno, že teplota v důlcích textury je vyšší, než teplota povrchu mimo textury a dále uniformní teplota oleje bez ohledu na výskyt důlků. V práci byla využita také fluorimetrie pro zjištění tloušťky mazacího filmu. Závislosti tloušťky maziva na charakteristickém čísle však neprokázaly žádné nestandardní chování.

Experimentální studium paralelních kontaktů je náročné především kvůli citlivosti systému. Problém představuje například házení disku. Rozložení mazacího filmu v kontaktu je nestálé a v texturách neustále vznikají intenzivní kavitace. To je například pro měření IR termografií problematické, jelikož pro filtraci záření od oleje a pinu je potřeba provést daný test dvakrát, pokaždé s jedním filtrem. Pokud jsou však projevy systému na každém záznamu jiné, analýza dat je nepřesná. Také tloušťka filmu je nestálá a složitě kvantifikovatelná. Tyto překážky jsou výzvou pro další pokrok v pochopení mechanismů mazání texturovaných paralelních povrchů.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Název: Non-contact temperature measurement in sliding contacts

Stav: finalizovaný

Abstrakt článku:

For the properties of lubricated sliding contacts of conformal textured surfaces, one of the determining factors is the temperature phenomena occurring in the lubricant film. One such phenomenon can be the occurrence of a so-called viscosity wedge, which can positively affect the bearing capacity of the contact. The basis for a closer understanding of the mechanisms of these phenomena is knowledge of the detailed distribution of temperatures in the lubricating film. However, information on the detailed temperature distribution for the various contacts is currently either based on numerical simulations or is not available. The problem is therefore the absence of data based on experimental measurements. A method that can help to obtain this information is infrared thermography.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TURCHINA, V., D. M. SANBORN a W. O. WINER. Temperature Measurements in Sliding Elastohydrodynamic Point Contacts. *Journal of Lubrication Technology* [online]. 1974, **96**(3), 464–469. ISSN 0022-2305. Dostupné z: doi:10.1115/1.3452005
- [2] LU, Jia, Tom REDDYHOFF a Daniele DINI. 3D Measurements of Lubricant and Surface Temperatures Within an Elastohydrodynamic Contact. *Tribology Letters* [online]. 2018, **66**(1), 7. ISSN 10238883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-017-0953-2
- [3] AUSERMAN, V. K., H. S. NAGARAJ, D. M. SANBORN a W. O. WINER. Infrared Temperature Mapping in Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Lubrication Technology* [online]. 1976, **98**(2), 236–242. ISSN 0022-2305. Dostupné z: doi:10.1115/1.3452806
- [4] LU, Jia, Tom REDDYHOFF a Daniele DINI. 3D Measurements of Lubricant and Surface Temperatures Within an Elastohydrodynamic Contact. *Tribology Letters* [online]. 2018, **66**(1), 7. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-017-0953-2
- [5] SPIKES, H. A. Thin films in elastohydrodynamic lubrication: The contribution of experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 1999, **213**(5), 335–352. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/1350650991542712
- [6] REDDYHOFF, T, H A SPIKES a A V OLVER. Improved infrared temperature mapping of elastohydrodynamic contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2009, **223**(8), 1165–1177. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET499
- [7] SIROUX, Monica, Haytam KASEM, Jean THEVENET, Bernard DESMET a Phillipe DUFRENOY. Local temperatures evaluation on the pin-disc interface using infrared metrology. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. 2011, **50**(4), 486–492 [vid. 2022-03-14]. ISSN 12900729. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJTHEMALSCI.2010.11.001
- [8] VLĂDESCU, Sorin Cristian, Mark FOWELL, Lars MATTSSON a Tom REDDYHOFF. The effects of laser surface texture applied to internal combustion engine journal bearing shells – An experimental study. *Tribology International* [online]. 2019, **134**, 317–327 [vid. 2022-03-15]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/J.TRIBOINT.2019.02.009

- [9] NOSKO, Oleksii, Wojciech TARASIUK, Yurii TSYBRII, Andrey NOSKO, Adolfo SENATORE a Veronica D'URSO. Performance of acicular grindable thermocouples for temperature measurements at sliding contacts. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* [online]. 2021, **181** [vid. 2022-03-14]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109641
- [10] NOSKO, Oleksii a Yurii TSYBRII. Inverse determination of sliding surface temperature based on measurements by thermocouples with account of their thermal inertia. *Tribology International* [online]. 2021, **164** [vid. 2022-03-14]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/J.TRIBOINT.2021.107200
- [11] ABDULLAH, Oday I. a Josef SCHLATTMANN. Temperature analysis of a pin-on-disc tribology test using experimental and numerical approaches. *Friction* [online]. 2016, **4**(2), 135–143 [vid. 2022-03-14]. ISSN 22237704. Dostupné z: doi:10.1007/S40544-016-0110-1
- [12] LU, Ping a Robert J K WOOD. Tribological performance of surface texturing in mechanical applications—a review. *Surface Topography: Metrology and Properties* [online]. 2020, **8**(4), 043001. ISSN 2051-672X. Dostupné z: doi:10.1088/2051-672X/abb6d0
- [13] HAMILTON, D. B., J. A. WALOWIT a C. M. ALLEN. A Theory of Lubrication by Microirregularities. *Journal of Basic Engineering* [online]. 1966, **88**(1), 177–185 [vid. 2023-05-20]. ISSN 0021-9223. Dostupné z: doi:10.1115/1.3645799
- [14] FOWELL, M., A. V. OLVER, A. D. GOSMAN, H. A. SPIKES a I. PEGG. Entrainment and Inlet Suction: Two Mechanisms of Hydrodynamic Lubrication in Textured Bearings. *Journal of Tribology* [online]. 2007, **129**(2), 336–347 [vid. 2023-05-20]. ISSN 0742-4787. Dostupné z: doi:10.1115/1.2540089
- [15] DOBRICA, M. B., M. FILLON, M. D. PASCOVICI a T. CICONE. Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using a mass-conserving numerical approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2010, **224**(8), 737–750 [vid. 2023-05-20]. ISSN 13506501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET673
- [16] CUPILLARD, Samuel a LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET. Thermohydrodynamics of sliding contacts with textured surfaces. 2009.
- [17] ZOUZOULAS, Vassilios a Christos I. PAPADOPOULOS. 3-D thermohydrodynamic analysis of textured, grooved, pocketed and hydrophobic pivoted-pad thrust bearings. *Tribology International* [online]. 2017, **110**, 426–440 [vid. 2022-03-14]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/J.TRIBOINT.2016.10.001
- [18] CAMERON, A. The Viscosity Wedge. *A S L E Transactions* [online]. 1958, **1**(2), 248–253. ISSN 0569-8197. Dostupné z: doi:10.1080/05698195808972337

- [19] CUI, Jinlei, Motohiro KANETA, Ping YANG a Peiran YANG. The relation between thermal wedge and thermal boundary conditions for the load-carrying capacity of a rectangular pad and a slider with parallel gaps. *Journal of Tribology* [online]. 2016, **138**(2) [vid. 2023-03-15]. ISSN 15288897. Dostupné z: doi:10.1115/1.4031515/377948
- [20] YANG, Peiran a Motohiro KANETA. Thermal Wedge in Lubrication. *Encyclopedia of Tribology* [online]. 2013, 3617–3622 [vid. 2023-03-16]. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-92897-5_161
- [21] MENG, Xiangkai a M. M. KHONSARI. On the effect of viscosity wedge in micro-textured parallel surfaces. *Tribology International* [online]. 2017, **107**, 116–124 [vid. 2022-03-14]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/J.TRIBOINT.2016.11.007
- [22] MENG, Xiangkai a M. M. KHONSARI. Viscosity wedge effect of dimpled surfaces considering cavitation effect. *Tribology International* [online]. 2018, **122**, 58–66 [vid. 2022-03-14]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2018.02.011
- [23] HUH, Jungwon, Van Ha MAC, Quang Huy TRAN, Ki Yeol LEE, Jong In LEE a Choonghyun KANG. Detectability of delamination in concrete structure using active infrared thermography in terms of signal-to-noise ratio. *Applied Sciences (Switzerland)* [online]. 2018, **8**(10) [vid. 2022-12-17]. ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/APP8101986
- [24] FOX, Glen. The brewing industry and the opportunities for real-time quality analysis using infrared spectroscopy. *Applied Sciences (Switzerland)* [online]. 2020, **10**(2) [vid. 2023-05-21]. ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/APP10020616
- [25] ADAM, Jakub. *Chování mazaných kontaktů za vysokých skluzů*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [26] ŠNEVAJS, Matěj. *Snižování tření mazaných kontaktů změnou tepelné vodivosti materiálů*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [27] HARTL, Martin. Differential colorimetry: tool for evaluation of chromatic interference patterns. *Optical Engineering* [online]. 1997, **36**(9), 2384 [vid. 2023-05-25]. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/1.601415

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

10.1 Příklady použitých fyzikálních veličin

DL	digital level (někdy také counts)
DL_{pin}	digital level zaznamenaný od pinu
DL_{olej}	digital level zaznamenaný od oleje
DL_S	digital level zaznamenaný přes S filtr
DL_L	digital level zaznamenaný přes L filtr
H_g	poměrná hloubka důlku $H_g = h_g/h_0$
h_g	hloubka důlku
h_0	vzdálenosti pinu od hladkého povrchu
$h(t)$	součinitel pro zohlednění tloušťky mazacího filmu
$k(t)$	přepočtový součinitel mezi DL z S a L filtru

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	IR termografie v tribologii, příklad konfigurace zařízení pro měření EHD kontaktu s kuličkou [2]	17
Obr. 2-2	Spektra emisivity ocelové kuličky, maziva, safírového disku a propustnost S a L filtrů [4]	17
Obr. 2-3	Konfigurace pin-on-disc a pyrometrů dle Siroux [7]	18
Obr. 2-4	Snímek z měření Vlădesca [8]; a) původní snímek, b) snímek zpracovaný v Matlab	19
Obr. 2-5	Korekce Stribeckovy křivky vzhledem k znalosti teploty v kontaktu [8]	19
Obr. 2-6	Snímky z měření Noska; a) [9], b) [10]	20
Obr. 2-7	Snímek z práce Abdullaha [11]	20
Obr. 2-8	Přehled vybraných geometrií a základních parametrů povrchových textur [12]	21
Obr. 2-9	Fowellův model vtahu tahu maziva do paralelního kontaktu vlivem podtlaku [12]	22
Obr. 2-10	Výskyt recirkulačních zón (řádky shora dolů – zvětšující se convergence ratio, sloupce zleva doprava – zvětšující se hloubka důlků) [16]	23
Obr. 2-11	Nosnost kontaktu a maximální teplota maziva v kontaktu jako funkce hmotnostního průtoku na vstupu pro rychlosti skluzu 5 m/s a 10 m/s a $k=1$ [16]	23
Obr. 2-12	Teploty v axiálních ložiskách; a) rozložení teplot na rozhraní segment-mazivo; b) rozdíl maximální teploty maziva v texturovaných ložiskách oproti hladkému ložisku [17]	24
Obr. 2-13	Schéma vzniku viskozitního klínu v kluzném kontaktu [20]	25
Obr. 2-14	Rozložení teploty a rychlostí v mazacím filmu v oblasti důlku textury [21].	25
Obr. 2-15	Bezrozměrné rozložení a) tlaku bez uvažování viskozitního klínu; b) tlaku s uvažováním viskozitního klínu; c) zprůměrovaná teplota mazacího filmu; d) teplota povrchu slideru [22]	26
Obr. 2-16	Teplota a lokální tepelný tok na střednici (T_s je teplota slideru, T_m je teplota maziva a q_p je lokální tepelný tok do hladké desky) [22]	27
Obr. 4-1	Schéma postupu práce	31
Obr. 4-2	Schéma měřicí soustavy tribometru a kamery	32
Obr. 4-3	Schéma kalibrační sestavy	33

Obr. 4-4	Kalibrační přípravek	33
Obr. 4-5	Texturované piny; a) rozměry textur pinů; b) ilustrace poměru $Hg = hg/h_0$	34
Obr. 4-6	Profily dna laserovaných textur; a) \varnothing 103 μm , b) \varnothing 404 μm , c) \varnothing 800 μm	35
Obr. 4-7	Princip infračervené termografie [23]	36
Obr. 4-8	Infračervené záření v elektromagnetickém spektru a jeho dělení na MIR, NIR a FAR [24]	37
Obr. 4-9	Emisivita zdrojů a pásma užitých filtrů (upraveno dle [4])	37
Obr. 4-10	Kalibrace pro bodový kontakt – disk.....	38
Obr. 4-11	Kalibrace pro bodový kontakt – kulička a k faktor.....	39
Obr. 4-12	Schéma kalibrace teploty oleje.....	40
Obr. 5-1	Testování kalibračního přípravku	43
Obr. 5-2	Porovnání teploty z PLC s výsledky testu s chládnoucí kuličkou	43
Obr. 5-3	Snímky běžícího kontaktu pořízené s různou filtrací (celková teplota kolem 60°C).....	44
Obr. 5-4	Nárůst DL s filtry a bez filtru.....	45
Obr. 5-5	Vliv rozdílné emisivity povrchu pinu a důlku na DL (snímky ze suché kalibrace, teplota 23 °C).....	45
Obr. 5-6	Přístupy ke kalibraci oleje; 1) kalibrace s kuličkou; 2) kalibrace s piny a plíšky	46
Obr. 5-7	Dílní výsledky zkušební kalibrace s kuličkou.....	46
Obr. 5-8	Výsledek zkušební kalibrace oleje pomocí kuličky.....	47
Obr. 5-9	Získané kalibrační křivky pro L filtr a S filtr	48
Obr. 5-10	$k(t)$ faktor pro přepočítání mezi DL s L filtrem a S filtrem	49
Obr. 5-11	Kalibrační křivka ocelového pinu	49
Obr. 5-12	Kalibrační křivka oleje	50
Obr. 5-13	Součinitel $h(t)$ zohledňující tloušťku maziva při přepočtu DL na teplotu.....	51
Obr. 5-14	Korekce teploty oleje $u(t)$ faktorem; a) $u(t)$ faktor, b) korekce teploty pinu pomocí $u(t)$ faktoru	51
Obr. 5-15	Schéma postupu kalibrace texturovaných pinů a oleje.....	52
Obr. 5-16	Schéma postupu měření a vyhodnocení teploty texturovaných pinů a oleje .	53

Obr. 5-17	Korekce Stribeckovy křivky dle celkové teploty v kontaktu – pin 7, paralelní povrchy.....	54
Obr. 5-18	Korekce Stribeckovy křivky dle teploty oleje – pin 7, paralelní povrchy	54
Obr. 5-19	Náhled do kontaktů s kavitací, zatížení 50 N (2,4 MPa), rychlost 8,1 m/s (rozměry důlků v μm).....	55
Obr. 5-20	Půběh měření Stribeckovy křivky pro jedno zatížení (na obrázku pro 50 N)	56
Obr. 5-21	Souhrnné Stribeckovy křivky pro paralelní povrchy a povrchy s klínovou spárou	57
Obr. 5-22	Mazivo v kontaktu s paralelními povrchy a klínovou spárou (laserem indukovaná fluorescence – intenzita záření nabarveného maziva koresponduje s tloušťkou mazacího filmu).....	58
Obr. 5-23	Tloušťka maziva v kontaktu s paralelními povrchy (pin 9)	58
Obr. 5-24	Tloušťka maziva v kontaktu s klínovou spárou $0,05^\circ$ (pin 9)	59
Obr. 5-25	Tloušťka mazací vrstvy v závislosti na charakteristickém čísle u paralelního kontaktu.....	59
Obr. 5-26	Tloušťka mazací vrstvy v závislosti na charakteristickém čísle u kontaktu se klínovou spárou	60
Obr. 5-27	Profil teploty v kontaktu se třemi důlky na podélné ose po dvou minutách v chodu (pin 9, rychlost 8,1 m/s, zatížení 50 N).....	60
Obr. 5-28	Snímky z kontaktu s filtrací na pin a olej v prostředí Matlab (pin 9, 50 N, 8,1 m/s)	61
Obr. 5-29	Podélný profil teploty pinu a oleje ze snímků na Obr. 5-27 (pin 9, 50 N, 8,1 m/s)	61
Obr. 5-30	Celkové rel. teploty a rel. teploty pinu a oleje v kontaktu - pin 7 - paralelní (50 N, $h_0=5 \mu\text{m}$)	62
Obr. 5-31	Celkové rel. teploty a rel. teploty pinu a oleje v kontaktu – pin 9 paralelní povrchy (50 N, $h_0=10 \mu\text{m}$).....	62
Obr. 5-32	Celkové rel. teploty a rel. teploty pinu a oleje v kontaktu – pin 7 – klínová spára (50 N, $h_0=5 \mu\text{m}$).....	63
Obr. 5-33	Celkové rel. teploty a rel. teploty pinu a oleje v kontaktu – pin 9 – klínová spára (50 N, $h_0=10 \mu\text{m}$).....	63
Obr. 5-34	Porovnání teplot pinu 7, pinu 9 a hladkého pinu – paralelní povrchy (50 N)	64
Obr. 5-35	Porovnání teplot oleje – pin 7, pin 9 a hladký pin – paralelní povrchy (50 N)	64

Obr. 6-1	Snímky z měření; a) v ball-on-disc konfiguraci [26] a b) pin-on-disc konfiguraci s texturami	67
Obr. 6-2	Problematika nehomogenity snímků	67
Obr. 6-3	$k(t)$ součinitel - různé přístupy	68
Obr. 6-4	Princip ustavení paralelního povrchu při měření	69

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Parametry kamery a objektivu	32
Tab. 2	Rozměry textur dostupných pinů	34

13 SEZNAM PŘÍLOH