



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**CHOVÁNÍ MAZANÝCH KONTAKTŮ ZA
VYSOKÝCH SKLUZŮ**

BEHAVIOUR OF LUBRICATED CONTACTS UNDER HIGH-SLIDING
CONDITIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Adam

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Omasta, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jakub Adam**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Omasta, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Chování mazaných kontaktů za vysokých skluzů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V řadě strojních aplikací, jako jsou např. ozubené nebo vačkové převody, pracují mazané kontakty součástí za vysoké relativní rychlosti. Vlivem tohoto skluzu může okamžitá teplota v kontaktu dosáhnout až několika stovek °C. Za těchto podmínek jsou tření a tloušťka mazacího filmu značně závislé na teplotním chování kontaktu. Pro správný návrh strojních součástí je nezbytné popsat a pochopit jevy, které toto chování ovlivňují. Teoretické i empirické znalosti jsou v této oblasti stále ještě omezené.

Typ práce: výzkumná
Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je experimentálně popsat vliv provozních parametrů na vznik tzv. dimplu v tloušťce mazacího filmu za podmínek vysokého skluzu. K popisu bude použit optický tribometr pro měření tloušťky mazacího filmu pomocí kolorimetrické interferometrie a teploty kontaktu pomocí IR termografie.

Dílčí cíle diplomové práce:

- na základě studia vědeckých článků identifikovat významné parametry ovlivňující vliv tzv. dimplu,
- experimentálně popsat vliv jednotlivých parametrů na rozložení tloušťky mazacího filmu a teploty v kontaktu,
- připravit publikaci výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

OMASTA, Milan. Studium utváření elastohydrodynamických mazacích filmů u hypoidních převodů. Brno, 2013. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Ivan Křupka.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je popsat vliv jednotlivých provozních parametrů na tloušťku a rozložení teploty elastohydrodynamického kontaktu za vysokého skluzu. Pomocí optické interferometrie je stanoveno rozložení tloušťky mazacího filmu a mapování teploty v EHD kontaktu je realizováno prostřednictvím infračervené mikroskopie. Pro oddělení záření jednotlivých povrchů a oleje byly použity dva optické filtry. Měření teploty povrchu disku bylo realizováno za použití disku s chromovou vrstvou, která odstíní záření od kuličky a oleje. Experimentální zařízení bylo upraveno tak, aby bylo možné simulovat podmínky různých vektorů natočení. Výsledky rozšiřují dosavadní informace o chování EHD kontaktu za podmínek vysokého skluzu.

KLÍČOVÁ SLOVA

EHD, dimpl, infračervená mikroskopie, tloušťka mazacího filmu

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to describe the influence of individual operating parameters on thickness and temperature distribution of elastohydrodynamic contact under high slip ratio. In this work, the distribution of the lubricant film thickness is determined by optical interferometry and the temperature mapping in EHL contact is realized by infrared microscopy. Two optical filters were used to separate the radiation of contact surfaces and oil. Temperature of disk surface was measured using a sapphire disk with chromium layer that shielded radiation from ball and oil. The experimental device was modified to simulate the conditions of the various vectors between entrainment and sliding speed. The results extend existing information about behavior of EHL contact under high slip ratio conditions.

KEYWORDS

EHL, dimple, Lubricant film thickness, infrared microscopy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ADAM, J. Chování mazaných kontaktů za vysokých skluzů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Milanu Omastovi, Ph.D. a také odbornému konzultantovi, panu Ing. Petru Šperkovi, Ph.D. za ochotu během jejího zpracování. Rovněž děkuji své rodině a přítelkyni za podporu a velkou trpělivost po celou dobu mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Chování mazaných kontaktů za vysokých skluzů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Milana Omasty, Ph. D. a uvedl jsem v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 18. 5. 2018

.....

Bc. Jakub Adam

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	12
2.1	Odborné studie měření teploty v kontaktu pomocí IR mikroskopie.....	12
2.2	Vliv skluzu na tloušťku maziva	16
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	21
3.1	Analýza problému.....	21
3.2	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše.....	21
3.3	Podstata a cíle diplomové práce.....	21
4	MATERIÁLY A METODY	23
4.1	Postup měření	23
4.2	Experimentální zařízení	23
4.2.1	Popis zařízení.....	23
4.3	Použité experimentální metody	25
4.3.1	Kolorimetrická interferometrie.....	25
4.3.2	Infračervená mikroskopie	25
4.4	Použité materiály	28
4.5	Vstupní podmínky pro experimenty	28
4.5.1	Vektory rychlostí	29
5	VÝSLEDKY	30
5.1	Vliv provozních parametrů na tloušťku filmu	30
5.1.1	Vliv unášivé rychlosti	30
5.1.2	Vliv tlaku	31
5.1.3	Vliv teploty	32
5.1.4	Vliv skluzu.....	32
5.2	Měření teploty v kontaktu.....	35
5.2.1	Výsledky při 30 °C a 0° natočení	35
5.2.2	Výsledky při 60 °C a 0° natočení	38
5.2.3	Výsledky při 30 °C a 90° natočení	40
5.2.4	Výsledky při 60 °C a 90° natočení	44
6	DISKUZE	48
6.1	Možné zdroje chyb.....	48
6.2	Vliv provozních parametrů	49

6.3	Distribuce teploty v kontaktu.....	49
6.4	Oblast výskytu dimplů	53
7	ZÁVĚR	56
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	60
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	61
11	SEZNAM TABULEK	64
12	SEZNAM PŘÍLOH	65

1 ÚVOD

Řada strojních součástí, jako jsou např. ozubené převody či valivá ložiska, pracuje za podmínek elastohydrodynamického (EHD) mazání, které je charakteristické tenkým mazacím filmem, jenž odděluje kontaktní tělesa. Jak je již dobře známo, u kruhového kontaktu je tvar filmu plochý s konstrikcí ve tvaru koňské podkovy, což predikuje klasická EHD teorie. Tento tvar je typický pro podmínky čistého valení, kdy se povrchy pohybují stejnou rychlostí, avšak v mnoha aplikacích je v EHD kontaktu kromě valivé složky přítomná také významná skluzová složka rychlosti.

Vlivem přítomnosti skluzové složky rychlosti dochází ke zvýšenému generování tepla, které významně ovlivňuje chování EHD kontaktu, přičemž dochází ke změně tření a tloušťky mazací vrstvy. Změna profilu tloušťky maziva je významná lokálním nárůstem maziva, což je běžně označováno pojmem „dimple“. Tloušťka se může za těchto podmínek lišit o několik stovek nanometrů a je potenciálně možná transformace teploty v kontaktu až několikanásobně. V současné době jsou častěji voleny různé materiály mechanických součástí, které disponují odlišnými fyzikálními i chemickými vlastnostmi. Právě tepelná vodivost značně ovlivňuje chování kontaktu, potažmo i vznik dimplu.

V této oblasti jsou teoretické i empirické znalosti omezené. Pro správný návrh strojních součástí, jež v praxi fungují za podmínek vysokého skluzu, je tedy nezbytné lépe pochopit mechanismy vzniku a chování dimplu v mazaném kontaktu. Práce je zaměřena na experimentální studium chování EHD kontaktů pracujících za vysokých skluzů, a to zejména z pohledu tloušťky mazacího filmu a teploty.



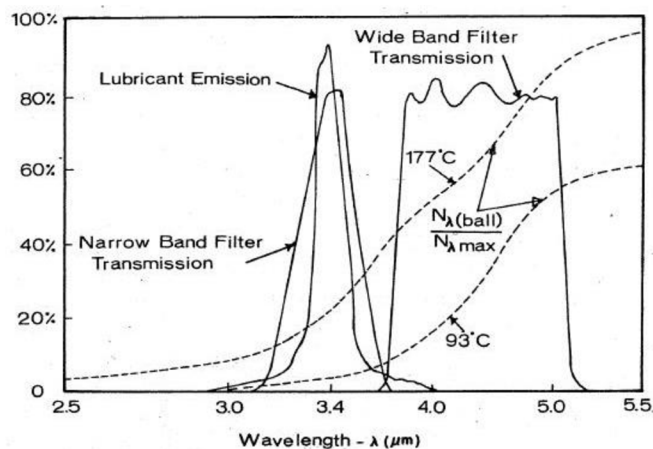
Obr. 1.1 Interferogram kontaktu [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Práce se věnuje vlivu skluzu na tloušťku mazacího filmu a po dohodě s vedoucím diplomové práce byla rozšířena také na měření teploty a její distribuci v kontaktu. Teplota v kontaktu je zobrazována pomocí infračervené mikroskopie (IR), která slouží k analyzování infračervené energie vyzařované povrchy. Tato metoda je poměrně unikátní a věnuje se jí jen několik málo prací. První část této kapitoly je právě zaměřena na tuto problematiku. Další část se věnuje studiu samotného vlivu skluzu na tloušťku mazacího filmu nebo případnou distribuci teploty a související mechanismy EHD.

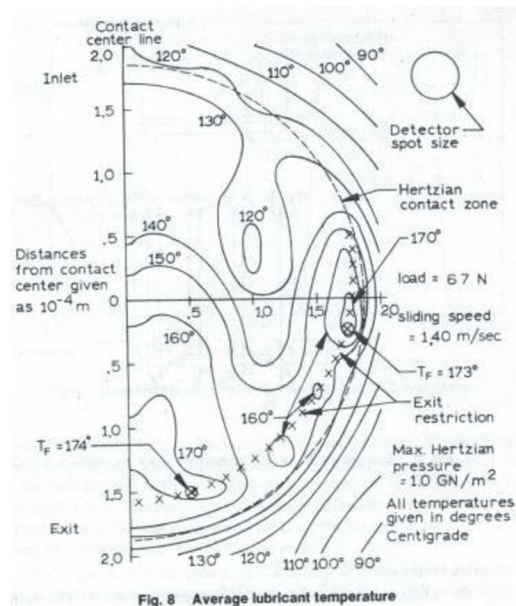
2.1 Odborné studie měření teploty v kontaktu pomocí IR mikroskopie

Jako jedni z prvních použili infračervenou technologii pro zobrazování teploty v kontaktu V. Ausherman [2]. Práce, kterou publikoval, je zaměřena na mapování teploty za tlakových podmínek 1,05 GPa a 1,51 GPa, skluzových rychlostech $0,35 - 12,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a přehřáté olejové lázni na $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Experiment provedl na optickém tribometru v konfiguraci ball – on – disk. K určení teplotního rozložení v kontaktu použil autor infračervený mikrodetektor. Pro odlišení záření, emitovaného povrchem kuličky a olejem, odečetl část z celkového záření, aby získali záření odpovídající záření povrchu kuličky a poté pro olej (viz Obr. 2.1).



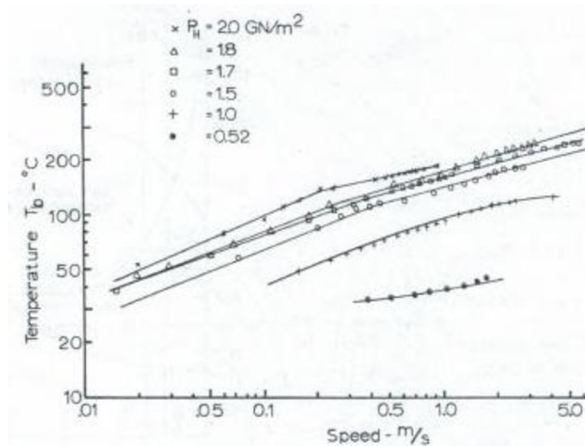
Obr. 2.1 Vlnové délky záření[2]

Výsledkem experimentu bylo teplotního rozložení na povrchu kuličky a mazacího filmu v kontaktní oblasti. Teplota povrchu kulička dosáhla maximální teploty $117 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota oleje přesáhla $170 \text{ }^\circ\text{C}$ a před vstupem do oblasti největšího tlaku se mazivo ohřálo na teplotu přes $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní maxima oleje byly na více místech, z čehož jedno maximum bylo v blízkosti teplotního maxima povrchu kuličky. Další místa se nacházela v bočním laloku sevření (viz Obr. 2.3).



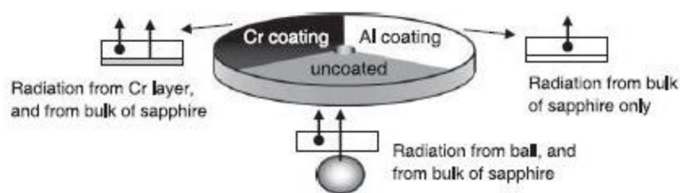
Obr. 2.3 Teplota mazacího filmu [2]

Při zvýšení tlaku i rychlosti přesáhla teplota oleje i povrchu kuličky 200 °C, což poukazuje na vliv kontaktního tlaku i rychlosti (viz Obr. 2.2). Graf poukazuje na lineární závislosti teploty povrchu kuličky se zvyšující se rychlostí. Autoři také zjistili, že olej se již ohřívá ve vstupní zóně, což vede ke snížení viskozity a tlakově – viskózního koeficientu.



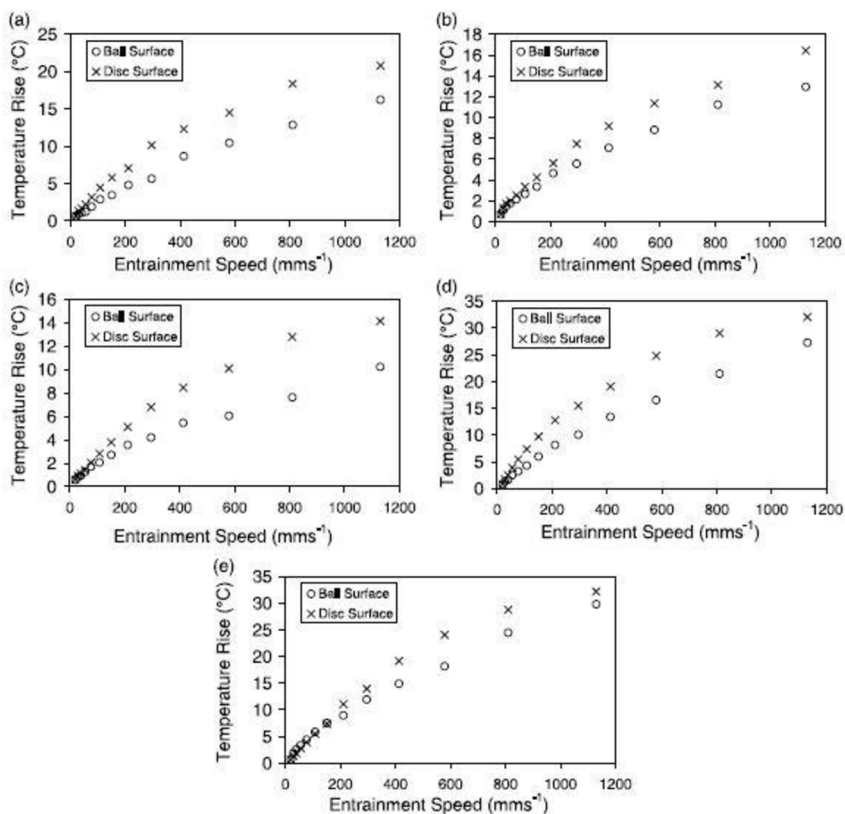
Obr. 2.2 Graf závislosti teploty povrchu kuličky na rychlosti [2]

Pozdější práce T. Reddyhoff [3] se zabývala podobnou problematikou. Autor této studie opět použil pro zobrazování teploty v kontaktu infračervenou technologii. Na rozdíl od předchozí práce, aplikoval safírový disk se třemi různými částmi, rozdělenými po 120° (viz Obr. 2.5). První část je bez povlaku. Pomocí této vrstvy je snímána teplota povrchu kuličky. Druhá třetina je pokryta chromovou vrstvou, která je vysoce reflektivní. Chromový povlak slouží ke snímání teploty horního povrchu disku, který je v kontaktu. Poslední část je pokryta hliníkovým povlakem, který je velice nízce reflexivní. Tato vrstva umožňuje vyzařování pouze objemu disku. Rychlost snímání kamery byla nastavena tak, aby bylo možné snímat data z každé části disku.



Obr. 2.5 Rozdělení disku [3]

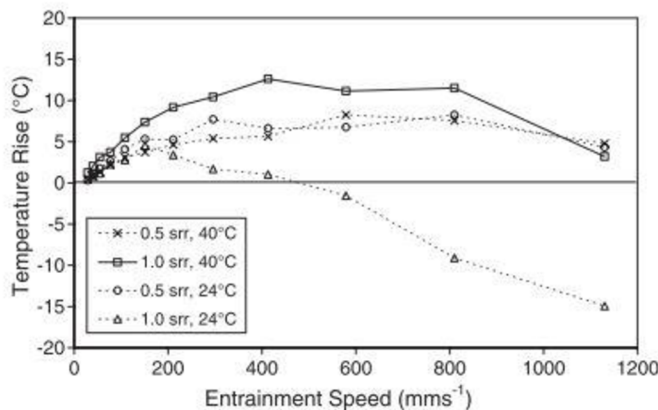
Práce se liší také v použitých mazivech. Zatímco v předchozí studii testovali jeden olej, v této práci autoři použili pět jeho druhů. Mezi ně patří Santotrac 50, který je navržen pro trakční pohony. Pohony tohoto typu požadují mazivo s vysokým koeficientem trakce, aby dokázalo přenést vysoké zatížení bez nadměrného kontaktního tlaku. Dalšími mazivy jsou oleje první a třetí třídy¹, které autoři použili k pozorování efektu zvyšování jemnosti maziva. Čtvrtým druhem maziva je polyalfaolefin (PAO). Jedná se o oleje, které se vyrábí polymerizací alkenů. Toto mazivo charakterizuje čtvrtou třídu olejů. Posledním typem maziva je 5P4E, jinak polyfenylether. Používá se při velkých teplotách díky své teplotní a oxidační stabilitě. Samotný experiment probíhal při zatížení 20 N, poměr skluzu a valení (SRR) 0,5 a předehřátým mazivem na 40 °C. Teplota byla snímána při rychlostech od 20 mm·s⁻¹ až do 1 113 mm·s⁻¹.



Obr. 2.4 Maximální teplotní zvýšení povrchu kuličky a disku při 20 N a SRR 0,5. a) Olej skupiny I; b) Olej skupiny III; c) PAO; d) Santotrac 50; e) 5P4E [3]

¹ Rozdělení olejů podle American Petroleum Institute (API)

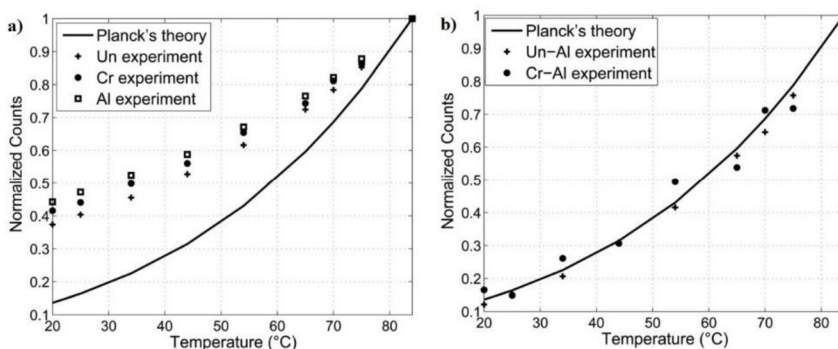
Jak lze vidět na Obr. 2.4, trend teploty povrchů je stejný. Při nízkých rychlostech, kdy je tloušťka filmu nízká, jsou teploty skoro totožné. Po zvýšení unášivé rychlosti, se teploty povrchů od sebe oddalovaly, namísto přibližovaly, jak autoři předpokládali. Tento efekt dále autoři zkoumali u oleje Santotrac 50. Experiment ukázal, že teplota kuličky převyšuje teplotu disku pouze při SRR 0,5, předehřátém oleji na 24 °C a od rychlosti 400 mm · s⁻¹ (viz Obr. 2.6).



Obr. 2.6 Rozdíl tepot kuličky a disku, $T = T_d - T_b$ [3]

Jedni z posledních, kteří se věnovali zobrazování teploty v kontaktu, byl J. Le Rouznic [4]. Ve své práci se zaměřil na zdokonalení mapování teploty v kontaktu pomocí infračervené termografie, z hlediska uplatnění, robustnosti a prostorového rozlišení, aby bylo možné měřit teplotu drsných povrchů v kontaktu. První část práce věnoval aplikaci Planckova zákona, aby potvrdil, že použitím povlaku na disku lze vyfiltrout nežádoucí záření. Druhou část studie věnoval zdokonalení kalibrace této metody, aby při měření nemusel být používán disk s měkkou vrstvou hliníku a mohly tak být měřeny drsné povrchy. V poslední části se autor zaměřil na algoritmy, které zlepší ostrost snímků.

Podle Planckova zákona, by se teplota měla pohybovat okolo křivky vyjadřující Planckovu teorii (viz Obr. 2.7a). Autoři zjistili, že teploty disků se liší od Planckova zákona, protože je ve výsledku přítomna složka záření emitovaného objemem disku. Po eliminování této složky, odečtením záření získaného použitím disku s hliníkovou vrstvou, se již výsledky shodovaly s Planckovým zákonem, jak lze vidět na Obr. 2.7b.



Obr. 2.7 Závislost počtu fotonů na jeden pixel snímku na teplotě a) před korekcí b) po korekci [4]

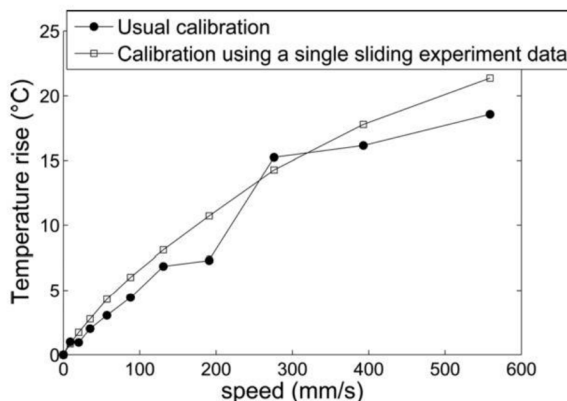
Aby nemusel být použit při kalibraci disk s hliníkovou vrstvou, určili autoři závislost počtu emitovaných fotonů na jeden snímek mezi diskem s hliníkovou vrstvou a chromovou vrstvou za skluzu podle vztahu (2.1). Dále pak druhou závislost mezi teplotou přehřívání oleje a rozdílu počtu emitovaných fotonů za čistého valení (2.2). Tyto funkce aplikovali při výpočtu teploty disku, podle vztahu (2.3).

$$C_{Al\ sliding} = f_2 \cdot C_{Cr\ sliding} \quad (2.1)$$

$$T_{olej} = f_1 \cdot (C_{Cr\ pure\ rolling} - C_{Al\ pure\ rolling}) \quad (2.2)$$

$$T_{disk} = f_1 \cdot (C_{Cr\ sliding} - f_2 \cdot C_{Cr\ sliding}) \quad (2.3)$$

Výsledná teplota byla vykreslena v závislosti na rychlosti do grafu (viz Obr. 2.8). Jak lze vidět, zmíněná kalibrační metoda je ovlivněna nechtěnou radiací v pozadí. Při použití této metody jsou data získaná při měření diskem s chromovou vrstvou méně zkreslená oproti měření s oběma disky. Výše uvedené zjištění dokazuje, že disk s hliníkovou vrstvou se použije pouze pro kalibraci. Tento přístup může být také použit pro disk bez povlaku.



Obr. 2.8 Rozdíl teplot povrchů disku a kuličky v závislosti na rychlosti [4]

2.2 Vliv skluzu na tloušťku maziva

Skluz nastává mezi povrchy tehdy, pokud rychlosti povrchů u_1 a u_2 jsou různé. Pokud tyto rychlosti mají stejný směr a rychlost, jedná se pak o podmínky čistého valení. Relativní pohyb je definován unášivou rychlostí u_e , kterou lze vypočítat dle vztahu (2.4), a skluzovou rychlostí u_s dle vztahu (2.5). Poměr skluzu a valení (SRR) je pak vyjádřen poměrem těchto rychlostí, viz vztah (2.6). Pro čisté valení pak platí, že $SRR = 0$ a pro čistý skluz nabývá SRR hodnoty 2 nebo -2. Pokud SRR je větší než 2, povrchy konají pohyb proti sobě. Limitní stav nastává při hodnotě $SRR = \infty$. V tomto případě se jedná o čistý prokluz.

$$u_s = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (2.4)$$

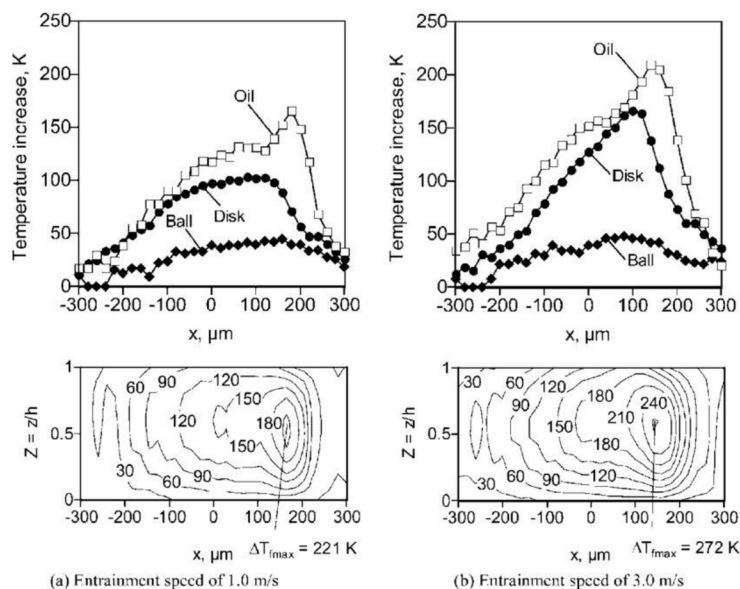
$$u_e = u_1 - u_2 \quad (2.5)$$

$$SRR = \frac{u_s}{u_e} = \frac{2 \cdot (u_1 - u_2)}{u_1 + u_2} \quad (2.6)$$

V minulosti nebyla vlivu skluzu na tloušťku mazacího filmu věnována taková pozornost. Až později se ukázalo, že skluz významně ovlivňuje mazací film. Díky skluzové složce rychlosti dochází ke zvýšení smykového napětí a tím i k nárůstu teploty v kontaktu.

Problematikou generování teploty v kontaktu se věnovali K. Yagi, T. Nakahara a kol. [5–7]. Autoři této studie měřili teplotu povrchů a průměrnou teplotu napříč filmem pomocí IR metody, která je blíže specifikována v předchozí kapitole 2.1. Z výsledků experimentů vyplývají mechanismy, které ovlivňují pokles tloušťky mazacího filmu:

- generování tepla ve vstupní oblasti kontaktu.
- přenos tepla generovaného ve střední oblasti kontaktu do vstupní oblasti kontaktu vedením tepla pomalejším povrchem.
- efekt teplotně-viskozitního klínu.



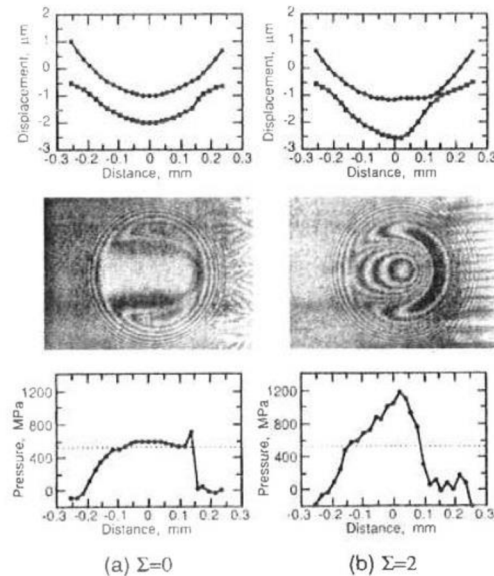
Obr. 2.9 Rozložení teploty v kontaktu [5]

Skluz neovlivňuje jen tloušťku mazacího filmu, ale také jeho tvar. Podle klasických teorií EHD, by měla tloušťka maziva být v centrální oblasti kontaktu konstantní. Této problematice se věnoval ve své práci Kaneta a kol. [1, 8]. Ten poprvé pozoroval výraznou změnu v rozložení tloušťky mazacího filmu. Výše uvedená změna se označuje jako tzv. „*dimple effect*“, ke kterému dochází při specifických skluzových podmínkách. Projevuje se lokálním nárůstem tlaku a tloušťky maziva v centrální oblasti EHD kontaktu (viz Obr. 2.10).

Z provedených experimentů vyvodil autor tyto závěry:

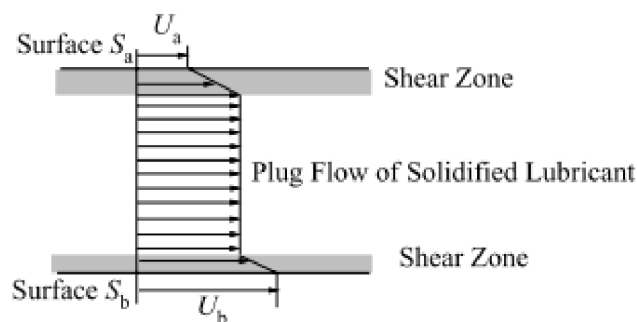
- dimply se snadněji tvoří u olejů s nízkou viskozitou a velkým tlakově-viskózním koeficientem.
- k dimplům dochází při piezo-viskózním režimu.

- dimply se tvoří v oblastech skluzu a zatížení v závislosti na použitém mazivu.
- podmínky, které brání proudění maziva v EHD kontaktu, jako je podkovitá konstrikce, nerovnosti a porušení filmu, jsou nezbytné pro vznik dimplu.
- pokud se Youngův modul těles liší, hloubka dimplu je výrazně ovlivněna SRR koeficientem.
- dimple může být důsledkem solidifikace maziva, kde může dojít k prokluzu na rozhraní solidifikovaného maziva a povrchu.



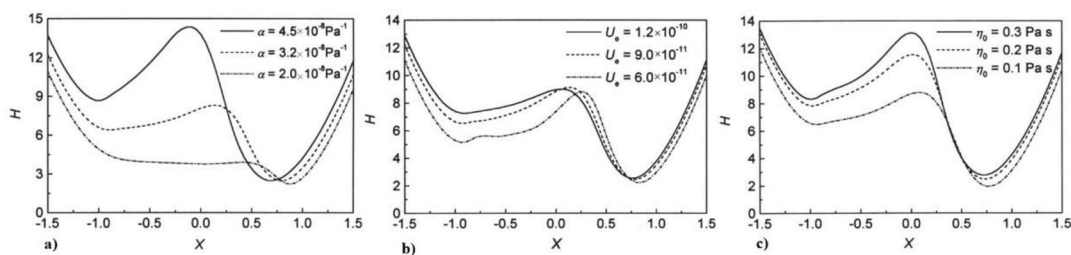
Obr. 2.10 Deformace a tlak pro podmínky a) SRR = 0 b) SRR = 2 [8]

Výsledky publikované Kanetou [1, 8] srovnával ve své práci Ehret [9], který se zaměřil na numerické řešení a porovnání již vydaných experimentální výsledků. Z dosažených výsledků usuzoval vznik skluzové roviny důsledkem působení limitního smykového napětí v kontaktu. Ve své práci uvažuje vznik dvou skluzových roviny blízko kontaktních povrchů, což má za následek konstantní průtok solidifikovaného maziva kontaktem. Tato teorie se označuje jako „*Plug flow model*“.



Obr. 2.11 Rychlostní profil toku solidifikovaného maziva

F. Guo, P. Yang a S. Qu [10] se zabývali také numerickým řešením vzniku dimplů. Ve své práci porovnávali numerické řešení s experimenty, které provedl Kaneta [8]. Dospěli k závěru, že vznik dimplů lze připsat mechanismu teplotně-viskozitního klínu, který již dříve předpokládal A. Cameron [11]. Z výsledků vyplývá, že při zvyšování viskozity dochází k posunu blíže ke vstupní oblasti. Zároveň dochází ke zvětšení hloubky dimplu a tloušťky mazacího filmu (viz Obr. 2.12 a)). Na dimply má vliv také tlakově-viskózní koeficient. Se zvyšujícím se tlakově-viskózním koeficientu se dimple výrazně prohlubuje a posouvá se opět směrem ke vstupní oblasti kontaktu, (viz Obr. 2.12 b)). V neposlední řadě má na dimply vliv unášivá rychlost. Se snižující se hodnotou unášivé rychlosti se dimple posouvá k výstupní oblasti kontaktu a tloušťka mazacího filmu se mění, liší pouze ve velkém rozdílu unášivé rychlosti (viz Obr. 2.12 c)). Toto zjištění nesouhlasí s izotermálními modely. Vypočtené hodnoty se od experimentálních hodnot Kanety [8] liší v hloubce dimplu a unášivé rychlosti. Početní algoritmus není schopný počítat správně, pokud je tlakově-viskózní koeficient příliš velký nebo unášivá rychlost příliš malá. Z daných poznatků vyplývá, že vypočtená hloubka dimplů není tak velká, jako u experimentálně zjištěných. Získaná data byly však slibná a autoři z těchto dat vyvozovali závěr, že samotný tepelný účinek může vytvořit dimple za podmínek podobných těm experimentálním.



Obr. 2.12 Vliv a) tlakově-viskózního koeficientu; b) unášivé rychlosti; c) viskozity na dimple [10]

Jednou z posledních studií, která se věnovala numerickému řešení a ověření experimentálních výsledků je práce V. Bruyera[12]. Ve své práci se věnovali metodě konečných prvků, kde pomocí matematických modelů společně s Navier-Stokesovými rovnicemi zjišťovali vliv neneutonského chování maziva a termálních jevů. Ze získaných výsledků vyvodili autoři závěry:

- zahrnutím tloušťky mazacího filmu a uvažováním konečných rozměrů pevných těles byla vize kontaktu rozšířena. Analýza tokových křivek a přenosu tepla přinesla více informací o EHD.
- zkoumáním vlivu tepelné vodivosti a tepla na tření objasnili lokální minimální tření v případě čistého skluzu.
- v případě vysokého skluzu je vznik dimplu převážně ovlivněn teplem. Vznik dimplu a jeho tvar nastává v důsledku teplotně-viskozitního klínu, který je popsán gradientem viskozity, tlakem a teplotou maziva a povrchů.

Z těchto studií vyplývá, že v dnešní době je vznik dimplu spíše připisován efektu teplotně-viskozitnímu klínu. Tento jev úzce souvisí s generovaným teplem v kontaktu a jeho následnou distribucí a odvodem. Podstatný vliv má tepelná vodivost kontaktních povrchů. Jelikož má ocel větší tepelnou vodivost než skleněný disk, je teplota u povrchu skleněného disku větší než u povrchu kuličky, což má za následek nižší viskozitu maziva. Pokud je olej o nízké viskozitě na jedné straně hnán proti

mazivu s vysokou viskozitou při relativním pohybu, dochází k působení tlaku, který způsobuje elastické deformace kontaktních povrchů a tím dochází ke vzniku dimplu.

Dimply vznikají i za podmínek čistého opačného prokluzu, kdy je unášivá rychlost nulová. Za těchto podmínek predikuje klasická teorie EHD nulovou tloušťku maziva. Touto problematikou se zabývali F. Guo, P. Yang a P. Wong [13]. Ve své práci se zaměřili na numerické řešení, kdy zkoumali vliv tepla na kontakt pro různá zatížení a unášivé rychlosti. Z výsledků, které vypočítali, vyvodili následující závěry:

- vypočtený tlak a tloušťka maziva vykazují rozdílné hodnoty od predikovaných izotermální teorie EHD pro skluz nebo čistý skluz. V centrální oblasti kontaktu vzniká výrazný dimple přímo ve středu, kde je podle izotermální teorie EHD predikována konstantní tloušťka maziva.
- z výpočtů vyplývá, že utváření dimplu je ovlivňováno teplotně-viskozitním klínem.
- tloušťka filmu je ovlivněna nejen ve vstupní oblasti, ale také v centrální a výstupní oblasti.
- zatížení, unášivá rychlost a skluz významně ovlivňují tloušťku maziva při opačném prokluzu díky teplotně-viskozitnímu klínu.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

3.1 Analýza problému

3.1

Hlavní problémem této diplomové práce je použití zařízení pro mapování teploty v kontaktu, tedy IR mikroskopii. Jedná se o unikátní technologii, která se používá jen na několika místech. IR metoda není tedy natolik zmapovaná za podmínek vysokých skluzů. Také teorie utváření mazacího filmu za těchto specifických podmínek nejsou uzavřeny a je třeba brát na ně ohled. Dalším technickým problémem může být pohon kuličky nebo disku u optického tribometru. Některé experimenty vyžadují vyšší rychlosti, které jsou nad maximum současného pohonu. Může tedy dojít k úpravám tohoto pohonu.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

3.2

První část rešerše je zaměřena na metodu mapování teploty v kontaktu pomocí IR mikroskopie. Tato metoda je založena na snímání emitovaného záření z kontaktu. Pro odlišení záření jednotlivých těles a oleje, je nezbytné aplikovat softwarové filtry. Pro získání filtrů je nutné před samotným měřením provést kalibraci. Kalibrace se odvíjí od disků, které jsou použity. Používají se disky s chromovou a hliníkovou vrstvou a disk bez povlaku nebo dva disky, kdy jeden je opatřen chromovým povlakem a druhý je bez vrstvy kovu. Lze také použít jeden disk, rozdělený na tři nebo dvě části, kde každá má jiný povlak. Při použití tohoto disku se však musí správně nastavit snímkování kamery.

Druhá část se věnuje vlivu parametrů na chování EHD kontaktu. Při určitých podmínkách dochází k výrazné změně v tloušťce maziva a vzniká dimpl. Tento jev je spojován se SRR a termálními jevy. Se zmíněným skluzem bylo sestaveno několik teorií a mechanismů, které popisují chování EHD kontaktu:

- dimpl vzniká v důsledku rozdílných modulů pružnosti kontaktních těles. [8, 14]
- dimply vznikají v důsledku vzniku skluzových rovin v blízkosti kontaktních povrchů a konstantním tokem solidifikovaného maziva. [9]
- efekt teplotně-viskozitního klínu. [10, 11]
- skluz vzniká na rozhraní materiálů v kontaktu vlivem působení limitního smykového napětí. [15, 16]

První z uvedených hypotéz byla již několika odbornými pracemi vyvrácena. V dnešní době je nejčastěji změna chování připisována jevu teplotně-viskozitního klínu, který je popsán gradientem viskozity, teplotou maziva a povrchů kontaktních těles a tlakem. Dále je tento jev spojován s tepelnou vodivostí povrchů v kontaktu.

3.3 Podstata a cíle diplomové práce

3.3

Hlavním cílem práce je experimentálně popsat vliv provozních parametrů na vznik tzv. dimplu v tloušťce mazacího filmu za podmínek vysokého skluzu. K popisu tohoto jevu bude použit optický tribometr. Pro měření tloušťky mazacího filmu bude využita kolorimetrická interferometrie a pro stanovení teploty v kontaktu pomocí infračervená mikroskopie.

Diplomová práce bude rozdělena na následující dílčí cíle:

- na základě studia vědeckých článků identifikovat významné parametry
- experimentálně popsat vliv teploty, skluzu, unášivé rychlosti na rozložení tloušťky mazacího filmu.
- experimentálně stanovit teplotu v kontaktu za stejných podmínek jako při měření tloušťky mazacího filmu.
- publikovat zjištěné výsledky.

4 MATERIÁLY A METODY

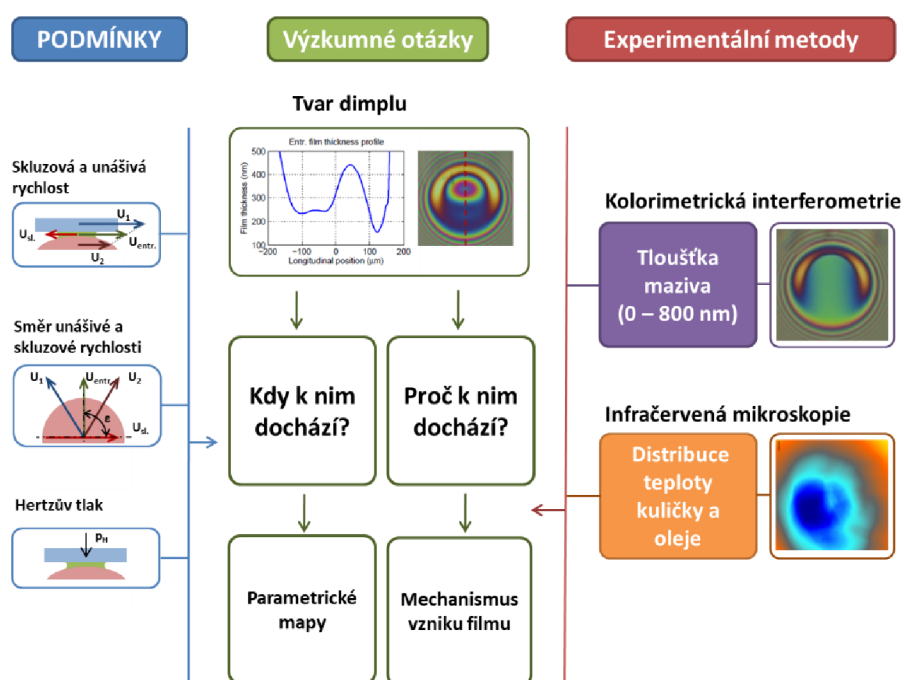
4

4.1 Postup měření

4.1

Tato diplomová práce je především zaměřena na parametry, jako je rychlost posuvu a jeho směr, Hertzův tlak, teplota maziva a SRR, které EHD kontakt významně ovlivňují. Výzkumným cílem je pak rozšíření poznatků o utváření mazacího filmu za vysokých skluzů z pohledu tloušťky maziva a také generovaného tepla v kontaktu.

Pro experimentální ověření vlivu jednotlivých parametrů jsou využity různé experimentální metody - infračervené mikroskopie pro mapování teploty v kontaktní oblasti a kolorimetrická interferometrie pro mapování tloušťky filmu. Výsledkem by měly být poznatky, které by poukázaly na změny ve tvaru mazacího filmu a teploty v kontaktu.



Obr. 4.1 Schéma postupu při řešení (upraveno z [17])

4.2 Experimentální zařízení

4.2

4.2.1 Popis zařízení

4.2.1

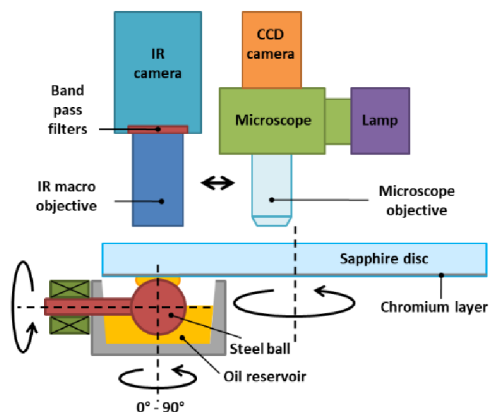
Pro měření byl použit experimentální simulátor v konfiguraci ball-on-disk, který byl sestaven na Ústavu konstruování (viz Obr. 4.2). Princip simulace kontaktu spočívá ve styku rotujícího disku a kuličky. Zatížení v kontaktu je generováno přes disk pomocí závaží umístěného na páce. Velikost síly je snímána siloměrem. Aby bylo možné simulovat různé tepelné podmínky, jsou ve vaně simulátoru umístěny topné patrony, jež zajišťují vyhřívání celé vany i rezervoáru oleje. Teplota je měřena v rezervoáru maziva, ve vaně a na vstupu do kontaktu pomocí termočlánků. Pohon disku a kuličky je zajištěn servomotory. Kontakt je snímán CCD kamerou pro měření tloušťky nebo IR kamerou pro měření teploty v kontaktu. Kamery jsou umístěny na otočné věži.

U optického tribometru, který byl použit při experimentech v této diplomové práci, nelze měnit úhel mezi vektory rychlostí povrchů. Pro umožnění natočení byl v rámci této práce navržen a zkonstruován modul, jenž lze instalovat na simulátor (viz Obr. 4.3).

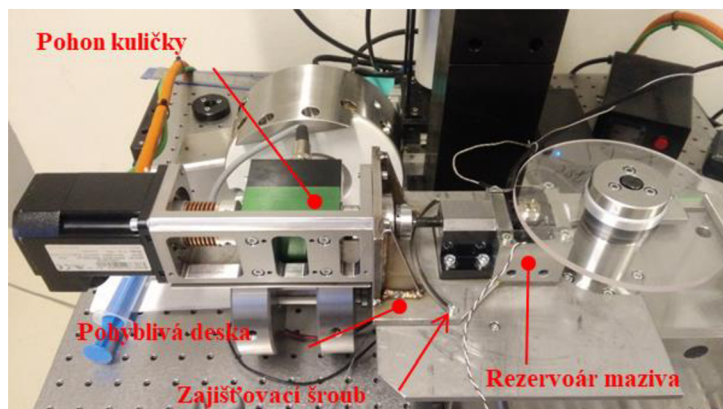
Při navrhování modulu se musely brát v potaz podmínky, za kterých budou provedeny experimenty. Jedním z požadavků bylo zajištění variability vzdálenosti mezi osou otáčení disku a polohou kuličky. Další podmínkou byla možnost nastavení úhlu mezi vektory rychlostí povrchů v rozsahu $0^\circ - 90^\circ$.

Modul je složen z dvou částí, přičemž první část tvoří výpalek, který se pomocí šroubů spojí se stávajícím tribometrem. Ve výpalku je drážka pro čep, přes nějž je možné provést natočení. Z důvodu zajištění polohy, se nachází v součásti drážka pro T matici. Druhou část tvoří svařenec, jenž nese pohon, ložiskový domek a rezervoár maziva. Čep je umístěn pod rezervoárem maziva tak, aby osa otáčení byla totožná s osou kuličky.

Jelikož je rezervoár maziva pouze okolo kuličky a disk není krytý, může docházet k odštíku maziva při vyšších rychlostech a k jeho úbytku, což by mělo za následek hladovění kontaktu. Tento problém je vyřešen pomocí gumového kroužku, který je umístěn v rezervoáru maziva, čímž dochází k setření maziva zpět. Zahřívání rezervoáru je zprostředkováno přes topné patrony umístěné přímo ve vaničce. Teplota okolí kontaktu je snímána pomocí termočlánu, jenž je umístěn co nejbližší kontaktu.



Obr. 4.2 Schéma experimentálního zařízení (upraveno z [17])



Obr. 4.3 Modul pro simulaci změny úhlu mezi vektory

4.3 Použité experimentální metody

4.3

4.3.1 Kolorimetrická interferometrie

4.3.1

K vyhodnocení tloušťky maziva byla u experimentálního zařízení použita metoda kolorimetrické interferometrie, jež spočívá v interferenci světla. Světlo prochází skrz disk s chromovou vrstvou, od níž je jeho část odražena zpět do mikroskopu. Zbytek světelného paprsku prochází přes mazivo a dopadá na povrch kuličky, od kterého je odražen do pozorovacího místa mikroskopu. Tyto dva odražené paprsky tvoří interferogram. Výsledné interferogramy jsou zpracovány v softwaru Achilles, který tloušťku vyhodnocuje na základě barev vzniklých interferencí světla. Vyhodnocení tloušťky mazacího filmu probíhá na základě kalibrace, kdy je z kalibračních snímků jednotlivým barvám spektra přiřazena odpovídající tloušťka maziva. [18, 19]

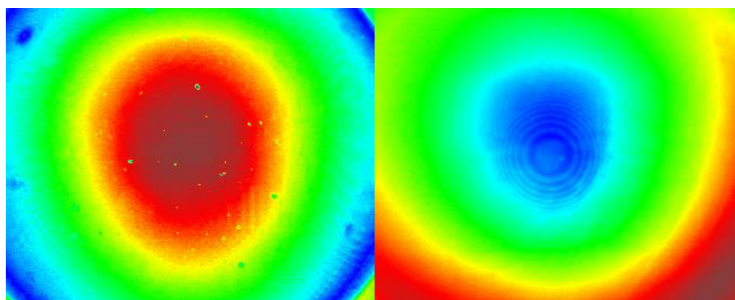
4.3.2 Infračervená mikroskopie

4.3.2

Pro stanovení teploty přímo v kontaktu byla u simulátoru využita termokamera FLIR SC5000 a safírový disk bez povlaku. Infračervená kamera snímá elektromagnetické vlny v pásmu infračerveného záření, a to v rozsahu vlnových délek 2,5 μm až 5,1 μm [20]. V tomto rozsahu se nachází i vlnové délky záření od oleje a kuličky. Aby mohla být vyhodnocena jednotlivá záření zvlášť, je nutné použít filtry. Používají se dva pásmové filtry, které propouští záření jen o určité vlnové délce. Filtr, jenž propouští záření v pásmu kuličky, je v této diplomové práci a na pracovišti označen jako L-filtr. Druhý filtr propouští záření od povrchu kuličky i oleje a je nazýván jako S-filtr. Jedná se o sklíčka, která se v kameře automaticky aplikují na základě naprogramovaného postupu.

Pro vyhodnocení teploty v kontaktu bylo však nutné stanovit závislost mezi intenzitou záření (ekvivalentně „*digital level*“²) a teplotou, kde DL je jednotka úměrná počtu fotonů snímaných kamerou na jeden pixel. Tato závislost se stanovila při kalibraci, přičemž v první fázi byl kalibrován pouze povrch kuličky bez maziva a v druhé statický kontakt (viz. Obr. 4.4).

U kalibrace povrchu kuličky byla odečítána hodnota DL při postupném zvyšování teploty pouze pro vrchlík (viz Tab. 4.1). Z těchto dat bylo možné stanovit závislost nárůstu teploty na změně DL. Z rovnice křivky, která vznikla proložením kalibračních bodů, autor přepočítal naměřené hodnoty DL na teplotu povrchu kuličky.

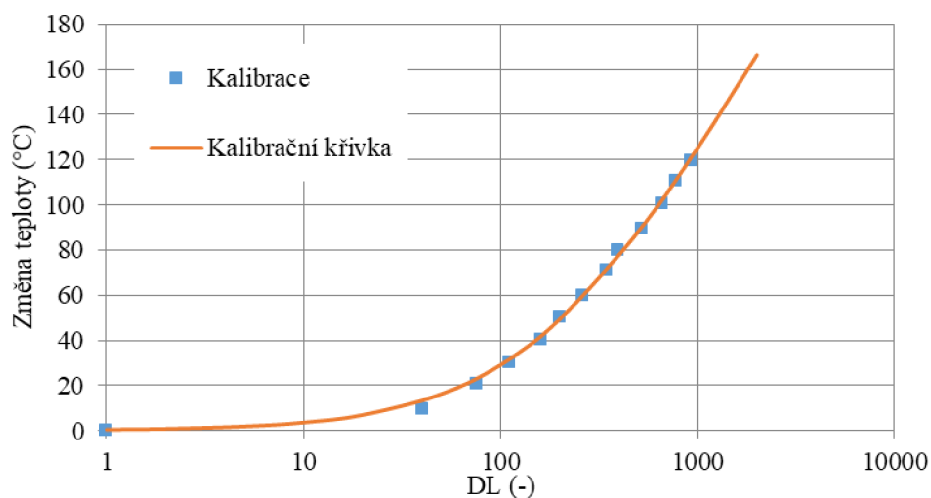


Obr. 4.4 Kalibrační snímky (vlevo kulička, vpravo statický kontakt)

² Dále jen DL

Tab. 4.1 Kalibrační hodnoty pro povrch kuličky

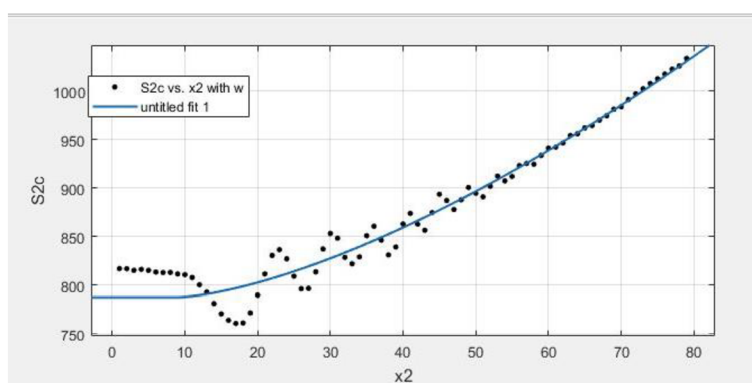
Teplota (°C)	Teplota rel. (°C)	L filtr	L filtr rel.
30,4	0,1	-164	1
40	9,7	-125	40
50,8	20,5	-89	76
60,6	30,3	-54	111
70,8	40,5	-4	161
80,4	50,1	34	199
90,4	60,1	94	259
101,1	70,8	178	343
110,3	80	230	395
119,9	89,6	360	525
130,9	100,6	493	658
140,7	110,4	611	776
150,1	119,8	758	923



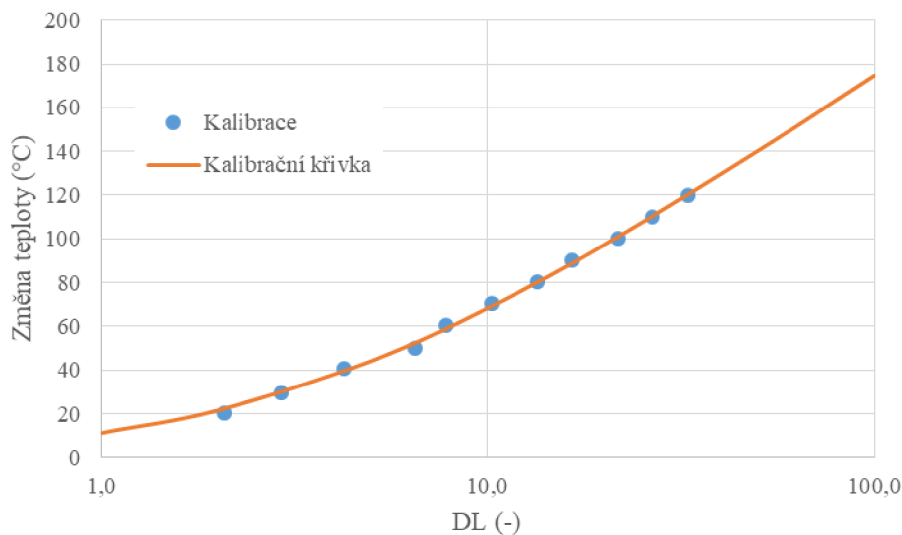
Obr. 4.5 Kalibrační křivka kuličky

Určení kalibrační křivky oleje vyžadovalo více kroků než kuličky. Při snímání kontaktu se na snímcích objevovala interference statického kontaktu, která však nebyla žádoucí. Zmíněná interference se eliminovala proložením křivky (viz Obr. 4.6). Následně se křivky posunuly po ose y tak, aby byl počátek v nule, jelikož autor předpokládal nulovou tloušťku oleje u vrchlíku kuličky. Signál, resp. hodnota DL by v tomto místě měla být rovněž nulová. Z těchto hodnot byla stanovena závislost teploty na DL pro zvolený referenční pixel, kdy výsledkem byla křivka vyjadřující závislost DL na teplotě, obdobně jako u kuličky (viz Obr. 4.7).

Tloušťka filmu se nicméně v kontaktu mění, a proto bylo nutné zanést do výpočtu i tento vliv, poněvadž autor předpokládal, že více oleje vyzařuje mnohem více než jeho menší objem při stejné teplotě. Z profilu kontaktu, jenž se určí pomocí kolorimetrické interferometrie na začátku kalibrace, byla určena maxima a minima interference, ze kterých pomocí vlnové délky, fázového posunu a indexu lomu autor spočítal tloušťku. Těmito daty byla následně proložena křivka, která tvořila profil Hertzova kontaktu. Z této závislosti autor dopočítal tloušťku pro referenční pixel. Při stanovení teploty byla posléze referenční tloušťka podělena tloušťkou stanovenou při experimentu, tím autor získal přepočtení koeficient, který kompenzoval vliv tloušťky. Pro měření teploty povrchu disku byl využit safírový disk s chromovou vrstvou, přičemž tento povlak odstínil záření kuličky i oleje a bylo tedy snímáno pouze záření od této vrstvy. Kalibrace byla pak stejná jako u kuličky.



Obr. 4.6 Proložení dat křivkou pomocí softwaru Matlab



Obr. 4.7 Kalibrační křivka pro referenční pixel

4.4 Použité materiály

U obou experimentálních metod byl použit safírový disk od firmy Alkor, přičemž tento materiál byl zvolen jednak z důvodu vyššího modulu pružnosti než u skla, čímž lze dosáhnout vyššího Hertzova kontaktního tlaku. Vlastnosti safíru jsou zároveň blíže k oceli, než je tomu u skla.

Byly použity dva typy safírových disků, kdy pro měření tloušťky byl využit safírový disk, který byl pokryt z jedné strany tenkou vrstvou chromu. V případě měření teploty byl aplikován čistý safírový disk. Jako druhé kontaktní těleso byla zvolena kulička z ložiskové oceli AlSi 52100 (100Cr6). V tabulce Tab. 4.2 jsou uvedeny mechanické a fyzikální vlastnosti použitých materiálů. Při experimentech byl použit základový minerální olej FVA 4, jehož vlastnosti jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.3.

Tab. 4.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti kontaktních těles

Mechanické a fyzikální vlastnosti	Safír Alkor	Ocel AlSi52100 (100Cr6)
Modul pružnosti v tahu (GPa)	335	210
Poissonův poměr (-)	0,25	0,29
Tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	27,21	43
Měrná tepelná kapacita ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	763	490

Tab. 4.3 Vlastnosti použitého oleje

Použitý olej	Viskozita při 20 °C (Pa·s)	Tlakově-viskózní koeficient α při 20 °C (GPa^{-1})	Tepelná vodivost oleje ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
FVA 4 (minerální olej)	1,9	26	0,14

4.5 Vstupní podmínky pro experimenty

Jak vyplývá z cílů práce, byly na základě rešeršní části stanoveny parametry, jež významně ovlivňují tloušťku mazacího filmu a rozložení teploty v kontaktu. Jedná se o teplotu, zatížení, unášivou rychlost a skluz. Tyto parametry byly nadále zkoumány při experimentech, kde se jejich hodnoty měnily. U zatížení byly zvoleny tlaky 0,8 GPa, 1 GPa a 1,2 GPa, které odpovídají zatížení 23 N, 44 N a 76 N. U parametru teploty byly zvoleny tři úrovně, a to 30 °C, 40 °C a 60 °C. Snahou bylo, aby zvolená teplota byla na vstupu do kontaktu i v jeho okolí stejná.

Interval rychlostí byl zvolen s ohledem na tloušťku mazacího filmu vyhodnotitelnou kolorimetrickou interferometrií, kterou lze vyhodnotit v rozmezí 0-800 nm. Dále se musela brát v potaz viskozita oleje při dané teplotě, jelikož při jejím snížení vznikají dimply až při vyšších rychlostech, přičemž pro porovnání vlivu teploty musela být u každého experimentu alespoň jedna rychlost stejná. Zvolené rychlosti jsou uvedeny v tabulce (viz Tab. 4.4). Posledním parametrem je skluz, resp. SRR, který se zvyšoval od čistého valení SRR 0. Byly zvoleny hodnoty SRR 0 - 8.

Tab. 4.4 Tabulka rychlostí experimentu při dané teplotě

30 °C	40 °C	60 °C
0,01 m·s ⁻¹	0,025 m·s ⁻¹	0,06 m·s ⁻¹
0,025 m·s ⁻¹	0,50 m·s ⁻¹	0,1 m·s ⁻¹
0,5 m·s ⁻¹	0,1 m·s ⁻¹	0,15 m·s ⁻¹
0,1 m·s ⁻¹	0,15 m·s ⁻¹	0,2 m·s ⁻¹
0,15 m·s ⁻¹	0,2 m·s ⁻¹	0,4 m·s ⁻¹
0,2 m·s ⁻¹	0,4 m·s ⁻¹	0,6 m·s ⁻¹

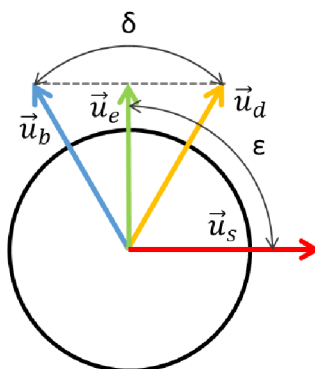
4.5.1 Vektory rychlostí

4.5.1

Jedním z dalších parametrů, který byl zkoumán, je úhel natočení mezi vektory rychlostí. V této diplomové práci byl studován vliv úhlu ε a velikost unášivé rychlosti u_e a skluzové rychlosti u_s . Řídicími parametry se pak staly úhel δ a velikosti vektorů povrchových rychlostí u_d a u_b . Závislost mezi vektory je pak dána vztahy 4.1 a 4.2.

$$|\vec{u}_b| = \frac{|\vec{u}_e|}{2} \cdot \frac{\cos \varepsilon}{\sin \delta} \quad (4.1)$$

$$|\vec{u}_d| = \frac{|\vec{u}_e|}{2} \cdot \left(\sin \varepsilon - \frac{\cos \delta \cdot \cos \varepsilon}{\sin \delta} \right) \quad (4.2)$$



Obr. 4.8 Schéma úhlů mezi vektory

5 VÝSLEDKY

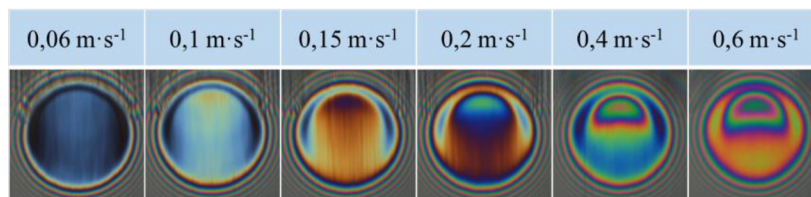
Tato kapitola diplomové práce je zaměřena na vyhodnocení experimentů, které byly provedeny na základě zjištěných poznatků z řešeršní části. První část je věnována vlivu jednotlivých parametrů na tloušťku filmu maziva a chování dimplu v kontaktu, v další části je posléze popsáno rozložení teploty napříč kontaktem.

5.1 Vliv provozních parametrů na tloušťku filmu

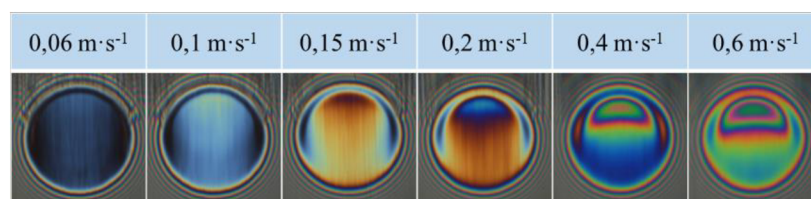
Podle klasické teorie EHD mazání by měl být profil maziva v kontaktu plochý a tvar kontaktu by měl znázorňovat přibližně podkovu. Za vysokých skluzů je ovšem tato teorie porušena, neboť tvoří se dimpl, jak vyplývá z řešerše. Ten je charakteristický deformací plochého profilu a lokálním nárůstem tloušťky maziva. V tomto extrému je lokalizováno i tlakové maximum. Vznik dimplu a jeho chování je ovlivněno několika faktory, kde některé z nich jsou experimentálně zkoumány v této kapitole.

5.1.1 Vliv unášivé rychlosti

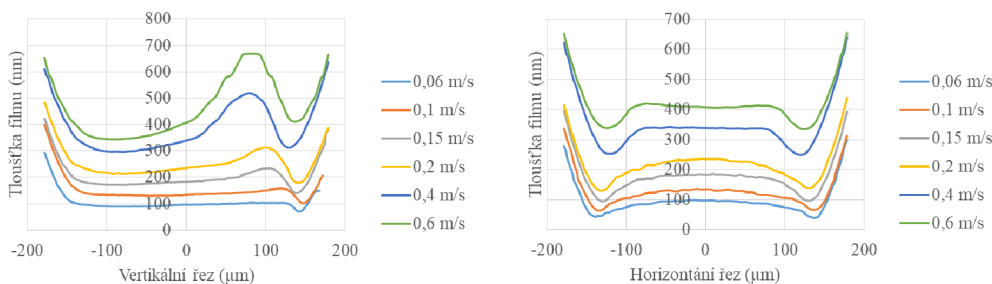
Prvním provozním parametrem, který byl zkoumán, byla unášivá rychlost. Jako vstupní podmínky byly zvoleny skluz SRR 4,83, tlak 1 GPa a 1,2 GPa a teplota 60 °C. Cílem experimentu bylo zjistit, jak se chová kontakt při zvyšující se unášivé rychlosti. Interferogramy kontaktu jsou uvedeny níže na obrázcích (viz Obr. 5.1; Obr. 5.2). Z výsledných profilů pro tlak 1 GPa zobrazených na Obr. 5.3 vyplývá, že při zvyšování rychlosti se začíná deformovat plochý profil střední části kontaktu, a v pravé části kontaktu vzniká dimpl. Velmi malý dimpl je již patrný při rychlosti $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a se zvyšující se rychlostí narůstá i tloušťka maziva v jeho vrcholu. Lze také pozorovat, že se vrchol dimplu posouvá od výstupní oblasti blíže ke středu kontaktu, a také se více ohraničuje. Je i patrné, že posuv dimplu k centrální oblasti ovlivňuje centrální tloušťku maziva. V této oblasti tloušťka narůstá, u profilů v horizontálním řezu můžeme pozorovat zploštění profilu kontaktu při rychlostech $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. U zatížení 1,2 GPa (viz Obr. 5.4) lze pozorovat stejný průběh, jako tomu bylo při zatížení 1 GPa, avšak s tím rozdílem, že se dimple více ohraničuje. Dochází ke strmějšímu nárůstu v jeho vrcholu, což způsobuje pokles tloušťky maziva v centrální oblasti. Lze také pozorovat u profilů v horizontálním řezu, že centrální oblast není tak plochá, obdobně jako u nižšího zatížení.



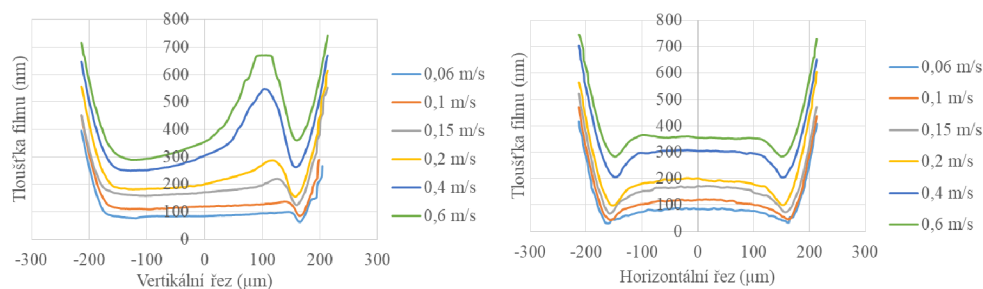
Obr. 5.1 Snímky kontaktu při zvyšující se unášivé rychlosti (SRR 4,83; 1 GPa; 60 °C)



Obr. 5.2 Snímky kontaktu při zvyšující se unášivé rychlosti (SRR 4,83; 1,2 GPa; 60 °C)



Obr. 5.3 Vliv rychlosti na chování dimplu (SRR 4,83; 1 GPa; 60 °C)

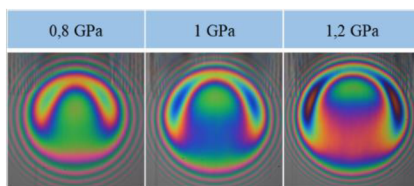


Obr. 5.4 Vliv rychlosti na chování dimplu při vyšším zatížení (SRR 4,83; 1,2 GPa; 60 °C)

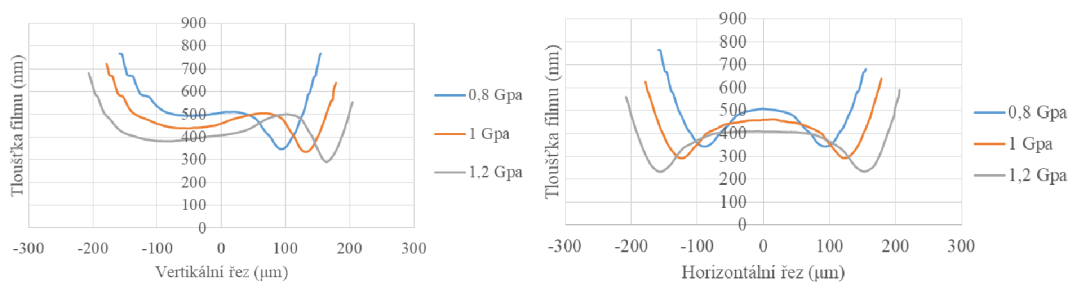
5.1.2 Vliv tlaku

Dalším parametrem, který byl experimentálně zkoumán, byl tlak. Cílem experimentu bylo zjistit, jak zatížení ovlivňuje chování dimplu. Jako vstupní podmínky pro experimenty byla zvolena teplota 30 °C, unášivá rychlost $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a skluz SRR 4,83. Výsledné snímky jsou zobrazeny na Obr. 5.5.

Z výsledných profilů na Obr. 5.6 lze vypožorovat, že dimple je při menším zatížení velice malý až nepatrný a je lokalizován v středové oblasti. Se zvyšujícím se tlakem nastává jeho posun z této oblasti blíže k výstupu kontaktu. Dále se dimple více ohraničuje a dochází k poklesu tloušťky maziva v centrální části, přičemž tloušťka maziva ve vrcholu dimplu se nemění.



Obr. 5.5 Interferogramy kontaktu za různého zatížení (SRR 4,83; $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a 60 °C)

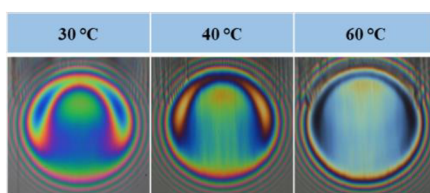


Obr. 5.6 Vliv zatížení na dimpl (SRR 4,83; $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 60 °C)

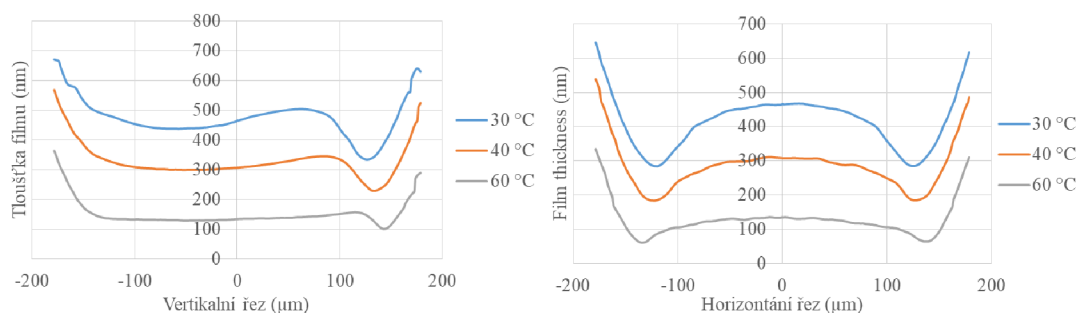
5.1.3 Vliv teploty

Jedním z dalších zkoumaných provozních parametrů byla také teplota kontaktu a vliv na jeho chování. Cílem bylo dosáhnout rovnoměrné teploty v okolí kontaktní oblasti, čehož bylo dosaženo pomocí topných patron umístěných přímo v experimentálním zařízení. Vstupními podmínkami byly zvoleny zatížení 1 GPa, rychlost $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a skluz SRR 4,83. Výsledné interferogramy jsou znázorněny na Obr. 5.7.

Z výsledků vyplývá, že při narůstající teplotě se dimple posouvá blíže k výstupní oblasti kontaktu (viz Obr. 5.8). Zároveň dochází k celkovému poklesu tloušťky a to i ve vrcholu dimplu. Je to způsobeno poklesem viskozity maziva, která se transformuje se změnou teploty.



Obr. 5.7 Snímky kontaktu za různé teploty (SRR 4,83; 1 GPa; $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

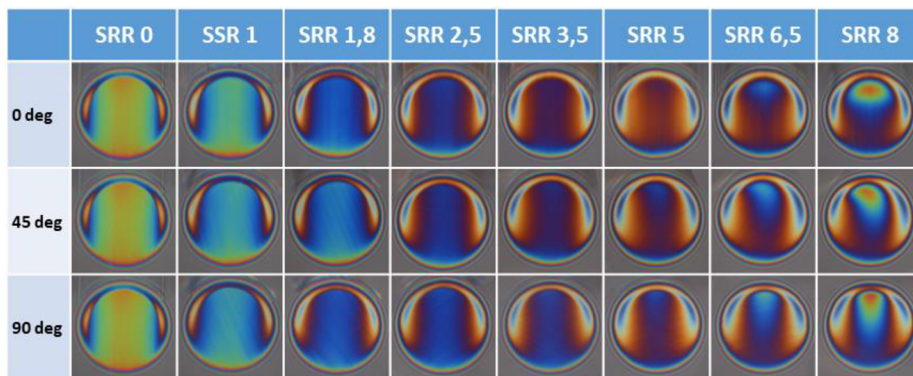


Obr. 5.8 Vliv zatížení na dimple (SRR 4,83; 1 GPa; $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

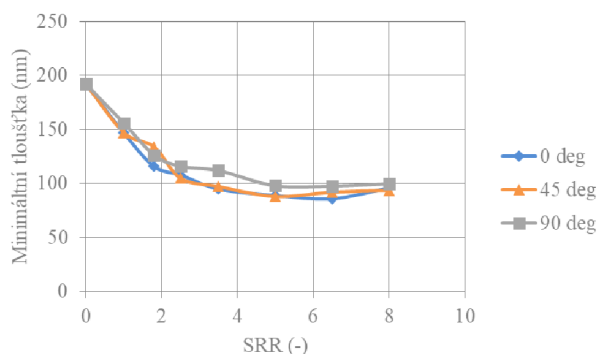
5.1.4 Vliv skluzu

V této kapitole jsou uvedeny výsledky experimentů, které byly zaměřeny na vliv skluzu a změny úhlu ε mezi unášivou a skluzovou rychlostí na minimální tloušťku. Tu je důležité sledovat z důvodu možného poškození součásti, jelikož by film měl zaručit oddělení kontaktních povrchů. Počátečním natočením byl úhel ε nastaven na 0° , následně se změnil na 45° a poté na 90° . U všech případů se postupně zvyšoval skluz z SRR 0 až na SRR 8, při rychlostech $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $150 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Hertzův tlak byl zvolen 1,2 GPa, přičemž daná hodnota je ekvivalentní zatížení 76 N. Teplota na vstupu do kontaktu byla nastavena na 30°C .

Z výsledných interferogramů (viz Obr. 5.9) je patrné, že vznik dimplu je ovlivněn skluzem i rychlostí. Minimální tloušťka v kontaktu klesá se zvyšujícím se skluzem u všech natočení. Za těchto podmínek se dimpl utvářel od SRR 6,5 a úhlu $\varepsilon = 0^\circ$. Při jeho změně byl pozorován vznik dimplu od SRR 5, avšak vliv měl pouze na centrální tloušťku. Na grafu (viz Obr. 5.10) lze pozorovat již zmíněný pokles do skluzu SRR 5 a následnou stagnaci, kdy minimální tloušťka klesla o 48 %.



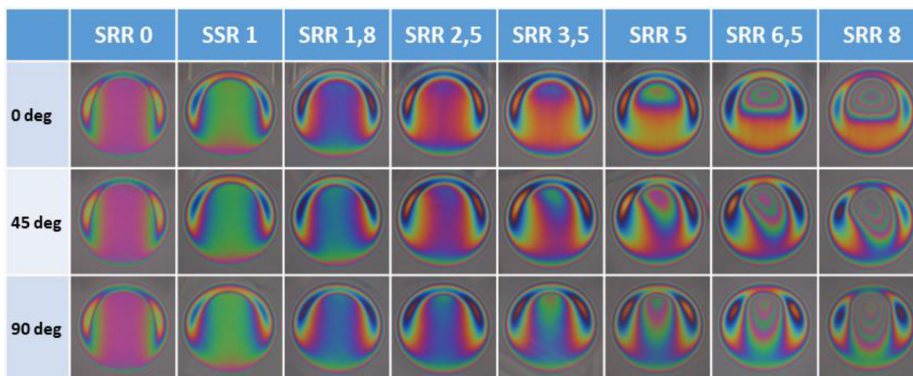
Obr. 5.9 Výsledné interferogramy ($50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; $1,2 \text{ GPa}$; $30 \text{ }^\circ\text{C}$)



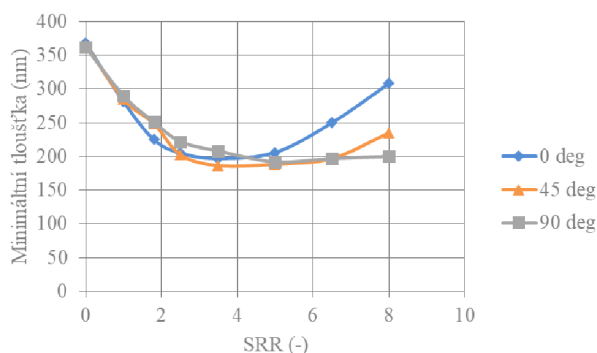
Obr. 5.10 Vliv skluzu na minimální tloušťku ($50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; $1,2 \text{ GPa}$; $30 \text{ }^\circ\text{C}$)

Při zvýšení rychlosti na $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ vznikaly dimply mnohem dříve u všech natočení. Bylo také možné pozorovat změnu v chování minimální tloušťky. U úhlu 90° nedocházelo ke změně trendu, ale pouze k jeho navýšení. Při podmínkách $\varepsilon = 0^\circ$ klesala minimální tloušťka stejně jako u 90° , ale od SRR 4 docházelo k jejímu navýšení. Podobný jev byl pozorován u úhlu 45° , kde ke změně docházelo až od SRR 6,5.

Tato transformace byla způsobena rostoucím dimplem, kdy se zvyšujícím se skluzem rostla i tloušťka v jeho vrcholu. Jak lze vidět z interferogramů na Obr. 5.11, při skluzu SRR 5 a úhlu $\varepsilon = 0^\circ$ je dimpl ohraničený. Následně narůstá a ovlivňuje oblast minimální tloušťky (viz. Obr. 5.12), avšak ta zůstává na vstupu neměnná. Při natočení 45° je minimální tloušťka ovlivněna pouze na jedné straně z důvodu rozdílných vektorů rychlostí kontaktních povrchů. Větší minimální tloušťka je pozorována ve směru pohybu rychlejšího povrchu. U natočení 90° roste dimple pouze ve vertikálním směru, jelikož při této konfiguraci jsou rychlosti povrchů stejné. Dochází tedy k ovlivnění vstupní oblasti do kontaktu a nikoliv oblasti minimální tloušťky. U všech případů klesne tato tloušťka přibližně o 48 %, avšak při změně úhlu na 0° a 45° dochází k zmíněnému nárůstu, kdy na konci je u souběžných vektorů menší oproti čistému valení pouze o 17,5 % a u 45° téměř o 36 %.

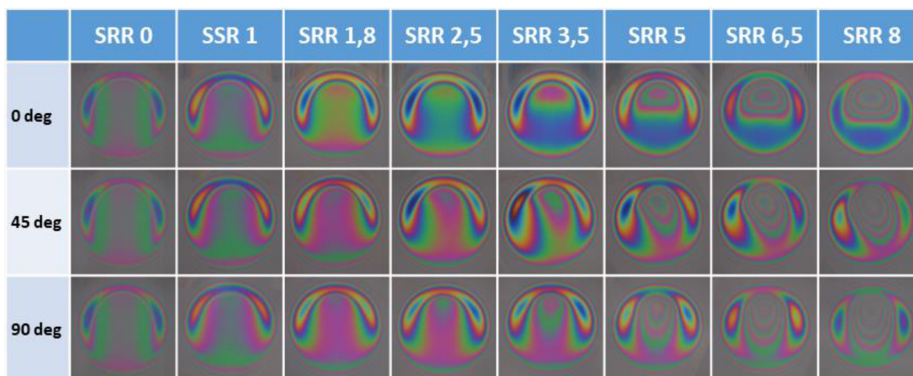


Obr. 5.11 Výsledné interferogramy (100 mm·s⁻¹; 1,2 GPa; 30 °C)

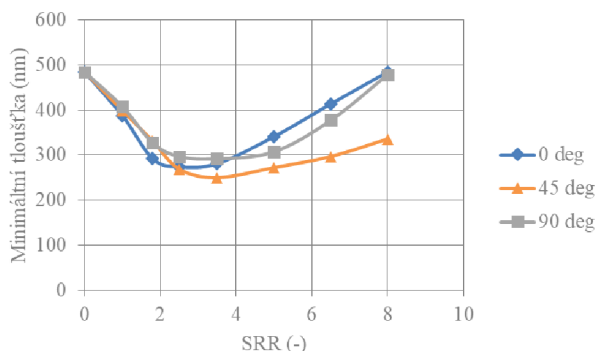


Obr. 5.12 Vliv skluzu na minimální tloušťku (100 mm·s⁻¹; 1,2 GPa; 30 °C)

Poslední experiment byl proveden při rychlosti 150 mm·s⁻¹. Za těchto podmínek dochází ke změně trendu i u úhlu 90°. Jak je patrné z interferogramů na Obr. 5.13, dimpl za těchto podmínek narůstá nejen ve svém vrcholu, ale také se rozšiřuje do oblasti minimální tloušťky. Při natočení 0° a 45° dochází pouze k dřívější změně v trendu (viz Obr. 5.14). Dimpl za těchto podmínek vzniká již při nižších skluzech a dále narůstá. Následně se jeho vrchol přesouvá do centrální oblasti, jak již bylo zjištěno v předešlých kapitolách. Z výsledků je patrné, že minimální tloušťka klesá do skluzu SRR 3,5 a následně dochází k jejímu navýšení. U úhlů 0° a 90° narůstá tato tloušťka až na hodnotu za podmínek čistého valení. Při natočení 45° dochází také k jejímu nárůstu, avšak při skluzu SRR 8 je o skoro o 31 % menší.



Obr. 5.13 Výsledné interferogramy (150 mm·s⁻¹, 1,2 GPa, 30 °C)



Obr. 5.14 Vliv skluzu na minimální tloušťku
(150 mm·s⁻¹, 1,2 GPa, 30 °C)

5.2 Měření teploty v kontaktu

5.2

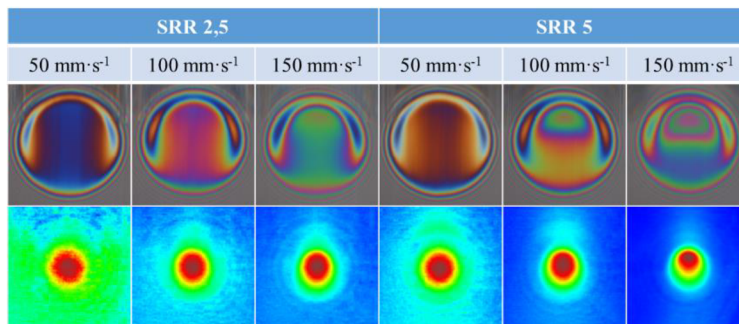
Tato kapitola je věnována mapování teploty v kontaktu za podmínek skluzu. Z již publikovaných prací je známo, že vznik dimplů souvisí s termálními jevy a je spojen s nárůstem teploty v kontaktu. V současné době je publikováno více numerických řešení, která nejsou dostatečně podložena experimentálními výsledky.

Při experimentech byly zkoumány podmínky skluzů SRR 2,5 a 5 při unášivých rychlostech 50 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹ a 150 mm·s⁻¹. Teplota na vstupu do kontaktu byla zvolena pro první řadu experimentů 30 °C a pro druhou 60 °C. Studován byl i vliv změny úhlu mezi vektory rychlostí na rozložení teploty v kontaktu, a to natočení $\varepsilon = 90^\circ$ mezi unášivou a skluzovou složkou rychlosti. V této diplomové práci značí skluz SRR > 0 případ, kdy je při úhlu $\varepsilon = 0^\circ$ kulička rychlejší než disk. U úhlu 90° jsou vektory rychlostí kontaktní těles stejně velké.

5.2.1 Výsledky při 30 °C a 0° natočení

5.2.1

V prvním kroku byly provedeny experimenty při teplotě oleje 30 °C na vstupu do kontaktu a úhlu 0°, kde snímky z IR kamery a interferogramy jsou na Obr. 5.15. Výsledky byly zpracovány do grafů, přičemž na ose y byl vynesena nárůst teploty, který značí, o kolik se teplota kontaktu navýšila oproti teplotě na vstupu. Na ose x je znázorněna poloha, jež představuje vertikální řez kontaktem. V grafech je také zobrazena tloušťka filmu s vedlejší osou y. Na grafech nárůstu teploty povrchů kontaktních těles a oleje (viz Obr. 5.16, Obr. 5.17) lze pozorovat, že při nejnižší rychlosti je maximum nárůstu teploty ve středu kontaktu. Po následném navýšení rychlosti, kdy dochází k tvorbě dimplu, se přesouvá směrem k výstupu kontaktu.

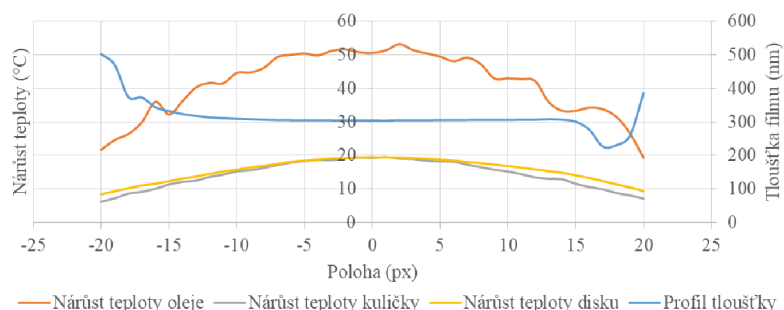


Obr. 5.15 Interferogramy a snímky z IR kamery při použití S-filtru (30 °C, 0°)

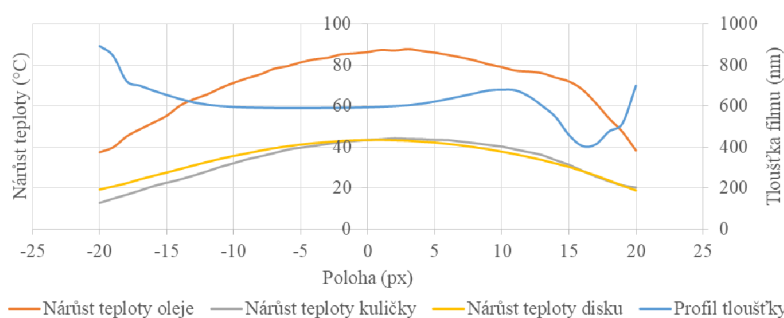
Při rychlosti $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ byla maximální teplota povrchu kuličky i disku pozorována uprostřed kontaktu, kdy profily nárůstu teploty byly symetrické podle středu kontaktu. U nejvyšší rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ byl zjištěn mírný posun maxima ve směru rychlejšího z povrchů, což je v tomto případě kulička. Lze také pozorovat, že u kuličky dochází k mírné změně v profilu, který při této rychlosti není tak symetrický. Maximální teplota oleje nebyla pozorována v místě dimplu, ale ve střední části kontaktu. Nárůst teploty oleje je za těchto podmínek nejvyšší ve středu kontaktu před dimplem.

Po zvýšení skluzu na SRR 5 lze pozorovat větší nárůst teploty u kuličky i disku, stejně tak jako přesun maxima ve směru pohybu příslušného tělesa. Oproti skluzu SRR 2,5 je odchylení výraznější a dochází k vyššímu nárůstu teploty (viz Obr. 5.18). Při vynesení profilu nárůstu teploty oleje do grafu, lze pozorovat pozvolný nárůst a následnou mírnou stagnaci ve středu kontaktu. V místě dimplu ovšem dochází k menšímu nárůstu teploty (viz Obr. 5.19). V této oblasti je i maximální teplotní nárůst povrchu kuličky, který je mnohem výraznější než u předešlého skluzu SRR 2,5. U disku můžeme sledovat, že maximum se posouvá ve směru pohybu povrchu, jako tomu bylo u skluzu SRR 2,5.

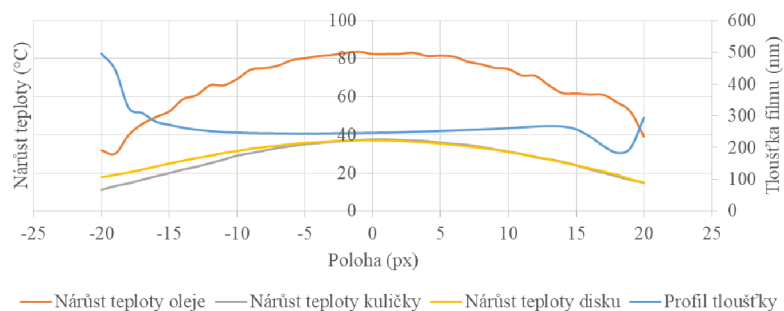
Na základě profilů nárůstu teploty kuličky i disku lze konstatovat, že jsou symetrické, avšak u disku nedochází k takovému posunu maxima. U rychlosti $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ můžeme pozorovat podobný průběh, jako tomu je u nejvyšší rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž v místě dimplu dochází k mírnému poklesu, což je způsobeno kompenzací tloušťky maziva vyplývající z kalibrace. Za podmínek nejnižší rychlosti se profily nárůstu kontaktních povrchů vyrovnávají a jsou téměř totožné. U oleje je pak patrná stejný průběh jako u skluzu SRR 2,5 za situace, kdy dimpl nevzniká.



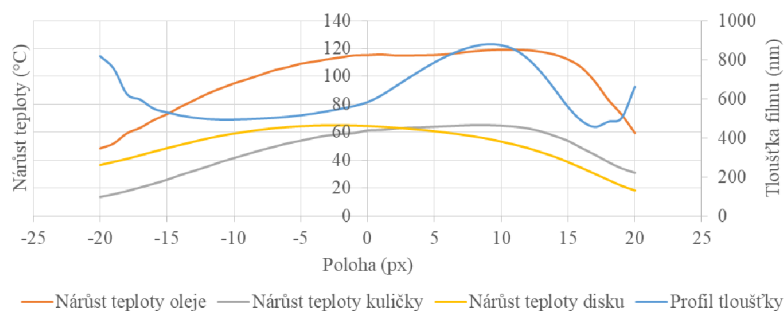
Obr. 5.16 Profily teplotních nárůstů a maziva (SRR 2,5, $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 30 °C , 0°)



Obr. 5.17 Profily teplotních nárůstů a maziva (SRR 2,5, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 30 °C , 0°)

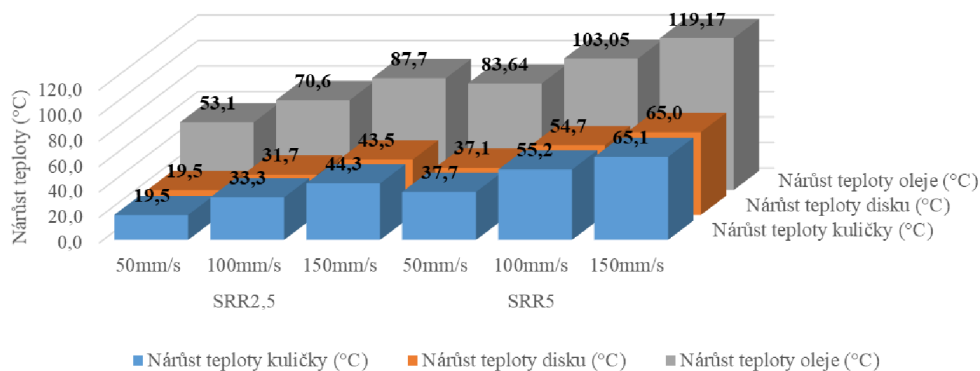


Obr. 5.18 Profily teplotních nárůstů a maziva (SRR 5, 50 mm·s⁻¹, 30 °C, 0°)



Obr. 5.19 Profily teplotních nárůstů a maziva (SRR 5, 150 mm·s⁻¹, 30 °C, 0°)

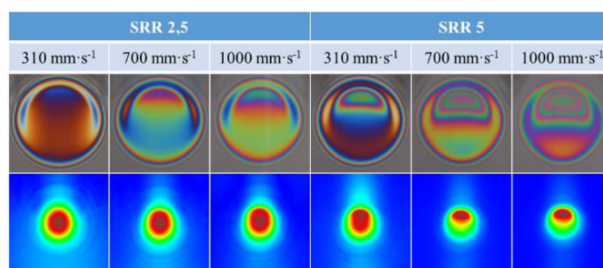
Na grafu níže (viz Obr. 5.20) jsou uvedeny jednotlivé maximální nárůsty teploty pro všechny parametry při úhlu natočení 0°. Pokud srovnáme největší hodnoty při nejnižší rychlosti, pak u skluzu SRR 2,5 je maximální teplota povrchu kuličky i disku 19,5 °C. Při zvýšení skluzu na SRR 5 vzroste teplota povrchu kuličky o 37,7 °C a v případě disku o 36,1 °C. U oleje se jedná o mnohem větší nárůst teploty. U skluzu SRR 2,5 teplota oleje narostla o 53,1 °C a při změně skluzu o 83,6 °C. Největší změnu lze pozorovat při nejvyšší rychlosti 150 mm·s⁻¹, jelikož za daných podmínek je tepelný výkon vlivem tření největší. Za podmínek skluzu SRR 2,5 je nárůst kontaktních povrchů téměř stejný o 44 °C a u oleje o 87,7 °C. Při zvýšení skluzu a tím i skluzové složky rychlosti dochází k navýšení teploty u kuličky a disku o 65 °C. Teplota oleje vzrostla přibližně o 119 °C.



Obr. 5.20 Nárůst teploty u povrchů a oleje při teplotě 30 °C a natočení 0°

5.2.2 Výsledky při 60 °C a 0° natočení

Po provedení experimentů při teplotě oleje 30 °C následovaly experimenty s jeho vyšší teplotou, a to 60 °C. Chování kontaktu při této teplotě bylo zkoumáno z důvodu, že při nižší teplotě vznikaly dimply až při nejvyšších rychlostech, kdy za těchto podmínek lze ještě stanovit tloušťku metodou použitou v této diplomové práci. Dalším důvodem je odlišná tepelná vodivost safírového disku, která klesá s rostoucí teplotou. Z předchozích experimentů (viz. Kap. 5.1.1) je patrné, že při 60 °C vzniká dimpl mnohem dříve a je také mnohem výraznější. Jelikož se zvýšením teploty se změnila i viskozita oleje, bylo nutné stanovit nové rychlosti. Důležité bylo, aby se tloušťky za podmínek čistého valení při teplotách 30 °C a 60 °C shodovaly. Nové rychlosti byly přepočítány podle změny viskozity a následně upraveny podle experimentálních hodnot ze snímků při čistém valení. Viskozita byla spočítána podle vzorců pro daný olej, který publikoval ve své práci P. Gold a kol. [21]. Z 50 mm·s⁻¹ se rychlost zvýšila na 310 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹ na 700 mm·s⁻¹ a 150 mm·s⁻¹ na 1000 mm·s⁻¹. Za těchto podmínek se bohužel nepodařilo změřit teplotu povrchu disku, jelikož při experimentech docházelo k podřetí chromové vrstvy a následnému zkreslení dat.

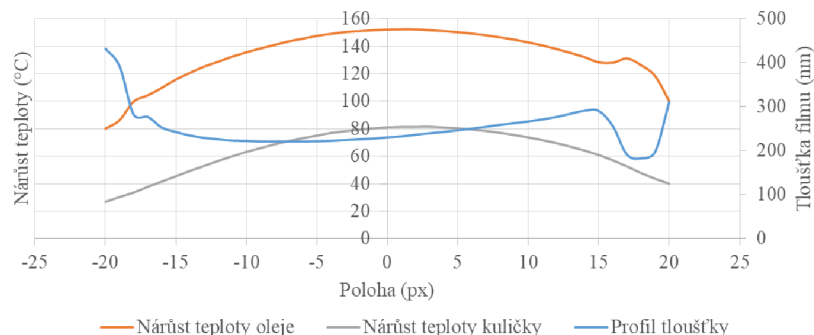


Obr. 5.21 Interferogramy a snímky z IR kamery (60 °C, 0 °)

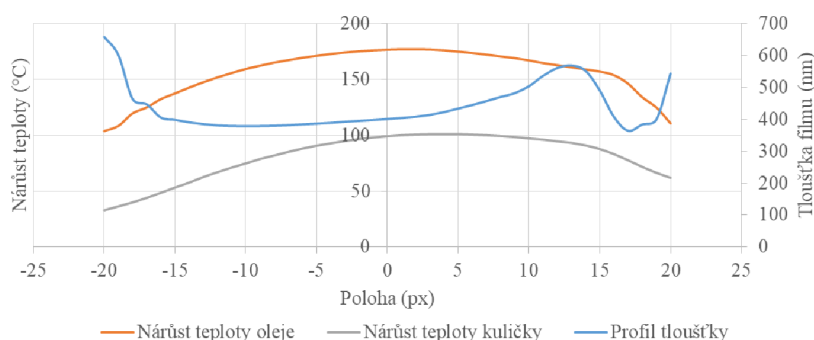
Nejprve byl zkoumán skluz SRR 2,5, kde výsledné interferogramy a snímky z IR kamery jsou uvedeny na obrázku Obr. 5.21. Lze vidět, že již při nejnižší rychlosti dochází ke vzniku malého dimplu. Profily nárůstu teploty jsou znázorněny na obrázcích Obr. 5.22 a Obr. 5.23. U povrchu kuličky je maximum lokalizováno uprostřed kontaktu. Profil nárůstu teploty oleje koresponduje s tvarem profilu teploty kuličky. Při zvýšení rychlosti dochází k posunu maxima kuličky směrem k vrcholu dimplu a pozvolnému klesání teploty na výstupu. Profil nárůstu teploty oleje však zůstává stejný, jen dochází k navýšení teploty. Dále není tak strmý jako u předchozích případů. Pokud porovnáme jednotlivé profily nárůstu teploty při nejvyšších rychlostech mezi 30 °C a 60 °C, lze pozorovat, že dochází ke vzniku mnohem výraznějšího dimplu, ale tloušťka na vstupu do kontaktu je vyšší u 30 °C přibližně o 200 nm.

U vyššího skluzu SRR 5 vzniká dimpl již při nejnižší rychlosti (viz Obr. 5.24). Tloušťka na vstupu do kontaktu je téměř stejná jako u předešlého skluzu, avšak ve vrcholu dimplu vzrostla o 300 nm. Dochází i ke změně v nárůstu teploty, kdy profily při 310 mm·s⁻¹ téměř odpovídají podmínkám 1000 mm·s⁻¹ a skluzu SRR 2,5. Nárůsty teplot se v tomto případě liší jen o několik málo stupňů. Zvýšením rychlosti se profil teploty oleje více narovná a maximum je přibližně ve stejném místě jako vrchol dimplu (viz Obr. 5.25). U kuličky je nárůst teploty na výstupu pozvolnější než u nejnižší rychlosti a maximum koresponduje s vrcholem dimplu. Tloušťka v dimplu přesahuje hodnotu 1 μm při maximální rychlosti, což je navýšení okolo 400 nm oproti

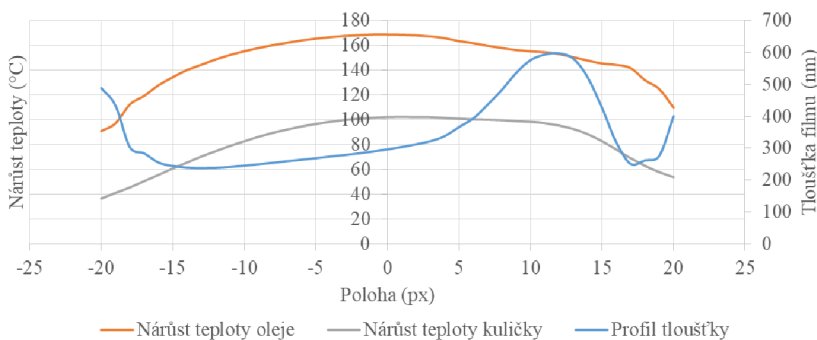
rychlosti 310 mm/s. Ve srovnání s podmínkami při 30 °C je dimple přibližně o 200 nm větší, nicméně tloušťka na vstupu do kontaktu je přibližně o 100 nm nižší.



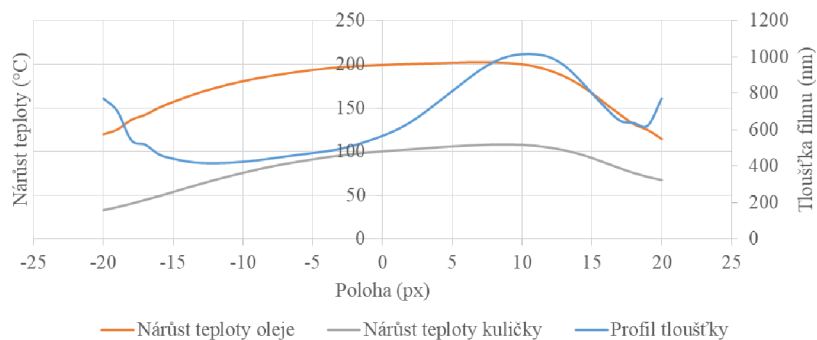
Obr. 5.22 Profily nárůstů a maziva (SRR 2,5, 310 mm·s⁻¹, 60 °C, 0 °)



Obr. 5.23 Profily nárůstů a maziva (SRR 2,5, 1000 mm·s⁻¹, 60 °C, 0 °)

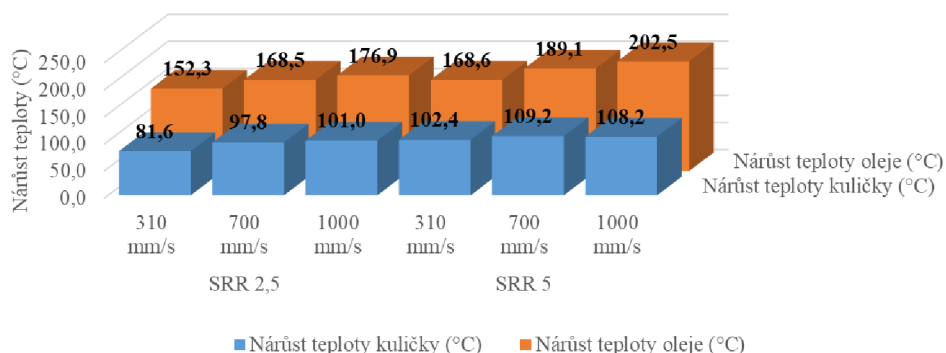


Obr. 5.24 Profily nárůstů a maziva (SRR 5, 310 mm·s⁻¹, 60 °C, 0 °)



Obr. 5.25 Profily nárůstů a maziva (SRR 5, 1000 mm·s⁻¹, 60 °C, 0 °)

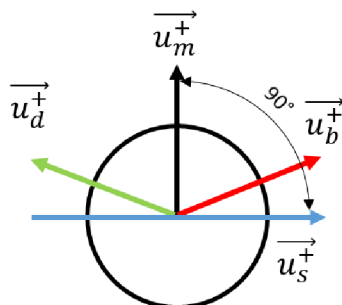
Na sloupcovém grafu níže (viz Obr. 5.26) jsou uvedeny maximální hodnoty nárůstu teploty pro povrch kuličky a olej. U skluzu SRR 2,5 se největší teplota zvyšuje s narůstající rychlostí, nicméně u vyššího skluzu lze pozorovat nárůst mezi $310 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $700 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Následně dochází ke stagnaci mezi $700 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. U oleje k takovému jevu nedochází, patrný je jen menší nárůst mezi rychlostmi. Z výsledků také vyplývá, že maximální hodnoty při skluzu SRR 2,5 a rychlosti $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou srovnatelné s podmínkami SRR 5 a $310 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, kdy tomu odpovídají i profily uvedené v grafech výše.



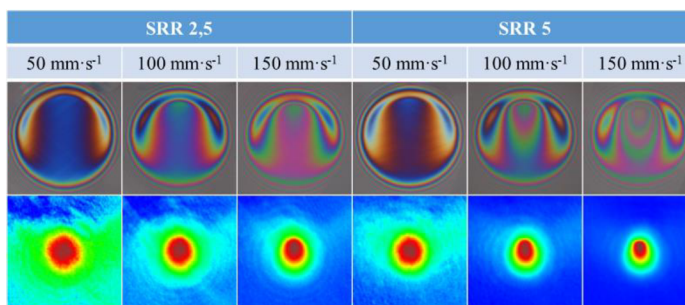
Obr. 5.26 Nárůst teploty u povrchů a oleje při teplotě $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a natočení 0°

5.2.3 Výsledky při $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a 90° natočení

Po předchozích experimentech při natočení 0° , kdy vektory rychlostí povrchů jsou rovnoběžné, byly experimenty zaměřeny na úhel $\varepsilon = 90^\circ$ mezi skluzovou a unášivou rychlostí. Tyto podmínky umožňují lépe posoudit vliv tepelných vlastností kontaktních těles a skluzové složky rychlosti (viz. Obr. 5.27). Výsledné interferogramy jsou znázorněny na Obr. 5.28.



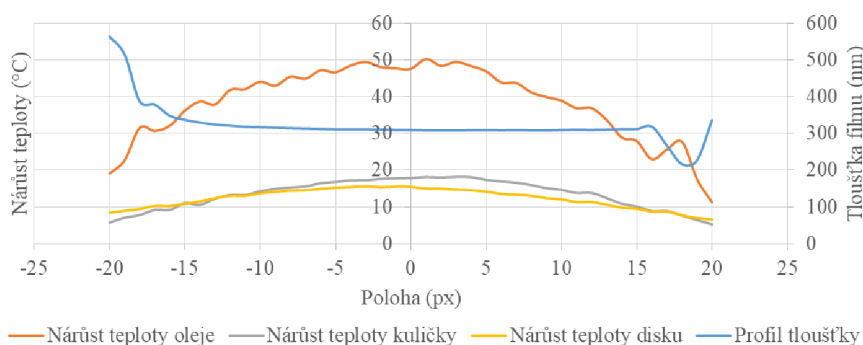
Obr. 5.27 Schéma směrů vektorů rychlostí



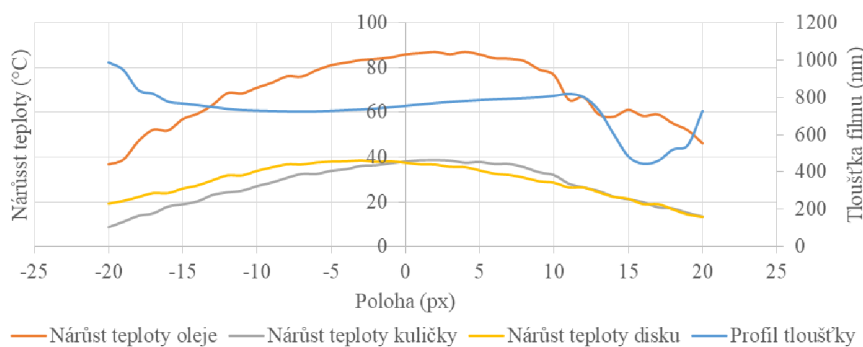
Obr. 5.28 Interferogramy a snímky z IR kamery ($30 \text{ }^\circ\text{C}$, 90°)

Na následujících grafech (viz. Obr. 5.29, Obr. 5.30) jsou znázorněny profily nárůstu teploty kontaktních povrchů a oleje v řezu, který je orientován kladnou osou ve směru unášivé rychlosti. U nejnižší rychlosti $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ můžeme pozorovat průběh, jež je srovnatelný s předchozími výsledky natočení 0° . Maximální nárůst teploty je ve středu kontaktu u obou těles a i oleje. Při zvýšení rychlosti na $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ je průběh teploty oleje stejný jako u nižší rychlosti, ale u disku a kuličky dochází k nepatrnému posunu extrémů ve směru pohybů povrchů. U rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ je patrná změna v průběhu teploty oleje, kdy od vstupu do kontaktu dochází k pozvolnému nárůstu a následné stagnaci za středem kontaktu. Maximum teploty je lokalizováno před dimplem, který nedosahuje za těchto podmínek takové velikosti, jako v předchozích případech. Profily nárůstu teploty povrchů se v tomto případě opět posouvají více od středu kontaktu.

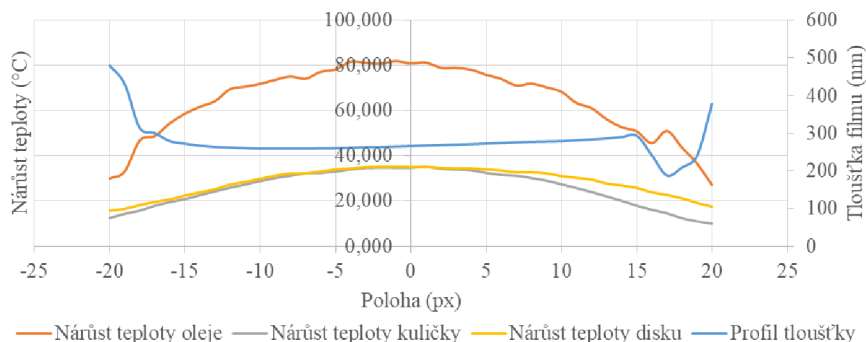
Výsledky experimentu se skluzem SRR 5 jsou při rychlosti $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz Obr. 5.31) totožné s výsledky se stejným skluzem při natočení 0° . Lze je srovnat i s nižším skluzem SRR 2,5 při natočení 0° i 90° . U nejvyšší rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ jsou profily nárůstu teploty povrchů téměř stejné, což můžeme pozorovat také u nižšího skluzu. Rozdílem je větší nárůst teploty za těchto podmínek. Největší diference je v nárůstu teploty oleje a tloušťky maziva, jak lze vidět na obrázku níže (viz. Obr. 5.32). Při nižším skluzu je dimpl oproti tloušťce blízko vstupu přibližně o 100 nm větší, kdežto u skluzu SRR 5 je tento rozdíl markantní. U profilu nárůstu teploty oleje dochází ke stejnému pozvolnému nárůstu jako u nižšího skluzu a následné stagnaci, nicméně vrchol je lokalizován velice blízko dimplu, odkud následuje strmější pokles teploty.



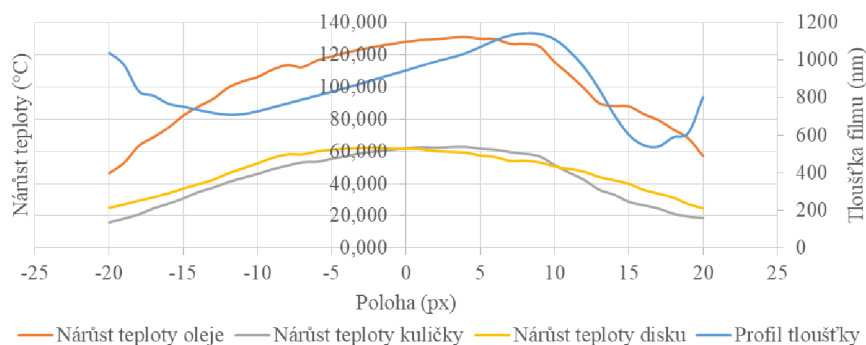
Obr. 5.29 Profily teplotních nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 2,5, $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 30°C , 90°)



Obr. 5.30 Profily teplotního nárůstu a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 2,5, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 30°C , 90°)

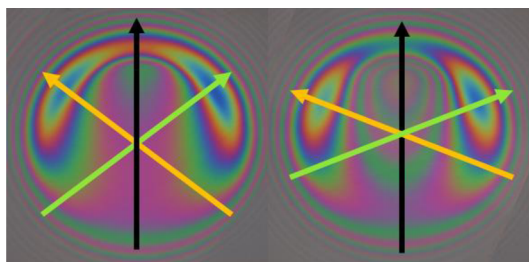


Obr. 5.31 Profily teplotních nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 5, 50 mm·s⁻¹, 30 °C, 90 °)



Obr. 5.32 Profily teplotních nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 5, 150 mm·s⁻¹, 30 °C, 90 °)

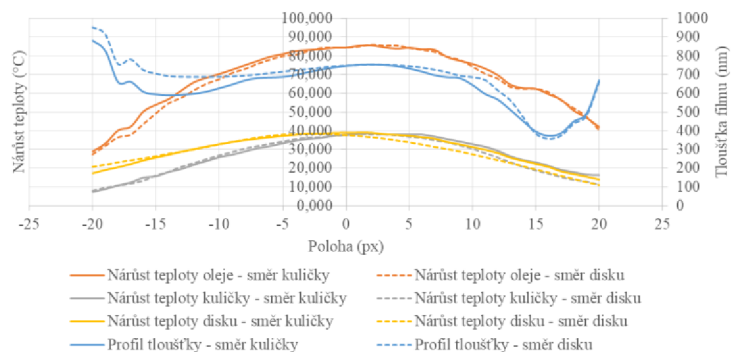
Jelikož se povrchy pohybují stejnou rychlostí, byly vyhodnoceny řezy ve směrech jejich pohybů, které by popřípadě ukázaly změnu profilů nárůstu tepla v důsledku odlišné tepelné vodivosti. Na následujících grafech jsou vyneseny profily teplotního nárůstu povrchů a profil tloušťky ve směru pohybu kuličky a disku. Řezy jsou naznačeny na obrázku níže (viz. Obr. 5.33), kde černou barvou je znázorněna unášivá rychlost, oranžovou barvou směr pohybu disku a zelenou barvou směr pohybu kuličky.



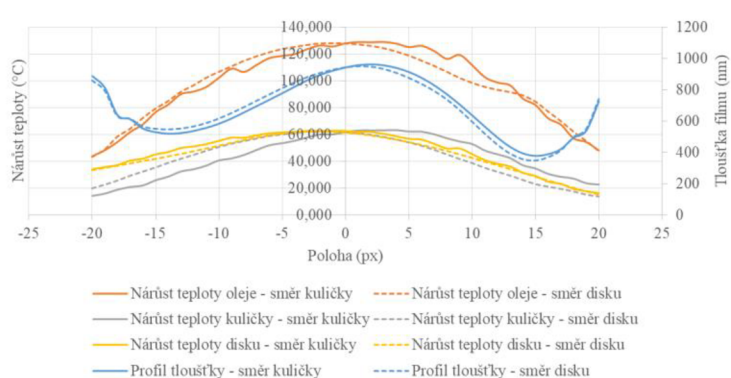
Obr. 5.33 Schéma řezů (vlevo SRR 2,5; vpravo SRR 5)

Z grafu níže lze konstatovat (viz. Obr. 5.34), že u obou směrů není rozdíl v maximální hodnotě nárůstu tepla u oleje i povrchů, liší se pouze v průběhu nárůstu. U kontaktních těles jsou profily přibližně stejné směrem doprava od středu kontaktu, kdežto ve směru kuličky je patrný posun maxima na stranu jejího pohybu. Naopak u disku je maximální teplota lokalizována směrem proti jeho pohybu. Nárůst teploty oleje je v obou směrech téměř totožný. U profilu tloušťky lze pozorovat odchylku na straně vstupu do kontaktu, kdy ve směru disku dochází k jejímu navýšení okolo 100 nm.

V případě vyššího skluzu SRR 5 (viz. Obr. 5.35) lze sledovat téměř analogické chování teploty kontaktních povrchů, jako u skluzu SRR 2,5. V levé části grafu jsou profily nárůstu teploty těles tvarově srovnatelné s předchozími výsledky. Dochází pouze k navýšení okolo 20 °C uprostřed kontaktu. Nárůst teploty oleje je symetrický podle středu kontaktu v obou směrech, kdy odchylka napravo je způsobena zašuměním dat. Při porovnání minimální tloušťky, pak ve směru pohybu kuličky je cca o 50 nm větší než v případě disku.

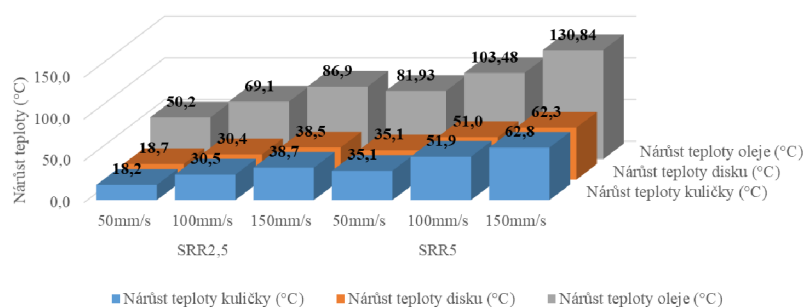


Obr. 5.34 Profily nárůstů a tloušťky v řezech (SRR 2,5, 150 mm·s⁻¹, 30 °C, 90 °)



Obr. 5.35 Profily nárůstů a tloušťky v řezech (SRR 5, 150 mm·s⁻¹, 30 °C, 90 °)

V grafu níže (vit. Obr. 5.36) jsou uvedeny maximální teplotní nárůsty pro úhel natočení $\epsilon = 90^\circ$. Z výsledků vyplývá, že dochází k obdobnému navýšení teploty jako u natočení 0°, přičemž teplotní nárůsty povrchů se liší velice málo, nicméně u předešlého natočení jsou maximální hodnoty vyšší. Jedinou výjimkou je skluz SRR 5 při 150 mm·s⁻¹, kdy teplota oleje je vyšší oproti konfiguraci 0° o necelých 12 °C, avšak maximální hodnoty teploty povrchů jsou nižší.

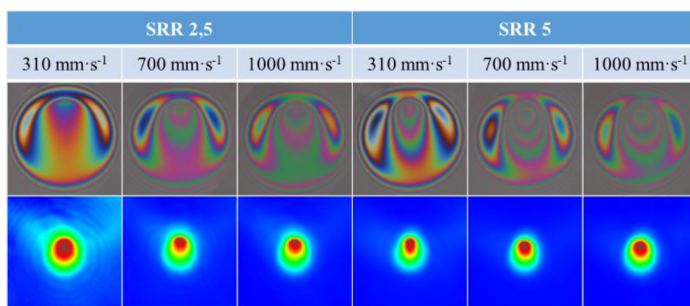


Obr. 5.36 Nárůsty teploty povrchů a oleje při teplotě 30 °C a natočení 90°

5.2.4 Výsledky při 60 °C a 90° natočení

Posledními zkoumanými parametry byl úhel natočení 90° za stejné teploty, jako v podkapitole 5.2.2. Opět byly zvoleny unášivé rychlosti pro 60 °C a jejich směry jsou pro dané skluzu totožné jako v případě nižší teploty. Z experimentů se souběžnými vektory byl vznik dimplu zřejmý již při nejnižší rychlosti. Při změně úhlu mezi vektory by mohl být více patrný vliv rozdílné tepelné vodivosti kontaktních těles.

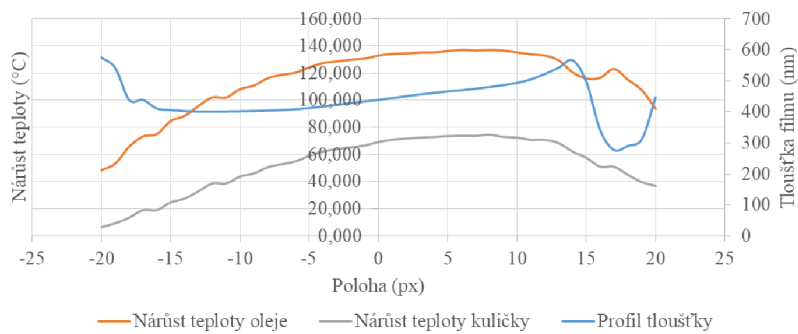
Z výsledných interferogramů (viz Obr. 5.37) je již evidentní, že za těchto podmínek vzniká větší dimpl i u nejnižší rychlosti při skluzu SRR 2,5. Oproti předchozím podmínkám, při stejném i jiném úhlu natočení a teplotě, lze pozorovat nárůst ve vrcholu dimplu i navýšení tloušťky na vstupu do kontaktu. Minimální tloušťka se liší přibližně jen o 20 nm. Podobná situace nastává pro stejnou rychlost u vyššího skluzu, kdy tloušťka dimplu ve vrcholu je téměř 900 nm a jeho tvar zasahuje i do vstupní oblasti kontaktu. Z interferogramů je však zřejmé, že v tomto případě ve směru pohybu disku je minimální tloušťka nižší než ve směru kuličky. U vyšších rychlostí se výrazně liší oproti předchozí teplotě a natočení, jak minimální tloušťka, tak i velikost dimplu.



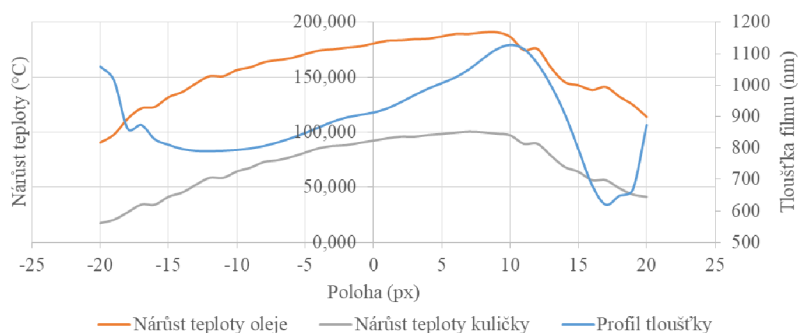
Obr. 5.37 Interferogramy a snímky z IR kamery (60 °C, 90 °)

Z profilů teplotních nárůstů u skluzu SRR 2,5 (viz. Obr. 5.38; Obr. 5.39) je patrné, že u kuličky je maximální teplota jejího povrchu v místě dimplu a při nárůstu rychlosti nedochází ke změně tvaru profilu, ale pouze k jeho celkovému navýšení. Při nejnižší rychlosti 310 mm·s⁻¹ je nárůst teploty oleje pozvolný, nicméně maximální hodnota je posunuta směrem k vrcholu dimplu. Tento jev nebyl pozorován při stejné teplotě a úhlu 0°. Po zvýšení rychlosti dochází k profilově stejnému nárůstu teploty, ale maximum je výraznější a nachází se v místě dimplu. Následně profil klesá v místě konstrikce mnohem strměji než u rychlosti 310 mm·s⁻¹.

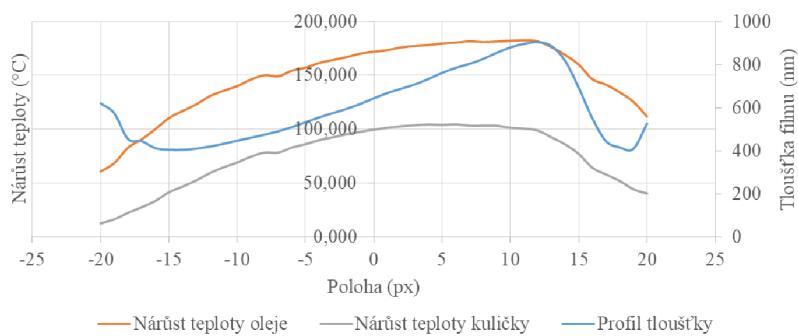
Při zvýšení skluzu dochází hned při nejnižší rychlosti k obdobnému nárůstu teploty oleje, jako tomu je u skluzu SRR 2,5 za podmínek nejvyšší rychlosti (viz Obr. 5.40; Obr. 5.41). U kuličky lze pozorovat, že ve středu kontaktu dochází k vyrovnání profilu nárůstu teploty a maximum není tak zřejmé jako u předešlých parametrů. Navýšením rychlosti pak dochází k ještě většímu zploštění profilu nárůstu teploty a stejný jev se objevuje i u teploty oleje. Z profilu tloušťky se také potvrzuje fakt, že dimpl narůstá jen do určité doby, kdy maximální tloušťka ve vrcholu dimplu se již nemění mezi rychlostmi 700 mm·s⁻¹ a 1000 mm·s⁻¹ a dochází k celkovému nárůstu tloušťky v kontaktu až do doby vyrovnání v celém kontaktu.



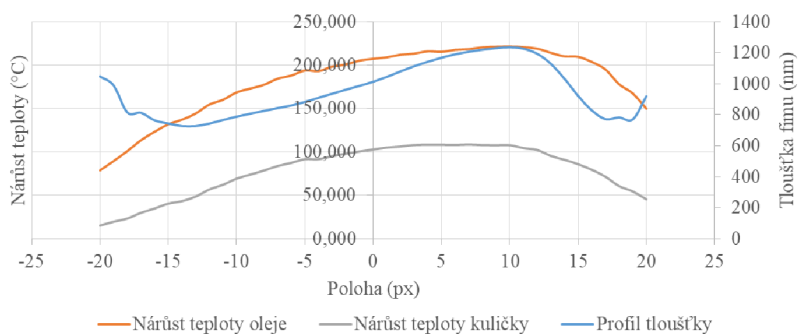
Obr. 5.38 Profily nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 2,5, 310 mm/s, 60 °C, 90 °)



Obr. 5.39 Profily nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 2,5, 1000 mm/s, 60 °C, 90 °)



Obr. 5.40 Profily nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 5, 310 mm/s, 60 °C, 90 °)

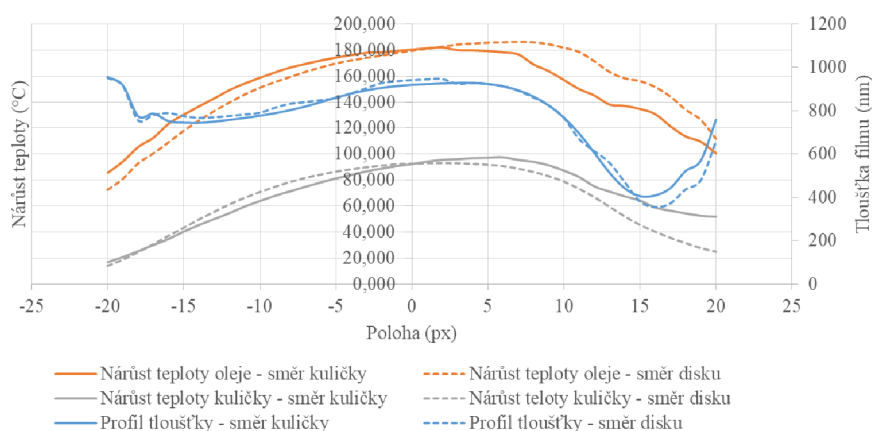


Obr. 5.41 Profily nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 5, 1000 mm/s, 60 °C, 90 °)

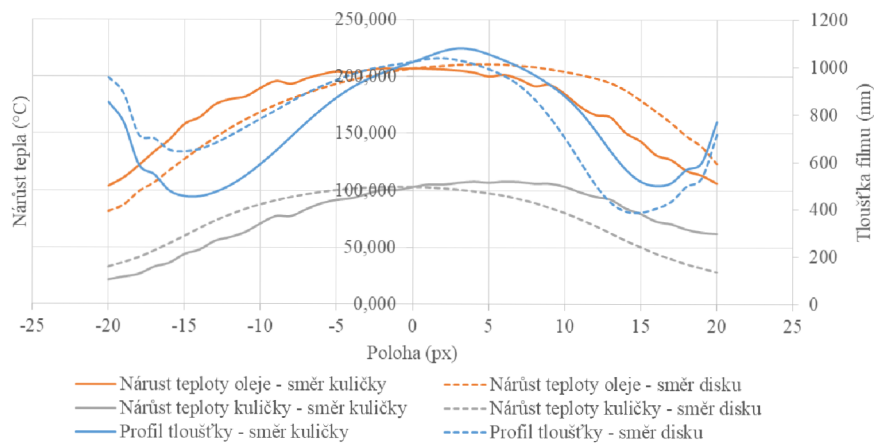
Oproti ostatním podmínkám dochází k velké změně u profilů ve směrech kontaktních těles (viz Obr. 42, Obr. 43), přičemž již z interferogramů byla zřejmá odlišnost v minimální tloušťce. U skluzu SRR 2,5, jsou odchylky v této tloušťce nevýrazné, avšak u profilů teplotního nárůstu oleje a povrchu kuličky lze pozorovat odlišné chování. V řezu ve směru kuličky je maximální teplota jejího povrchu posunuta ve směru jejího pohybu a koresponduje s místem největší tloušťky. Od tohoto místa následně profil pozvolna klesá. Ve směru pohybu disku je ovšem profil kuličky téměř symetrický podle vrcholu maximální tloušťky a na výstupu z kontaktu je strmější. V případě oleje je chování profilu opačné, než je tomu u kuličky. Ve směru kuličky profil od maximální tloušťky klesá, zatímco v druhém řezu teplota oleje od tohoto místa dochází k nárůstu. Pokles nastává až za místem největší tloušťky. Pokud porovnáme nárůst teploty v místě minimální tloušťky, pak v řezu ve směru pohybu kuličky se jedná o nárůst zhruba o 130 °C a u disku přibližně o 150 °C.

Při zvýšení skluzu je patrný rozdíl v průběh profilu nárůstu teploty kuličky i oleje ve všech směrech. Ve směru pohybu kuličky lze pozorovat ještě pozvolnější klesání na výstupu z kontaktu než u předešlého skluzu, rovněž křivka teploty oleje v tomto řezu klesá mnohem dříve. Profil tloušťky také značí, že oblast minimální tloušťky na straně disku se rozrůstá a částečně zasahuje i do místa, kde kulička vstupuje do kontaktu. V řezu ve směru disku dochází k ještě pozdějšímu klesání profilu oleje a ještě k většímu nárůstu teploty v místě minimální tloušťky, kdy na straně disku je teplota přibližně o 30 °C vyšší než na straně kuličky. Z profilu mazacího filmu a interferogramů u skluzu SRR 5 lze pozorovat stočení kontaktu. Tento jev je více patrný u vstupní oblasti kontaktu.

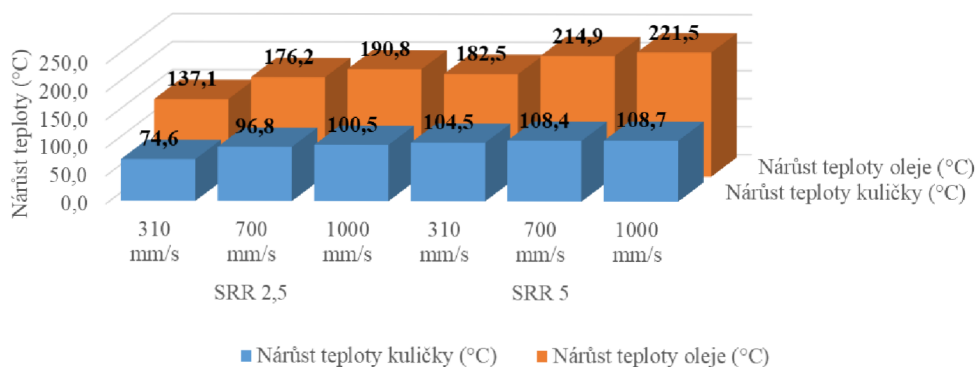
Pokud porovnáme maximální hodnoty nárůstu teploty oleje a kuličky, (viz Obr. 5.44) je zřejmé, že u skluzu SRR 2,5 dochází k nárůstu se zvyšující se rychlostí, avšak v porovnání s podmínkami u natočení 0° jsou hodnoty teploty jejího povrchu o několik málo stupňů nižší. U oleje je nižší teplota pouze u rychlosti 310 mm·s⁻¹. Maximální teploty při vyšším skluzu jsou u povrchu kuličky srovnatelné, nicméně u oleje jsou všechna maxima větší než za stejných podmínek u úhlu natočení 0°. U nejvyšších rychlostí dochází k nárůstu o 190,8 °C u skluzu SRR 2,5 a 221,5 °C za podmínek vyššího skluzu SRR 5.



Obr. 5.42 Profily nárůstů a tloušťky v řezech (SRR 2,5, 1000 mm·s⁻¹, 60 °C, 90 °)



Obr. 5.43 Profily nárůstů a tloušťky v řezech (SRR 5, $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 °)



Obr. 5.44 Nárůsty teploty povrchů a oleje při teplotě $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a natočení 90 °

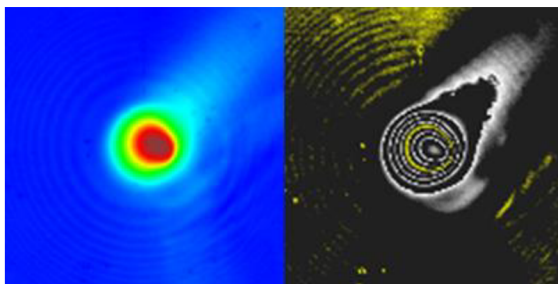
6 DISKUZE

6.1 Možné zdroje chyb

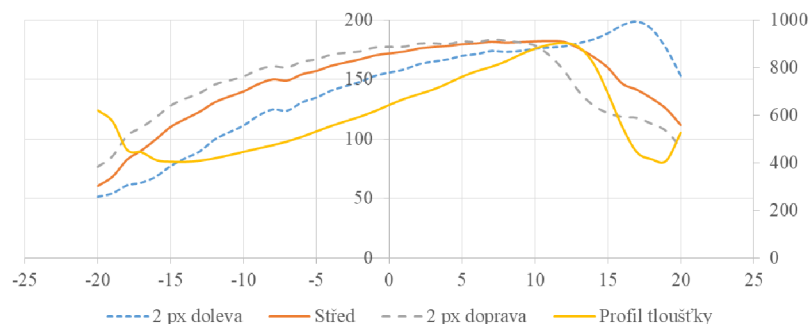
Možným zdrojem chyb při vyhodnocování teploty je správné propojení profilů teploty a tloušťky filmu. Během zpracování dat z měření teploty, bylo zjištěno, že špatné určení středu kontaktu má vliv na profil teplotního nárůstu oleje, jelikož je kompenzována jeho tloušťka. Střed kontaktu je u snímků pořízených IR určován pomocí interference, kterou lze spatřit na klasických snímcích, kde je velikost DL vyjádřena prostřednictvím barev. V případě slabšího signálu interference je možné určit střed s použitím izočar (viz Obr. 6.1). Pokud není střed určen dostatečně přesně, což je v tomto případě odchylka jednoho pixelu, dochází k již zmíněné změně profilu oleje, a to konkrétně v místě vrcholu dimplu a konstrikce, kde se nejvíce projevu kompenzace tloušťky maziva. Jak lze vidět na obrázku níže (viz Obr. 6.2), pokud je střed určen správně, koresponduje profil oleje s profilem tloušťky. V případě vychýlení o více jak dva pixely vpravo od středu kontaktu dojde ke strmému klesání a maximum je před vrcholem dimplu. U přesunu na druhou stranu profil naopak prudce vzroste a maximální teplota se nachází v místě konstrikce. Na profil nárůstu teploty kuličky nemá určení středu významný vliv, jelikož zde nedochází ke kompenzaci tloušťky oleje. Profil zůstává tedy neměnný a dochází pouze k jeho posunu po ose x. Při vyhodnocování profilů z IR kamery bylo postupováno tak, aby tato chyba byla co nejvíce eliminována, avšak reálně se může pohybovat v rozsahu $\pm 5\%$.

Způsob stanovení tloušťky filmu v kontaktu je omezen v rozsahu 0 – 800 nm v rámci automatického vyhodnocení v software Achyles, přičemž je při experimentech dosahováno ve vrcholech dimplu tloušťky přes 1 μm . Vyhodnocení tloušťky v dimplech bylo provedeno ručně na základě barevné škály z kalibrace, která umožňuje určit i vyšší tloušťku. Z interferogramů byla tloušťka určena v několika bodech vrcholu dimplu a následně proložena křivkou. Tloušťka ve vrcholu dimplu byla stanovena několikrát a chyba v jejím vyhodnocení může být $\pm 2\%$.

Dalším významným zdrojem chyb může být určení teploty v kontaktu, jelikož při experimentech byla měřena v blízkosti vstupu do kontaktu. Její změna, i o jeden stupeň, má vliv na viskozitu maziva, respektive i na tloušťku filmu. Snahou bylo prohrát kontakt na požadovanou teplotu, což bylo provedeno za podmínek čistého valení, kdy při přechodu na případ skluzu bylo nutné běžící kontakt zastavit. Za podmínek vysokého skluzu bylo snahou provést experiment co nejrychleji, aby nedocházelo k nárůstu teploty v rezervoáru maziva a tím i ke změně vstupních parametrů.



Obr. 6.1 Interference u snímků z IR kamery (vlevo barevný snímek, vpravo snímek s izočarami)



Obr. 6.2 Vliv určení středu kontaktu na profil oleje (SRR5, 50 mm/s, 60 °C, 90 °)

6.2 Vliv provozních parametrů

6.2

Výsledky vlivu unášivé rychlosti a zatížení souhlasí s již dříve zjištěnými [22]. U vlivu skluzu na centrální tloušťku vyplývají stejné závěry, jako u Omasty [23], který zkoumal vliv skluzu na centrální tloušťku za menšího zatížení a rychlostí. V této práci byl zkoumán vliv skluzu na minimální tloušťku kontaktu i při různých úhlech natočení, do výše skluzu SRR 8, avšak Omasta [22] jej zkoumal pouze do výše SRR 4,83. Z dosažených výsledků lze učinit závěr, že při nejnižší rychlosti minimální tloušťka klesá se zvyšujícím se skluzem, od skluzu SRR 5 již nadále neklesá a profil se narovná (viz Obr. 5.11). Následné zvýšení rychlosti způsobuje dřívější vznik dimplu a také změnu chování profilu u všech natočení, kdy dochází k takovému nárůstu minimální tloušťky, která je srovnatelná s minimální tloušťkou za podmínek čistého valení.

Tento jev je způsoben nárůstem dimplu, jenž je patrný z výsledných interferogramů (viz Obr. 5.12; Obr. 5.14; Obr. 5.16). U natočení 0° dochází k dřívějšímu nárůstu z důvodu růstu dimplu směrem k této oblasti, zatímco u natočení 45° a 90° je dimpl více protáhlý a do oblasti minimální tloušťky zasahuje až při vyšších rychlostech.

6.3 Distribuce teploty v kontaktu

6.3

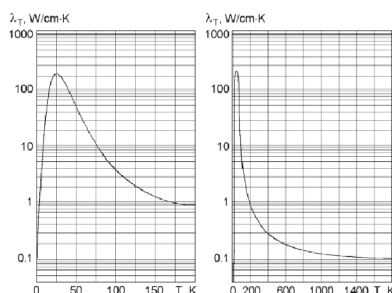
V současné době je vznik dimplů nejvíce spojován s mechanismem teplotně-viskozitního klínu. Tato teorie uvažuje generování tepla ve středu kontaktu a tloušťky filmu. Těleso s nižší tepelnou vodivostí nebo rychlostí následně odvádí méně tepla, které se akumuluje u tohoto povrchu. V důsledku toho klesá viskozita v tomto místě, zatímco u druhého kontaktního povrchu je viskozita vyšší. Následkem je tedy fakt, že jeden povrch unáší maziva o nižší viskozitě proti mazivu o viskozitě vyšší, a tím vzniká pomyslný klín. Mezi toky pak dochází ke vzniku lokálního tlakového maxima, jež ovlivňuje jednak tloušťku filmu a také deformace kontaktních těles.

Další teorií, kterou je nutné brát v potaz, je mechanismus vzniku dimplů spojený s limitním smykovým napětím neboli „*plug flow model*“ [1, 9], který uvažuje konstantní tok solidifikovaného maziva napříč kontaktem a vznik skluzových rovin v těsné blízkosti kontaktních povrchů.

U experimentů měření teploty při ambientní teplotě 30 °C nebyl pozorován žádný velký nárůst teploty v místě vzniku dimplu. Maximum bylo lokalizováno ve středu kontaktu a teplotní nárůsty povrchů byly symetrické podle středu kontaktu. Také

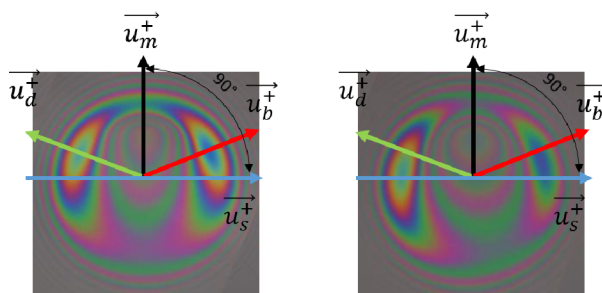
experimenty s natočením vektorů rychlostí 90° nepoukázaly na rozdílnou tepelnou vodivost povrchů. U skluzu SRR 5 a rychlosti 150 mm/s je nepatrná změna v profilu teplotního nárůstu oleje, ale v řezech ve směrech pohybů kontaktních těles jsou průběhy teploty téměř shodné.

Rozdíl nastal u experimentů za vyšší teploty 60°C , kdy je již z interferogramů patrná nesymetričnost minimálních tloušťek hlavně u natočení 90° . Tyto výsledky jsou srovnatelné s výsledky Omasty [22, 23], který použil podobné mazivo FVA3. I profily nárůstu teploty ukazují na nesymetričnost, jelikož teplota v místě minimální tloušťky na straně disku je vyšší než u kuličky, a tím je v toto místě nižší viskozita oleje. V daném případě tento jev ovlivňuje i změna tepelné vodivosti safíru, která se snižuje s rostoucí teplotou (viz Obr. 6.3) [24]. Profil teplotního nárůstu disku nebyl změřen z důvodu poničení chromové vrstvy za těchto podmínek.

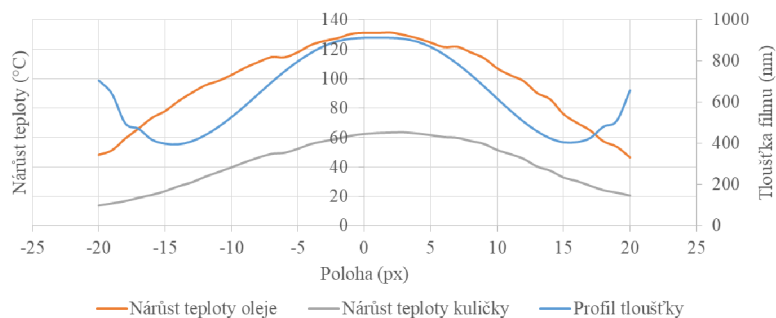


Obr. 6.3 Závislost tepelné vodivosti safíru na teplotě (vlevo nízké teploty, vpravo vysoké teploty)[24]

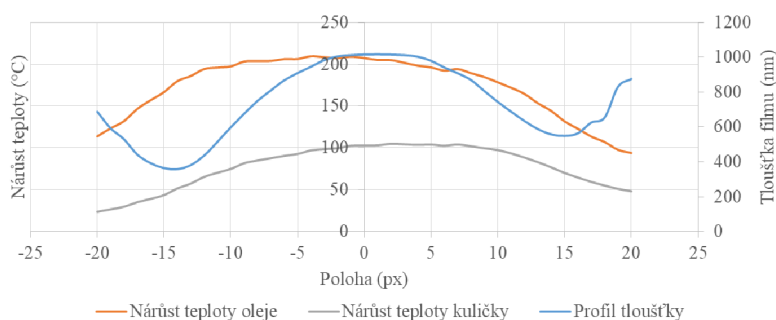
V rámci této diplomové práce byly vyhodnoceny nárůsty teploty povrchu kuličky, teploty oleje, a také tloušťka maziva v řezu ve směru skluzové rychlosti, který by poukázal na vliv tepelného toku mazivem. Na Obr. 6.4 jsou zobrazeny výsledné interferogramy za podmínek skluzu SRR 5, teploty 30°C a 60°C . Při vyšší teplotě je již z interferogramů patrné, že je tloušťka maziva v kontaktu nesymetrická. Ještě více je to patrné při porovnání profilů nárůstu teploty (viz Obr. 6.5; Obr. 6.6). U podmínek teploty 30°C je tloušťka filmu symetrická podle středu kontaktu a i profil nárůstu teploty oleje. U kuličky lze pozorovat nepatrný posun od středu kontaktu. Při vyšší teplotě 60°C je tloušťka nesymetrická a v místě minimální tloušťky se liší téměř o 200 nm. Ke změně dochází také u profilu nárůstu teploty oleje, kde je zřejmé, že v místě nižší tloušťky je vyšší teplota zhruba o 40°C , což významně ovlivňuje viskozitu v daném místě. Lze tedy konstatovat, že v kontaktu dochází k určitému tepelnému toku u obou teplot. Při teplotě 60°C je vliv tepelného toku výraznější z důvodu poklesu tepelné vodivosti safíru. Tento jev následně ovlivňuje odvod tepla z kontaktu a tím i tloušťku mazacího filmu.



Obr. 6.4 Interferogramy posuzované na vliv tepelného toku SRR 5, 90° (vlevo 30°C , 150 mm/s; vpravo 60°C , 1000 mm/s)



Obr. 6.5 Profily nárůstu tepla ve směru skluzové rychlosti (SRR 5, 30 °C, 90°, 150 mm/s)



Obr. 6.6 Profily nárůstu tepla ve směru skluzové rychlosti (SRR 5, 60 °C, 90°, 1000 mm/s)

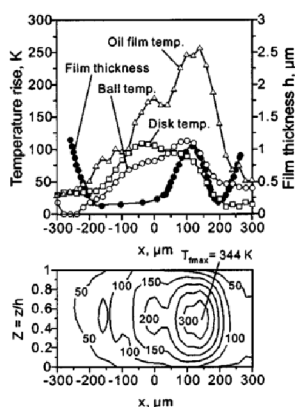
Při porovnání s již publikovanými výsledky od Nakahary [6] nebo Yagihio [7] lze pozorovat srovnatelný profil tloušťky maziva za podmínek vyššího skluzu SRR 8, tlaku 0,97 GPa, rychlosti 250 mm/s a v neposlední řadě také parafinového oleje P100. Za těchto podmínek dosahuje dimpl ve svém vrcholu kolem 1 μm a centrální tloušťka přibližně 400 nm. U nárůstu teploty povrchu kuličky koresponduje maximum s vrcholem dimplu. Maximální nárůst teploty disku je stejný jako u kuličky s tím rozdílem, že maximum je orientované ve směru pohybu disku. Obdobných výsledků bylo dosaženo i v této diplomové práci, kdy nárůst teploty povrchů jsou stejné a maximum se posouvá ve směru pohybu daného tělesa se zvyšujícím se skluzem a rychlostí. Výsledky se ovšem neshodují s nárůstem teploty oleje. U publikovaných výsledků dochází k enormnímu nárůstu teploty v místě dimplu a to až o 344 K. V této diplomové práci však daný jev nebyl pozorován. Rozdílem může být zahrnutí tloušťky mazacího filmu, jelikož autoři uvádí, že z kalibrace vyplývá parabolická závislost mezi tloušťkou a teplotou. Při vyhodnocování to znamená, že v místě dimplu dochází k navýšení signálu z důvodu přítomnosti většího objemu maziva. Z kalibrace provedené autorem však vyplývá hyperbolická křivka závislosti tloušťky maziva na DL, která znamená redukci signálu v místě dimplu. Vyplývá to z faktu, že pokud jsou měřeny různé objemy maziva o stejné teplotě, větší objem září více než menší, což vede ke zkreslení signálu.

Naopak obdobné výsledky jsou pozorovány u průběhu profilů nárůstu teploty kontaktních povrchů těles. V porovnání s výsledky při teplotě 30 °C (viz Obr. 5.19) jsou profily stejně symetrické podle středu kontaktu. Maximální hodnoty teplot u povrchů jsou ve zmíněné publikaci téměř totožné. Z výsledků v této diplomové práci vyplývá stejný závěr, avšak teplota není tak vysoká v důsledku nižší rychlosti povrchů a skluzu.

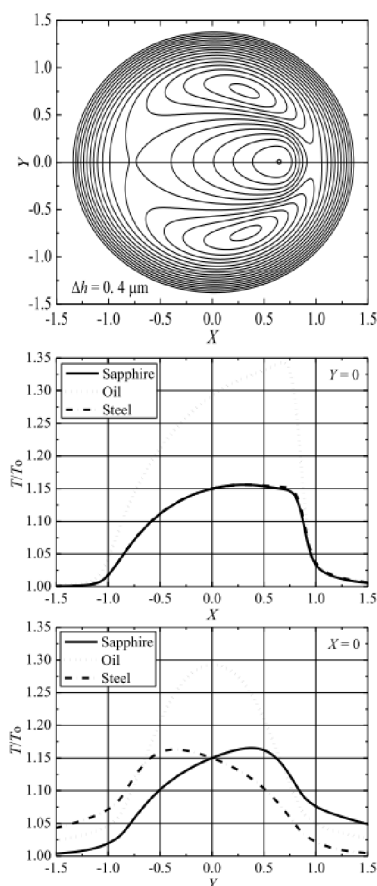
Při porovnání práce Bruyera [12], který se zabýval ve své publikaci numerickou simulací liniového kontaktu pomocí Navier-stokesových rovnic, je patrná shoda výsledků za podmínek úhlu $\varepsilon = 0^\circ$. Publikované výsledky poukazují na pozvolný nárůst teploty v oleji, kdy maximum není lokalizováno v místě vrcholu dimplu ale ve středu kontaktu. Stejných výsledků bylo dosaženo v této diplomové práci při teplotě 30°C . Vznik dimplu je autorem publikace vysvětlen teorií teplotně-viskozitního klínu na základě analýzy gradientů viskozity, tlaku a teplot oleje a kontaktních povrchů. Zjištěné výsledky se shodují s publikovanými výsledky v tom, že teplo je generované uprostřed kontaktu, kde dochází k poklesu viskozity a také ke vzniku skluzové roviny.

Výsledky se shodují i s numerickými výsledky Kanety M. a kol. [25], kteří se zaměřili na numerické simulace kontaktu při natočení $\varepsilon = 90^\circ$, kde zahrnuli i vliv změny tepelné vodivosti kontaktních těles. Autoři použili mazivo FVA 3, které je podobné mazivu použité autorem této diplomové práce FVA 4, nicméně je možné výsledky kvalitativně porovnat. Lze pozorovat, že odpovídá tvar dimplu i kontaktu. Také profil nárůstu teploty povrchu kuličky odpovídá výsledkům této diplomové práce. Rozdíl je v hodnotě nárůstu teploty, což lze vysvětlit vyšší rychlostí u experimentů. Profil nárůstu teploty oleje je u numerických výsledků strmější a dochází také k výraznějšímu nárůstu v místě vrcholu dimplu, jelikož do výpočtu vstupuje tlak, který je v tomto místě maximální. Autorem nebyl tento jev pozorován, avšak lze říci, že průběh nárůstu teploty oleje mimo vrchol dimplu je srovnatelný.

Závěrem lze konstatovat, že chování kontaktu a vznik dimplu je spojen s tepelným tokem, což odpovídá teorii teplotně-viskozitního klínu. U výsledků při teplotě 30°C lze také pozorovat vznik dimplu a symetrický tvar kontaktu. V tomto případě by zjištěná data poukazovala na vliv tepelného toku, který ovšem se v těchto případech projevu pouze na profilu nárůstu teploty oleje. Výsledky za vyšší teploty korespondují se současnou teorií teplotně-viskozitního klínu, avšak nelze ani vyvrátit teorii limitního smykového napětí.



Obr. 6.7 Profily nárůstu teplot
(SRR 8; 250 mm/s; 0,97 GPa; 23°C) [6]

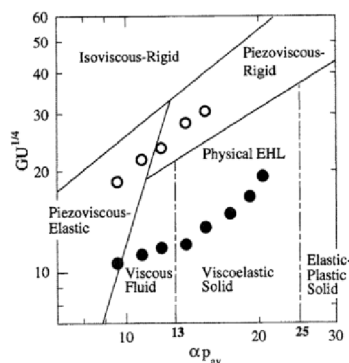


Obr. 6.8 Mapa tloušťky kontaktu a nárůsty teploty oleje a kontaktních povrchů
(1,1 GPa; 240 mm/s; 23 °C)

6.4 Oblast výskytu dimplů

6.4

Z předchozích experimentů bylo zjištěno, jak se kontakt chová při různých provozních parametrech. Kaneta [1, 8] ve svých pracích publikoval grafy, které znázorňovali vznik dimplu. Jedním grafem byla závislost rychlosti kuličky na rychlosti disku, kde zkoumal vznik dimplu při různých podmínkách. V jiné své publikaci zanesl data vzniku dimplu do mapy režimů, ze které vyplynulo, že se dimply vyskytují v piezoviskozitním režimu.



Obr. 6.9 Vznik dimplů v piezoviskozitním režimu pro olej
ST100[1]

V této diplomové práci je však snahou vytvořit graf, kde by bylo možné na základě vstupních parametrů určit, kdy dimpl nastává. Pro vytvoření takového grafu byly zvoleny dva parametry, a to tepelně korekční faktor C_T (5.1) a bezrozměrný parametr tepelného zatížení L (5.2), které formuloval Gupta [26]. Oba tyto parametry se používají při stanovení tloušťky maziva u kontaktů, jež nelze považovat za izotermické. Kontakt lze považovat za izotermický, pokud hodnota bezrozměrného parametru zatížení L je menší než 0,1, jak uvádí ve své práci Wilson [27]. Experimenty provedené autorem, spadají za zvolených podmínek do kategorie izotermálních. Jelikož je vznik dimplu spojen právě s termálními jevy, byl zvolen tento postup.

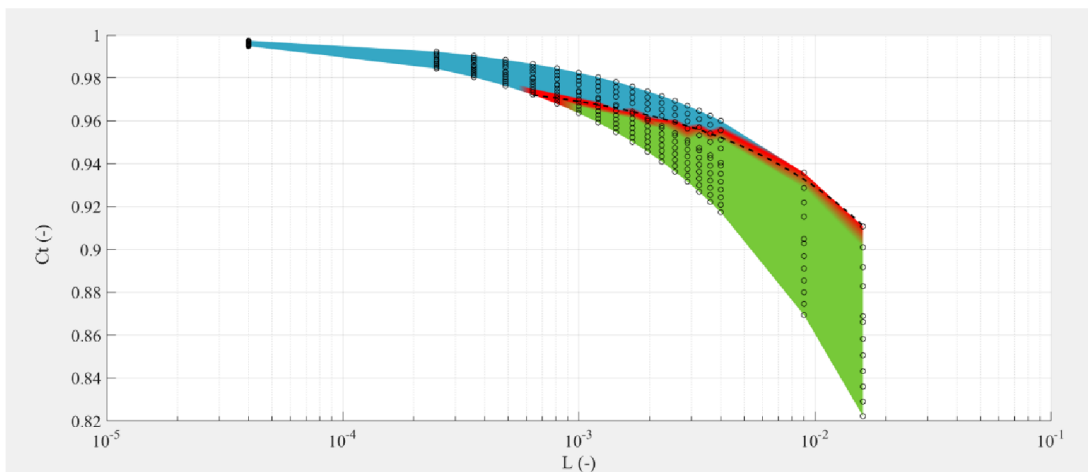
Vstupními daty při vytváření grafu byly experimenty při skluzech SRR 2,5 – 8. Samotný vznik dimplu byl zjištěn experimentálně autorem této diplomové práce na základně změny profilu tloušťky mazacího filmu. Parametr tepelného zatížení L byl spočítán pro každou jednotlivou rychlost a následně byly data vyneseny na osu x v logaritmickém měřítku. Na ose y jsou uvedeny data korekčně tepelné faktoru C_T . V grafu Obr. 6.10 je modrou barvou zobrazena oblast, kdy dimply nevznikají, červenou barvou oblast přechodu, kdy dimpl nevzniká nebo se začíná objevovat a zelenou barvou jsou znázorněna data, u kterých lze s jistotou určit vznik dimplu. Hraniční oblast pak tvoří červená barva.

$$C_T = \frac{1 - 13,2 \cdot \frac{\rho_0}{E} \cdot L^{0,42}}{1 + 0,213 \cdot (1 + 2,23 \cdot S^{0,83}) \cdot L^{0,64}} \quad (5.1)$$

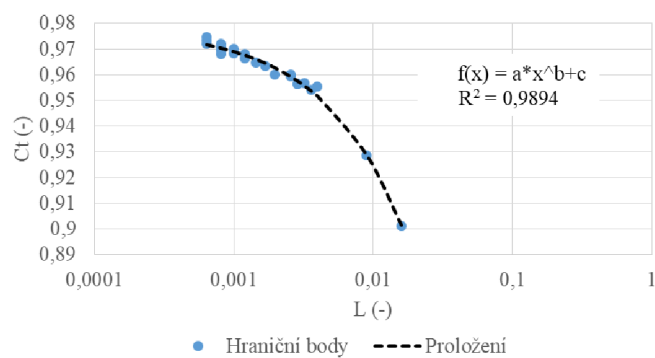
$$L = -\left(\frac{\partial \eta}{\partial T}\right) \cdot \frac{U^2}{k} \quad (5.2)$$

Z experimentálních výsledků vyplývá, že mezi daty je patrná hranice, kdy se dimply začínají objevovat. Pokud se proloží těmito daty křivka, lze dostat trend, který by naznačoval vznik dimplu (viz Obr. 6.11). Nutno však říci, že tuto teorii nelze aplikovat na všechny případy, jelikož každé mazivo má jinou viskozitu a reologii, a také závisí na jeho teplotě. Data v této mapě jsou právě značně ovlivněna viskozitou a také teplotou. Právě změnou těchto hodnot se posouvají data v grafu Obr. 6.10 směrem doleva. Z předchozích výsledků kapitoly 6.3 vyplývá, že změnou rychlosti v závislosti na viskozitě při vyšší teplotě dochází k dřívějšímu vzniku dimplu. Pokud by hranice vzniku dimplu se nezměnila, posun dat doleva se zvyšující se teplotou by odpovídal dřívějšímu vzniku dimplu.

Tento model mapy výskytu dimplů je vhodný pro určení jejich vzniku pro konkrétní olej a teplotu, avšak pro všeobecné podmínky není vhodný. Nedostatkem je absence tepelné vodivosti kontaktních povrchů při výpočtu dat, které souvisí se vznikem dimplů. Kladně lze hodnotit zahrnutí gradientu viskozity a také tepelnou vodivost oleje, jež taktéž ovlivňuje vznik dimplů. Podobná mapa nebyla dosud publikována a vytvořena, nelze ji tedy s jinými daty porovnat.



Obr. 6.10 Graf vzniku dimplu



Obr. 6.11 Hraniční křivka vzniku dimplů

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce obsahuje experimenty zaměřené na popis vlivu jednotlivých provozních parametrů na tloušťku mazacího filmu a distribuci teploty v EHD kontaktu. Větší důraz byl kladen na mapování teploty v kontaktu, kde by výsledky přispěli k objasnění chování EHD kontaktu za podmínek vysokých skluzů. Studovány byly i podmínky změny úhlu mezi skluzovou a unášivou rychlostí.

Dosavadní výsledky poukazyvaly na klesající tendenci minimální tloušťky se zvyšujícím se skluzem. Autorem této diplomové práce bylo zjištěno, že daná skutečnost platí pouze v omezené míře. Od určitého skluzu dochází k navyšování minimální tloušťky, a to i při změně úhlu mezi unášivou a skluzovou rychlostí.

Součástí práce bylo i použití metody infračervené mikroskopie. Pomocí zmíněné technologie byla mapována distribuce teploty v kontaktu. Výsledky souběžných vektorů byly porovnány s již publikovanými experimentálními i numerickými daty. Bylo zjištěno, že se liší spíše kvalitativně než kvantitativně.

Nové výsledky pak přináší mapování teploty u experimentů se změnou úhlu mezi rychlostmi. Při nízké teplotě a rychlosti nebyl pozorován vliv rozdílné tepelné vodivosti povrchů ani vliv skluzové rychlosti. Při vyšší teplotě byl autorem zjištěn vliv tepelného toku na tvar mazacího filmu.

Výsledky, obsažené v této diplomové práci, byly komparovány s aktuálně nejvíce diskutovanou elastohydrodynamickou teorií a doplňují tak již publikovaná experimentální i numerická data.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KANETA, Motohiro. For the Establishment of a New EHL Theory. In: . LYON: ELSEVIER SCIENCE BV, SARA BURGERHARTSTRAAT 25, PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS, 1999, s. 25–36. ISBN 0-444-50267-X. Dostupné z: doi:
- [2] AUSERMAN, V. K., H. S. NAGARAJ, D. M. SANBORN a W O WINER. Infrared Temperature Mapping in Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Lubrication Technology*. 1976, roč. 98, č. 2, s. 236. ISSN 00222305.
- [3] 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*. 2009, roč. 223, č. 8, s. 1165–1177. ISSN 1350-6501.
- [4] LE ROUZIC, Julian a Tom REDDYHOFF. Development of Infrared Microscopy for Measuring Asperity Contact Temperatures. *Journal of Tribology*. 2013, roč. 135, č. 2, s. 021504. ISSN 0742-4787.
- [5] YAGI, K, K KYOGOKU a T NAKAHARA. Experimental Investigation of Effects of Slip Ratio on Elastohydrodynamic Lubrication Film Related to Temperature Distribution in Oil Films. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2006, roč. 220, č. 4, s. 353–363. ISSN 1350-6501.
- [6] NAKAHARA, Tsunamitsu a Kazuyuki YAGI. Influence of temperature distributions in EHL film on its thickness under high slip ratio conditions. *Tribology International*. 2007, roč. 40, č. 4, s. 632–637. ISSN 0301679X.
- [7] YAGI, Kazuyuki, Keiji KYOGOKU a Tsunamitsu NAKAHARA. Relationship Between Temperature Distribution in EHL Film and Dimple Formation. *Journal of Tribology*. 2005, roč. 127, č. 3, s. 658. ISSN 07424787.
- [8] KANETA, M., H. NISHIKAWA, T. KANADA a K. MATSUDA. Abnormal Phenomena Appearing in EHL Contacts. *Journal of Tribology*. 1996, roč. 118, č. 4, s. 886. ISSN 07424787.
- [9] EHRET, P., D. DOWSON a C. M. TAYLOR. On lubricant transport conditions in elastohydrodynamic conjunctions. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998, roč. 454, č. 1971, s. 763–787. ISSN 1364-5021.
- [10] QU, Shiyue, Peiran YANG a Feng GUO. Theoretical investigation on the dimple occurrence in the thermal EHL of simple sliding steel–glass circular contacts. *Tribology International*. 2000, roč. 33, č. 1, s. 59–65. ISSN 0301679X.
- [11] CAMERON, A. The Viscosity Wedge. *A S L E Transactions*. 1958, roč. 1, č. 2, s. 248–253. ISSN 0569-8197.

- [12] BRUYERE, V., N. FILLOT, G.E. MORALES-ESPEJEL a P. VERGNE. Computational fluid dynamics and full elasticity model for sliding line thermal elastohydrodynamic contacts. *Tribology International*. 2012, roč. 46, č. 1, s. 3–13. ISSN 0301679X.
- [13] GUO, Feng, Peiran YANG a Shiyue QU. On the Theory of Thermal Elastohydrodynamic Lubrication at High Slide-Roll Ratios—Circular Glass-Steel Contact Solution at Opposite Sliding. *Journal of Tribology*. 2001, roč. 123, č. 4, s. 816. ISSN 07424787.
- [14] KANETA, M., H. NISHIKAWA, K. KAMEISHI, T. SAKAI a N. OHNO. Effects of Elastic Moduli of Contact Surfaces in Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Tribology*. 1992, roč. 114, č. 1, s. 75. ISSN 07424787.
- [15] ZHANG, Yongbin a Shizhu WEN. An Analysis of Elastohydrodynamic Lubrication with Limiting Shear Stress: Part II — Load Influence. *Tribology Transactions*. 2002, roč. 45, č. 2, s. 211–216. ISSN 1040-2004.
- [16] GUO, F., P. L. WONG, M. GENG a M. KANETA. Occurrence of Wall Slip in Elastohydrodynamic Lubrication Contacts. *Tribology Letters*. 2009, roč. 34, č. 2, s. 103–111. ISSN 1023-8883.
- [17] KŘUPKA, I. Návrh projektu GAČR č. 15-24091S. 2014, Část C1.
- [18] HARTL, M., I KRUPKA a M LISKA. Differential Colorimetry: Tool for Evaluation of Chromatic Interference Patterns. *Optical Engineering*. 1997, roč. 36, č. 9, s. 2384–2391. ISSN 00913286.
- [19] HARTL, M., J. MOLIMARD, I. KŘUPKA, P. VERGNE, M. QUERRY, R. POLIŠČUK a M. LIŠKA. Thin film lubrication study by colorimetric interferometry. *Tribology Series*. 2000, roč. 38, s. 695–704. ISSN 01678922.
- [20] FLIR® SYSTEMS, Inc. *FLIR SC5000 Series Thermal Imaging Cameras - FLIR Infrared*. 2017 [vid. 22. říjen 2017]. Dostupné z: <http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=42577>
- [21] GOLD, P. W., A. SCHMIDT, H. DICKE, J. LOOS a C. ASSMANN. Viscosity–pressure–temperature behaviour of mineral and synthetic oils. *Journal of Synthetic Lubrication*. 2001, roč. 18, č. 1, s. 51–79. ISSN 0265-6582.
- [22] OMASTA, Milan. *Studium utváření elastohydrodynamických mazacích filmů u hypoidních převodů*. Brno, 2013. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování.
- [23] OMASTA, Milan, Ivan KŘUPKA a Martin HARTL. Effect of surface velocity directions on elastohydrodynamic film shape. *Tribology Transactions*. 2013, roč. 56, č. 2, s. 301–309. ISSN 10402004.
- [24] PISHCHIK, Valerian, Leonid A. LYTVYNOV a Elena R. DOBROVINSKAYA. *Sapphire*. Boston, MA: Springer US, 2009. ISBN 978-

0-387-85694-0.

- [25] KANETA, Motohiro a kol. Soukromá komunikace. nedatováno.
- [26] GUPTA, P. K., H. S. CHENG, D. ZHU, N. H. FORSTER a J. B. SCHRAND. Viscoelastic Effects in MIL-L-7808-Part I: Analytical Formulation. *Tribology Transactions*. 1992, roč. 35, č. 2, s. 269–274. ISSN 1040-2004.
- [27] WILSON, W. R. D. a S. SHEU. Effect of Inlet Shear Heating Due to Sliding on Elastohydrodynamic Film Thickness. *Journal of Lubrication Technology*. 1983, roč. 105, č. 2, s. 187. ISSN 00222305.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka Symbol Veličina	Jednotka	Název
C_t	-	Tepelně koreční faktor
E'	GPa	Redukovaný modul pružnosti
G	-	Bezrozměrný parametr char.materiál kontaktní dvojice
IR	-	Infračervená technologie
k_T	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Tepelná vodivost oleje
L	-	Bezrozměrný parametr tepelného zatížení
SRR	-	Poměr skluzu a valení
U	-	Bezrozměrný parametr rychlosti
u_b	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost povrchu kuličky
u_d	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost povrchu disku
u_e / u_m	$m \cdot s^{-1}$	Unášivá rychlost
u_s	$m \cdot s^{-1}$	Skluzová rychlost
α	GPa^{-1}	Tlakově-viskózní koeficient
δ	deg	Úhel mezi vektory rychlostí povrchů
ε	deg	Úhel mezi
η	$Pa \cdot s^{-1}$	Dynamická viskozita

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1 Interferogram kontaktu [1]	11
Obr. 2.1 Vlnové délky záření[2].....	12
Obr. 2.2 Graf závislosti teploty povrchu kuličky na rychlosti [2].....	13
Obr. 2.3 Teplota mazacího filmu [2]	13
Obr. 2.4 Maximální teplotní zvýšení povrchu kuličky a disku při 20 N a SRR 0,5. a) Olej skupiny I; b) Olej skupiny III; c) PAO; d) Santotrac 50; e) 5P4E [3]	14
Obr. 2.5 Rozdělení disku [3]	14
Obr. 2.6 Rozdíl teplot kuličky a disku, $T = T_d - T_b$ [3]	15
Obr. 2.7 Závislost počtu fotonů na jeden pixel snímku na teplotě a) před korekcí b) po korekci [4].....	15
Obr. 2.8 Rozdíl teplot povrchů disku a kuličky v závislosti na rychlosti [4]	16
Obr. 2.9 Rozložení teploty v kontaktu [5]	17
Obr. 2.10 Deformace a tlak pro podmínky a) SRR = 0 b) SRR = 2 [8]	18
Obr. 2.11 Rychlostní profil toku solidifikovaného maziva	18
Obr. 2.12 Vliv a) tlakově-viskózního koeficientu; b) unášivé rychlosti; c) viskozity na dimple [10]	19
Obr. 4.1 Schéma postupu při řešení (upraveno z [17]).....	23
Obr. 4.2 Schéma experimentálního zařízení (upraveno z [17]).....	24
Obr. 4.3 Modul pro simulaci změny úhlu mezi vektory	24
Obr. 4.4 Kalibrační snímky (vlevo kulička, vpravo statický kontakt)	25
Obr. 4.5 Kalibrační křivka kuličky	26
Obr. 4.6 Proložení dat křivkou pomocí softwaru Matlab	27
Obr. 4.7 Kalibrační křivka pro referenční pixel	27
Obr. 4.8 Schéma úhlů mezi vektory	29
Obr. 5.1 Snímky kontaktu při zvyšující se unášivé rychlosti (SRR 4,83; 1 GPa; 60 °C)	30
Obr. 5.2 Snímky kontaktu při zvyšující se unášivé rychlosti (SRR 4,83; 1,2 GPa; 60 °C).....	30
Obr. 5.3 Vliv rychlosti na chování dimplu (SRR 4,83; 1 GPa; 60 °C)	31
Obr. 5.4 Vliv rychlosti na chování dimplu při vyšším zatížení (SRR 4,83; 1,2 GPa; 60 °C).....	31
Obr. 5.5 Interferogramy kontaktu za různého zatížení (SRR 4,83; 0,1 m·s ⁻¹ a 60 °C)	31
Obr. 5.6 Vliv zatížení na dimpl (SRR 4,83; 0,1 m·s ⁻¹ ; 60 °C)	31

Obr. 5.7 Snímky kontaktu za různé teploty (SRR 4,83; 1 GPa; 0,1 m·s ⁻¹)	32
Obr. 5.8 Vliv zatížení na dimple (SRR 4,83; 1 GPa; 0,1 m·s ⁻¹).....	32
Obr. 5.9 Výsledné interferogramy (50 mm·s ⁻¹ ; 1,2 GPa; 30 °C)	33
Obr. 5.10 Vliv skluzu na minimální tloušťku (50 mm·s ⁻¹ ; 1,2 GPa; 30 °C)	33
Obr. 5.11 Výsledné interferogramy (100 mm·s ⁻¹ ; 1,2 GPa; 30 °C)	34
Obr. 5.12 Vliv skluzu na minimální tloušťku (100 mm·s ⁻¹ ; 1,2 GPa; 30 °C)	34
Obr. 5.13 Výsledné interferogramy (150 mm·s ⁻¹ , 1,2 GPa, 30 °C).....	34
Obr. 5.14 Vliv skluzu na minimální tloušťku (150 mm·s ⁻¹ , 1,2 GPa, 30 °C)	35
Obr. 5.15 Interferogramy a snímky z IR kamery při použití S-filtru (30 °C, 0 °).....	35
Obr. 5.16 Profily teplotních nárůstů a maziva (SRR 2,5, 50 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 0°)	36
Obr. 5.17 Profily teplotních nárůstů a maziva (SRR 2,5, 150 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 0°)	36
Obr. 5.18 Profily teplotních nárůstů a maziva (SRR 5, 50 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 0°)	37
Obr. 5.19 Profily teplotních nárůstů a maziva (SRR 5, 150 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 0°)	37
Obr. 5.20 Nárůst teploty u povrchů a oleje při teplotě 30 °C a natočení 0°	37
Obr. 5.21 Interferogramy a snímky z IR kamery (60 °C, 0 °).....	38
Obr. 5.22 Profily nárůstů a maziva (SRR 2,5, 310 mm·s ⁻¹ , 60 °C, 0 °)	39
Obr. 5.23 Profily nárůstů a maziva (SRR 2,5, 1000 mm·s ⁻¹ , 60 °C, 0 °)	39
Obr. 5.24 Profily nárůstů a maziva (SRR 5, 310 mm·s ⁻¹ , 60 °C, 0 °)	39
Obr. 5.25 Profily nárůstů a maziva (SRR 5, 1000 mm·s ⁻¹ , 60 °C, 0 °)	39
Obr. 5.26 Nárůst teploty u povrchů a oleje při teplotě 60 °C a natočení 0°	40
Obr. 5.27 Schéma směrů vektorů rychlostí	40
Obr. 5.28 Interferogramy a snímky z IR kamery (30 °C, 90 °).....	40
Obr. 5.29 Profily teplotních nárůstů a maziva ve směrů unášivé rychlosti (SRR 2,5, 50 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 90 °).....	41
Obr. 5.30 Profily teplotního nárůstu a maziva ve směrů unášivé rychlosti (SRR 2,5, 150 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 90 °).....	41
Obr. 5.31 Profily teplotních nárůstů a maziva ve směrů unášivé rychlosti (SRR 5, 50 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 90 °).....	42
Obr. 5.32 Profily teplotních nárůstů a maziva ve směrů unášivé rychlosti (SRR 5, 150 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 90 °).....	42
Obr. 5.33 Schéma řezů (vlevo SRR 2,5; vpravo SRR 5)	42
Obr. 5.34 Profily nárůstů a tloušťky v řezech (SRR 2,5, 150 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 90 °)....	43
Obr. 5.35 Profily nárůstů a tloušťky v řezech (SRR 5, 150 mm·s ⁻¹ , 30 °C, 90 °).....	43
Obr. 5.36 Nárůsty teploty povrchů a oleje při teplotě 30 °C a natočení 90°	43
Obr. 5.37 Interferogramy a snímky z IR kamery (60 °C, 90 °).....	44

Obr. 5.38 Profily nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 2,5, 310 mm/s, 60 °C, 90 °).....	45
Obr. 5.39 Profily nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 2,5, 1000 mm/s, 60 °C, 90 °).....	45
Obr. 5.40 Profily nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 5, 310 mm/s, 60 °C, 90 °).....	45
Obr. 5.41 Profily nárůstů a maziva ve směru unášivé rychlosti (SRR 5, 1000 mm/s, 60 °C, 90 °).....	45
Obr. 5.42 Profily nárůstů a tloušťky v řezech (SRR 2,5, 1000 mm·s ⁻¹ , 60 °C, 90 °).....	46
Obr. 5.43 Profily nárůstů a tloušťky v řezech (SRR 5, 1000 mm·s ⁻¹ , 60 °C, 90 °)....	47
Obr. 5.44 Nárůsty teploty povrchů a oleje při teplotě 60 °C a natočení 90°	47
Obr. 6.1 Interference u snímků z IR kamery (vlevo barevný snímek, vpravo snímek s izočarami).....	48
Obr. 6.2 Vliv určení středu kontaktu na profil oleje (SRR5, 50 mm/s, 60 °C, 90 °).....	49
Obr. 6.3 Závislost tepelné vodivosti safiru na teplotě (vlevo nízké teploty, vpravo vysoké teploty)[24].....	50
Obr. 6.4 Interferogramy posuzované na vliv tepelného toku SRR 5, 90° (vlevo 30 °C, 150 mm/s; vpravo 60 °C, 1000 mm/s).....	50
Obr. 6.5 Profily nárůstu tepla ve směru skluzové rychlosti (SRR 5, 30 °C, 90°, 150 mm/s).....	51
Obr. 6.6 Profily nárůstu tepla ve směru skluzové rychlosti (SRR 5, 60 °C, 90°, 1000 mm/s).....	51
Obr. 6.7 Profily nárůstů teplot (SRR 8; 250 mm/s; 0,97 GPa; 23 °C) [6].....	52
Obr. 6.8 Mapa tloušťky kontaktu a nárůsty teploty oleje a kontaktních povrchů (1,1 GPa; 240 mm/s; 23 °C)	53
Obr. 6.9 Vznik dimplů v piezoviskozitním režimu pro olej ST100[1].....	53
Obr. 6.10 Graf vzniku dimplu	55
Obr. 6.11 Hraniční křivka vzniku dimplů	55

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Kalibrační hodnoty pro povrch kuličky	26
Tab. 4.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti kontaktních těles	28
Tab. 4.3 Vlastnosti použitého oleje	28
Tab. 4.4 Tabulka rychlostí experimentu při dané teplotě	29

12 SEZNAM PŘÍLOH

12

1. Manuskript vědeckého článku s výsledky