

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# STUDIUM PŘECHODOVÝCH JEVŮ MEZI ZCELA ZAPLAVENÝM A HLADOVĚJÍCÍM ELASTOHYDRODYNAMICKY MAZANÝM KONTAKTEM

THE STUDY OF TRANSITION BETWEEN FULLY FLOODED AND STRAVED REGIMES IN  
EHL CONTACT

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MICHAL POPELKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PETR SVOBODA, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student(ka): Bc. Michal Popelka

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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

### **Studium přechodových jevů mezi zcela zaplaveným a hladovějícím elastohydrodynamicky mazaným kontaktem**

v anglickém jazyce:

#### **The study of transition between fully flooded and starved regimes in EHL Contact**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza přechodových jevů mezi zcela zaplaveným a hladovějícím elastohydrodynamicky mazaným kontaktem:

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Analýzu a interpretaci získaných údajů
7. Závěr

Forma diplomové práce: průvodní zpráva

Typ práce: konstrukční

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Výstup RIV: publikace

Seznam odborné literatury:

Cann, P., Damiens, B., & Lubrecht, A. (2004). The transition between fully flooded and starved regimes in EHL. *Tribology International*, 37(10), 859-864. doi:10.1016/j.triboint.2004.05.005.

Chevalier, F; Lubrecht, AA; Cann, PME; Colin, F; Dalmaz, G. 1998. Film thickness in starved EHL point contacts. *JOURNAL OF TRIBOLOGY-TRANSACTIONS OF THE ASME* 120 (1): 126-133. ISSN: 0742-4787

F. Chevalier, A.A.Lubrecht, P.M.E. Cann, F. Colin, G. Dalmaz, Starved Film Thickness: a Qualitative Explanation, *Tribology Series*, Elsevier, 1995, Volume 30, Lubricants and Lubrication - Proceedings of the 21th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Pages 249-257, ISSN 0167-8922.

Lubrecht, AA; Cann, PME; Dalmaz, G. 1998. A review of starved EHL point contacts. *COST 516 TRIBOLOGY SYMPOSIUM 180*: 102-119. edited by Ronkainen, H; Holmberg, K. presented at COST 516 Tribology Symposium in ESPOO, FINLAND, MAY 14-15, 1998. ISSN: 0357-9387.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18. 11. 2010 13:25

---

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

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Předmětem této diplomové práce je studium přechodových jevů mezi zcela zaplaveným a hladovějícím elastohydrodynamicky mazaným kontaktem. Práce je zaměřena na problematiku hladovějícího kontaktu a cílenou modifikaci topografie třecích povrchů. Cílená modifikace topografie třecích povrchů patří mezi úpravy, které způsobují v jistém smyslu zlepšení mazacích schopností a také snížení tření a opotřebení. Cílem této práce je porovnat numerické modely s reálnými výsledky naměřenými na experimentálním zařízení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Meniskus, Hertzova kontaktní oblast, tloušťka mazacího filmu, mikrovrtisk, cílená modifikace

## **ABSTRAKT**

The diploma thesis deals with The study of transition between fully flooded and starved regimes in EHL Contact. The work is focused on problems of starved contact and surface texturing of rubbing surfaces. Surface texturing of rubbing surfaces is one of the adjustments that cause in a sense improved lubricity and reduce friction and wear. The aim of this study is to compare numerical models with real experimental results measured on the Experimental apparatus.

## **KEYWORDS**

Meniscus, Hertz contact area, lubrication film thickness, micro dents, surface texturing

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

POPELKA, M. *Studium přechodových jevů mezi zcela zaplaveným a hladovějícím elastohydrodynamicky mazaným kontaktem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Svoboda, Ph.D.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Studium přechodových jevů mezi zcela zaplaveným a hladovějícím elastohydrodynamicky mazaným kontaktem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Svobody, Ph.D. a uvedl v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 23. května 2012

.....  
vlastnoruční podpis autora



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat především Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení. Dále Ing. Davidu Košťálovi, který mi pomáhal při experimentálních studiích a vyhodnocování výsledku. Taktéž dekuji všem, kteří se podíleli na zdárném splnění podmínek studia a realizaci mé diplomové práce.



**OBSAH**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>12</b> |
| <b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b> .....                              | <b>13</b> |
| 1.1 Experimentální měření tekutinových mazacích filmů .....                  | 13        |
| 1.2 Numerické modely pro měření tekutinových mazacích filmů.....             | 18        |
| 1.2.1 Minimální tloušťka filmu v závislosti na poloze menisku .....          | 18        |
| 1.2.2 Tloušťka filmu pro velká zatížení .....                                | 18        |
| 1.2.3 Pokles tloušťky filmu .....  | 21        |
| 1.2.4 Relativní pokles tloušťky filmu .....                                  | 22        |
| 1.2.5 Teoretické modely variabilní vstupní vrstvy .....                      | 25        |
| 1.2.6 Rovnice poklesu tloušťky filmu .....                                   | 26        |
| 1.2.7 Vztah mezi tloušťkou filmu a vrstvou maziva .....                      | 29        |
| 1.3 Experimentální měření plastických maziv.....                             | 30        |
| <b>2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA</b> .....                    | <b>32</b> |
| <b>3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE</b> .....   | <b>35</b> |
| <b>4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ</b> .....                           | <b>36</b> |
| 4.1 Experimentální zařízení .....  | 36        |
| 4.2 Cílená modifikace topografie třecích povrchů.....                        | 37        |
| <b>5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ</b> .....                        | <b>39</b> |
| 5.1 Vstupní měření.....  | 39        |
| 5.1.1 Vstupní měření plně zaplaveného kontaktu.....                          | 39        |
| 5.1.2 Vstupní měření hladovějícího kontaktu.....                             | 40        |
| 5.2 Hystereze tloušťky filmu .....   | 42        |
| 5.3 Měření tloušťky filmu na povrchu kuličky s cílenou modifikací povrchu .. | 43        |
| 5.3.1 Tloušťka filmu u hladovějícího EHL kontaktu (mělké vtisky) .....       | 46        |
| 5.3.2 Tloušťka filmu u plně zaplaveného EHL kontaktu (mělké vtisky) .....    | 48        |
| 5.3.3 Tloušťka mazacího filmu při průchodu hlubokých vtisků .....            | 49        |
| 5.4 Poloha vstupního menisku .....   | 51        |
| <b>6 ZÁVĚR</b> .....   | <b>54</b> |
| <b>7 SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....  | <b>55</b> |
| <b>8 SEZNAM TABULEK</b> .....  | <b>57</b> |
| <b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....                            | <b>58</b> |
| <b>10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....                                      | <b>60</b> |
| <b>11 SEZNAM PŘÍLOH</b> .....  | <b>62</b> |

## ÚVOD

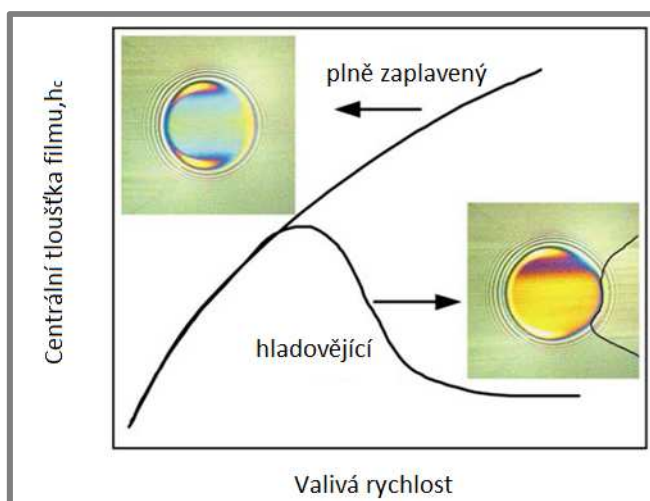
Valivá ložiska jsou jedny z nejčastěji používaných strojních součástí, které musí správně fungovat, často i přes delší dobu a musí být spolehlivé. Pro zajištění optimálního výkonu po celou dobu životnosti stroje je mazání často nezbytné (pro minimalizaci tření a opotřebení). Při mazání jednotlivých dílů vzniká mezi třecími plochami tenká vrstva maziva, která odděluje tyto třecí povrchy a minimalizuje tření a opotřebení. Existuje několik různých způsobů, jak vytvořit tento mazací film. Závisí to především na vlastnostech maziva a na kontaktní ploše mezi tělesy [1].

Maziva se neomezují jen na minerální oleje, ale mohou obsahovat také pevné látky, plyny nebo dvoufázové tekutiny a závisí pouze na provozních parametrech. Jeden z hlavních parametrů, který ovlivňuje efektivitu součástí, je tloušťka mazacího filmu, ta se může pohybovat u chemických povrchových filmů jen několik nanometrů, nebo u olejových filmů je to několik mikrometrů. U klasického filmu (olejový film) je tloušťka filmu převážně určena rychlostí, viskozitou, zatížením a množstvím oleje [1].

Mazivo unášené do mezery mezi třecí plochy generuje zvýšení tlaku schopné nést zatížení a odděluje tyto plochy. Pokud jsou vzniklé tlaky poměrně malé nebo působí zatížení na velké plochy, jedná se hydrodynamický režim mazání. Pokud jsou naopak tlaky vysoké a velmi lokální, nastává zde pružná deformace, jedná se o elastohydrodynamický režim mazání. Tento režim je typický pro valivá ložiska a ozubená kola [1].

Při mazání ložisek je důležité vědět, zda ložisko pracuje v plně zaplaveném režimu nebo v hladovějícím režimu viz Obr. 1. Tloušťka mazacího filmu výrazně závisí na typu kontaktu (plně zaplavený, hladovějící). Při plně zaplaveném režimu mazání se tloušťka filmu se zvyšující rychlostí zvyšuje. V režimu hladovění je tomu od určité rychlosti třecích povrchů (v závislosti na množství a viskozitě maziva) naopak, tloušťka mazacího filmu s rychlostí klesá [2].

Hladovějící kontakt se většinou vyskytuje u vysokorychlostních ložisek, nebo u ložisek mazaných plastickými mazivy. Při hladovění se snižuje tloušťka mazacího filmu, a proto je nutné určit, kdy hladovění nastává, aby pak bylo možno dosáhnout optimálního výkonu a životnosti ložiska [2].



Obr. 1 Závislost valivé rychlosti na tloušťce filmu [1]

# 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

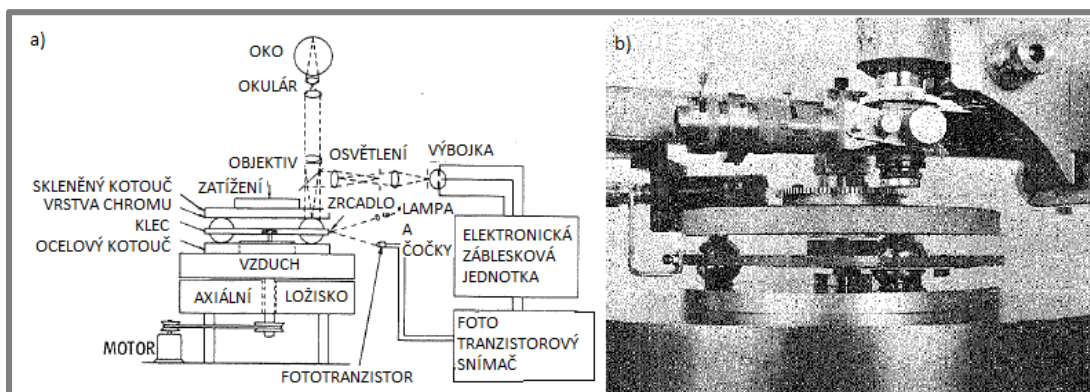
1

## 1.1 Experimentální měření tekutinových mazacích filmů

1.1

Prvními experimenty měření tloušťky filmu u hladovějícího kontaktu se zabýval Wedeven a kolektiv [3]. Měření tloušťky filmu probíhalo v plně zaplaveném i hladovějícím kontaktu. Výsledky těchto experimentů pak porovnávali s matematickým modelem. V experimentech se zaměřili především na bodový kontakt [3].

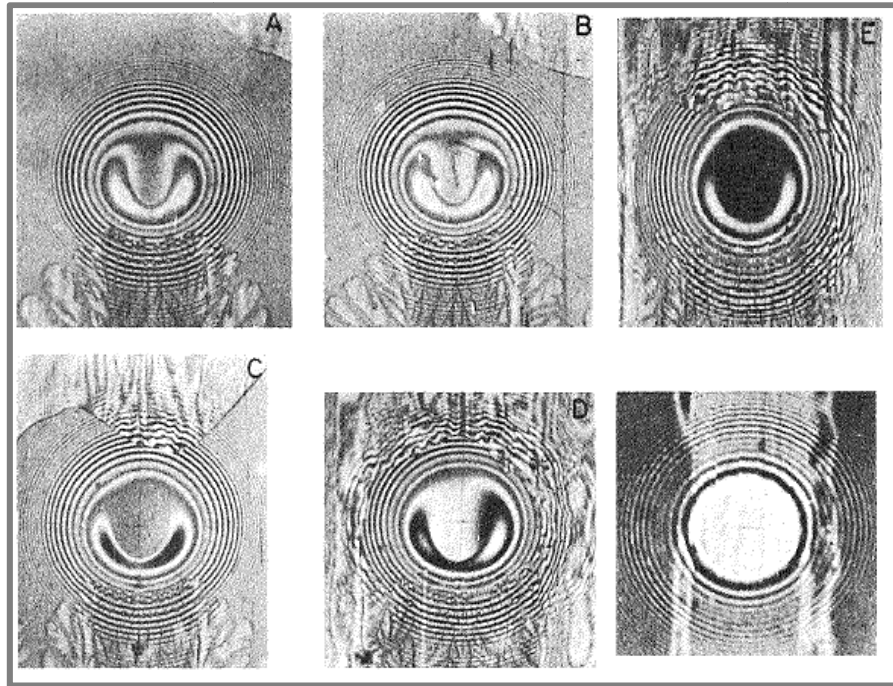
Měření probíhalo na experimentálním zařízení, které je znázorněno na Obr. 2a. Tloušťku mazacího filmu měřili pomocí optické interferometrie. Experimentální ložisko je znázorněno na Obr. 2b. Skládá se ze dvou plochých disků oddělených od sebe třemi ocelovými kuličkami s průměrem 1". Spodní disk je ocelový a je poháněn tlakovým vzduchem, který jej roztáčí okolo své osy. Tento disk tedy koná rotační pohyb, který je dále přenášen na ocelové kuličky a horní disk. Horní disk je vyroben z korunového skla o průměru 150,6 mm a výšce 12,7 mm. Spodní strana disku je pokryta vrstvou chromu o 15 % odrazivosti a jeho horní strana antireflexní vrstvou [3].



Obr. 2 Experimentální axiální kuličkové ložisko s klecí a) schéma, b) foto experimentálního zařízení [3]

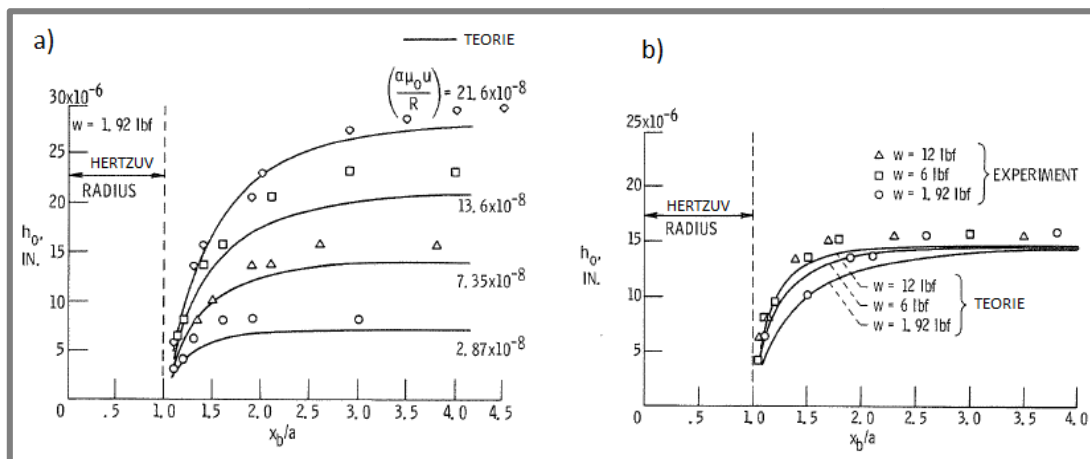
Zatížení se do kontaktu aplikuje přes horní disk, který je spojen s ramenem páky. Testované kuličky jsou upevněny radiálně v laminované kleci. Mikroskopem pak pozorovali interferometrické proužky v kontaktu. Pomocí xenonové výbojky, která je zdrojem bílého světla a vysokorychlostní kamery výsledky zaznamenávali a poté vyhodnocovali [3].

Na Obr. 3 jsou znázorněny výsledky měření. Na Obr. 3A je vidět, že počáteční meniskus je poměrně hodně vzdálen od středu Hertzovy oblasti a jedná se zde o tzv. plně zaplavený kontakt. Obr. 3B vykazuje snížení tloušťky mazacího filmu a oblast vstupní hranice se postupně přibližuje k Hertzově oblasti. Zmenšení tloušťky filmu je také patrné ze zužujících se okrajů Hertzovy oblasti oproti předchozímu obrázku.



Obr. 3 Mikrosnímky vývoje hladovějícího mazání [3]

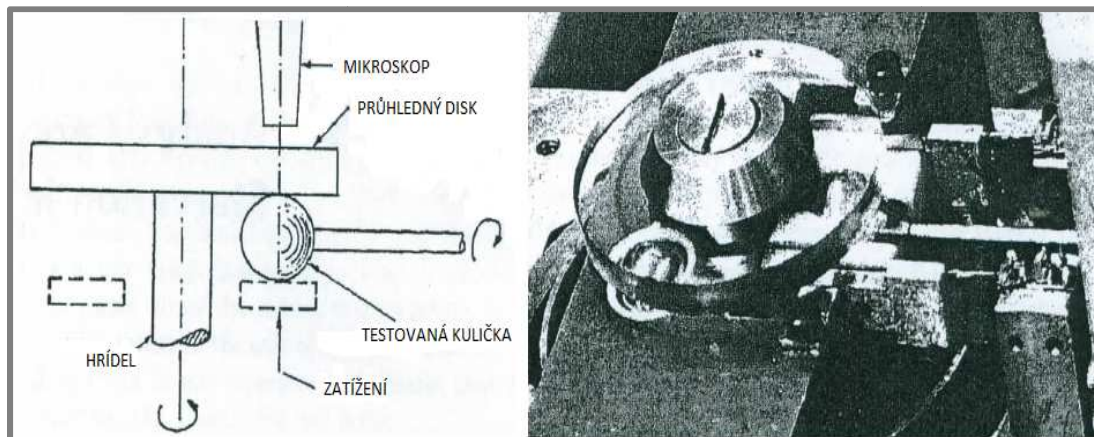
Některé z teoretických a experimentálních výsledků stanovení centrální tloušťky filmu jsou vyneseny na Obr. 4 v závislosti  $x_b/a$ , kde  $a$  je poloměr Hertzovy oblasti. Obr. 4a ukazuje vliv různých vstupních tloušťek filmu při daném zatížení na centrální tloušťku a Obr. 4b ukazuje vliv různých zatížení pro danou vstupní tloušťku filmu na centrální tloušťku. Výsledky ukazují, že tloušťka filmu je stále více závislá na zmenšující se vzdálenosti mezi vstupní hranicí a okrajem Hertzovy oblasti. Stejně tak jak se blíží vstupní hranice k Hertzově oblasti, se tloušťka filmu blíží k nule [3].



Obr. 4 Vliv vstupní hranice na tloušťku filmu a) pro různé počáteční tloušťky filmu, b) pro různé zatížení [3]

Dalším kdo se zabýval hladovějícím kontaktem, byl Chiu [4]. Chiu se zabýval především analýzou a predikací tloušťky filmu v hladovějícím kontaktu. Na Obr. 5 je zobrazen schematický náčrtek a fotografie použitého optického kontaktního testeru. Základem je ocelová kulička o průměru 12,7 mm, která je ve valivém kontaktu s průhledným diskem ze skla nebo saříru. Tento disk je z jedné strany pokryt vrstvou

chromu pro optické interferometrické pozorování. Testovaná kulička je ze spodu podepřena kuličkovými ložisky. Testované mazivo je přes hadičky působením gravitační síly přiváděno do místa kontaktu. Teplota maziva je měřena termočláňky těsně před (1,6 mm) zkušební kuličkou [4].



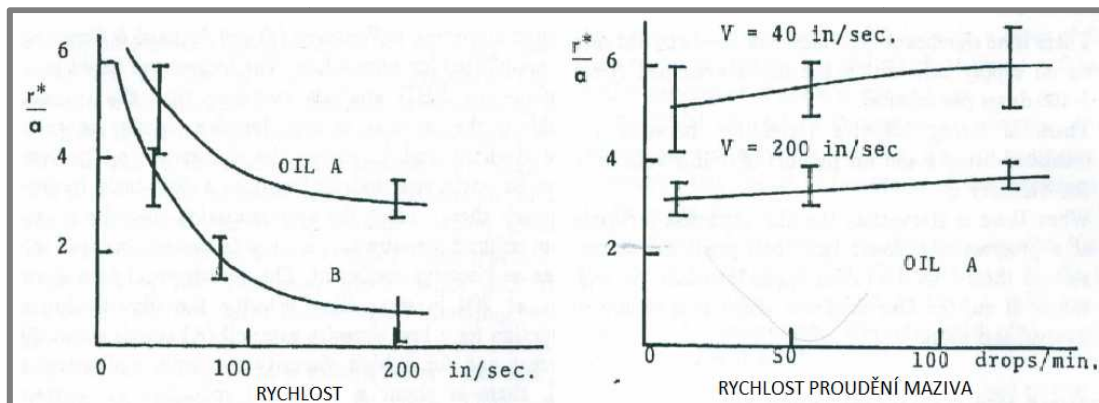
Obr. 5 Optické EHL testovací sestava [4]

Pozorováním na tomto testeru Chiu zjistil, že se při hladovění se zvyšující se rychlostí přibližuje vstupní meniskus ke kontaktu, a také dochází k zúžení šířky filmu na vstupu [4].

Tab. 1 Vlastnosti testovaného maziva [4]

| Označení maziva | Hustota | Viskozita |       |       | Viskózně tlakový koeficient (psi <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|---------|-----------|-------|-------|--|
|                 |         | 75°F      | 100°F | 210°F |  |
| SAE 10          | 0,870   | 66,8      | 33,9  | 5,2   | $1,41 \cdot 10^{-4}$                             |
| SAE 30          | 0,883   | 261,0     | 113,0 | 11,4  | 1,60   |
| SAE 40          | 0,885   | 401,0     | 165,0 | 14,8  | 1,70   |
| TN 631          | 0,901   |           | 138,0 | 10,2  | 2,14   |
| LUB D           | 0,942   | 572,0     | 182   | 10,8  | 2,50   |

Chiu [4] provedl dvě zkušební pozorování, pro stanovení konkrétních podmínek ovlivňující polohu menisku a hladovění. Testované oleje byly dva a to olej založený na esteru z nafty a syntetický parafinický uhlovodík. Vlastnosti oleje jsou uvedeny v Tab. 1. Na Obr. 6 byly vyneseny závislosti vzdálenosti vstupního menisku od středu kontaktu na valivé rychlosti a rychlosti přítoku oleje [4].

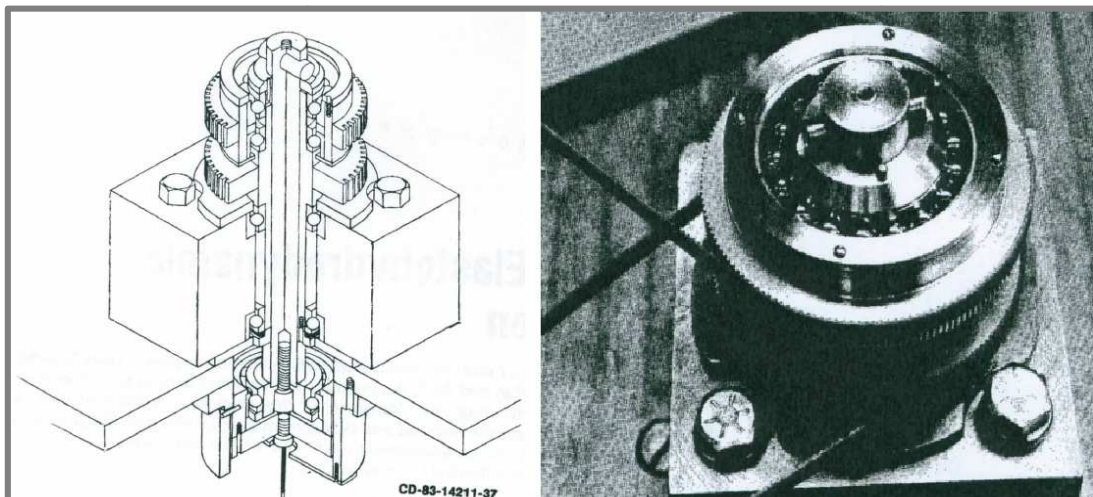


Obr. 6 Změna vzdálenosti menisku a) s rychlostí valení, b) s rychlostí proudění oleje A [4]

Experimenty ukázaly, že neexistuje žádná významná závislost mezi vzdáleností menisku a valivou rychlostí nebo přívodem maziva. Dále se ukázalo, že je zde silná negativní korelace mezi vzdáleností menisku, valivou rychlostí  $u$  a viskozitou  $\eta$ . Také bylo zjištěno, že za hladovějících podmínek se tloušťka filmu zvyšuje pomaleji. Při vysokých hodnotách  $\eta$  a  $u$  má tloušťka filmu tendenci se ustálit a klesat [4].

Experimentálním pozorování EHL kontaktu také pozoroval Kingsbury [5], který se zabýval „vyprahlým“ EHL mazáním. Tento EHL mazací režim leží mezi hladovějícím a smíšeným režimem. Ložiska ve „vyprahlém“ režimu se vyznačují nejmenším krouticím momentem a nejlíp definovanou osou otáčení ze všech mazacích režimů [5].

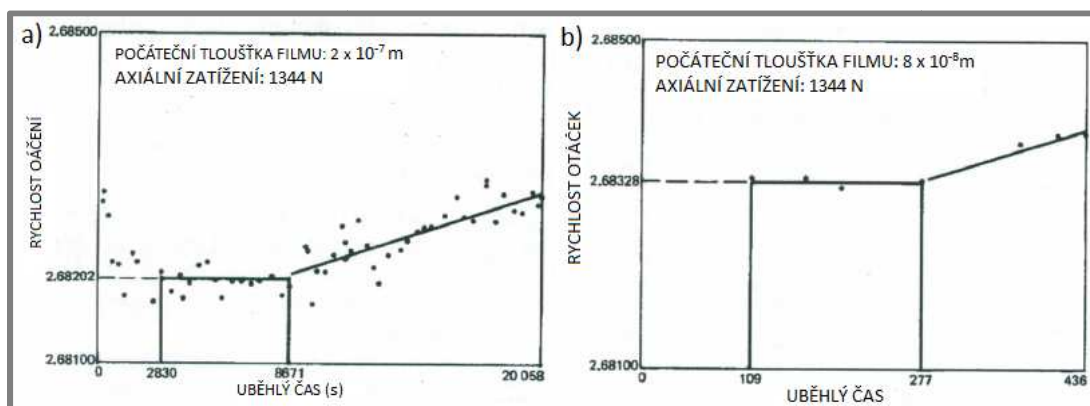
Experiment v tomto režimu mazání pozoroval Kingsbury na ložisku (bylo použito ložisko s označením 108). Toto ložisko je namáháno čistým axiálním zatížením. Nebyl zde použit žádný mechanismus doplňování oleje na oběžnou dráhu, tak že olej vytlačený z Hertzovy oblasti není nijak nahrazen. K tomuto ložisku byl dále připojen měřič rychlosti k pozdějšímu vyhodnocování výsledků. Obr. 7 ukazuje experimentální zařízení, které Kingsbury použil pro měření tohoto ložiska 108 [5].



Obr. 7 Experimentální ložiskové zařízení [5]

Obr. 8 ukazuje přechody testovaného ložiska a je zde znázorněna také závislost rychlosti otáček na čase. Nezávislá proměnná v tomto experimentu byla tloušťka filmu (Obr. 8a-  $2 \cdot 10^{-7}$  m, Obr. 8b-  $8 \cdot 10^{-8}$  m). Obecný režim v obou testech byl

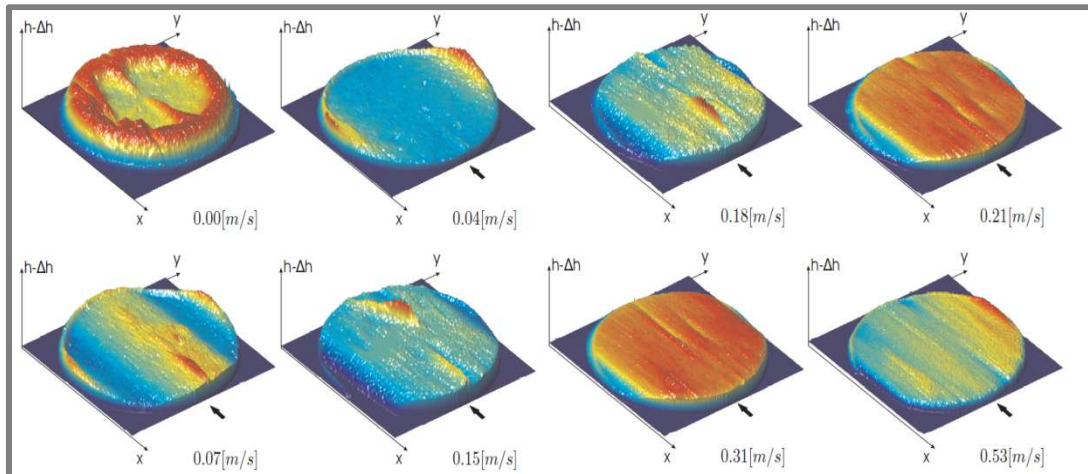
stejný: počáteční snížení rychlosti (nelze vidět na Obr. 8b, protože konec byl velmi rychlý), konstantní rychlost a pak lineární nárůst. Rozdíly jsou v čase komprese a největšího dosaženého stupně otáček u tenkého filmu [5].



Obr. 8 Závislost rychlosti otáčení na čase [5]

Problematiku hladovějícího EHL kontaktu publikoval také Popovici [6]. Ve svých experimentech hladovějícího kontaktu pozoroval především vliv valivé rychlosti.

Vliv rychlosti distribuce maziva může být pozorován sledováním EHL kontaktu s vysoce viskózním olejem při různých valivých rychlostech. Obr. 9 ukazuje 3D mapy kontaktu zatížených 20 N pro různé rychlosti valení. Každá 3D mapa může být interpolována jako deformační oblast kuličky v kontaktu s plochým “tuhým” povrchem. 3D mapa s rychlostí 0 m/s ukazuje stav kontaktu po předchozím odvalování s jednotným rozložením maziva. Jak se disk začne otáčet (0,04 m/s) vytváří se tenký EHL film se dvěma minimy po stranách kontaktu. Při dalším zvýšení rychlosti na 0,07 m/s se vytvoří úzký pás s hodnotou tloušťky srovnatelnou s minimy po stranách kontaktu. Při dalším zvýšení rychlosti (0,15 až 0,18 m/s) se pás rozšiřuje ke stranám kontaktu a objevuje se zde ještě nižší hodnota tloušťky filmu. Pro 3D mapy odpovídající rychlosti 0,21 a 0,31 m/s je zřejmé, že centrální oblast je výrazně hladovějící, zatím co strany kontaktu jsou dobře mazány. Tento rozdíl je způsoben tokem maziva do stran a zpětným doplňováním. Kromě toho v rychlosti 0,53 m/s je možné pozorovat, že jedna strana kontaktu je lépe mazána než druhá. To způsobují odstředivé síly, které tlačí mazivo směrem k oběžné dráze na jedné straně kontaktu a na druhé tlačí mazivo od kontaktu [6].



Obr. 9 3D mapy vzniklé z interferometrických snímků EHL kontaktu [6]

## 1.2 Numerické modely pro měření tekutinových mazacích filmů

Jeden z prvních kdo se zajímal o numerické popsání hladovějícího kontaktu, byl Wolveridge [7]. Wolveridge prokázal, že když jsou známy vhodné bezrozměrné parametry hladovění, tak je numerické řešení v souladu se semi-analytickým řešením. Nicméně praktičtější je vyjádřit vliv pozice vstupní hranice na minimální tloušťku filmu při daném zatížení. Poměrné snížení minimální tloušťky filmu může být vyjádřeno jako jedna funkce pozice vstupní hranice v bezrozměrné formě [7]. Dále se Wolveridge zabýval řešením vlivu pozice vstupní hranice na tloušťku filmu pro velká zatížení, která elasticky deformuje povrchy a kde se viskozita s tlakem zvyšuje [7].

### 1.2.1 Minimální tloušťka filmu v závislosti na poloze menisku

Změna minimální tloušťky mazacího filmu  $h_0$  za konstantních podmínek ( $\eta_0$ ,  $U$ ,  $R$  a především konstantní hodnotu  $W$ ) v závislosti na poloze vstupního menisku  $x_i$  lze určit jako:

$$(X_i)_\beta = \frac{x_i}{(2R(h_0)^{1/2})} \quad (1)$$

kde:

$\eta_0$  je viskozita při atmosférickém tlaku

$U$  je rychlost povrchu

$R$  je relativní poloměr křivosti

$\beta$  je definována jako poměrné snížení tloušťky filmu (při konstantním zatížení) způsobené pohybem vstupní hranice od  $\infty$  až k  $x_i$

### 1.2.2 Tloušťka filmu pro velká zatížení

V této části je ukázána analýza vlivu polohy vstupní hranice na tloušťku filmu, která vznikla při vysokém zatížení. Za těchto podmínek je deformace povrchu i změna viskozity významná. Tloušťka filmu pro  $x_i = \Phi_l = \infty$  je:

$$h_\infty^* = 2 \cdot 0,742(\alpha\eta_0\dot{U})^{2/3}R^{1/3}\beta^{-2/9} \quad (2)$$

Pro obecný přístup s vstupní hranicí mazacího filmu  $x_i$

$$h^* = 2 \cdot 0,742 \cdot \rho (\alpha \eta_0 \dot{U})^{2/3} R^{1/3} \beta^{-2/9} \quad (3)$$

Kde:

$\rho$  je vliv hladovění na  $h^*$  v EHL kontaktu ( $\rho = h^*/h_{\infty}^*$ )

$\alpha$  je viskózně-tlakový koeficient

$\dot{U}$  je rychlost otáčení

Také Hamrock a Dowson [8] se ve své práci snažili získat vztah mezi bezrozměrnou vstupní vzdáleností a tloušťkou filmu. Tato vzdálenost vstupní hranice určuje, zda je kontakt v hladovějícím nebo plně zaplaveném režimu. Dalším cílem bylo vytvořit jednoduchý vztah pro určení minimální a střední tloušťky filmu za hladovějících podmínek [8].

Hladovějící mazání může být studováno jen při snížení bezrozměrné vstupní vzdálenosti. Plně zaplavené podmínky jsou, když bezrozměrná vstupní vzdálenost přestává nějakým způsobem ovlivňovat minimální tloušťku filmu. Když se u plně zaplaveného stavu sníží vzdálenost vstupní hranice  $m$  (vzdálenost vstupní hranice od středu kontaktu), minimální tloušťka filmu se začne měnit a vzniká tzv. plně zaplavená-hladovějící hranice, která je označena jako  $m^*$ . Proto bylo hladovějící mazání studováno pomocí základní EHL mazací teorie hladovějícího kontaktu a byl zde pozorován vliv snížení vzdálenosti vstupní hranice [8].

Tab. 2 ukazuje, jaký má vliv změna vstupní vzdálenosti na minimální tloušťku filmu pro 3 skupiny zatížení a rychlostních parametrů. V této tabulce je vidět, že při snižování vstupní hranice klesá minimální tloušťka filmu. Tab. 3 ukazuje, jak 3 hodnoty parametrů rychlosti a zatížení ovlivňují umístění vstupní hranice  $m^*$  [8].

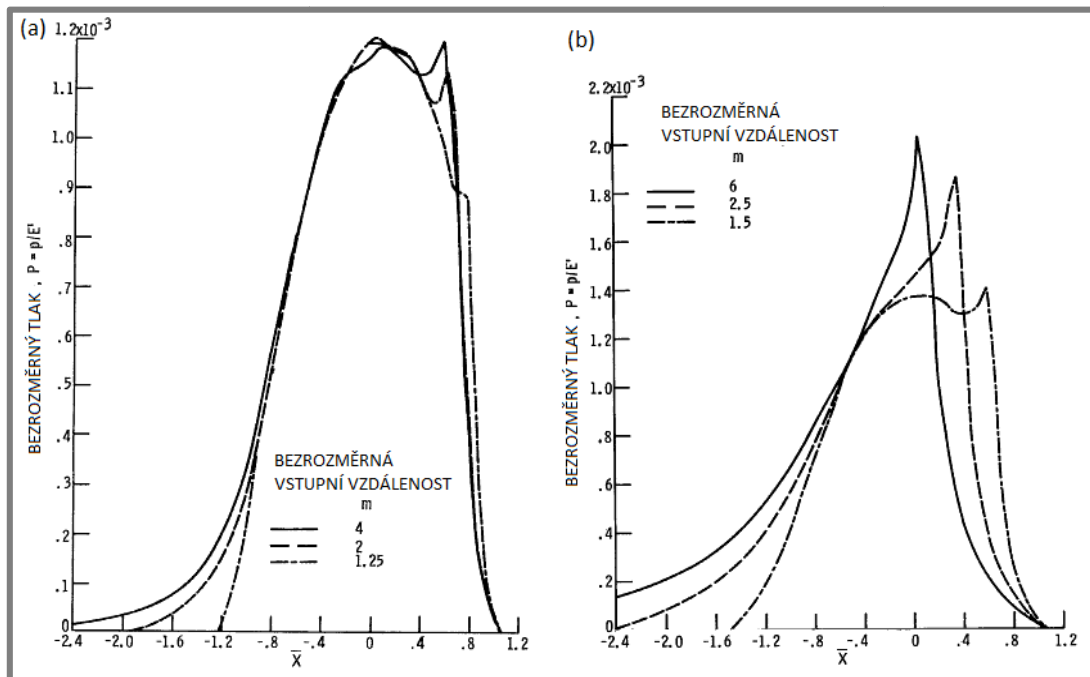
Tab. 2 Vliv hladovění na minimální tloušťku filmu [8]

| Bezrozměrná vstupní vzdálenost $m$ | Skupina                              |                         |                        |
|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------|
|                                    | 1                                    | 2                       | 3                      |
|                                    | Bezrozměrné zatížení, W              |                         |                        |
|                                    | $0,3686 \cdot 10^{-6}$               | $0,7371 \cdot 10^{-6}$  | $0,7371 \cdot 10^{-6}$ |
|                                    | Bezrozměrná rychlost, U              |                         |                        |
|                                    | $0,1683 \cdot 10^{-11}$              | $0,1683 \cdot 10^{-11}$ | $5,050 \cdot 10^{-11}$ |
|                                    | Minimální tloušťka filmu, $H_{\min}$ |                         |                        |
| 6                                  | -                                    | $29,75 \cdot 10^{-6}$   | $61,32 \cdot 10^{-6}$  |
| 4                                  | $6,317 \cdot 10^{-6}$                | 29,27                   | 57,50                  |
| 3                                  | 6,261                                | 27,84                   | 51,70                  |
| 2,5                                | -                                    | 26,38                   | 46,89                  |
| 2                                  | 5,997                                | 23,46                   | 39,91                  |
| 1,75                               | -                                    | 21,02                   | 34,61                  |
| 1,5                                | 5,236                                | -                       | 27,90                  |
| 1,25                               | 3,945                                | -                       | -                      |

Tab. 3 Vliv rychlosti a zatížení na vstupní vzdálenost[8]

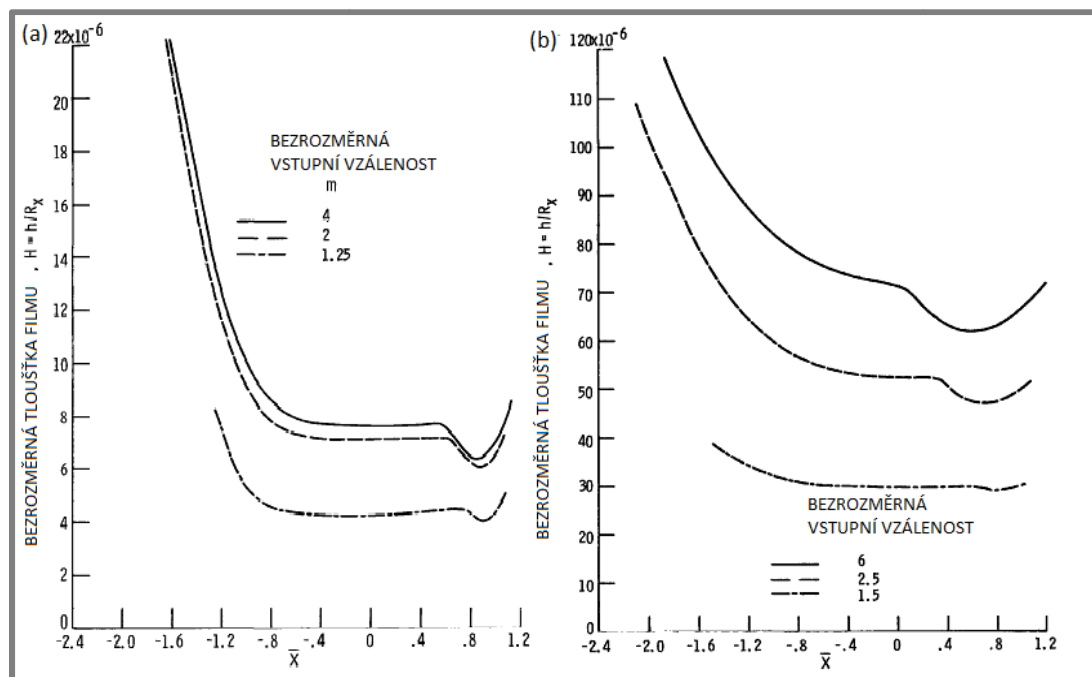
| Skupina | Bezrozměrná rychlost U  | Bezrozměrné zatížení W | Bezrozměrný rádius $R_x/b$ | Plně zaplavená centrální tloušťka filmu $H_{C,F}$ | Plně zaplavená minimální tloušťka filmu $H_{min,F}$ | Bezrozměrná vstupní vzdálenost s plně zaplavenou hladovějící hranicí $m^*$ |
|---------|-------------------------|------------------------|----------------------------|---|---|--|
| 1       | $0,1683 \cdot 10^{-11}$ | $0,3686 \cdot 10^{-6}$ | 205,9                      | $7,480 \cdot 10^{-6}$                             | $6,221 \cdot 10^{-6}$                               | 2,62   |
| 2       | 1,683                   | 0,7371                 | 163,5                      | 33,55   | 29,20   | 3,71   |
| 3       | 5,050                   | 0,7371                 | 163,5                      | 70,67   | 60,92   | 5,57   |

Na Obr. 10 je znázorněn graf rozložení bezrozměrného tlaku ( $P=p/E'$ ) podél kontaktu (osy X) pro 3 skupiny uvedené v Tab. 3. Na těchto obrázcích lze vidět jak se zvyšujícím se hladověním (snížením hodnoty  $m$ ) klesá tlaková špička [8].



Obr. 10 Bezrozměrný tlak pro tři různé vzdálenosti vstupní hranice a) bezrozměrné parametry U a W jsou konstantní, uvedené ve skupině 1 Tab. 3, b) U a W jsou uvedeny ve skupině 3 v Tab. 3 [8]

Stejně tak na Obr. 11 jsou ukázány grafy rozložení bezrozměrné tloušťky ( $H=h/R_x$ ) podél kontaktu (osy X) pro 3 skupiny uvedené v Tab. 3. Na těchto obrázcích, zejména na Obr. 11b se centrální oblast při hladovění stává rovnoměrná. Také se při přechodu z plně zaplaveného režimu do hladovějícího tloušťka filmu výrazně snižuje [8].



Obr. 11 Bezrozměrná tloušťka filmu pro tři různé vzdálenosti vstupní hranice a) bezrozměrné parametry  $U$  a  $W$  jsou konstantní, uvedené ve skupině 1 Tab. 3, b) parametry  $U$  a  $W$  jsou uvedeny ve skupině 3 Tab. 3 [8]

Chevalier [9] se rovněž zajímal o hladovějící EHL kontakt a jeho práce byl zaměřena na numerickou studii o vlivu rozložení maziva na tloušťku filmu v EHL hladovějícím bodovém kontaktu. Obecně se zde používá vzdálenosti vstupního menisku jako řídicího parametru, který je v reálných aplikacích obtížně měřitelný. V Chevalierově publikaci [9] byl přijat alternativní přístup, kdy je použito omezené množství maziva pro definování stupně hladovění. Je to parametr, který určuje jak polohu menisku, tak i snížení tloušťky filmu. Může zde být rovněž zkoumán vliv odvalení kontaktu na tloušťku filmu v následujícím kontaktu. V zjednodušeném případě byla předpokládána konstantní vstupní tloušťka filmu ve směru osy  $Y$ . To dává rovnici pravděpodobnosti snížení tloušťky filmu na povrchu oběžné trati v závislosti na počtu průchodů kontaktů  $n$ . Nicméně, konstantní vstupní tloušťka filmu nedává reálný popis hladovějícího kontaktu za všech podmínek. Některé experimentální studie ukázaly, že kombinace toku maziva do stran a doplňování výrazně ovlivňuje tloušťku filmu. Také ukázaly, že boční hráze s mazivem hrají důležitou roli v mechanismu doplňování. Ukázalo se, že střed kontaktu může být plně hladovějící, zatím co strany kontaktu dosahují podstatně větších tlouštěk filmu. V těchto případech byla provedena komplexní analýza s reálným rozložením vstupní tloušťky filmu a numerické výsledky byly v dobrém souladu s experimentálními výsledky [9].

### 1.2.3 Pokles tloušťky filmu

Velmi jednoduchá analýza vede k obecné rovnici (4) snížení tloušťky filmu  $R = H_C / H_{Cff}$  poměru  $r = H_{oi} / H_{Cff} / \rho(p_H)$

$$R = \frac{r}{\sqrt{1+r^2}} \quad (4)$$

Kde:

$H_C$  – je bezrozměrná centrální tloušťka filmu,

$H_{Cff}$  – je bezrozměrná centrální tloušťka filmu u plně zaplaveného kontaktu,

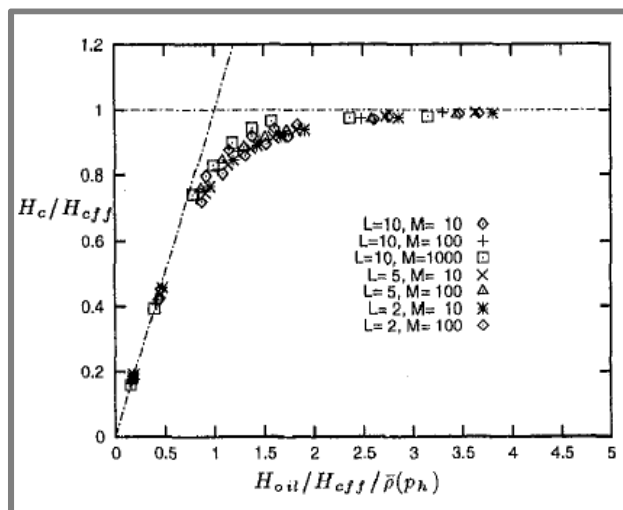
$r$  – je relativní mazací tloušťka filmu,

$\rho$  – je bezrozměrná hustota,

$p_H$  – je maximální Hertzův tlak.

V EHL je  $\gamma$  pozorován mezi 2 a 5. Centrální tloušťku pro plně zaplavený kontakt lze například vypočítat podle Nijebanning (1994) nebo Hamrock a Dowson (1977).

Z Obr. 12 lze dojít k závěru, že jak se množství oleje ve vstupní oblasti snižuje, poměr mezi  $\rho(p_H)H_C$  a  $H_C$  se přibližuje k jedné. Při studii numerických výsledků bylo zjištěno, že se pozice vstupního menisku blíží k oblasti Hertzova kontaktu a v důsledku toho je nárůst tlaku na vstupu opožděný. Vzhledem k tomu je gradient rozložení Hertzova tlaku velmi vysoký, a proto je dosaženo prudkého nárůstu tlaku. Tyto velké tlaky vedou k vysoké viskozitě, která zabraňuje toku maziva do stran. To způsobuje vytěsnění menšího množství maziva a tím se stává kontakt efektivnější, při vytváření EHL filmu [9].



Obr. 12 Centrální tloušťka filmu v závislosti na vstupní vrstvě maziva [9]

#### 1.2.4 Relativní pokles tloušťky filmu

Relativní pokles filmu mezi vstupem a výstupem lze popsat rovnicí

$$\frac{R}{r} = \frac{1}{\sqrt{1+r\gamma}} \quad (5)$$

Pokud vezmeme v úvahu tloušťku filmu na vstupu konstantní po celé šířce Hertzova kontaktu (což v reálných podmínkách odpovídá hladovějícímu režimu) a pokud je  $H_e$  rovno  $\rho(p_H)H_C$ , je možné hodnotit rozpad filmu v závislosti na počtu průchodů kontaktu  $n$ , kdy se nepředpokládá žádné doplňování. Za těchto předpokladů  $r_{(n)} = R_{(n-1)}$  a  $R_{(n)}$  může být popsána jako:

$$R_{(n)} = \frac{1}{\sqrt[r]{\frac{1}{r}\gamma+n}}, \lim_{n \rightarrow \infty} R_{(n)} = n^{-1/\gamma} \quad (6)$$

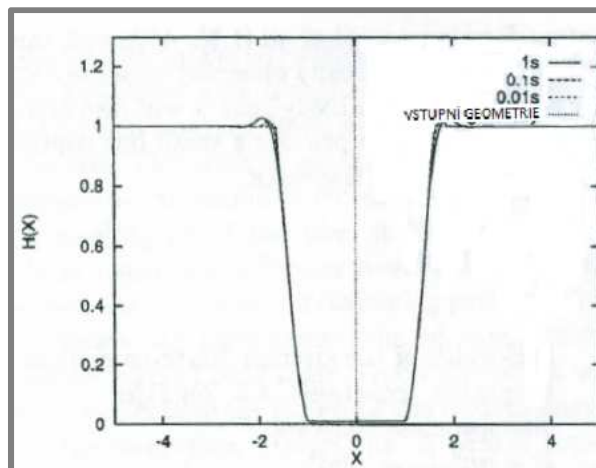
Numericky popsal EHL hladovějící kontakt také Jacod a kolektiv [10], který se zabýval analýzou distribuce maziva do kontaktu při hladovějících podmínkách. Doplnění je rozděleno na “mimo-kontaktní” a “kontaktní”. Mimo-kontaktní doplnění probíhá přímo na valivé dráze a probíhá v intervalu mezi průchody valivého elementu [10].

Druhý mechanismus zpětné distribuce vychází z toku maziva v blízkosti kontaktu způsobené místními kapilárními silami. Jacod se v první části své publikace zaměřil na analýzu proudění maziva kolem pevného kontaktu. Tato analýza byla pak srovnána s experimentálním měřením, které ukázalo shodné výsledky. Tento model byl pak dále rozšířen na pohyblivý kontakt [10].

Počátek hladovění může být způsoben mnoha faktory: provozními podmínkami, přívodem maziva, viskozitou maziva nebo kombinací těchto podmínek. K hladovění v podstatě dochází kvůli selhání distribuce maziva na dráze valivého elementu, kdy je mazivo vytlačeno odvalením valivého elementu. Zvýšená rychlost (snížením doby k zpětnému doplnění maziva do kontaktu), vysoká viskozita nebo omezená dodávka maziva (tuky, emulze), jsou hlavní faktory, které mají tendenci zhoršovat stav hladovění. Jako nejjednodušší způsob měření vlastností při hladovění se ukázalo měření vstupního menisku od Hertzovy oblasti. Tento vstupní meniskus ovlivňuje také množství maziva na dráze valivého elementu [10].

Dřívější práce byly omezeny na relativně velké vrstvy maziva a nebylo možné zkoumat podmínky u silně vyhladovělého kontaktu. Proto cílem Jacodově práce bylo rozšířit tyto analýzy na poměrně tenké filmy, kde tloušťka okolního maziva je menší než 10  $\mu\text{m}$ . Další Jacodův vývoj byl zaměřen na způsoby doplnění maziva. Předchozí práce omezovaly své modely pouze na “mimo kontaktní” doplnění, ale tento výzkum se zabýval také doplněním způsobené účinkem kapilárních sil maziva vytlačeného na okraj dráhy valivého elementu [10].

Profil tloušťky filmu  $h(x,t)$  mimo kontakt je funkcí počátečního profilu, který je definován dvěma parametry ( $h_C$  a  $h_\infty$ ). Kde  $h_C$  představuje hodnotu tloušťky mazacího filmu v dráze kontaktu pro  $|x| \leq l$  zatím co  $h_\infty$  je tloušťka filmu měřitelná mimo kontaktní dráhu. V tomto případě bylo  $h_C=10 \text{ nm}$  a  $h_\infty=1 \mu\text{m}$ . Mezi těmito stabilními výškami hladiny se tloušťka olejového filmu vyvíjí v závislosti na Hertzově tlaku (Obr. 13). Kvůli povrchovému napětí u těchto malých tloušťek filmu dochází pouze k velmi malému doplnění [10].



Obr. 13 Vývoj profilu tloušťky filmu s časem [10]

Jacod také pozoroval vliv rozložení tlaku na distribuci maziva do centrální oblasti kontaktu. Výpočet byl proveden pro dvě hodnoty  $h_C = 10 \text{ nm}$  a  $h_C = 5 \text{ nm}$ . Ze kterého byl pozorován jen nepatrný nárůst tloušťky filmu, a proto se zde nepředpokládá téměř žádné doplňování centrální oblasti. Tento vliv může být důležitý u velmi tenkých centrálních tloušťek  $h_C$ , ale to by vedlo k tloušťkám filmu, které již nejsou fyzicky významné [10].

Damiens [11] se také zaměřil na popsání hladovějícího EHL kontaktu. Cílem Damiensovy práce bylo prozkoumat vliv vstupních parametrů na hladovění. Bylo zde použito kombinace numerického a experimentálního přístupu [11].

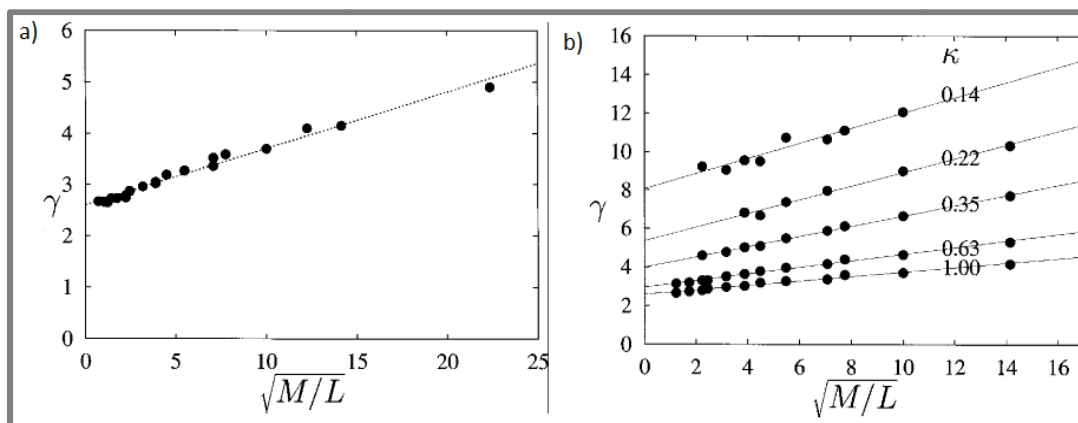
Chování daného EHL kontaktu za hladovějících podmínek je určeno množstvím oleje, které je vytlačeno z dráhy kuličky po každém průchodu valivého tělesa. Toto chování může být popsáno jedním parametrem  $\gamma$  [11].

Damiensovým cílem bylo získat parametr  $\gamma$  v závislosti na provozních podmínkách. To lze provést dvěma způsoby. Prvním, kde kontakt v ustáleném stavu pro různé hodnoty  $H_{oil}$  je použit pro vytváření "hladovějící křivky" a z této křivky je odvozen parametr  $\gamma$  podle Chavalierova vzorce [9] a pomocí metody nejmenších čtverců. Druhý přístup simuluje opakované odvalování kontaktu, kdy na začátku je určitá tloušťka  $H_{oil}$  a každá následující vstupní tloušťka filmu se rovná výstupní tloušťce filmu z předchozího kontaktu [11].

Pomocí matematického modelu a tvaru vstupního olejového profilu  $h_{oil}$  lze určit polohu vstupního menisku. Pro každý soubor mazacích podmínek (zatížení, rychlost, viskozita, geometrie, materiál,  $H_{oil}$ ) je počítán poměr  $R$  centrální tloušťky filmu  $H_C$  a plně zaplavené centrální tloušťky filmu  $H_{eff}$ . Pro výpočet poměru  $R$  byla použita Chavalierova rovnice [9].

Jeli známa  $\gamma$  a tloušťku filmu oleje  $r$  (4) je možné odhadnout tloušťku filmu ve středu kontaktu.

Pomocí Damiensova numerického modelu může být gama funkcí  $1/S$  a tedy  $\gamma = f(\sqrt{M/L})$ . To znamená, že předpokládané výsledky funkce  $M/L$  by měly ležet na stejné přímce. To je doloženo na Obr. 14a. Dále je třeba mít na paměti, že vztah mezi  $\gamma$  a  $M/L$  je patrný pouze v oblasti piezo-visko-elastické, iso-viskózní elastické a iso-viskózní tuhé [11].



Obr. 14  $\gamma$  v závislosti na  $\sqrt{M/L}$  a) pro kruhový kontakt s  $r=1$ ;  $L=2;5;10;20$  a  $M=10;30;100;1000$ ; b) pro eliptický kontakt s  $K=0,14; 0,22; 1,00$ ;  $r=1$  [11]

Výsledky ukázané na Obr. 14a byly získány pro kruhový kontakt za různých podmínek  $M$  a  $L$ . Stejně tak hodnota  $\gamma$  je určena pro eliptický kontakt pro různé hodnoty  $M$ ,  $L$  a  $K$ . Tyto výsledky jsou uvedeny na Obr. 14b. Pokud jde o závislosti  $\gamma$  na eliptičnosti jde vidět, že danou hodnotu  $M/L$  se hodnota  $\gamma$  zvyšuje s klesající  $K$  (širší elipsa). To znamená, že boční tok se snižuje [11].

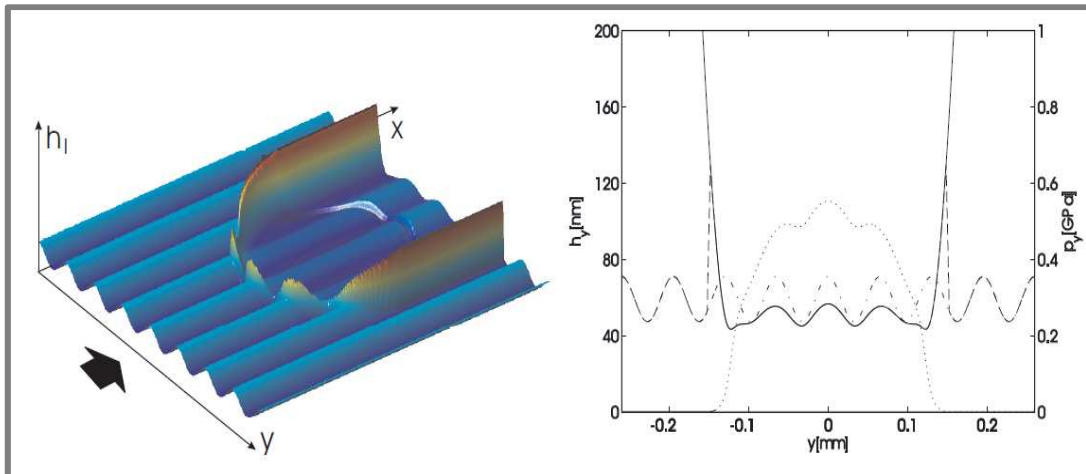
Popovici [6] se nejen zabýval experimentálním pozorováním EHL hladovějícího kontaktu, ale také matematickými modely.

### 1.2.5 Teoretické modely variabilní vstupní vrstvy

Popovici měl za cíl odvodit základní teoretický vzorec, který předpovídá amplitudu uvnitř kontaktu, jako funkci oscilující vrstvy a provozních podmínek, včetně stupně hladovění. Kombinace tohoto vzorce s Fourierovou analýzou, kde harmonické vrstvy oleje přináší možnou předpověď tvaru filmu uvnitř kontaktu, vyplývající z libovolného tvaru vstupní vrstvy. Ustálený stav je považován za problém s vrstvou oleje, která vstupuje do vstupní hranice [6].

$$H_{oil}(Y) = \overline{H_{oil}}[1 - f_a \cos\left(2\pi \frac{Y}{w_Y}\right)] \quad (7)$$

Amplituda harmonické vrstvy oleje je dána  $A_i = \overline{H_{oil}} f_a$ , s  $f_a \in [0,1]$ . Obr. 15 ukazuje typické řešení. Na obrázku jde vidět stopa kontaktu, příčný řez profilu centrálního toku, tloušťku filmu a rozložení vrstvy oleje. Je vidět, že oscilace vrstvy oleje ovlivňují rozložení tlaku a vytváří rozdíl harmonické kmitající výšky filmu, která má stejnou vlnovou délku jako oscilující vstupní vrstvy. Nicméně oscilující vstupní vrstva není zcela přenášena do kontaktu. Amplituda kmitání tloušťky filmu je menší než amplituda kmitání vstupní vrstvy. Poměr amplitudy kmitání filmu v kontaktu s amplitudou kmitání vstupní vrstvy byla zkoumána ve vztahu k provozním podmínkám a stupně hladovění [6].



Obr. 15 3D kontakt, příčný řez tlaku v kontaktu a výšky mazacího filmu [6]

Další, kdo se zabýval EHL hladovějícím kontaktem, byl Zoelen [12] a kolektiv, kteří vyvinuli model pro hladovějící mazání predikující změny dodávání maziva do kontaktu. V tomto modelu je tloušťka filmu uvnitř kontaktu závislá na dodávané vrstvě maziva do kontaktu. Model byl omezen pouze na eliptický a kruhový kontakt za hladovějících podmínek. Model byl také experimentálně ověřen [12].

V běžném matematickém modelu mazání je vztažná soustava s mazacím filmem pevná a analýza je omezena pouze na oblast kolem zóny EHL kontaktu. V této práci byl použit jiný přístup. Hlavní myšlenkou tohoto modelu je kvantifikovat tok maziva kolmo ke směru valení, tj. boční tok a použít jej k předpovědi snížení celkového množství maziva na oběžné trati [12].

### 1.2.6 Rovnice poklesu tloušťky filmu

$$h_{CS}(t) = (C_2 t + h_{CS,0}^{-2})^{-1/2} \quad (8) \text{ s } C_2 = \frac{p_H \alpha \rho_C^{-2} C}{3 \eta_0 l_t b^2} = \frac{E' K^{-2} \rho_C^{-2} C}{12 \eta_0 l_t R \varepsilon} \quad (9)$$

Kde:

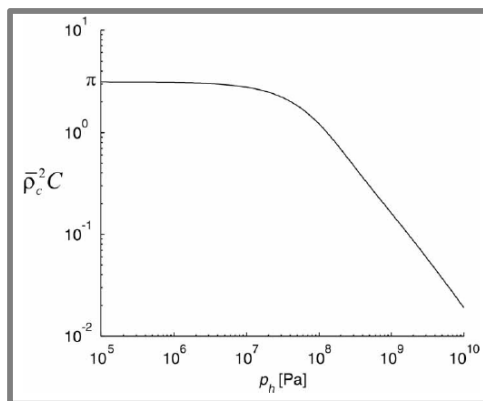
$h_{CS,0}$  je centrální tloušťka filmu při  $t=0$

Pokles asymptotické tloušťky filmu je dán parametrem  $C_2$  a podle rovnice (9) míra poklesu tloušťky filmu je menší pro větší viskozitu  $\eta_0$ , větší pro celkovou délku dráhy  $l_t$  a je nezávislá na rychlosti  $u_m$ . Kromě toho pro konkrétní tlak  $p_H$  je míra poklesu tloušťky filmu větší pro větší snížení modulu elasticity  $E$  a větší hodnoty parametru geometrie  $K^2/R\varepsilon$  [12].

Parametr  $\rho_C^{-2} C$  klesá s funkcí  $p_H$ , jak jde vidět na Obr. 16 pro  $\eta_0=0,8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  a  $\alpha=20\cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ . Tlak v Hertzově oblasti může být zapsán jako:

$$p_H = \sqrt{\frac{3F_K E^{-2}}{32\pi R^2 \varepsilon^2}} \quad (10)$$

Podle rovnice (10) Obr. 16 a rovnice (9) větší zatížení  $F$  dává nižší hodnoty  $C_2$  a tedy menší hodnoty poklesu tloušťky filmu. Toto chování ukazuje, že optimální řešení mazacího kontaktu, tj. maximální mazací film, v případě hladovějícího kontaktu nemusí nutně znamenat minimalizaci zatížení [12].

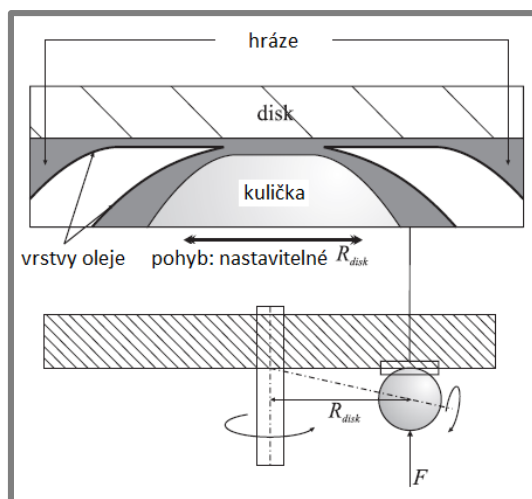


Obr. 16 Parametr  $\rho_c^{-2}$  v závislosti na  $p_H$ , pro  $\eta_0=0,8$  a  $\alpha=20 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$  [12]

Model byl ověřen pomocí optické interferometrie v experimentálním zařízení, ve kterém lze měřit tloušťku mazacího filmu mezi kuličkou (válečkem) a rotujícím diskem. V tomto zařízení lze nastavit různé hodnoty rychlosti otáček disku, zatížení aplikované na valivý element a také vzdálenost kontaktu od středu disku [12].

Valivý element je umístěn do zařízení a je nastaven poloměr otáčení na disku. Pomocí injekční stříkačky jsou aplikovány malé kapky oleje na povrch kuličky několik milimetrů před kontakt. Dále pak je připevněn skleněný disk, a spuštěno odvalování kuličky po disku s rychlostí 300 mm/s, toto odvalování běží půl hodiny. Během tohoto chodu jsou vytvořeny hráze na obou stranách dráhy kuličky. Hráze jsou relativně velké ve srovnání s tloušťkou filmu a způsobují výrazné doplňování oleje do dráhy kuličky v intervalu mezi jednotlivými průchody kontaktu. Pro minimalizaci doplňování se pomalu v průběhu chodu upraví poloměr trati a tím se vytlačí boční hráze ~2 mm od původní trati. Znázorněno na Obr. 17. Následně je kulička opět umístěna na původní poloměr a je nastavena požadovaná rychlost valení [12].

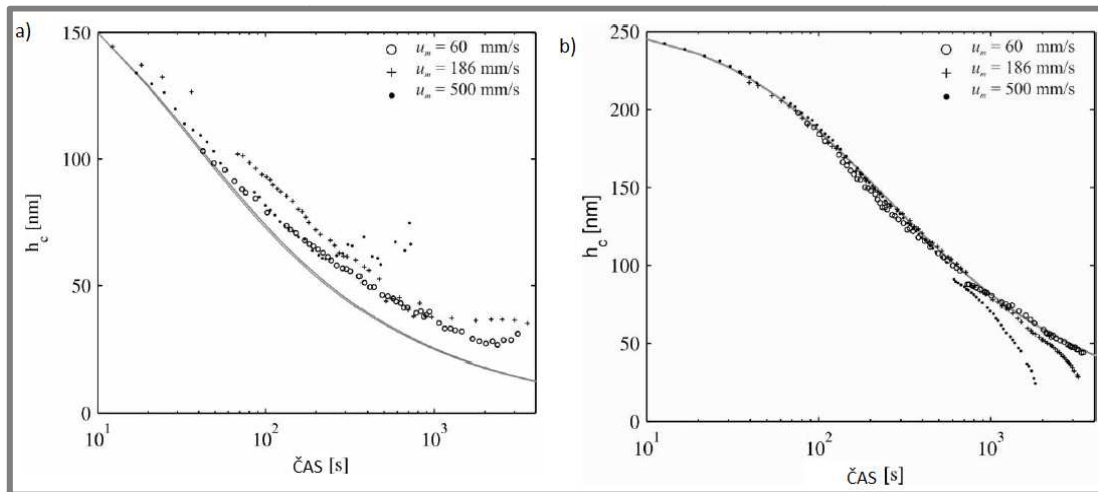
Použitý olej je vysoko viskózní k minimalizaci zpětného natečení oleje na oběžnou trať.



Obr. 17 Snížení účinku zpětného natečení odtlačením hrází do stran [12]

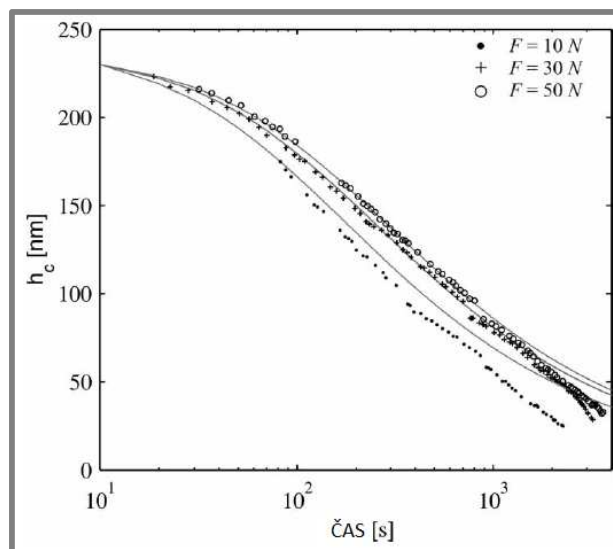
Experimentální výsledky pro kruhový a eliptický kontakt při různých rychlostech a zatížení jsou uvedeny na Obr. 18 a Obr. 19. Naměřené hodnoty jsou na obrázcích

znázorněny body. Křivky na obrázcích ukazují teoretickou tloušťku filmu, která se vypočítá podle rovnice (7) tj. asymptotický model poklesu tloušťky filmu [12].



Obr. 18 Naměřená a vypočtená centrální tloušťka filmu, a) kruhový kontakt při různých rychlostech, b) eliptický kontakt při různých rychlostech [12]

Naměřená tloušťka filmu u kruhového kontaktu (viz Obr. 18a) je větší než to, co předpovídal model. Tento rozdíl byl vysvětlen účinky zpětného natečení. Skutečnost že zpětné natečení je značné lze pozorovat především na konci měřicí série, kdy je dosaženo rovnovážné tloušťky filmu. Při větších rychlostech je rovnováha dosažena při větších tloušťkách filmu, které jsou s největší pravděpodobností způsobené dalším mechanismem zpětného natečení. Tento mechanismus distribuce je způsoben většími odstředivými silami, které vznikají při vyšších rychlostech. Upravením poloměru tratě, jak již bylo vysvětleno, může zpětné doplňování výrazně zpomalit [12].



Obr. 19 Naměřená a vypočtená centrální tloušťka filmu pro eliptický kontakt při různých zatížení [12]

Naměřené tloušťky filmu pro eliptický kontakt (Obr. 18b) jsou ve velmi dobré shodě s teoretickou tloušťkou. Na rozdíl od kruhového kontaktu kdy měření

vykazuje rovnovážnou tloušťku filmu, což znamená, že jsou zde účinky zpětného natečení větší. Menší účinek zpětného natečení u eliptického kontaktu je způsoben širší dráhou a menším sklonem hrází v porovnání s kruhovým kontaktem [12].

Van Zoelen [13] se ve své další práci zabýval vlivem EHL kontaktního tlaku na tloušťku mazacího filmu na oběžné dráze disku. Matematický model je určen pro predikci rozložení tloušťky filmu v závislosti na čase, kdy jsou zanedbány účinky zpětného natečení maziva. Tento model je pro kruhový i eliptický kontakt. Tloušťka filmu uvnitř hladovějícího EHL kontaktu je dána tloušťkou filmu dodávaného do kontaktu. Tento model může být použit pro predikci snížení tloušťky filmu [13].

### 1.2.7 Vztah mezi tloušťkou filmu a vrstvou maziva

1.2.7

Vztah mezi tloušťkou filmu a vstupní vrstvou maziva v asymptotickém režimu ( $H_{oil} \downarrow 0$ ).

$$H_{(Y,\bar{t})} = \frac{2\overline{H_{\infty}}(Y,t)}{\bar{\rho}(P_H)} \quad (11)$$

Centrální tloušťka filmu je určena jako funkce času pro asymptotický režim:

$$H_{CS}(t) = \left(\frac{1}{2}\rho_C^2 C(O)t + H_{CS,0}^{-2}\right)^{-1/2} \quad (12)$$

kde:

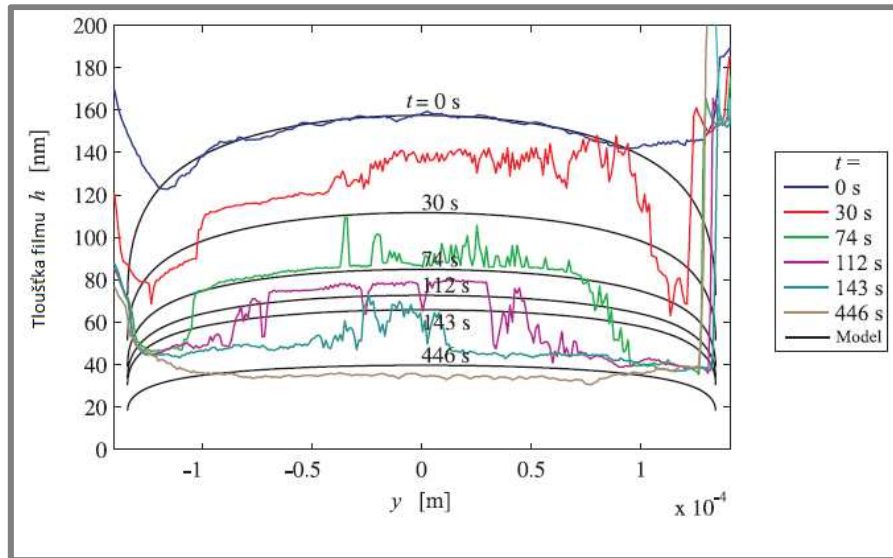
$\rho_0 = \rho(p=1)$  je bezrozměrná hustota maziva ve středu kontaktu,

$H_{CS,0}$  je centrální tloušťka filmu v  $t=0$ .

Tyto matematické modely byly ověřeny experimentálně na experimentálním zařízení popsane v jeho dřívější publikaci [12].

Na Obr. 20 jsou znázorněny výsledky z experimentálního měření pro 6 různých časů a je zde rovněž znázorněno numerické řešení tloušťky filmu z rovnice (11).

Výsledky ukazují, že naměřená tloušťka filmu v centrální oblasti je větší než predikuje model, ale obecné rozložení je predikováno dobře [13].

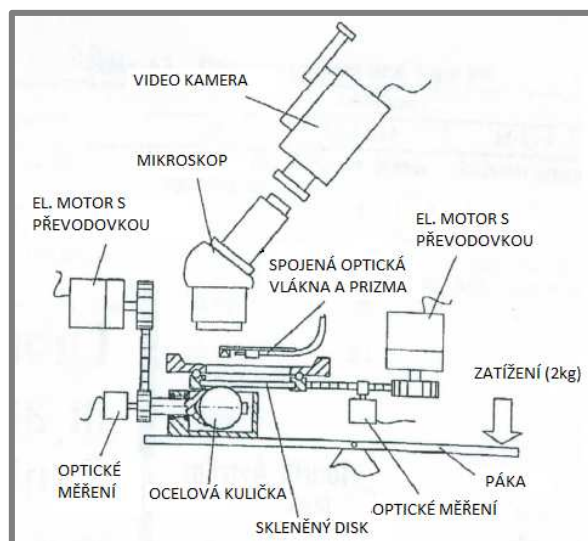


Obr. 20 Rozložení tloušťky filmu (barevné křivky- naměřené hodnoty, černé křivky- numerické hodnoty)[13]

### 1.3 Experimentální měření plastických maziv

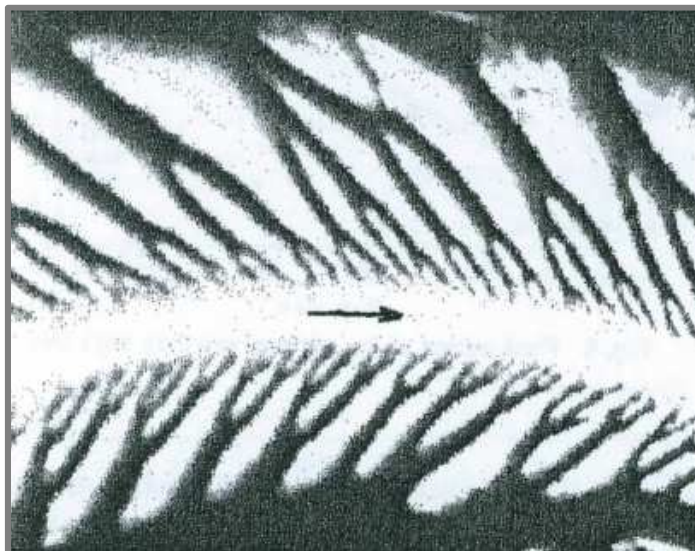
Astron [14] se ve své publikaci zabýval experimentálním pozorováním plastických maziv. Ve své práci použil experimentální přístroj s kuličkou a diskem pro pozorování doplňování maziva v elastohydrodinamickém bodovém kontaktu. Pohyb plastického maziva bylo možné pozorovat přidáním částic molybdenu disulfidu. Tyto částice neovlivňují měřené plastické mazivo [14].

Použité zařízení je zobrazeno na Obr. 21. Hlavní části jsou ocelová kulička a skleněný disk. Toto zařízení použil pro svá měření tloušťky filmu již Astron (1991). Pro měření bylo použito optické interferometrie. Místo běžného měření tloušťky filmu v kontaktu zde byl pozorován tok maziva kolem kontaktu. Kulička o průměru 50 mm je zde umístěna proti skleněnému disku. Kulička i disk se můžou nezávisle otáčet a lze tak dosáhnout čistého valení nebo také různého stupně prokluzu. Kontakt je pak pozorován přes mikroskop a zaznamenáván kamerou [14].



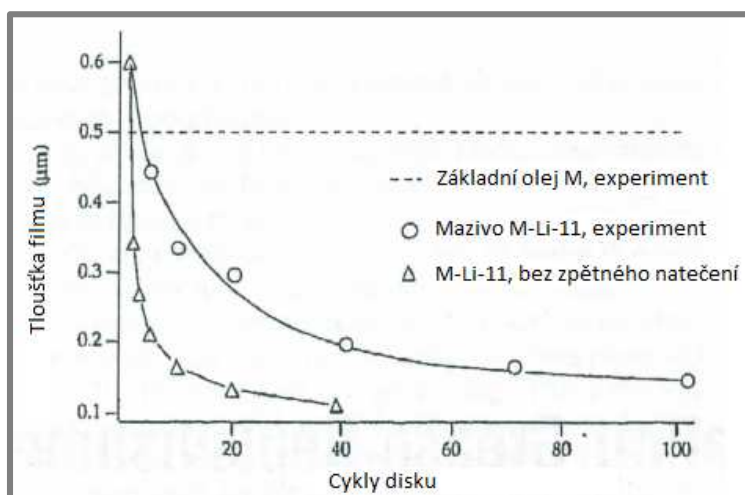
Obr. 21 Experimentální zařízení s kuličkou a diskem [14]

Plastická maziva jsou na vstupu v plně zaplaveném kontaktu rozdělena po první otáčce valivého elementu na dvě pásma, která jsou vytlačena daleko od kontaktní oblasti. V praxi tyto dvě pásma fungují jako těsnění ložiska před nečistotami a vodou. V oblasti vstupní zóny, kde se rozchází mezera mezi kuličkou a skleněným diskem mazivo kavituje. Kavitační obraz vypadá, jako strom viz Obr. 22. U mazacích olejů se větve mimo trať rozprostřou a mizí, ale u plastických maziv si zachovávají svůj tvar (protože napětí v plastických mazivech klesá) [14].



Obr. 22 Kavitační vzor vytvářený na výstupu u plně zaplaveného kontaktu [14]

Výsledky centrální tloušťky filmu, v závislosti na počtu otáček disku jsou znázorněny na Obr. 23. Při srovnání vypočtené tloušťky filmu bez doplňování s naměřeným poklesem tloušťky filmu je patrné, že dochází k některému ze způsobů doplňování [14].



Obr. 23 Centrální tloušťka filmu mezi kuličkou a diskem [14]

## 2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

Tloušťka mazacího filmu v kontaktu u nekomfortních třecích povrchů může být ovlivněna řadou provozních faktorů. Mezi čtyři základní faktory ovlivňující mazání patří: množství oleje, kontaktní rozměr, viskozita oleje a rychlost. Tyto všechny faktory ovlivňují, zda se kontakt nachází v hladovějícím nebo plně zaplaveném režimu.

Pro plně zaplavený režim mazání je patrné, že s rostoucí valivou rychlostí roste tloušťka mazacího filmu (Hamrock-Dowsonovo pravidlo). Nárůst tloušťky je způsoben pohybem třecích ploch, kdy je mazivo strháváno do místa kontaktu. Na tloušťku filmu má velký vliv zejména rychlost ale i dynamická viskozita maziva  $\eta_0$  a viskózně-tlakový koeficient  $\alpha$ .

Hladovění se naopak vyznačuje klesající tloušťkou filmu při nárůstu rychlosti. Tento pokles je způsoben nedostatečným množstvím maziva ve vstupní oblasti. Malé množství maziva může být způsobeno například velkou rychlostí, kdy je mazivo po odvalení kontaktu vytlačeno z dráhy kontaktu a nestihne natéct včas zpět do kontaktní dráhy. Další příčinou může být vysoká viskozita použitého maziva. Hladovění se proto většinou vyskytuje u vysokorychlostních ložisek, nebo u ložisek mazaných tuhými mazivy.

Prvními experimentálními studii hladovějícího kontaktu se zabýval Wedeven [3]. Ve své práci došel k závěru, že hladovění v EHL kontaktu je závislé na umístění vstupní hranice a centrální tloušťka filmu je v hladovějícím režimu funkcí polohy vstupního menisku od Hertzovy oblasti. Wedeven při svých experimentech pozoroval, že počáteční hladovění se projevuje snížením talku v Hertzově oblasti a tloušťka mazacího filmu se snižuje až na nulu, jak se vstupní meniskus přibližuje k Hertzově oblasti. Polohou vstupního menisku na tloušťku filmu se dále pak zabýval Wolveridgen [7] pomocí semi-analytického řešení.

Hladovění se stává postupně výraznějším, jak se viskozita a valivá rychlost zvyšuje. Povrchové napětí u maziva může způsobit zpětné natečení na oběžnou trať a zabránit tak hladovění. Toto zpětné natečení nastává jen v tom případě, kdy je vrstva maziva na okraji trati dostatečně velká, aby odolávala silám, způsobující odtok maziva (gravitační a odstředivé síly). Chiova [4] analýza ukázala, že míra hladovění závisí především na tloušťce vrstvy maziva na okraji trati. Také zjistil, že tloušťka mazacího filmu je závislá na množství maziva ve valivém systému, stejně jako na odstředivé a gravitační síle v rotující soustavě.

Prvním, kdo matematicky vyjádřil závislost polohy vstupního menisku na tloušťku filmu v hladovějícím EHL režimu, byl Hamrock a Dowson[8] a Ranger [15].

Experimentálním pozorování EHL kontaktu také pozoroval Kingsbury[5], který se zabýval „vyprahlým“ EHL mazáním. Vyprahlý EHL mazací režim leží mezi hladovějícím a smíšeným režimem. Ložiska ve vyprahlém režimu se vyznačují nejmenším krouticím momentem a nejlíp definovanou osou otáčení ze všech mazacích režimů.

Hladovění se vyskytuje ve velké míře u ložisek mazaných plastickými mazivy a touto problematikou se jako první zabýval Astrom[14].

Jiným přístupem ke studii hladovějícího mazání se zabýval Elrod [16] a Chevalier [9]. V jejich práci je pokles tloušťky filmu vztažen na množství maziva na povrchu oběžné trati. Tento parametr má tu výhodu, že je v praxi snadno měřitelný.

Dalším kdo zkoumal problematiku hladovění, byl Jacod [10] a kolektiv, kteří ze svých pozorování došli k závěru, že u tenkých vrstev maziva, mechanismy doplňování nehrají významnou roli. Tyto mechanismy vytvářejí pouze mírnou modifikaci tloušťky filmu. Tato predikce byla podepřena i experimentálním pozorováním.

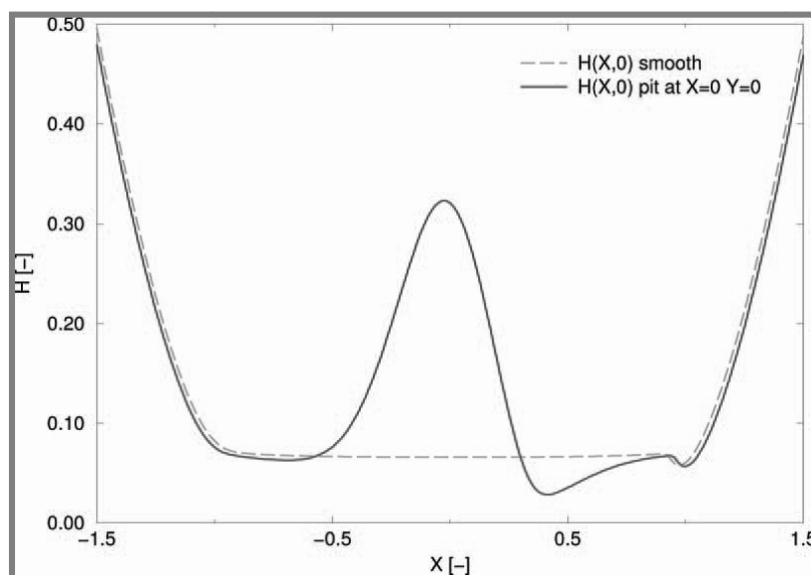
Damiens ve své publikaci [11] popisuje utváření mazacího filmu za hladovějících EHL podmínek jako funkci množství maziva, kontaktních podmínek a eliptičnosti kontaktu. Poměr  $M/L$  se ukazuje být rozhodující parametr predikující tok maziva v kontaktu do stran. Bezrozměrný parametr hladovění  $\gamma$  odvozený Chevalierem byl použit k charakterizování hladovění za různých podmínek mazání v piezo-elastickém režimu. Experimentální a numerické výsledky ukázaly, že bezrozměrný parametr  $\gamma$  (odpor proti toku maziva do stran) závisí na parametru  $M/L$  a je také funkcí tloušťky filmu.

Z novějších publikací sem například patří Wijnantova práce [17], která se týkala studie dynamického hladovějícího EHL kontaktu a pomocí Elroda, Yina [18] dosáhli numerického řešení pro hladovějící termální EHL kontakt (jako mazivo předpokládali Newtonskou kapalinu).

Problematiku hladovějícího EHL kontaktu pozoroval také Popovici [6] a Van Zoelen [12]. Popovici své experimenty hladovějícího kontaktu soustředil na vliv valivé rychlosti na tloušťku mazacího filmu a Van Zoelen se ve své práci zabýval vlivem EHL kontaktního tlaku na tloušťku mazacího filmu na oběžné dráze disku.

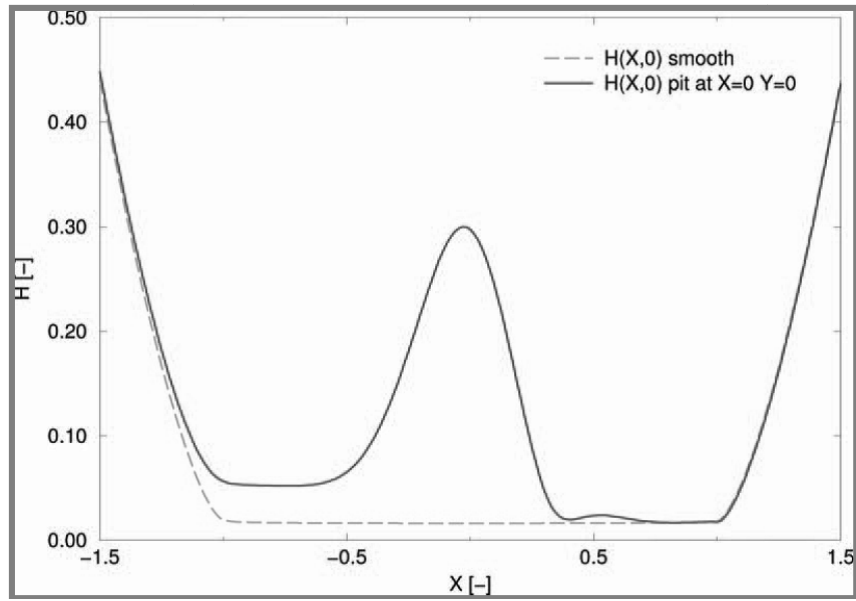
Cílenou modifikací ploch třecích povrchů u hladovějícího kontaktu se zabýval Lugt [19], který se zabýval matematickým popisem průchodu mikrotisku kontaktem za hladovějícího nebo plně zaplaveného režimu.

Lugt uvádí, že při čistém valení mikrotisky negativně ovlivňují tloušťku filmu a také, že u mikrotisků vytvořených vnikáním cizího tělesa vzniká oblast s vysokou koncentrací napětí, která může vést k porušení třecích povrchů.



Obr. 24 Tloušťka filmu u plně zaplaveného kontaktu, pozice mikrotisku  $X=0, Y=0$  [19]

Pro plně zaplavený kontakt, jak uvádí Lugt, je tloušťka filmu stejná jako u povrchů bez mikrotisků, pokles nastává jen před mikrotiskem (Obr. 24).



Obr. 25 Tloušťka filmu u hladovějícího kontaktu, pozice mikrovrtisku  $X=0, Y=0$  [19]

Za mikrovrtiskem je u hladovějícího režimu tloušťka filmu až 3 krát vyšší než před mikrovrtiskem, kde se tloušťka příliš neliší od povrchů bez mikrovrtisků (Obr. 25).

### 3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

**3**

---

Cílem diplomové práce je analýza přechodových jevů mezi zcela zaplaveným a hladovějícím elastohydrodynamicky mazaným kontaktem. Pro splnění tohoto cíle je nutno provést následující kroky:

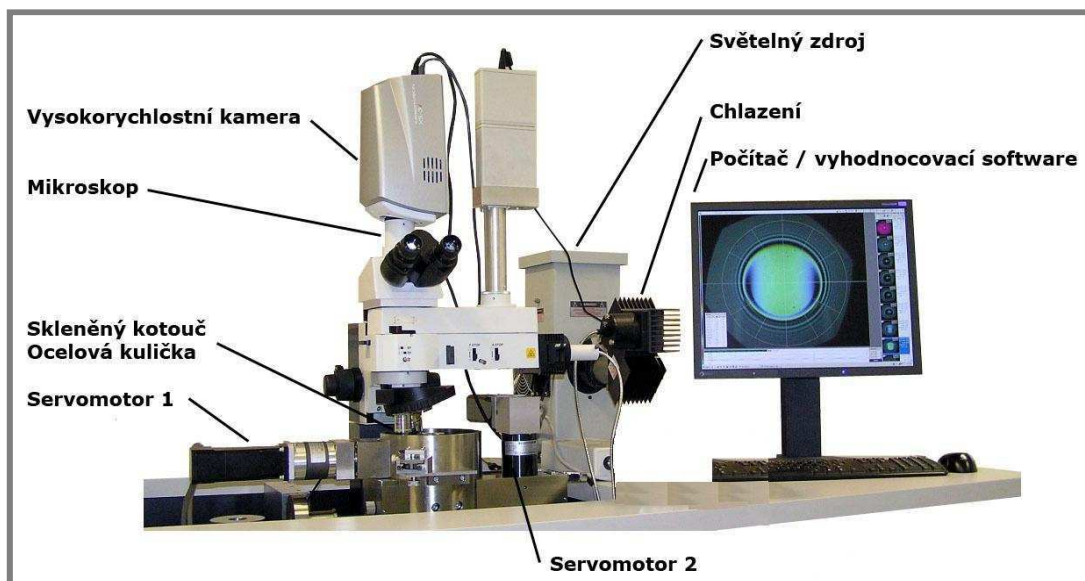
- *Experiment při plně zaplaveném a hladovějícím kontaktu.*
- *Experiment při plně zaplaveném a hladovějícím kontaktu s mikrotiskou.*
- *Experiment měření tloušťky filmu v závislosti na poloze vstupního menisku.*
- *Vyhodnocení výsledků provedených experimentů.*

## 4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Veškeré přípravy a měření byly provedeny na zařízení (tribometr, vnikací Rockwellova tělíška), které se nacházejí v laboratoři tribologie na Ústavu konstruování.

### 4.1 Experimentální zařízení

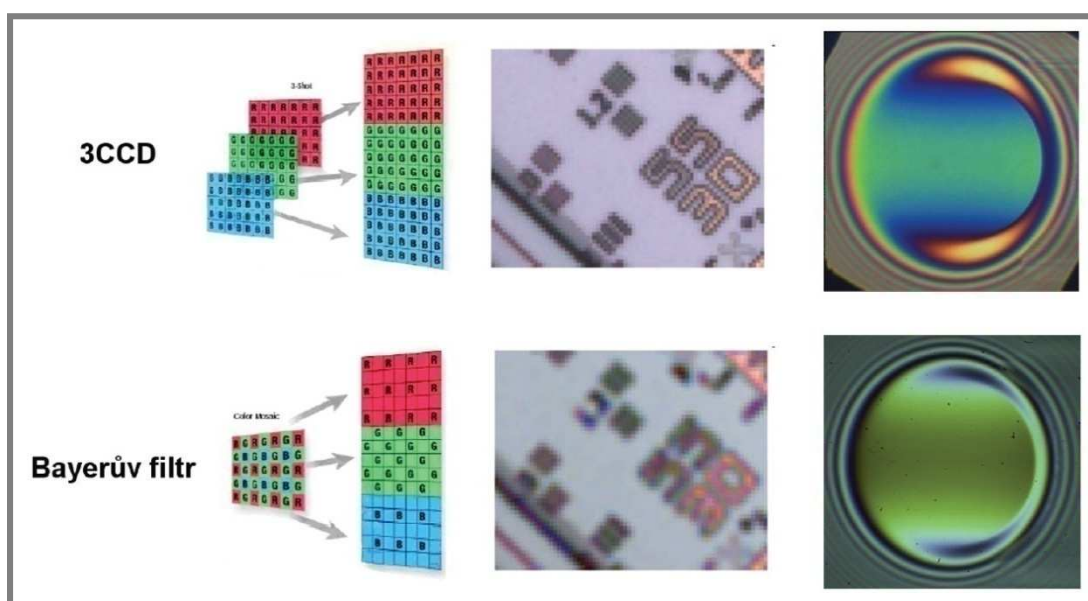
K simulování reálných podmínek, které vznikají v tribologických soustavách je používán tribometr, který je zobrazen na Obr. 26 a slouží k experimentálnímu pozorování mazacích filmů. Tento tribometr využívá kolorimetrické interferometrie ke studiu tloušťky mazacích filmů. Pomocí tohoto tribometru je možné simulovat reálné podmínky, které vznikají například u ložisek. Tenký mazací film se vytváří mezi skleněným diskem a ocelovou kuličkou, jejichž osy rotace jsou vzájemně kolmé. Zatížení se do kontaktu aplikuje přes skleněný disk, který je spojen s dvojitou pákou s pohyblivým závažím a jde tak plynule nastavit velikost zatížení. Horní strana disku je pokryta protidrazovou vrstvou a spodní vrstvou chromu. Oba třecí povrchy jsou poháněny servomotory a lze tak nastavit nezávisle na sobě rychlosti kuličky i disku. Rychlosti jsou řízeny programovatelným měničem frekvence. Toho se nejčastěji využívá při simulování reálných podmínek u čistého odvalování kuličky po disku, reverzaci nebo různých stupňů prokluzu.



Obr. 26 Experimentální zařízení [15]

Před experimentem je umístěna ocelová kulička do tribometru, aplikuje se požadované množství maziva na kuličku po případě do zásobníku maziva a nasadí se skleněný disk. Při experimentálním pozorování jsou zaznamenávány chromatické interferogramy při průchodu zvoleného místa na povrchu vzorku mazaným kontaktem. Pomocí mikroskopového zobrazovacího systému založeného na principu průmyslového mikroskopu Nikon Optiphot 150 je možné vizuálně pozorovat mazaný kontakt. Na tento mikroskop je pak dále umístěna kamera, pomocí již jsou interferogramy snímány. V tomto případě byly použity dvě kamery.

Vysokorychlostní kameru Phantom v710, která byla použita k snímání interferogramů s cílenou modifikací třecích povrchů u hladovějšího i plně zaplaveného režimu. Tato kamera je založena na snímání barevného obrazu jedním čipem, na jehož jednotlivých pixelech jsou naneseny barevné filtry v bayrovském uspořádání. Další nezbytnou součástí pro zaznamenávání snímků je xenonový zdroj bílého světla s výkonem až 1000 W, který v kombinaci s vysokorychlostní kamerou umožňuje snímat až 7530 snímků za sekundu v rozlišení 1280 x 800 pixelů. Druhou použitou kamerou byla kamera s 3CCD technologií. Na Obr. 27 je vidět srovnání vysokorychlostní kamery s jedním čipem s barevnými filtry s bayrovským uspořádáním a kamery s 3CCD technologií. Na tomto obrázku je vidět, že při snímání jedním senzorem s rozlišením 2048 x 2048 bude rozlišení ve skutečnosti pouze 1024 x 1024 oproti 3CCD technologii, která by měla rozlišení 2048 x 2048 [20].



Obr. 27 Srovnání jednočipové (Bayer filtr) technologie a technologie 3CCD [20]

Pro téměř všechna měření byl použit objektiv s 10násobným zvětšením, výjimkou byl případ při měření polohy menisku, kdy byl použit objektiv s 5násobným zvětšením.

V programu ACHILES byly pak interferogramy vyhodnoceny. Tento program za pomoci kolorimetrické interferometrie vyhodnocuje tloušťku mazacího filmu. Porovnáním interferenčních proužků lze stanovit tloušťku mazacího filmu ve vzniklých tenkých vrstvách maziva.

## 4.2 Cílená modifikace topografie třecích povrchů

4.2

Cílená modifikace topografie třecích povrchů se vytváří rozmístěním mikrovrtků po povrchu zkušební tělesa. Mikrovrtky lze na povrchu vytvářet různými metodami, např. pomocí svazku iontů, leptání, speciální laserovou metodou LST (laser surfacetexturing) nebo Rockwellovým vnikajícím tělískem. V tomto případě byly mikrovrtky zhotoveny na zařízení pracující s Rockwellovými vnikajícími tělísky, které se nachází v laboratoři tribologie na Ústavu konstruování. Toto zařízení využívá mikroskopu, na kterém je na místo objektivu umístěn přípravek s vnikacím

tělískem a tenzometrickým snímačem. Vytvoření mikrovrtisku probíhá manuálním otočením jemného posuvu mikroskopu. Jako vnikací tělísko se zde používá diamantový kužel běžně využívaný při měření tvrdosti podle Rockwella, s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a poloměrem zaoblení špičky 0,2 mm. Vnikací tělísko je umístěno v přípravku s tenzometrickým snímačem, na kterém se přesně odečítala zatěžovací síla. Mikrovrtisky se vytváří na ocelové kuličce AISI 52100 o průměru 25,4 mm s drsností  $R_a$  0,01  $\mu\text{m}$ . Bylo provedeno šest různých mikrovrtisků s postupným zvyšováním vnikající síly. Vnikající síly a hloubky mikrovrtisku jsou uvedeny v Tab. 4.

*Tab. 4 Hloubka mikrovrtisku [21]*

| Síla [N] | Hloubka [nm] |
|----------|--------------|
| 3        | 160          |
| 5        | 350          |
| 7.5      | 650          |
| 10       | 910          |
| 12.5     | 1200         |
| 15       | 1490         |

## 5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

5

### 5.1 Vstupní měření

5.1

Na začátku experimentálních měření byla provedena měření plně zaplaveného kontaktu k ověření správnosti měřicí metody a hladovějícího kontaktu k určení podmínek (množství maziva, rychlost valení, teplota, zatížení apod.), při kterých nastává hladovění.

Pro měření bylo použito mazivo LSBS, základový minerální olej bez aditiv. Vlastnosti maziva jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Vlastnosti oleje

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Označení oleje             | LSBS                  |
| Dynamická viskozita $\eta$ | 0,69 Pa·s (při 20 °C) |
| Index lomu (difrakce)      | 1,492                 |

#### 5.1.1 Vstupní měření plně zaplaveného kontaktu

5.1.1

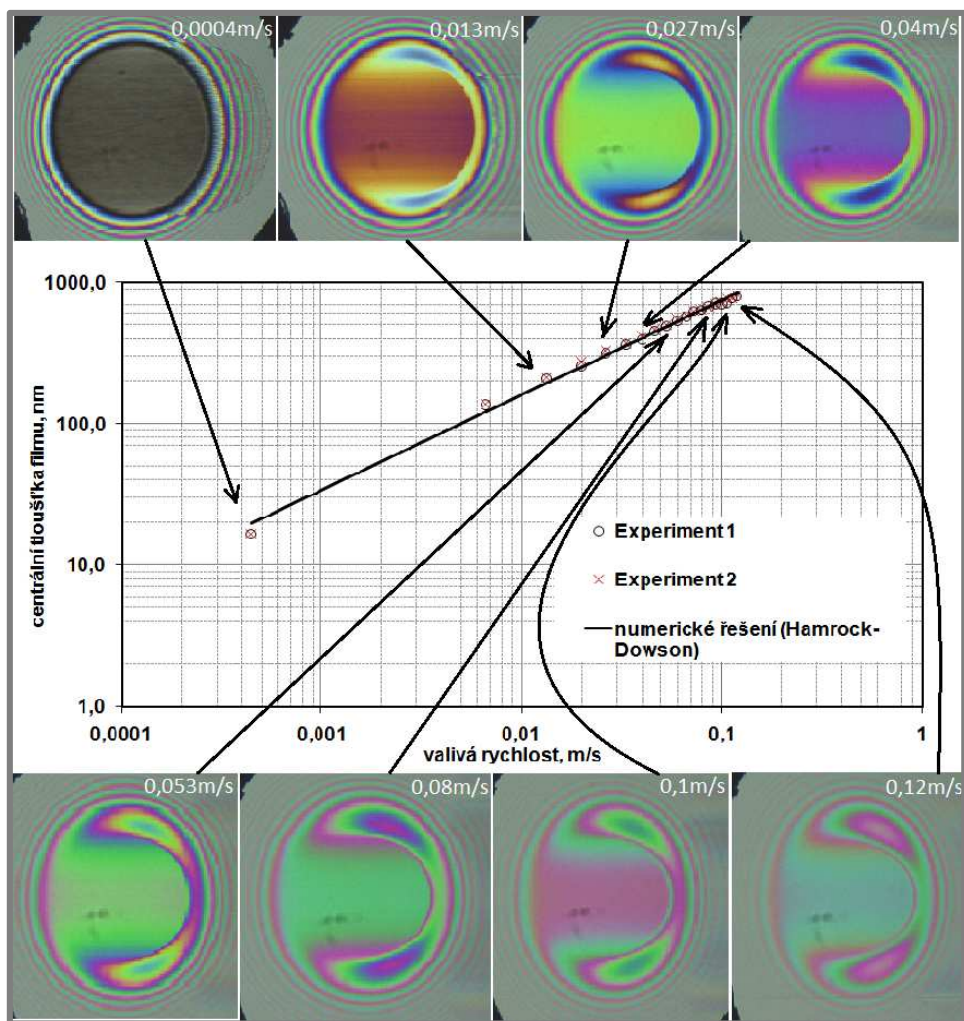
Pro ověření správnosti měřicí metody bylo provedeno měření s plně zaplaveným EHL kontaktem. Použité mazivo bylo LSBS jehož vlastnosti jsou uvedeny výše. Toto mazivo bylo nalito do zásobníku maziva a testovaná kulička je částečně ponořena v tomto oleji. Měření probíhalo při valivé rychlosti  $0,004 - 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , zatížení 27,4 N a teplotě 24 °C. Výsledky měření jsou vyneseny do grafu na Obr. 28, kde je vidět přímkový nárůst tloušťky filmu s rychlostí. Tloušťka centrálního mazacího filmu se pohybovala od 17 do 850 nm.

K ověření správnosti měřených hodnot byl použit Hamrock-Dowsonův matematický model.

$$H_c = 2,69U^{0,67}W^{-0,067}G^{0,53}(1 - 0,61e^{-0,73k}) \quad (13)$$

Tento matematický model detailně popisuje vliv bezrozměrných parametrů  $U$ ,  $W$ ,  $G$  a elipticity  $k$  na tloušťku a tlak v tenkých mazacích filmech. Tato rovnice centrální tloušťky filmu je dodnes používána k predikci tloušťky mazacího filmu v EHL mazaných kontaktech a je také často používána jako referenční hodnota při porovnání teoretických či experimentálních výsledků.

Výsledky matematického modelu jsou rovněž vyneseny do grafu na Obr. 28. Z tohoto grafu lze vidět, že experimentální výsledky jsou v dobré shodě s numerickými výsledky.



Obr. 28 Graf závislosti tloušťky filmu na rychlosti valení v plně zaplaveném režimu

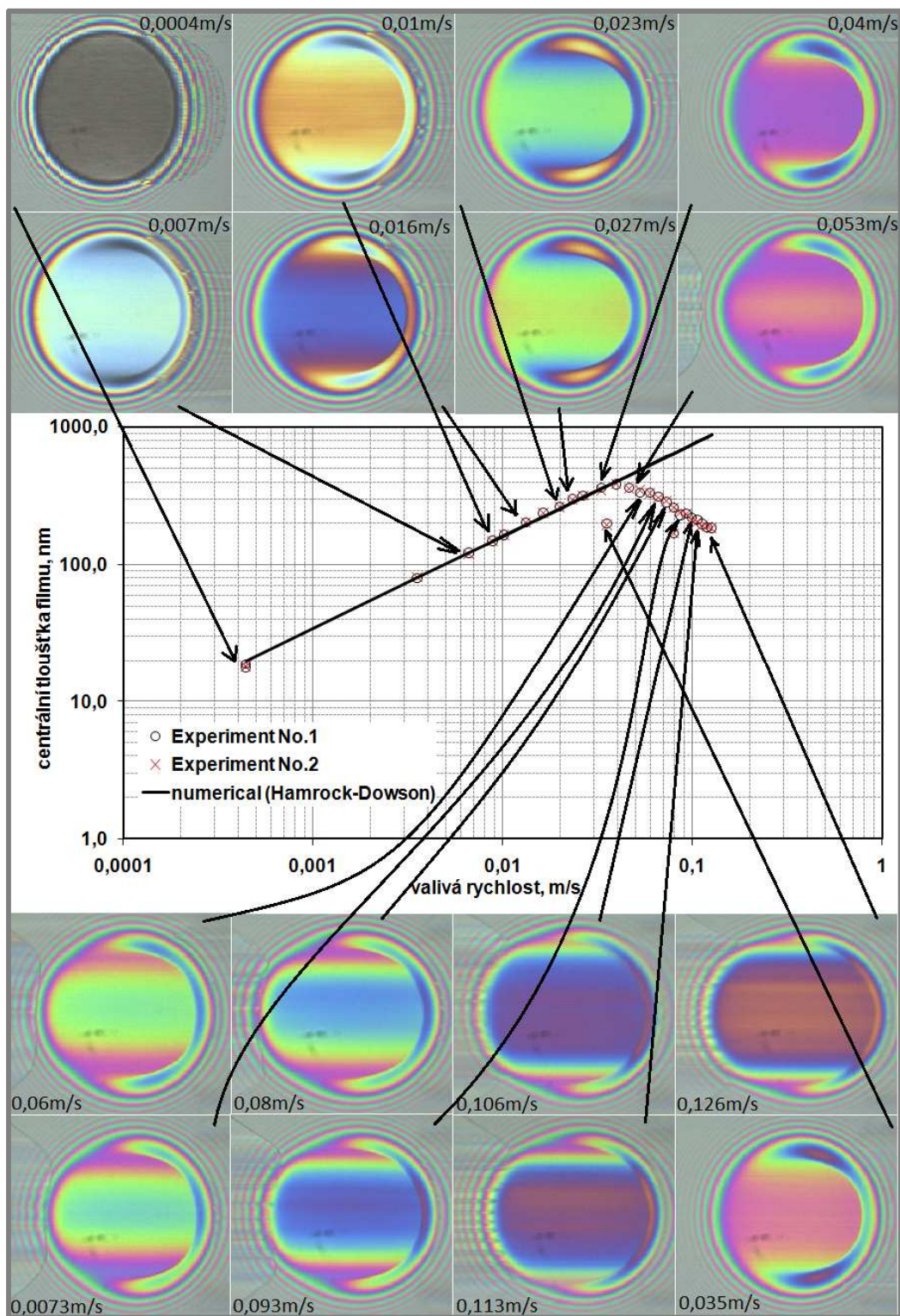
Pro vyloučení chyb měření bylo experimentální měření provedeno dvakrát, obě série výsledků jsou vyneseny do grafu.

Tab. 6 Měření plně zaplaveného kontaktu

| Měření plně zaplaveného kontaktu |            |
|----------------------------------|------------|
| Valivá rychlost                  | 0-0,12 m/s |
| Teplota                          | 25 °C      |
| Zatížení                         | 27,4 N     |
| Tloušťka mazacího filmu          | 17-850 nm  |

### 5.1.2 Vstupní měření hladovějícího kontaktu

K určení provozních podmínek hladovějícího kontaktu bylo nutné provést měření s omezeným množstvím maziva. Bylo zde opět použito mazivo LSBS jehož vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 5. Měření proběhlo při zatížení 27,4 N při okolní teplotě 25 °C. Mazivo se aplikovalo před umístěním skleněného disku na ocelovou kuličku. Pro nanášení přesného množství maziva se použila mikropipeta a bylo nanášeno 24  $\mu\text{l}$ .



Obr. 29 Graf závislosti tloušťky filmu na valivé rychlosti v hladovějícím režimu

Měření v hladovějícím režimu probíhalo v rozmezí valivé rychlosti 0,004 až 0,126  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podle teorie uvedené v kapitole 1.1, k počátku hladovění dochází v okamžiku, kdy se vstupní meniskus začne přibližovat k Hertzově oblasti a plně hladovějící režim vzniká, když tento vstupní menisku začne s Hertzovou oblastí splývat.

Podle výsledků vynesných do grafu na Obr. 29 se hladovění začíná projevovat při rychlosti  $0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při této rychlosti byla dosažena maximální centrální tloušťka filmu 383 nm. Po překročení této rychlosti klesá centrální tloušťka mazacího filmu. V grafu na Obr. 29 jsou znázorněny dvě série měření, pro vyloučení chyb měření. Obě tyto série mají velmi shodné výsledky. Do rychlosti  $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (počátku hladovění) se navíc obě tyto série měření shodují s výsledky z Hamrock-Dowsonového matematického modelu (plná černá křivka).

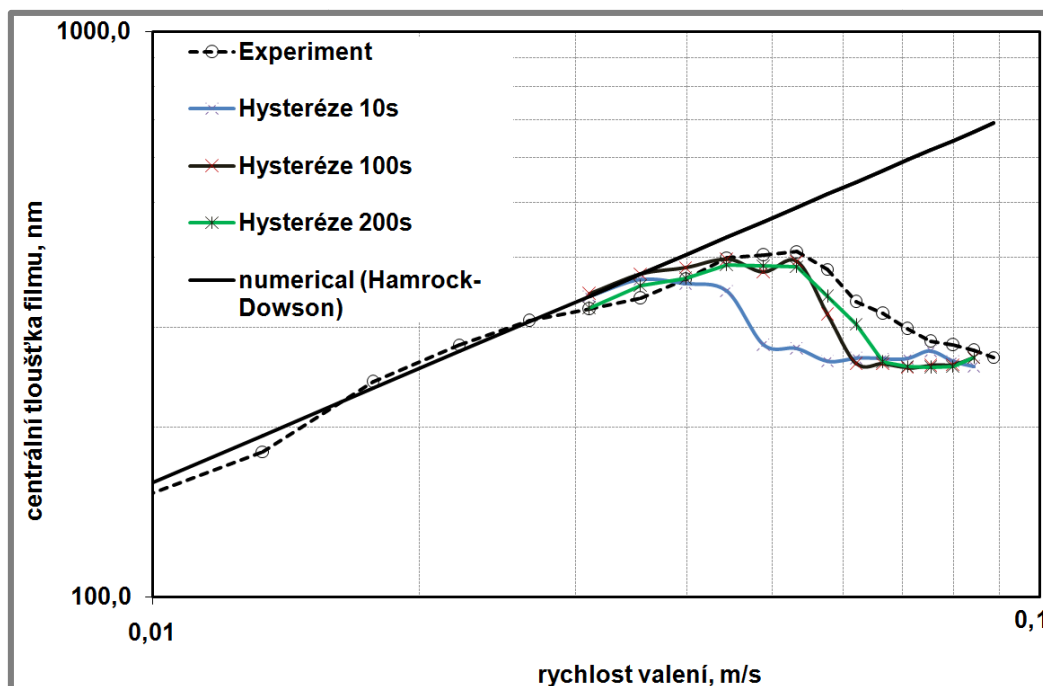
Na tomto grafu je pozoruhodné že při poklesu rychlosti se do určité hodnoty nezvyšuje centrální tloušťka mazacího filmu po stejné křivce jako při zvyšování rychlosti (hystereze tloušťky filmu).

Tab. 7 Měření hladovějícího kontaktu

| Měření hladovějícího kontaktu |   |
|-------------------------------|---|
| Valivá rychlost               | $0,004\text{--}0,126 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$             |
| Teplota                       | $25 \text{ }^\circ\text{C}$                                   |
| Zatížení                      | 27,4 N  |
| Tloušťka mazacího filmu       | 17,9–383,9 nm   |
| Použité množství maziva       | 24 $\mu\text{l}$  |
| Maximální tloušťka filmu      | 383,9 nm (při rychlosti $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |

## 5.2 Hystereze tloušťky filmu

Na Obr. 30 je vidět pokles centrální tloušťky mazacího filmu v závislosti na valivé rychlosti a zpětné navýšení tloušťky při klesající valivé rychlosti. Toto zpětné navýšení nepopisuje žádný z uvedených zdrojů. Při poklesu valivé rychlosti z krajní polohy ( $0,089 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se začne projevovat jistá hystereze, tedy křivka nárůstu rychlosti se nepřekrývá s křivkou poklesu rychlosti. Při počátečním snížení rychlosti z krajní polohy dochází dokonce k mírnému poklesu centrální tloušťky. Dalším snižováním rychlosti dojde k zotavení filmu, a tloušťka filmu při poklesu se přibližuje ke křivce tloušťky filmu při zvyšující se rychlosti. Pro nižší rychlosti se tyto křivky zvyšující se rychlosti a snižující se rychlosti překrývají.



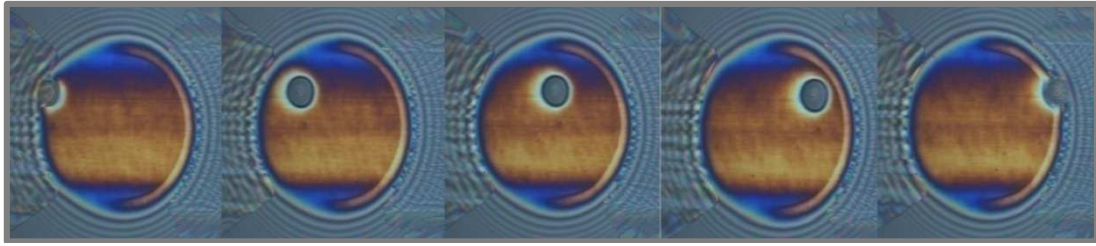
Obr. 30 Hystereze centrální tloušťky mazacího filmu (detail)

Tento jev je zejména závislý na rychlosti změny otáček. Byly provedeny 3 experimenty s rozdílnými časovými intervaly mezi změnami otáček, které jsou zobrazeny na Obr. 30 pro 10, 100 a 200 vteřin. Z obrázku je patrné, že při větších časových intervalech dochází k překrytí křivek dříve, tedy při 200 s se křivky protkly již při rychlosti  $0,053 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , zatím co při 10 s se křivky začaly protínat až při rychlosti  $0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tato hystereze je způsobena tím, že při poklesu tloušťky filmu se mazivo nestihne vrátit do valivé dráhy ani při dostatečném snížení otáček a valivý element se odvaluje v suchém prostředí.

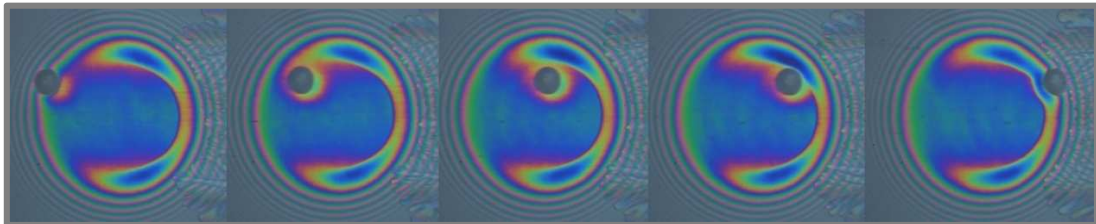
### 5.3 Měření tloušťky filmu na povrchu kuličky s cílenou modifikací povrchu

5.2

V této části experimentu byl pozorován vliv povrchu s cílenou modifikací na tloušťku mazacího filmu u EHL hladovějícího a plně zaplaveného kontaktu při čistém valení. Čisté valení nastává v případě, kdy se oba třecí povrchy pohybují stejnou rychlostí, a tedy i vrstva maziva se pohybuje touto rychlostí. Průchod mikrovrtisku podél kontaktu je zaznamenán vysokorychlostní kamerou Phantom v710. Záznam se skládá z jednotlivých snímků, na kterých se vyhodnocuje vliv mikrovrtisku na tloušťku mazacího filmu v kontaktní oblasti. Průchod mikrovrtisku kontaktem za hladovějících podmínek je zobrazen na Obr. 31. Na Obr. 32 je zobrazen průchod mikrovrtisku kontaktem u plně zaplaveného režimu. Zatížení přenášené do kontaktní oblasti bylo ponechané stejné jako v předchozích případech a to 27,4 N. Snímání bylo nastaveno s rozlišením 800 x 600 pixelů s expozičním časem kamery 2 ms.



Obr. 31 Průchod mikrovrtisku hladovějícím EHL kontaktem za čistého valení



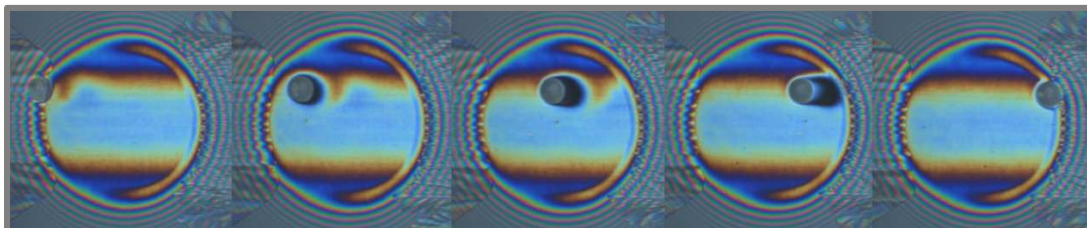
Obr. 32 Průchod mikrovrtisku plně zaplaveným EHL kontaktem za čistého valení

Rychlost obou třecích povrchů a tedy i maziva byla  $u=0,058 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Průměrná tloušťka mazacího filmu za EHL hladovějících podmínek v oblasti neovlivněné mikrovrtisky byla u čistého valení  $200 \text{ nm}$  a při prokluzu (0,5 a 1)  $160 \text{ nm}$ . U plně zaplaveného režimu byla tloušťka mazacího filmu v oblasti neovlivněné mikrovrtisky u čistého valení  $450 \text{ nm}$  a při prokluzu (0,5 a 1)  $400 \text{ nm}$ .

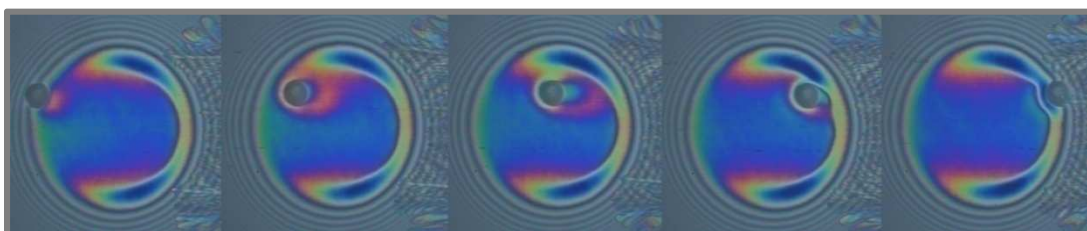
Další část tohoto experimentu byla zaměřena na vliv povrchu s cílenou modifikací na tloušťku mazacího filmu při prokluzu (0,5 a 1) v hladovějícím i v plně zaplaveném EHL kontaktu. Odvalují-li se po sobě třecí povrchy různou rychlosti, hovoří se o prokluzu. Prokluz lze definovat pomocí parametru prokluzu.

$$\Sigma = \frac{2(u_D - u_B)}{(u_D + u_B)} \quad (14)$$

kde  $u_D$  je rychlost třecí plochy skleněného disku v místě kontaktu a  $u_B$  je rychlost třecí plochy kuličky. Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud je parametr prokluzu kladný, pohybuje se skleněný disk rychleji než kulička. Pokud je parametr prokluzu záporný, pohybuje se skleněný disk pomaleji, než kulička. Při prokluzu třecích ploch dochází k ovlivňování tloušťky mazacího filmu. Toto ovlivňování je způsobené prudkým nárůstem viskozity maziva zachyceného v mikrovrtisku. Tím je mazivo uzavřeno v mikrovrtisku, který funguje pak jako zásobník maziva. Působením rozdílných rychlostí elasticky deformovaných nekonformních povrchů je vysoce viskózní mazací film vytlačován z mikrovrtisku. Tento vysoce viskózní mazací film může mikrovrtisk předbíhat nebo za ním zaostávat, záleží zde na parametru prokluzu. Pokud je parametr prokluzu kladný, mazivo v mikrovrtisku ovlivňuje oblast kontaktu před mikrovrtiskem a naopak.



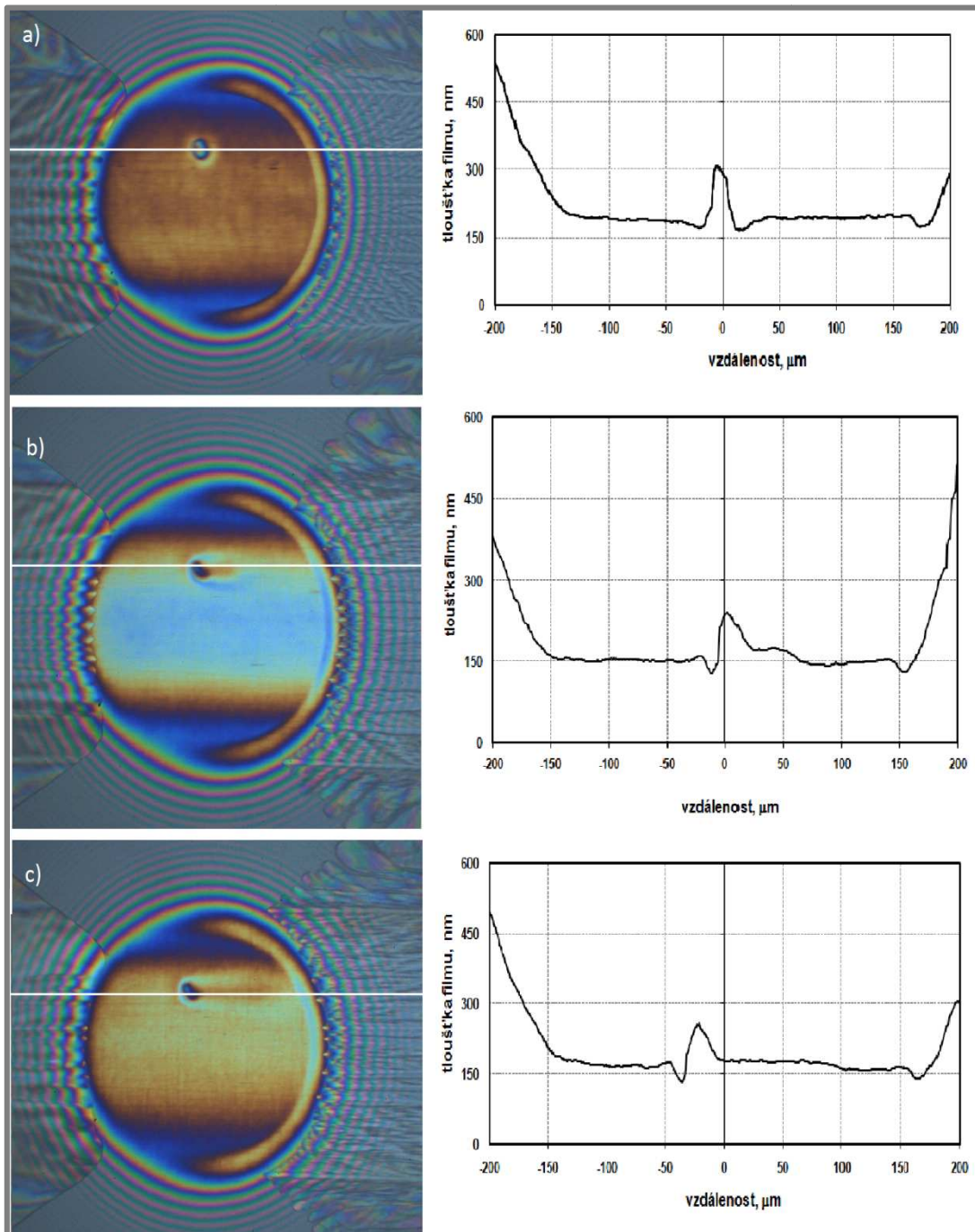
Obr. 33 Průchod mikrovizkusu hladovějícím EHL kontaktem za prokluzu 0,5



Obr. 34 Průchod mikrovizkusu plně zaplaveným EHL kontaktem za prokluzu 0,5

V tomto experimentu byl simulován kladný prokluz 0,5 a 1. Rychlost třecí plochy kuličky u prokluzu 0,5 byla  $u_B = 0,043 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a rychlost třecí plochy skleněného disku  $u_D = 0,072 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tyto rychlosti byly voleny tak, aby střední rychlost (rychlost maziva) byla stejná jak u čistého valení, tedy  $u = 0,058 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V případě prokluzu 1 byla rychlost třecí plochy kuličky zvolena  $u_B = 0,029 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , rychlost třecí plochy skleněného disku  $u_D = 0,086 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a to tak aby byla zachována stejná rychlost maziva  $u = 0,058 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## 5.3.1 Tloušťka filmu u hladovějícího EHL kontaktu (mělké vtisky)

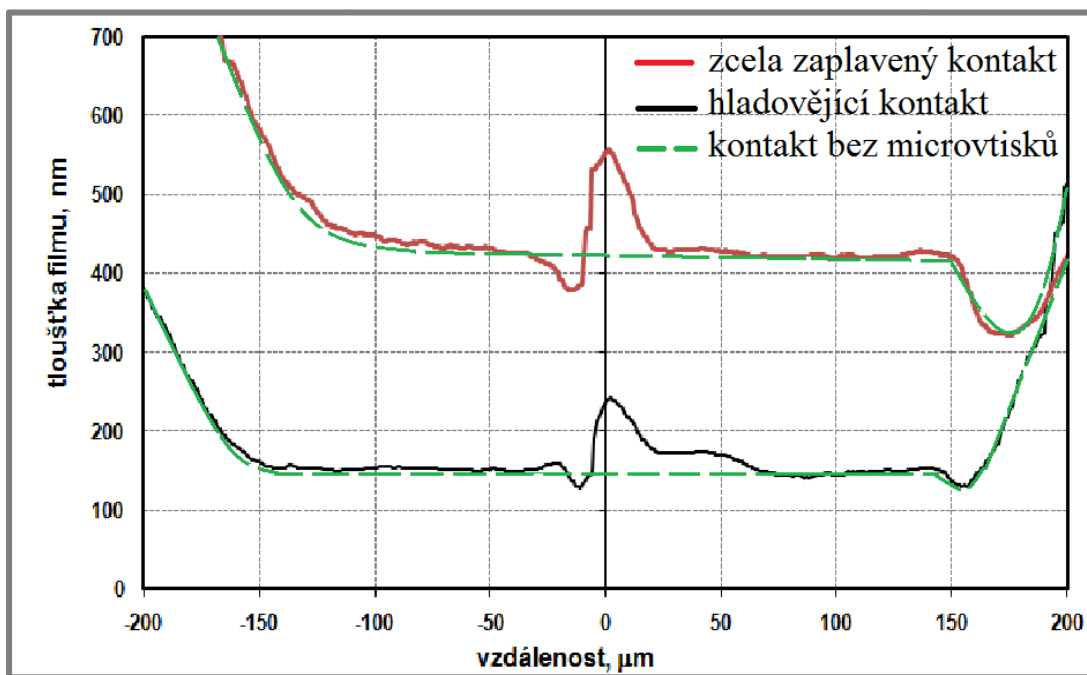


Obr. 35 Chromatické interferogramy a profily tloušťky filmu při parametru prokluzu 0;0,5;1 a hladovějícího EHL kontaktu (hloubka vtisku 160 nm)

Na Obr. 35 je vidět průchod mikrovrtisku kontaktem při prokluzu 0; 0,5; 1 u plně zaplaveného EHL režimu. Při průchodu mikrovrtisku byl pozorován opět pokles tloušťky filmu v okolí mikrovrtisku o hodnotu až 40 nm. U parametru prokluzu 0 (Obr. 35a) je tento pokles pozorován kolem celého mikrovrtisku, zatímco u parametru prokluzu 0,5 a 1 (Obr. 35a,b) je pokles pozorován za mikrovrtiskem a na bocích.

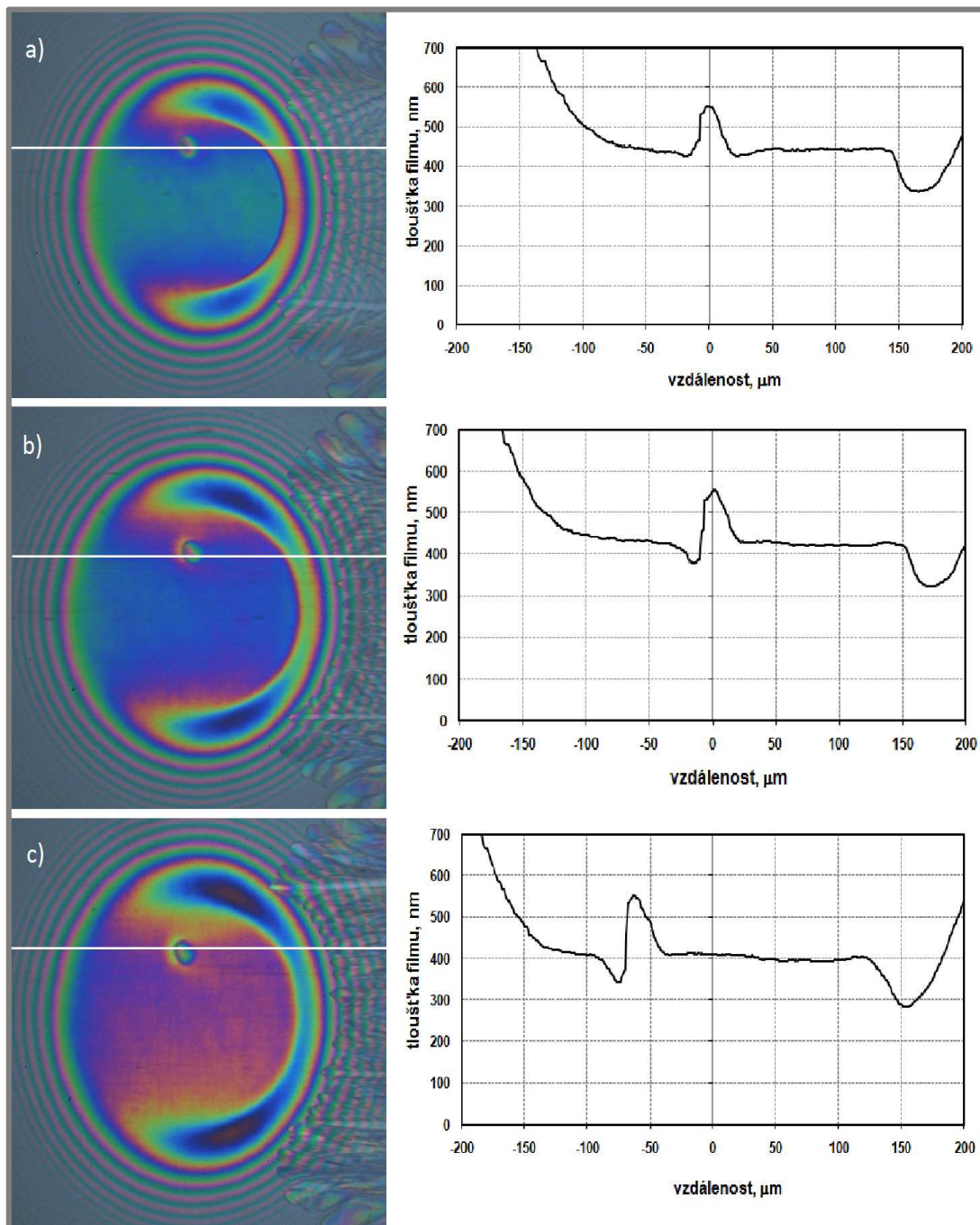
Při porovnání profilu tloušťky filmu o parametru prokluzu 0 (Obr. 35a) s Lugtovým matematickým modelem (Obr. 24) u plně zaplaveného režimu je vidět totožný pokles tloušťky filmu před mikrovtskem. Jediný rozdíl byl pozorován za mikrovtskem, kdy u experimentálního měření byl pozorován opět pokles filmu, zatím co u matematického modelu se tloušťka filmu neliší od tloušťky filmu při průchodu kontaktu bez mikrovtsku.

Jelikož se v tomto případě jedná o plně zaplavený EHL kontakt centrální tloušťka filmu je zde výrazně vyšší (ve srovnání s kontaktem za hladovějících EHL podmínek) což je vidět při porovnání výsledků na Obr. 36. Oblast s nárůstem tloušťky filmu, v plně zaplaveném režimu, která vzniká před mikrovtskem u prokluzu 0,5, není tak výrazná jako u hladovějícího režimu. Nárůst tloušťky filmu před mikrovtskem u plně zaplaveného režimu je jen o 10 nm a vzhledem k centrální tloušťce u kontaktu za těchto podmínek je toto navýšení minimální. Dále při porovnání těchto dvou křivek na Obr. 36 je vidět že za mikrovtskem je pozorován na obou křivkách téměř totožný pokles tloušťky filmu. Při porovnání obou křivek lze také pozorovat rozdílný pokles tloušťky na konci kontaktní oblasti, který je způsoben poklesem tlakové špičky u hladovějícího režimu.



Obr. 36 Profil tloušťky filmu v hladovějícím a v plně zaplaveném kontaktu pro parametr prokluzu 0,5

## 5.3.2 Tloušťka filmu u plně zaplaveného EHL kontaktu (mělké vtisky)



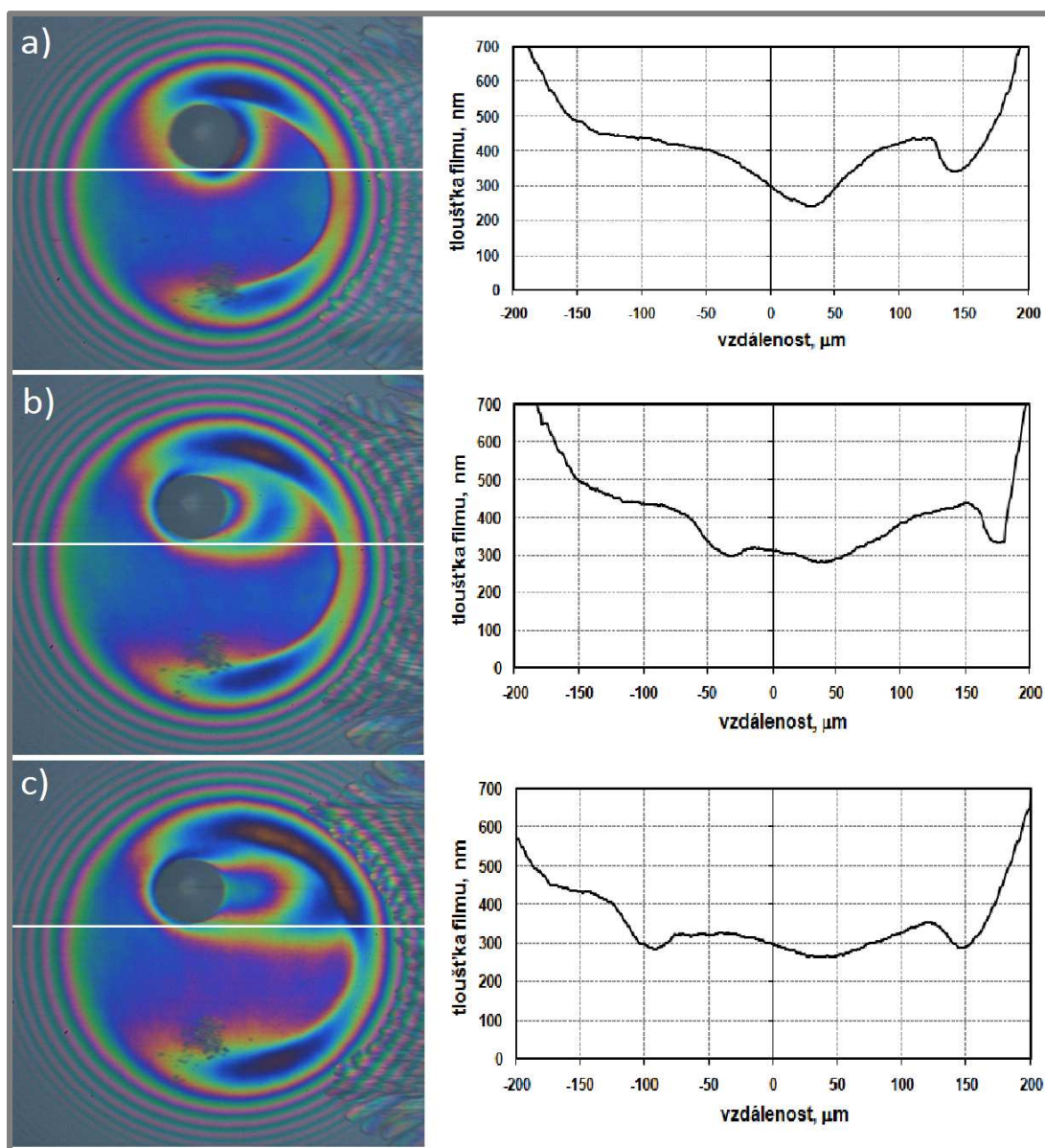
Obr. 37 Chromatické interferogramy a profily tloušťky filmu při parametru prokluzu 0;0,5;1 a plně zaplaveném EHL režimu (hloubka vtisku 160 nm)

Na Obr. 37 je vidět průchod mikrovrtisku kontaktem při prokluzu 0; 0,5; 1 v plně zaplaveném EHL režimu. Při průchodu mikrovrtisku byl pozorován opět pokles tloušťky filmu v okolí mikrovrtisku o hodnotu až 40 nm. U parametru prokluzu 0 (Obr. 37a) je tento pokles pozorován kolem celého mikrovrtisku, zatím co u parametru prokluzu 0,5 a 1 (Obr. 37a, b) má tento pokles tvar podkovy orientovaný podél kontaktu a na rozdíl od průchodu mikrovrtisku kontaktem za hladovějících EHL podmínek je tato oblast mnohem kratší (pouze v těsné blízkosti mikrovrtisku).

Jelikož se v tomto případě jedná o kontakt v plně zaplaveném EHL režimu centrální tloušťka filmu je zde výrazně vyšší (ve srovnání s kontaktem za hladovějících EHL podmínek) oblast s nárůstem tloušťky filmu, která vzniká za mikrovtskem u prokluzu 0,5 a 1 není tak výrazná jako v předchozím případě. Nárůst tloušťky filmu za mikrovtskem je jen o 20 nm a vzhledem k centrální tloušťce u kontaktu s plně zaplaveným režimem je toto navýšení minimální.

### 5.3.3 Tloušťka mazacího filmu při průchodu hlubokých vtisků

5.2.3

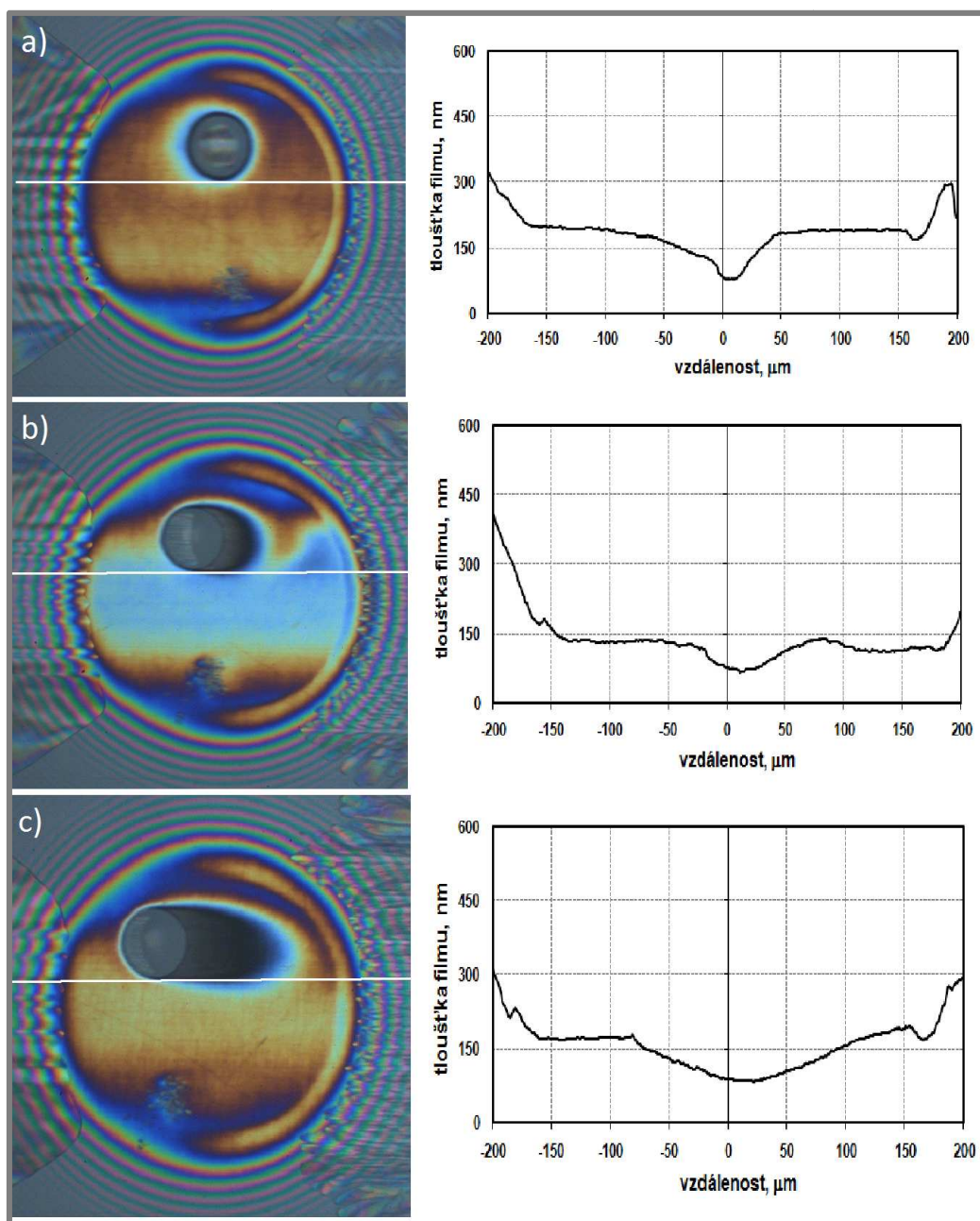


Obr. 38 Chromatické interferogramy a profily tloušťky filmu při parametru prokluzu 0;0,5;1 a plně zaplaveného EHL kontaktu (hloubka vtisku 1490 nm)

Na Obr. 38 jsou zobrazeny interferogramy a profil tloušťky filmu pro parametry prokluzu 0; 0,5 a 1 u plně zaplaveného EHL režimu. Protože se nepodařilo vyhodnotit profil tloušťky filmu ve středu mikrovtsku, byl vyhodnocen profil pouze

na okraji tohoto mikrovrtisku (poloha vyhodnocovaného profilu tloušťky filmu je naznačena na interferogramech bílou čarou).

Z Obr. 38 je vidět že při průchodu hlubšího mikrovrtisku kontaktem dochází k poměrně velkému poklesu tloušťky filmu až o hodnotu 200 nm. Na Obr. 38a (prokluz 0) je tento pokles tloušťky soustředěn okolo mikrovrtisku zatím co na Obr. 38b,c (prokluz 0,5 a 1) je vidět, že tento pokles je za mikrovrtiskem a po bocích, ale také se tato oblast poklesu vyskytuje daleko před mikrovrtiskem. Před mikrovrtiskem jak tomu bylo u mělkých mikrovrtisků při prokluzu 0,5 a 1 se postupně uvolňuje mazivo a vzniká oblast s nárůstem tloušťky filmu. Tato oblast je mnohem větší než u mělkých mikrovrtisků. To je způsobeno větším průměrem mikrovrtisku.



Obr. 39 Chromatické interferogramy a profily tloušťky filmu při parametru prokluzu 0;0,5;1 a hladovějšího EHL kontaktu (hloubka vtisku 1490 nm)

Při průchodu hlubších mikrovrtisků hladovějícím kontaktem, jak je zobrazeno na chromatických interferogramech na Obr. 39 způsobují mikrovrtisky rapidní pokles tloušťky filmu a dochází zde až k selhání mazacího filmu. Bylo zde také pozorováno, že při prokluzu 0,5 a 1 (Obr. 39*b,c*) nedochází nebo je jen nepatrné uvolňování maziva z mikrovrtisku na rozdíl od předchozích případů (mělké mikrovrtisky).

#### **5.4 Poloha vstupního menisku**

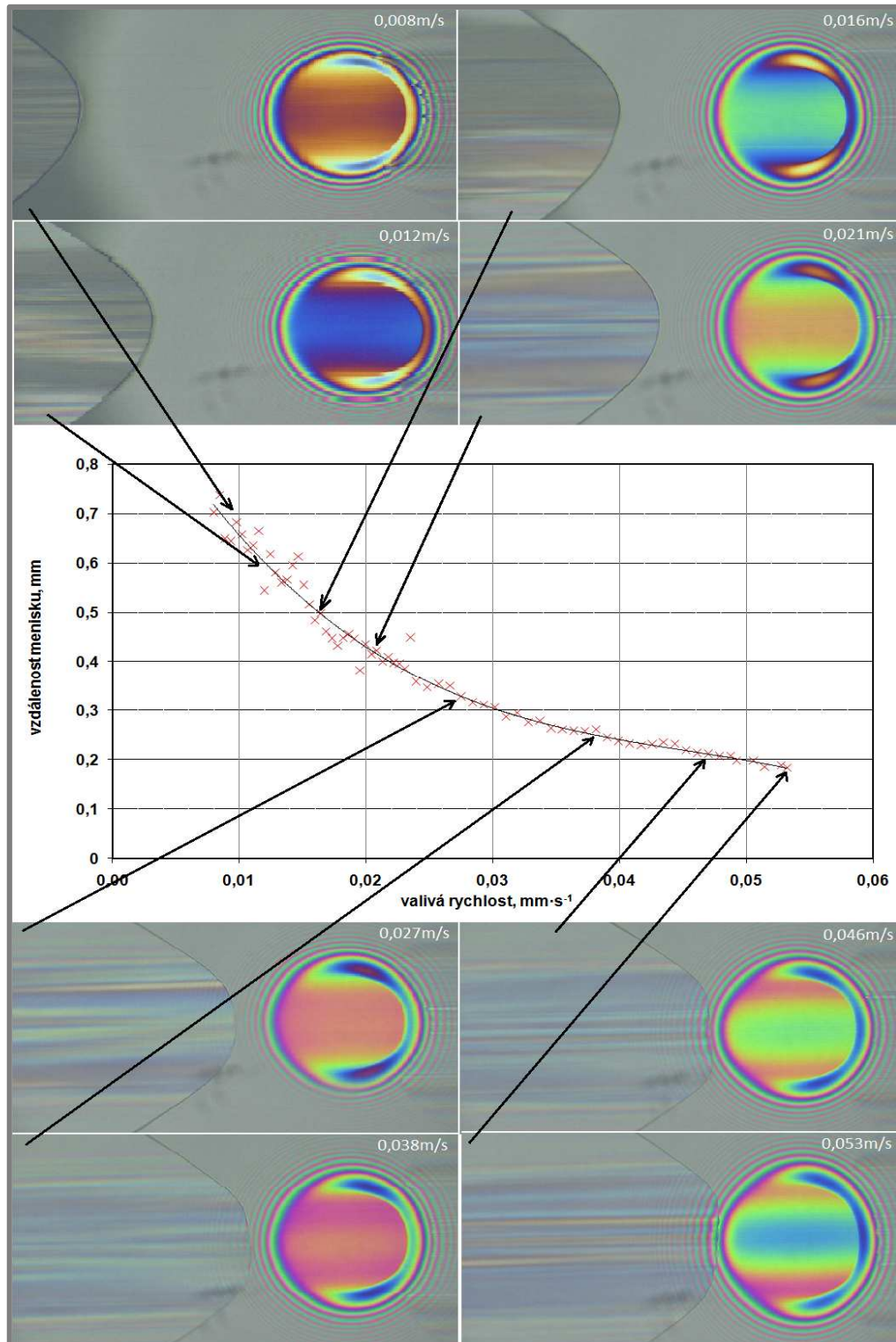
5.3

---

Pro měření polohy vstupního menisku byl použit opět základní minerální olej LSBS (Tab. 5). Množství tohoto oleje bylo stejné jak u měření centrální tloušťky mazacího filmu za EHL hladovějících podmínek tedy 24  $\mu\text{l}$ .

Pro měření polohy vstupního menisku byl na rozdíl od předchozích měření použit objektiv s 5x zvětšením, tím byl kontakt oddálen a byla tak lépe pozorována poloha vstupního menisku.

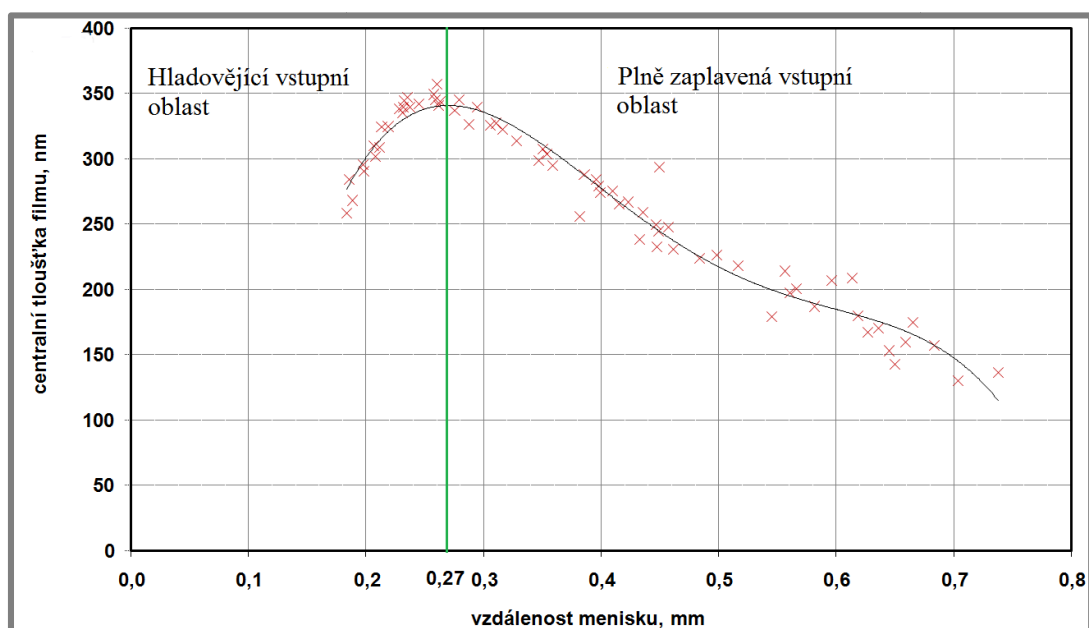
Jak bylo uvedeno v dřívějších pracích, poloha vstupního menisku určuje stupeň hladovění. Se zvyšující se valivou rychlostí se snižuje vzdálenost vstupního menisku od centra Hertzovy oblasti jak je vidět na Obr. 40. Vzdálenost tohoto vstupního menisku klesá, až na hodnotu 0,18 mm což je poloměr Hertzovy kontaktní oblasti. Poloha vstupního menisku je měřitelná, jak udávají dřívější práce pouze po okraj Hertzovy kontaktní oblasti, protože při další zvyšování stupně hladovění (v tomto případě valivé rychlosti) dochází tzv. prolomení Hertzovy kontaktní oblasti a poloha menisku již nejde dál měřit.



Obr. 40 Graf závislosti Valivé rychlosti na vzdálenosti vstupního menisku

Jak je vidět na Obr. 29, přechod z plně zaplavené vstupní oblasti do hladovějící oblasti dochází při rychlosti  $0,037\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  čemuž odpovídá centrální tloušťka filmu 380nm. Při překročení této rychlosti začne centrální tloušťky filmu klesat (hladovějící režim). Tato hodnota centrální tloušťka filmu (380 nm) rozděluje rovněž graf na Obr. 41 na část s plně zaplavenou vstupní oblastí a hladovějící vstupní

oblastí. V první části tohoto grafu je kontakt s plně zaplavenou vstupní oblastí, která se vyznačuje tím, že vzdálenost vstupního menisku neovlivňuje centrální tloušťku mazacího filmu (centrální tloušťka filmu v této části s klesající vstupní vzdáleností menisku roste). Jak je vidět z grafu nárůst centrální tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti menisku je pozvolný. Druhá část grafu s hladovějící vstupní oblastí kontaktu se vyznačuje poklesem centrální tloušťky mazacího filmu se snižující se vzdáleností vstupního menisku (vzdálenost vstupního menisku výrazně ovlivňuje tloušťku filmu). Z druhé části grafu (hladovějící vstupní oblast) je patrný prudký pokles tloušťky filmu se zmenšující se vzdáleností vstupního menisku. Přejít mezi oblastmi nastává při vzdálenosti 0,27 mm vstupního menisku od centra Hertzovy oblasti, tedy 0,09 mm od okraje Hertzovy oblasti (poloměr Hertzovy oblasti je 0,18mm).



Obr. 41 Graf závislosti vzdálenosti vstupního menisku na centrální tloušťce filmu

## 6 ZÁVĚR

První provedený experiment bylo měření centrální tloušťky filmu s kontaktem s plně zaplavenou vstupní oblastí v závislosti na valivé rychlosti. Cílem tohoto měření byla validace experimentálního měření pomocí matematického modelu. Proto toto experimentální měření bylo porovnáno s Hamrock-Downsovým numerickým řešením (13), které je do dnes používáno k predikci tloušťky filmu v EHL mazaném kontaktu a je také často používáno jako referenční hodnota při porovnávání teoretických a experimentálních výsledků. Při porovnání obou řešení byla pozorována velmi dobrá shoda výsledků.

Dalším provedeným experimentem bylo měření centrální tloušťky mazacího filmu v závislosti na valivé rychlosti u kontaktu s hladovějící vstupní oblastí. Experiment s hladovějící vstupní oblastí byl proveden k určení provozních podmínek, za kterých hladovění nastává.

Při zpětném navyšování rychlosti u experimentu s hladovějící vstupní oblastí kontaktu byla pozorována jistá hystereze, tedy křivka nárůstu rychlosti se nepřekrývá s křivkou poklesu rychlosti. Tento jev je zejména závislý na rychlosti změny otáček, a proto byly provedeny 3 experimenty s rozdílnými časovými intervaly mezi změnami otáček a tudíž i pořízení snímků - interferogramů. Bylo pozorováno, že při počátečním poklesu rychlosti dochází dokonce k mírnému poklesu tloušťky filmu. Při dalším snížení rychlosti dojde k tzv. zotavení filmu a při dalším snížení rychlosti se začnou křivky zvyšující rychlosti a snižující se rychlosti překrývat. Z výsledků je patrné, že při větším časovém intervalu dojde k zotavení filmu při mnohem vyšších rychlostech než u křivek s menšími časovými intervaly.

Tato hystereze je vysvětlena tím, že při poklesu tloušťky filmu se mazivo nestihne vrátit do valivé dráhy ani při dostatečném snížení valivé rychlosti a valivý element se odvaluje prostředím s nedostatkem maziva.

Byl také proveden experiment s cílenou modifikací třecích povrchů. Cílená modifikace třecích povrchů ovlivňuje tloušťku mazacího filmu, především u hladovějícího EHL kontaktu při prokluzu. Bylo pozorováno, že průchod mělkého mikrotisku kontaktem za prokluzu pozitivně ovlivňuje tloušťku filmu. Průchodem tohoto mikrotisku kontaktem se v porovnání s kontaktem s hladkým povrchem zvyšuje tloušťka mazacího filmu. Tyto mikrotisky, které mají hloubku pouhých 160 nm, mohou efektivně zvýšit životnost strojních součástí. Mělké mikrotisky u plně zaplaveného režimu také zvyšují tloušťku filmu ale centrální tloušťka je zde výrazně větší a procentuální nárůst je zde velmi malý.

Při studii průchodu hlubokých mikrotisků kontaktem byla pozorována výrazně větší ovlivněná oblast, ale v této oblasti nedocházelo k nárůstu tloušťky ale k poklesu, v některých případech až k selhání mazacího filmu.

Nevýhodou mikrotisků, především mikrotisků vytvářených vnikáním cizího tělesa je velké povrchové napětí v okolí mikrotisku doprovázené možným vznikem pittingu.

Byl také podán článek týkající se cílené modifikace třecích povrchů u hladovějícího a plně zaplaveného režimu do periodika Engineering Mechanics. Tento článek byl odeslán k řádnému receznímu řízení, po jehož kontrole bude článek zveřejněn v této publikaci.

## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| <b>Obr. 1</b> Závislost valivé rychlosti na tloušťce filmu [1]   | 12 |
| <b>Obr. 2</b> Experimentální axiální kuličkové ložisko s klecí a) schéma, b) foto experimentálního zařízení [3]  | 13 |
| <b>Obr. 3</b> Mikrosnímky vývoje hladovějícího mazání [3]  | 14 |
| <b>Obr. 4</b> Vliv vstupní hranice na tloušťku filmu a) pro různé počáteční tloušťky filmu, b) pro různé zatížení [3]  | 14 |
| <b>Obr. 5</b> Optické EHL testovací sestava [4]  | 15 |
| <b>Obr. 6</b> Změna vzdálenosti menisku a) s rychlostí valení, b) s rychlostí proudění oleje A [4]   | 16 |
| <b>Obr. 7</b> Experimentální ložiskové zařízení [5]  | 16 |
| <b>Obr. 8</b> Závislost rychlosti otáčení na čase [5]  | 17 |
| <b>Obr. 9</b> 3D mapy vzniklé z interferometrických snímků EHL kontaktu [6]  | 18 |
| <b>Obr. 10</b> Bezrozměrný tlak pro tři různé vzdálenosti vstupní hranice a) bezrozměrné parametry U a W jsou konstantní, uvedené ve skupině 1 Tab. 3, b) U a W jsou uvedeny ve skupině 3 v Tab. 3 [8]                   | 20 |
| <b>Obr. 11</b> Bezrozměrná tloušťka filmu pro tři různé vzdálenosti vstupní hranice a) bezrozměrné parametry U a W jsou konstantní, uvedené ve skupině 1 Tab. 3, b) parametry U a W jsou uvedeny ve skupině 3 Tab. 3 [8] | 21 |
| <b>Obr. 12</b> Centrální tloušťka filmu v závislosti na vstupní vrstvě maziva [9]  | 22 |
| <b>Obr. 13</b> Vývoj profilu tloušťky filmu s časem [10]   | 24 |
| <b>Obr. 14</b> $\gamma$ v závislosti na $\sqrt{M/L}$ a) pro kruhový kontakt s $r=1$ ; $L=2;5;10;20$ a $M=10;30;100;1000$ ; b) pro eliptický kontakt s $K=0,14; 0,22; 1,00$ ; $r=1$ [11]                                  | 25 |
| <b>Obr. 15</b> 3D kontakt, příčný řez tlaku v kontaktu a výšky mazacího filmu [6]  | 26 |
| <b>Obr. 16</b> Parametr $\rho_C^{-2}$ v závislosti na $p_H$ , pro $\eta_0=0,8$ a $\alpha=20 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ [12]  | 27 |
| <b>Obr. 17</b> Snížení účinku zpětného natečení odtláčením hrází do stran [12]   | 27 |
| <b>Obr. 18</b> Naměřená a vypočtená centrální tloušťka filmu, a) kruhový kontakt při různých rychlostech, b) eliptický kontakt při různých rychlostech [12]  | 28 |
| <b>Obr. 19</b> Naměřená a vypočtená centrální tloušťka filmu pro eliptický kontakt při různých zatížení [12]   | 28 |
| <b>Obr. 20</b> Rozložení tloušťky filmu (barevné křivky- naměřené hodnoty, černé křivky- numerické hodnoty) [13]   | 30 |
| <b>Obr. 21</b> Experimentální zařízení s kuličkou a diskem [14]  | 30 |
| <b>Obr. 22</b> Kavitační vzor vytvářený na výstupu u plně zaplaveného kontaktu [14]  | 31 |
| <b>Obr. 23</b> Centrální tloušťka filmu mezi kuličkou a diskem [14]  | 31 |
| <b>Obr. 24</b> Tloušťka filmu u plně zaplaveného kontaktu, pozice mikrovrtisku $X=0, Y=0$ [19]   | 33 |
| <b>Obr. 25</b> Tloušťka filmu u hladovějícího kontaktu, pozice mikrovrtisku $X=0, Y=0$ [19]  | 34 |
| <b>Obr. 26</b> Experimentální zařízení [15]  | 36 |
| <b>Obr. 27</b> Srovnání jednočipové (Bayer filtr) technologie a technologie 3CCD [20]  | 37 |
| <b>Obr. 28</b> Graf závislosti tloušťky filmu na rychlosti valení v plně zaplaveném režimu   | 40 |
| <b>Obr. 29</b> Graf závislosti tloušťky filmu na valivé rychlosti v hladovějícím režimu  | 41 |
| <b>Obr. 30</b> Hystereze centrální tloušťky mazacího filmu (detail)  | 43 |
| <b>Obr. 31</b> Průchod mikrovrtisku hladovějícím EHL kontaktem za čistého valení   | 44 |
| <b>Obr. 32</b> Průchod mikrovrtisku plně zaplaveným EHL kontaktem za čistého valení  | 44 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Obr. 33</b> Průchod mikrotisku hladovějícím EHL kontaktem za prokluzu 0,5   | 45 |
| <b>Obr. 34</b> Průchod mikrotisku plně zaplaveným EHL kontaktem za prokluzu 0,5  | 45 |
| <b>Obr. 35</b> Chromatické interferogramy a profily tloušťky filmu při parametru prokluzu 0;0,5;1 a hladovějícího EHL kontaktu (hloubka vtisku 160 nm)     | 46 |
| <b>Obr. 36</b> Profil tloušťky filmu v hladovějícím a v plně zaplaveném kontaktu pro parametr prokluzu 0,5   | 47 |
| <b>Obr. 37</b> Chromatické interferogramy a profily tloušťky filmu při parametru prokluzu 0;0,5;1 a plně zaplaveném EHL režimu (hloubka vtisku 160 nm)     | 48 |
| <b>Obr. 38</b> Chromatické interferogramy a profily tloušťky filmu při parametru prokluzu 0;0,5;1 a plně zaplaveného EHL kontaktu (hloubka vtisku 1490 nm) | 49 |
| <b>Obr. 39</b> Chromatické interferogramy a profily tloušťky filmu při parametru prokluzu 0;0,5;1 a hladovějícího EHL kontaktu (hloubka vtisku 1490 nm)    | 50 |
| <b>Obr. 40</b> Graf závislosti Valivé rychlosti na vzdálenosti vstupního menisku   | 52 |
| <b>Obr. 41</b> Graf závislosti vzdálenosti vstupního menisku na centrální tloušťku filmu   | 53 |

**8 SEZNAM TABULEK****8**

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Tab. 1</b> Vlastnosti testovaného maziva [4]                  | 15 |
| <b>Tab. 2</b> Vliv hladovění na minimální tloušťku filmu [8]     | 19 |
| <b>Tab. 3</b> Vliv rychlosti a zatížení na vstupní vzdálenost[8] | 20 |
| <b>Tab. 4</b> Hloubka mikrovrtisku [21]                          | 38 |
| <b>Tab. 5</b> Vlastnosti oleje                                   | 39 |
| <b>Tab. 6</b> Měření plně zaplaveného kontaktu                   | 40 |
| <b>Tab. 7</b> Měření hladovějícího kontaktu                      | 42 |

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|   |  |
|---|--|
| $x_b$ [m]                                   | vzdálenost od vstupní hranice maziva ke středu Hertzovy oblasti                    |
| $a$ [m]                                     | poloměr Hertzovy oblasti   |
| $u$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]        | kombinovaná rychlost $u=0,5\cdot(u_1+u_2)$   |
| $u_1, u_2$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] | rychlost povrchů ložisek   |
| $\eta$ [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]         | viskozita maziva   |
| $h_0$ [m]                                   | minimální tloušťka filmu   |
| $\eta_0$ [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]       | viskozita maziva (při atmosférickém tlaku)   |
| $U$ [1]                                     | bezrozměrný parametr rychlosti, $\eta_0 u / E' R_x$                                |
| $R$ [m]                                     | relativní poloměr křivosti   |
| $E'$ [Pa]                                   | redukovaný modul pružnosti, $2/[(1-\nu_1^2)/E_1+(1-\nu_2^2)/E_2]$                  |
| $E_1, E_2$ [Pa]                             | Youngův modul pružnosti třetího povrchu 1, resp. 2                                 |
| $W$ [1]                                     | bezrozměrný parametr zatížení, $F/E'R_x^2$   |
| $\nu_1, \nu_2$ [1]                          | Poissonova konstanta třetího povrchu 1, resp. 2                                    |
| $R_x$ [m]                                   | redukovaný poloměr třech povrchů ve směru osy $x$ , $r_{1x}r_{2x}/(r_{1x}+r_{2x})$ |
| $r_{1x}, r_{2x}$ [m]                        | poloměr třetího povrchu 1, resp. 2 ve směru osy $x$                                |
| $x_i$ [m]                                   | poloha vstupního menisku   |
| $\beta$ [1]                                 | vliv hladovění na $h_0$ při konstantním zatížení $W$                               |
| $\rho$ [1]                                  | vliv hladovění na $h^*$ v EHL kontaktu   |
| $m$ [1]                                     | bezrozměrná vstupní oblasti  |
| $m^*$ [1]                                   | bezrozměrná vzdálenost vstupní oblasti od plně zaplavené-hladovější hranice        |
| $H_{min}$ [1]                               | bezrozměrná minimální tloušťka filmu, $h_{min}/R_x$                                |
| $b$ [m]                                     | vedlejší osa elipsy  |
| $H_{C,F}$ [1]                               | bezrozměrná centrální tloušťka filmu u plně zaplaveného kontaktu,                  |
| $h_{c,f}/R_x$                               |  |
| $H_{min,F}$ [1]                             | bezrozměrná minimální tloušťka filmu u plně zaplaveného kontaktu,                  |
| $h_{min,f}/R_x$                             |  |
| $P$ [1]                                     | bezrozměrný tlak   |
| $H$ [m]                                     | tloušťka filmu   |
| $H_C$ [1]                                   | bezrozměrná centrální tloušťka filmu   |
| $H_{Cff}$ [1]                               | bezrozměrná centrální tloušťka filmu u plně zaplaveného kontaktu                   |
| $R$ [m]                                     | relativní tloušťka filmu   |
| $H_{oil}$ [1]                               | bezrozměrná vstupní tloušťka filmu   |
| $p_H$ [Pa]                                  | maximální Hertzův tlak   |
| $h_C$ [m]                                   | centrální tloušťka filmu na oběžné trati   |
| $h_\infty$ [m]                              | tloušťka filmu v rezervoáru  |
| $M$ [1]                                     | bezrozměrný parametr zatížení  |
| $L$ [1]                                     | bezrozměrný parametr materiálu   |
| $h_{CS}$ [m]                                | centrální tloušťka filmu při hladovění   |
| $C$ [1]                                     | inverzní kapilární číslo   |
| $l_t$ [m]                                   | celková délka tratě  |
| $K$ [ $\text{n}/\text{m}^n$ ]               | deformační faktor zatížení   |
| $s$ [m]                                     | souřadnice axisymetrického povrchu   |
| $u_m$ [m/s]                                 | průměrná rychlost povrchů  |
| $\rho_0$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]         | okolní hustota   |
| $G$ [1]                                     | dynamický materiálový parametr   |

$u_D$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] rychlost třecí plochy skleněného disku  
 $u_B$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] rychlost třecí plochy kuličky

**10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] LUBRECHT, T., D. MAZUYER a P. CANN. Starved elastohydrodynamic lubrication theory: application to emulsions and greases. *Different faces of tribology*. 2001, IV, s. 717-728.
- [2] CANN, P. M. E., B. DAMIENS a A. A. LUBRECHT. The transition between fully flooded and starved regimes in EHL. *Tribology*. 2004, č. 37, s. 859-864.
- [3] WEDEVEN, L. D., EVANS, D., a CAMERON, A. Optical Analysis of Ball Bearing Starvation. 1971, *Journal of Tribology*, č. 93, s. 349-363.
- [4] CHIU, Y. P. An Analysis and Prediction of Lubricant Film Starvation in Rolling Contact Systems. 1974, *ASLE Transactions*, č. 17, s. 22-35.
- [5] KINGSBURY, E. Parched Elastohydrodynamic Lubrication. 1985, *Journal of Tribology*, č. 107, s. 229-233.
- [6] POPOVICI, G. Effects of Lubricant Starvation on Performance of Elasto-Hydrodynamically Lubricated Contacts. 2005, Ph.D. Thesis, *University of Twente*, Enschede, The Netherlands.
- [7] WOLVERIDGE, P. E., BAGLIN, K. P., a ARCHARD, J. F. The Starved Lubrication of Cylinders in Line Contact. 1971, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, č. 181, s. 1159-1169.
- [8] HAMROCK, B. J., a DOWSON, D. Iso thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part IV, Starvation Results. 1977, *Journal of Tribology*, č. 99, s. 15-23.
- [9] CHEVALIER, F., LUBRECHT, A. A., CANN, P. M. E., COLIN, F., a DALMAZ, G. Film Thickness in Starved EHL Point Contacts. 1998, *Journal of Tribology*, č. 120, s. 126-133.
- [10] JACOD, B., PUBLIER, F., CANN, P. M. E., a LUBRECHT, A. A. An Analysis of Track Replenishment Mechanisms in the Starved Regime. 1998, In 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Elsevier Tribology Series, Dowson, D., Priest, M., Taylor, C. M., Ehret, P., Childs, T. H. C., Dalmaz, G., Berthier, Y., Flamond, L., Georges, J. M., Lubrecht, A. A. (Eds.) Elsevier: The Netherlands, č. 36, s. 483-492.
- [11] DAMIENS, B., VENNER, C. H., CANN, P. M., a LUBRECHT, A. A. Starved Lubrication of Elliptical EHD Contacts. 2004, *Journal of Tribology*, č. 126(1), s. 105-111.
- [12] VAN ZOELLEN, M. T., VENNER, C. H. a LUGT, P. M. Prediction of Film Thickness Decay in Starved Elasto Hydrodynamically Lubricated Contacts Using a Thin-Film Layer Model. 2009 *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. *Journal of Engineering Tribology*, č. 223, s. 541-552.
- [13] VAN ZOELLEN, M. T. Thin Layer Flow in Rolling Element Bearings. 2010, *University of Twente*.
- [14] ASTRÓM, H., ÓSTENSEN, J. O. a HÓGLUND, E. Lubricating Grease Replenishment in an Elastohydrodynamic Point Contact. 1993, *Journal of Tribology*, č. 115 (3), s. 501-506.
- [15] RANGER, A. P., ETTLES, C. M. M., a CAMERON, A. The Solution of the Point Contact Elastohydrodynamic Problem, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, č. 346, s. 227-244.
- [16] ELROD, H. G. A Cavitation Algorithm, 1981, *ASME J. Lubr. Technol.*, 103, pp. 350-354.

- [17] WIJNANT, Y. H. Contact Dynamics in the Field of Elastohydrodynamic Lubrication. 1998, Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands,
- [18] YIN, C., YANG, P., TAN, H., WANG, J. Thermal elastohydrodynamic lubrication of starved elliptical contacts. 2009, Tribol. Int. č. 42, s. 964–974
- [19] LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL. A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory. *Tribology Transactions*. 2011-03-31, roč. 54, č. 3, s. 470-496. ISSN 1040-2004. DOI: 10.1080/10402004.2010.551804.
- [20] SVOBODA, P. *Experimentální studium utváření mazacích filmů při reverzaci a rozběhu třecích povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 85s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [21] ŠAMÁNEK, O. *Vliv povrchových nerovností na funkci mazaných kontaktů strojních částí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha č.1:** Potvrzení o podání článku

**Příloha č.2:** Článek: The Study of Transition Between Fully Flooded and Starved  
EHL Contact