



Vývoj tloušťky filmu a tření v elastohydrodynamicky mazaných poddajných kontaktech (Studium chování povrstveného plastového ozubení)

Jiří Křupka, Ing.

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

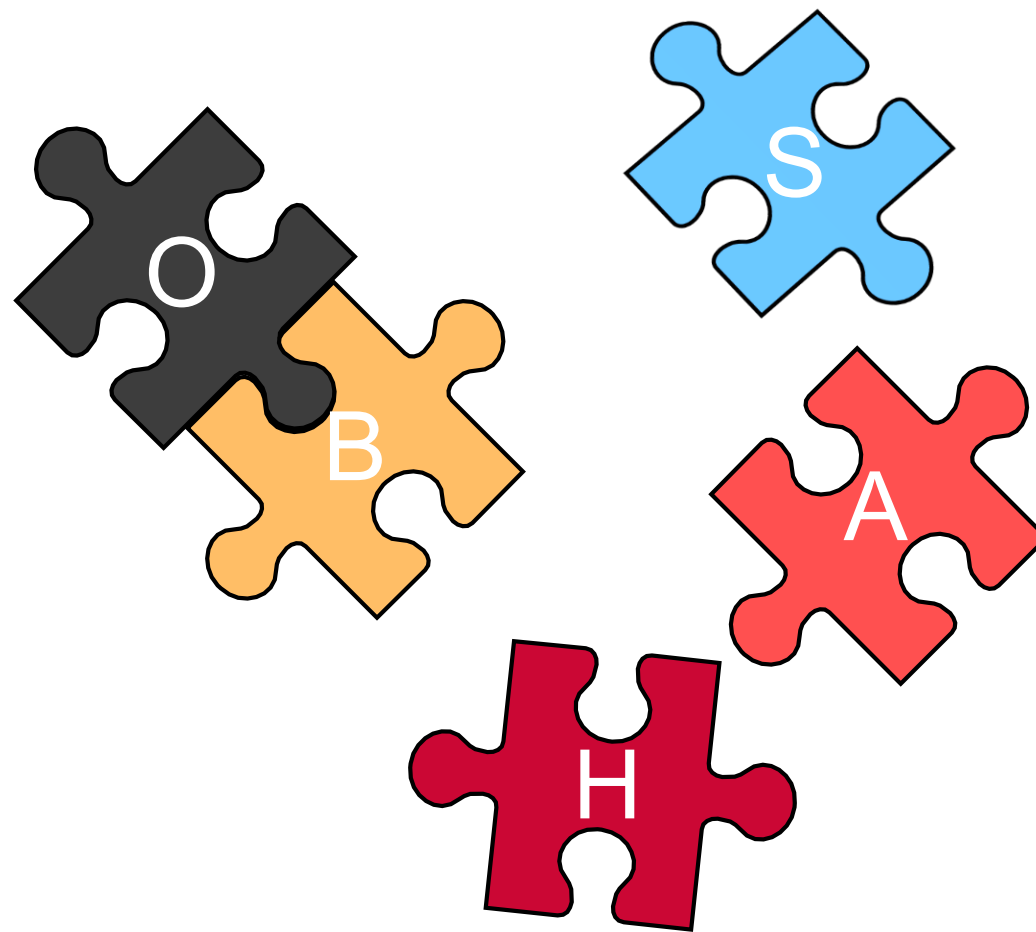
Školitel: prof. Ing. **Ivan Křupka, Ph.D.**
Školitel specialista: Ing. **Petr Šperka, Ph.D.**
Brno, 13.11.2020



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

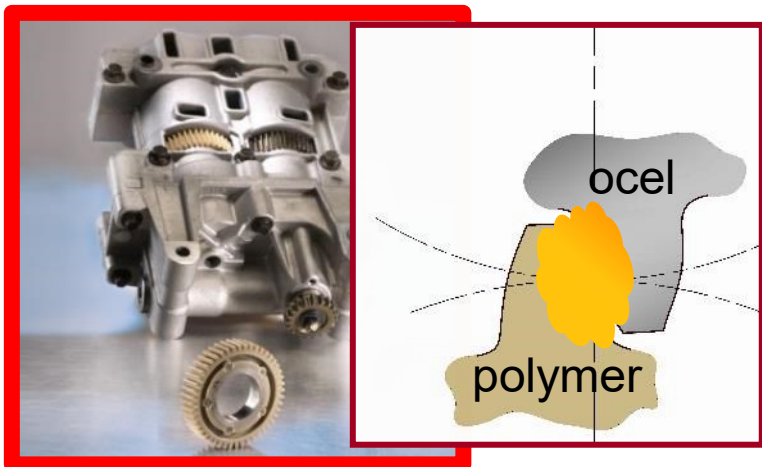
Obsah prezentace

- Motivace pro řešení problému
- Úvod
- Shrnutí současného stavu poznání
- Analýza a zhodnocení poznatků
- Vymezení cílů disertační práce
- Materiál a metody
- Současný stav
- Závěr

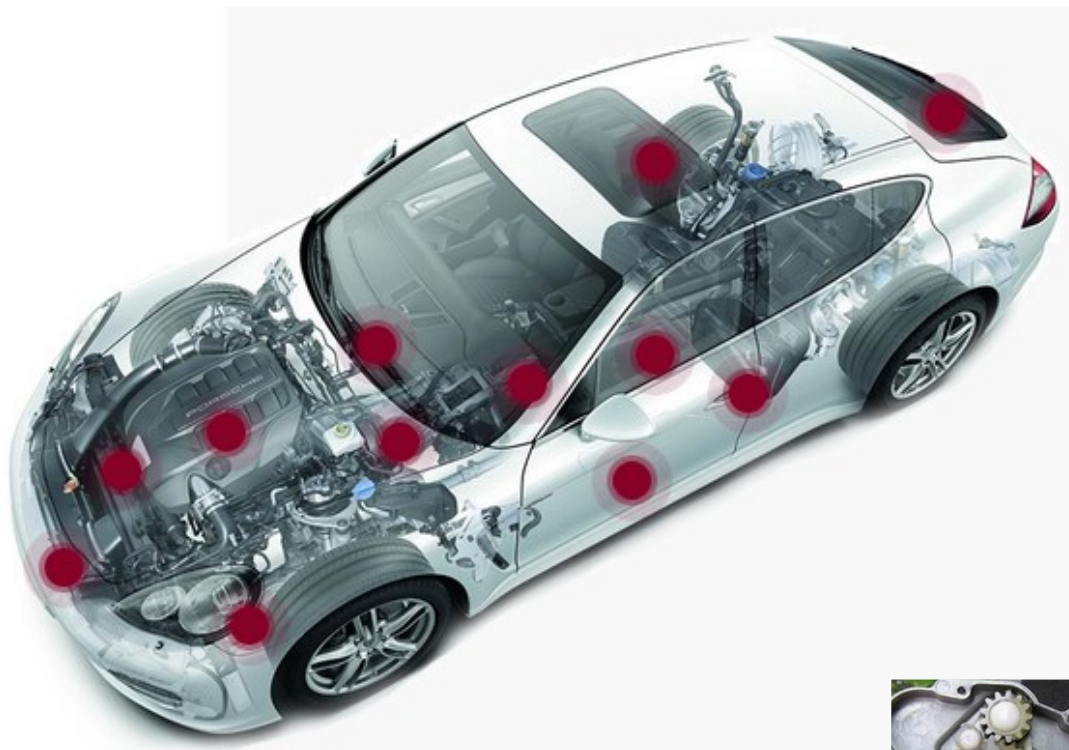


MOTIVACE PRO ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Převodovky a plastové ozubení ?

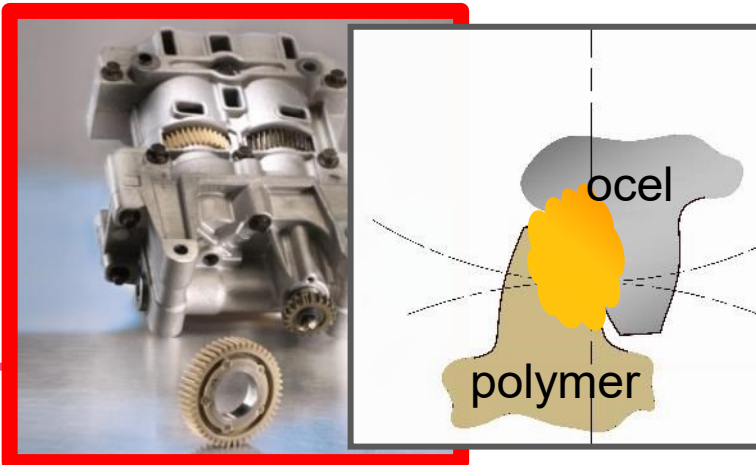


Mezní stavy



MOTIVACE PRO ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Převodovky a plastové ozubení ?



Mezní stavy

Teeth deformation



Melting wear



Zajištění plné separace kontaktních povrchů



Zajištění stabilní tloušťky mazacího filmu



Odvod tepla z kontaktní oblasti mazacím filmem



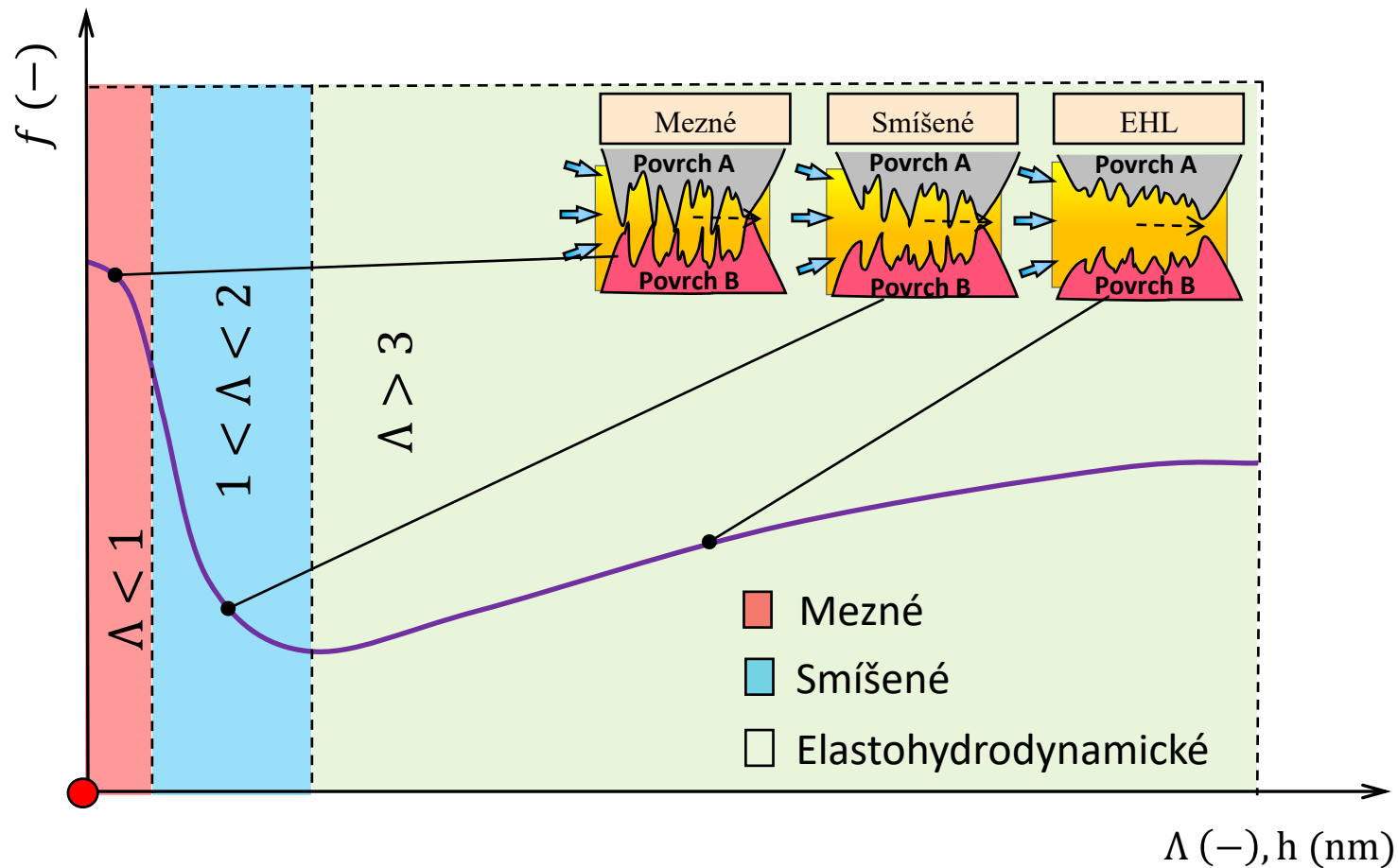
Snížení tření v kontaktní oblasti



Snížení opotřebení kontaktních povrchů

ÚVOD

Režimy mazání



SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rozšíření polymerních materiálů v technických aplikacích

50. LÉTA

První poznatky o režimu EHL mazání

GRUBIN, A.N., 1949
BLOK, H., 1959

50. LÉTA

První použití polymerních materiálů v technických aplikacích

60. LÉTA

Rozvoj problematiky **hard** EHL mazání

HOOKE, C. J., 1965
HERREBRUGH, K., 1966
DOWSON, D., 1967
ARCHARD, J. F., 1968

60. LÉTA

První použití polymerních ozubených soukolí

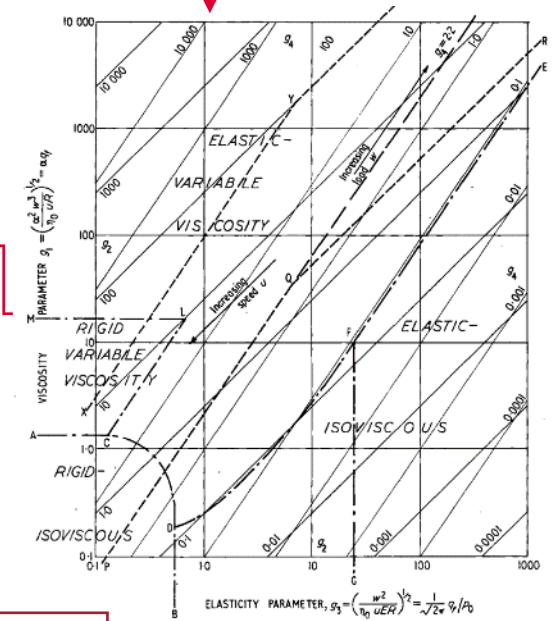


70. LÉTA

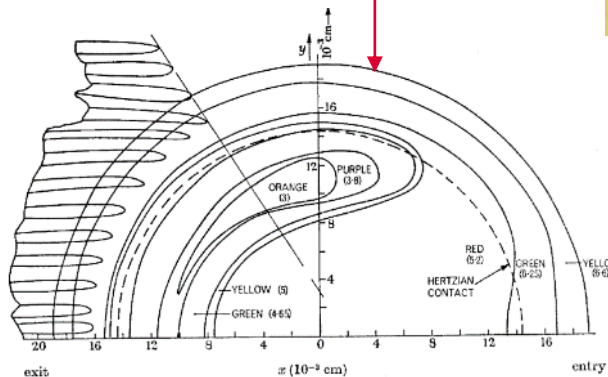
První poznatky o režimu **soft** EHL mazání

JOHNSON, K. L., 1970

Publikace: *Regimes of elastohydrodynamic lubrication*, 1970



Definice EHL režimů:
Piezoviscous - elastic
Piezoviscous - rigid
Isoviscous - elastic
Isoviscous - rigid



DOWSON, D., 1967

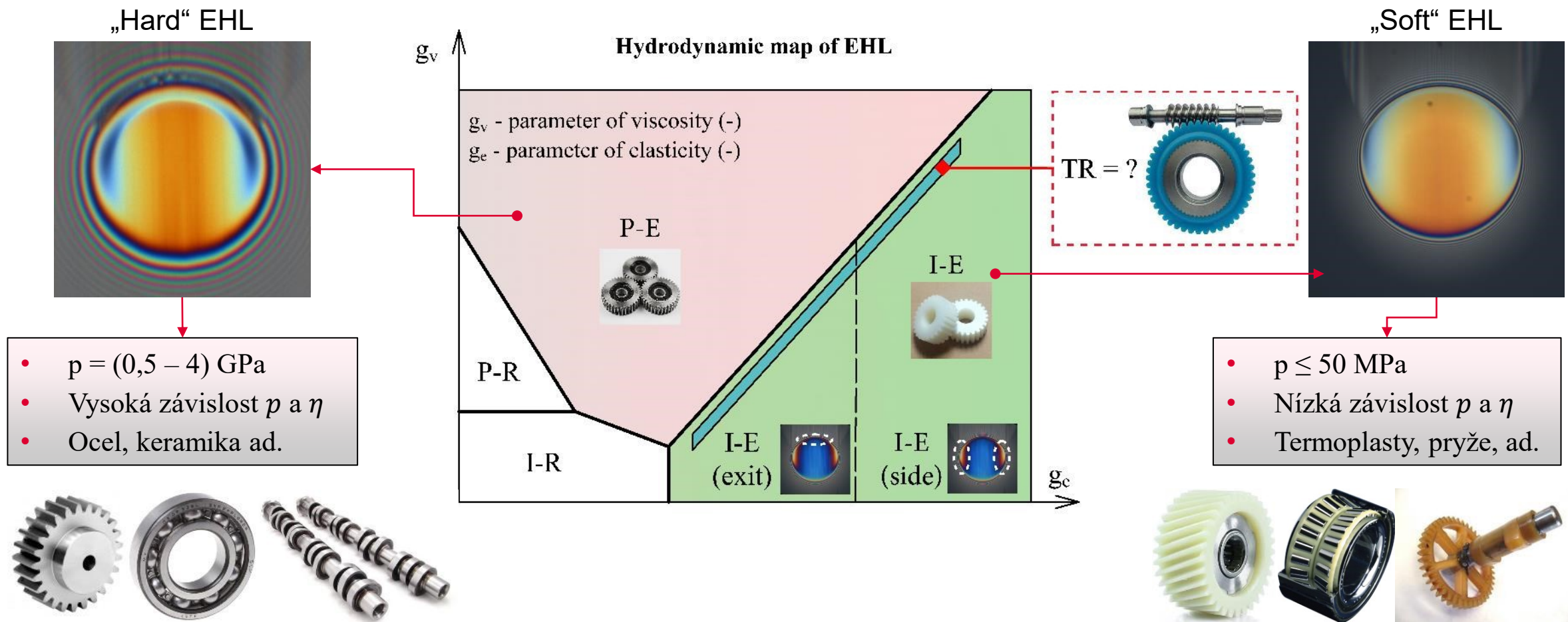
Parametr viskozity g_1 :

$$g_1 = g_V = \left(\frac{\alpha^2 \cdot W^3}{\eta_0 \cdot U \cdot R'^2}\right)^{1/2}$$

Parametr elasticity g_3 :

$$g_3 = g_E = \left(\frac{W^2}{\eta_0 \cdot U \cdot E' \cdot R'}\right)^{1/2}$$

SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ



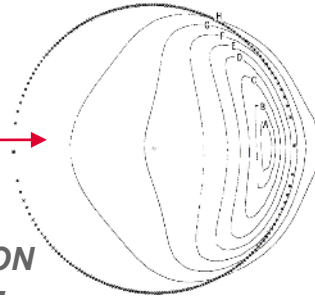
SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rozšíření polymerních materiálů v technických aplikacích

70. LÉTA

Predikce tloušťky filmu v **soft EHL**

HAMROCK, B., 1977



Publikace: *ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF ELLIPTICAL CONTACTS FOR MATERIALS OF LOW ELASTIC MODULUS*, 1977

Aplikace bezrozměrných parametrů a stanovení jejich významu v režimu soft EHL:

$$h = f(k, \bar{U}, \bar{W}, \bar{G})$$

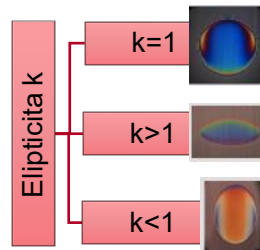
Stanovení predikčních vztahů tloušťky mazacího filmu:

Minimální tloušťka filmu h_m :

$$h_m = 7,43 \cdot (1 - 0,85 \cdot e^{-0,31 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,65} \cdot \bar{W}^{-0,21} \cdot R'$$

Centrální tloušťka filmu h_c :

$$h_c = 7,32 \cdot (1 - 0,72 \cdot e^{-0,28 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,64} \cdot \bar{W}^{-0,22} \cdot R'$$



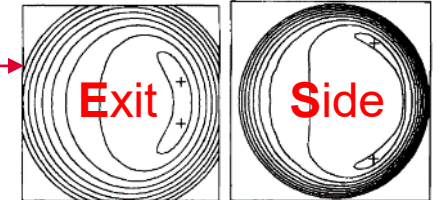
Vývoj nových polymerních materiálů

90. LÉTA

Lokalizace minimální tloušťky v **soft EHL**

HOOKE, C. J., 1995

Změna pozice $h_m \Rightarrow P \uparrow \ \&\& \ S \downarrow$



Publikace: *THE ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF ELLIPTICAL POINT CONTACTS OPERATING IN THE ISOVISCIOUS REGION*, 1995

Určení minimální tloušťky filmu dle bezrozměrných parametrů P a S pro eliptické kontakty:

$$h = f(k, P, S)$$

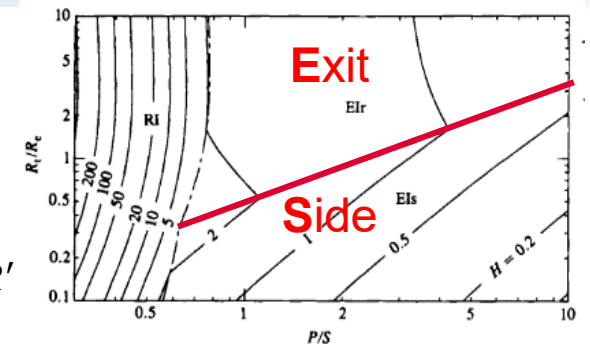
Lokalizace minimální tloušťky filmu v režimu Isoviscous-elastic:

Minimální tloušťka filmu h_{mE} :

$$h_{mE} = 2,83 \cdot \bar{U}^{0,6} \cdot \bar{W}^{-0,13} \cdot R'$$

Minimální tloušťka filmu h_{mS} :

$$h_{mS} = 8,55 \cdot \bar{U}^{0,75} \cdot \bar{W}^{-0,23} \cdot R'$$



SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2010

Experimentální studie - rozšíření poznatků o mazání soft kontaktů

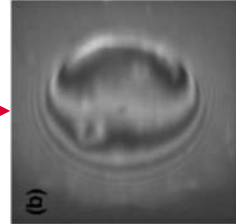
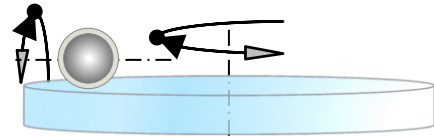
MYANT, C., 2010

Publikace: *AN INVESTIGATION OF LUBRICANT FILM THICKNESS IN SLIDING COMPLIANT CONTACTS*, 2010

Závislost tloušťky filmu a tlaku na U , W , η a SRR

Aplikace metody monochromatické interferometrie:

(PDMS+Steel) + BK7



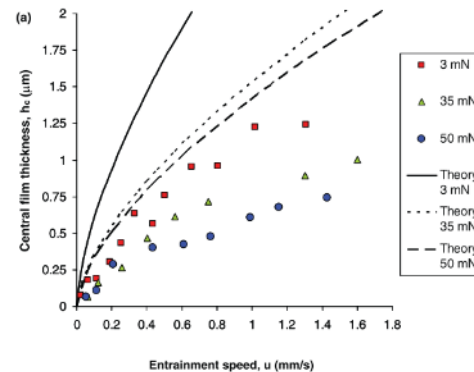
Porovnání experimentu a predikce Hamrock & Dowson (1978):

Minimální tloušťka filmu h_m :

$$h_m = 2,8 \cdot \bar{U}^{0,68} \cdot \bar{W}^{-0,20} \cdot R'$$

Centrální tloušťka filmu h_c :

$$h_c = 3,3 \cdot \bar{U}^{0,63} \cdot \bar{W}^{-0,13} \cdot R'$$



2016

Experimentální studie - rozšíření poznatků o mazání soft kontaktů

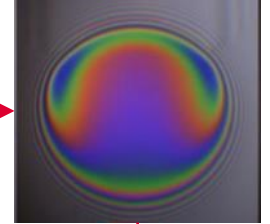
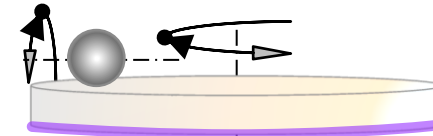
MARX, N., 2016

Publikace: *ELASTOHYDRODYNAMIC FILM THICKNESS OF SOFT EHL CONTACTS USING OPTICAL INTERFEROMETRY*, 2016

Závislost tloušťky filmu na U , W , η a SRR

Prvotní aplikace metody chromatické interferometrie v soft EHL:

Steel + (PMMA, PU) + Cr povlak



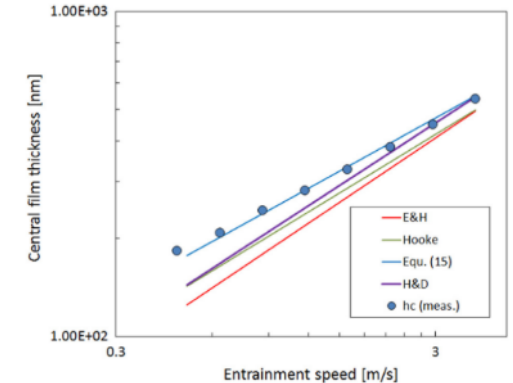
Porovnání experimentu s predikcemi pro soft EHL:

Minimální tloušťka filmu h_m :

$$h_m = 2,9 \cdot \bar{U}^{0,62} \cdot \bar{W}^{-0,16} \cdot R'$$

Centrální tloušťka filmu h_c :

$$h_c = 2,6 \cdot \bar{U}^{0,55} \cdot \bar{W}^{-0,07} \cdot R'$$



ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

VYMEZENÍ VZHLEDEM K SOUČASNÉMU STAVU POZNÁNÍ

- Nedostatek poznatků popisujících mazání polymerních materiálů v režimu EHL,
- Nepřesnost predikčních vztahů tloušťky filmu v režimu soft EHL,
 - Chybí popis vlivu teploty na změnu mechanických vlastností a dopad na tloušťku mazacího filmu,
 - Chybí popis utváření mazacího filmu při limitních pracovních zatíženích,
- Absence experimentálního zjištění vývoje tloušťky filmu v přechodové oblasti EHL mazání.

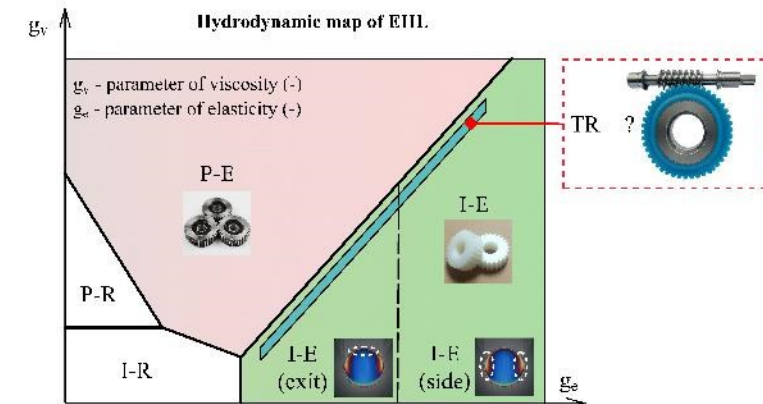
VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Cíl disertační práce

- Experimentální objasnění utváření mazacího filmu v přechodové oblasti mezi režimy I-E a P-E EHL
- Stanovení významu limitních projevů teploty a zatížení na utváření mazacího filmu
- Stanovení vlivu jednotlivých provozních parametrů při procesu mazání a vytvoření predikčních vztahů

Přínos disertační práce

- Pochopení utváření mazacího filmu a určení provozních limitů soft EHL kontaktu
- Identifikace vlivu jednotlivých provozních parametrů při procesu mazání a získání jejich závislostí na základě regresivní analýzy



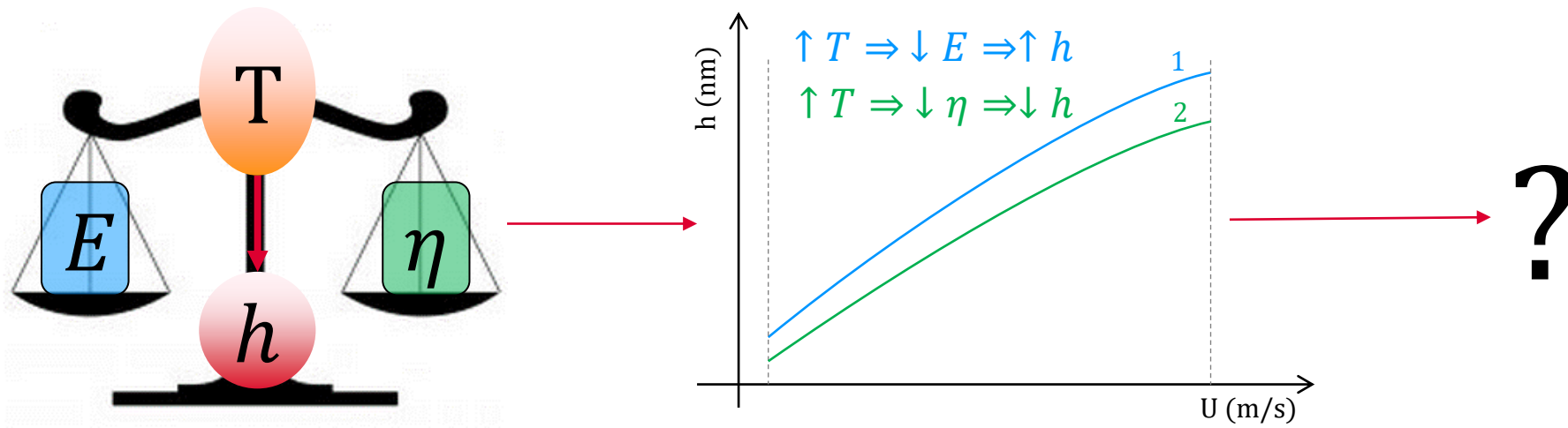
VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Vědecká otázka č. 1

„Jak bude ovlivněn vývoj tloušťky filmu při zvýšených teplotách v mazaném poddajném kontaktu v přechodové oblasti EHL?“

Pracovní hypotéza č. 1

„Vliv rostoucí teploty způsobí významné snížení mechanických vlastností, zejména modulu pružnosti, jehož redukcí dojde v přechodové oblasti EHL ke zvýšení tloušťky mazacího filmu. Současně vliv zvýšené teploty povede k poklesu viskozity maziva a tím tloušťky filmu, přechodu do režimu smíšeného mazání a tím zvýšení tření v kontaktu.“



VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Vědecká otázka č. 2

„Jaká je závislost rychlosti, tlakově viskózního koeficientu maziva, modulu pružnosti a zatížení na tloušťce mazacího filmu v TR EHL režimu?“

Pracovní hypotéza č. 2

„V TR EHL oblasti je míra vlivu rychlosti, tlakově viskózního koeficientu a zatížení někde na přechodu režimů mezi soft a hard EHL. Vliv rostoucího zatížení způsobující pokles tloušťky filmu, který bude mít více výrazný vliv při podmínkách blízkých soft EHL kontaktu.“

„Hard“ EHL	„TR“ EHL	„Soft“ EHL
\bar{U}	$\bar{U}^?$	\bar{U}
\bar{W}	$\bar{W}^?$	\bar{W}
\bar{G}	$\bar{G}^?$	$\bar{G} = 0$

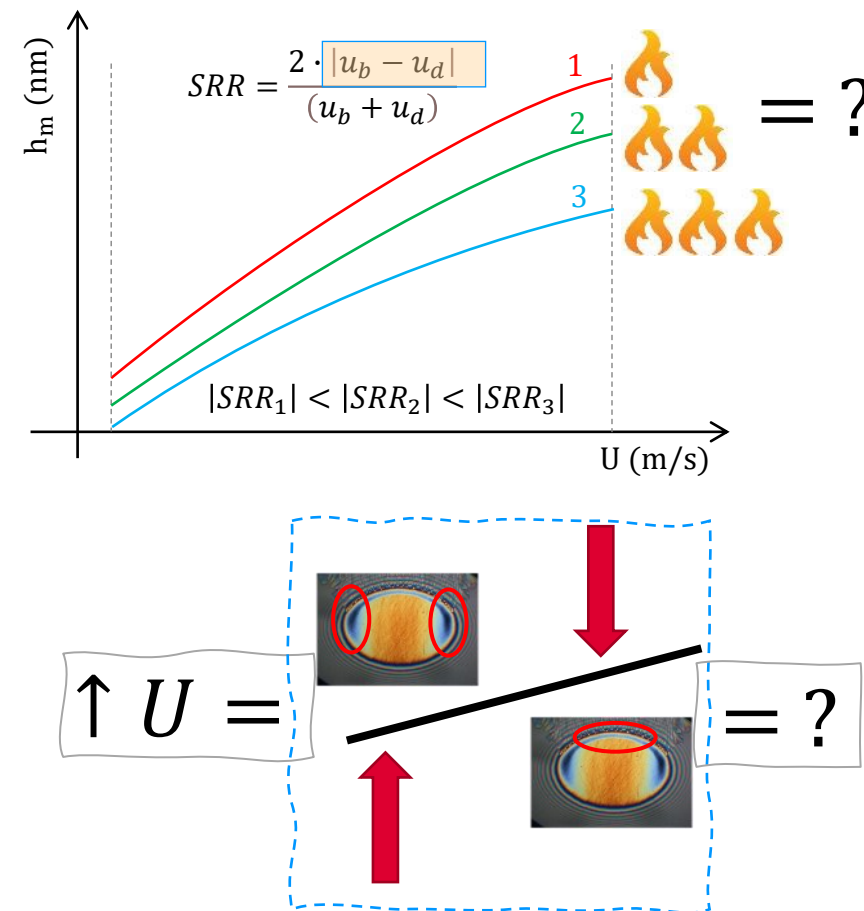
VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Vědecká otázka č. 3

„Jak se projeví účinek skluzové rychlosti na utváření mazacího filmu vně přechodové oblasti TR EHL?“

Pracovní hypotéza č. 3

„Při zajištění podmínek EHL mazání nebude mít skluzová rychlost významný vliv na utváření mazacího filmu. Lze očekávat nevýrazné snížení tloušťky maziva i přes zvýšení teploty uvnitř kontaktní oblasti. V důsledku působení skluzové rychlosti nedojde k relokaci minimální tloušťky filmu.“

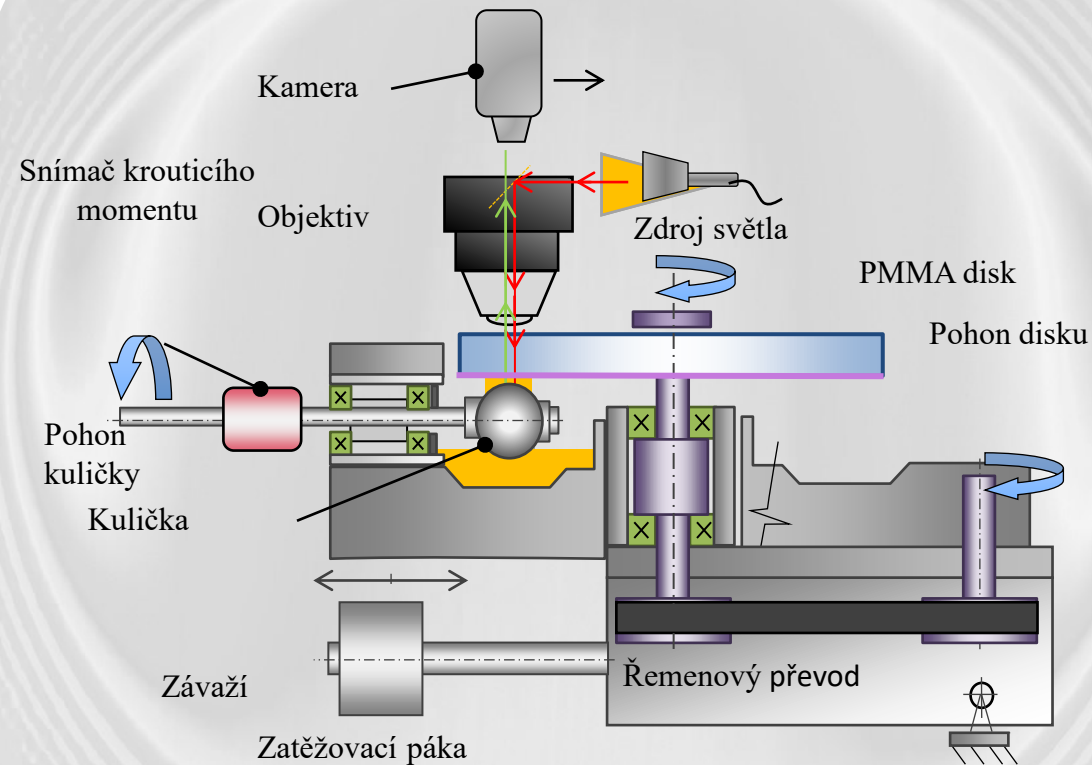
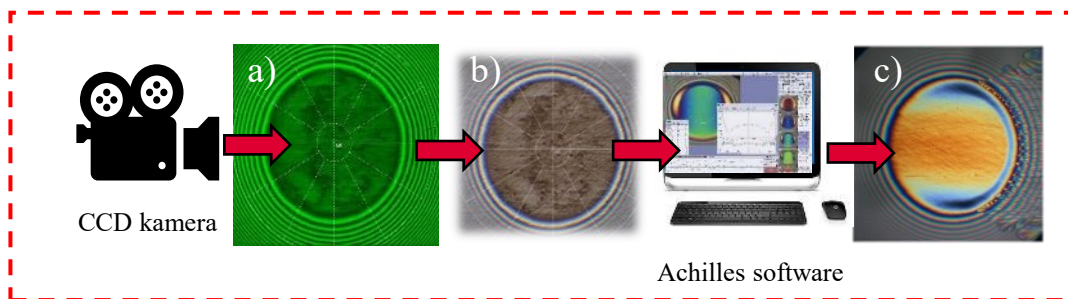


MATERIÁL A METODY

Metody:

- Rotační tribometr ball-on-disc
 - Měření tloušťky filmu
 - Měření tření
- Optická chromatická interferometrie

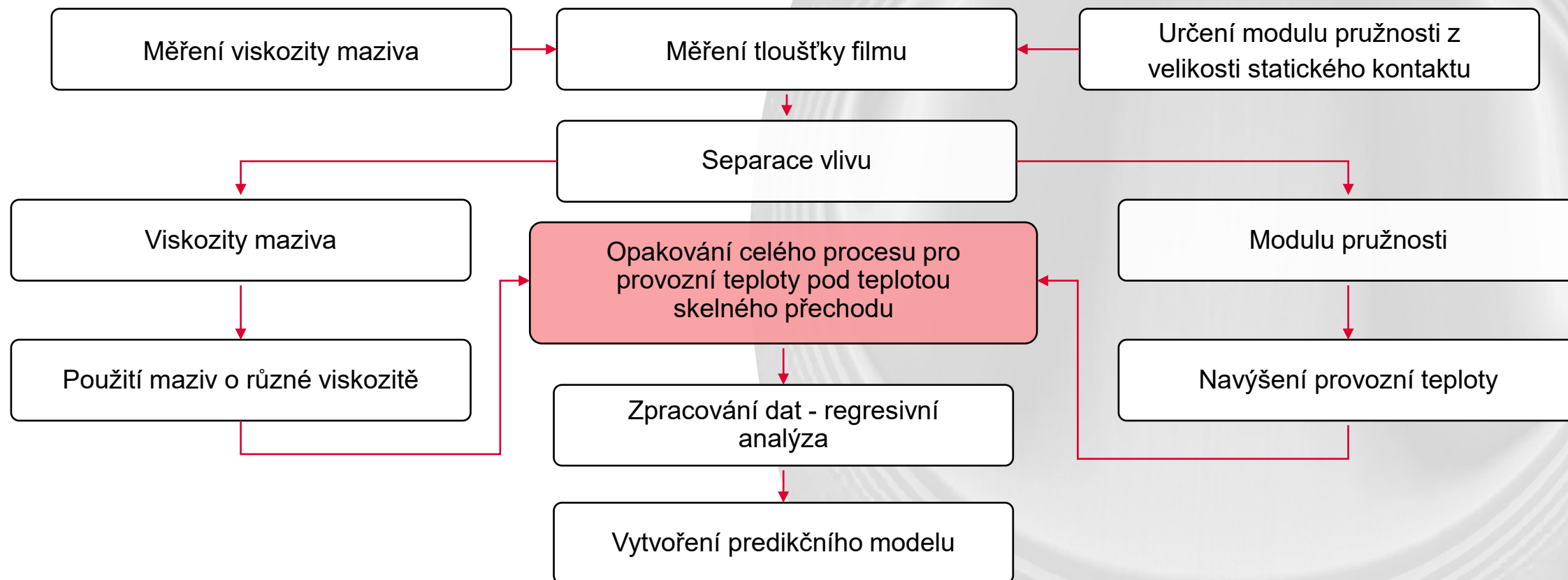
Proces vyhodnocení tloušťky filmu



MATERIÁL A METODY

Postup řešení – vědecká otázka č.1 :

Jak bude ovlivněn vývoj tloušťky filmu při zvýšených teplotách v mazaném poddajném kontaktu v přechodové oblasti EHL? “



MATERIÁL A METODY

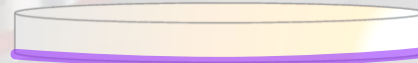
Materiál:

- Experimentální vzorky
 - Disky: PMMA, BK7, SAFÍR
 - Kuličky: 100Cr6, PA 66, POM, PEEK
- Maziva
 - Referenční maziva
 - Minerální a syntetické oleje

Soft kontakt

PMMA

$E = 3,3 \text{ GPa}$



$E = 206 \text{ GPa}$



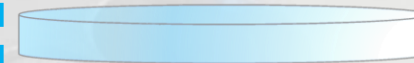
Ocel

100Cr6

Soft kontakt

BK7

$E = 76 \text{ GPa}$



$E = 2,5 \text{ GPa}$

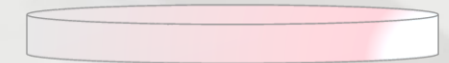


Polyamid

PA 66

SAFÍR

$E = 400 \text{ GPa}$



$E = 3,7 \text{ GPa}$



Polyetereterketon

PEEK

$E = 2,8 \text{ GPa}$



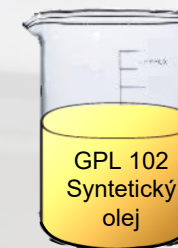
Polyacetal

POM

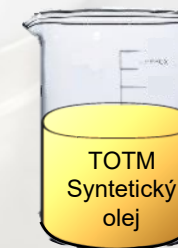
NEVEŘEJNÁ DATA



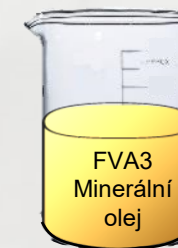
5P4E
Syntetický
olej



GPL 102
Syntetický
olej



TOTM
Syntetický
olej



FVA3
Minerální
olej



SQL
Přírodní
olej

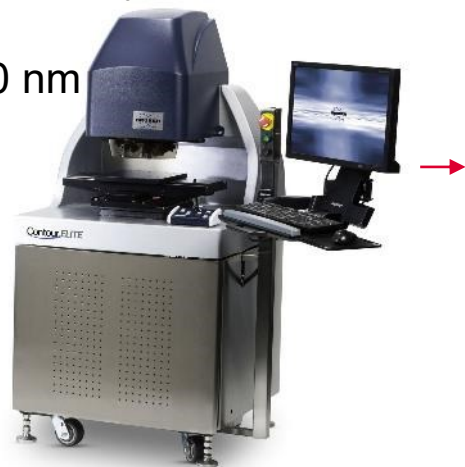
SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ

Experiment:

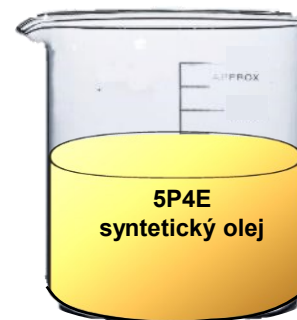
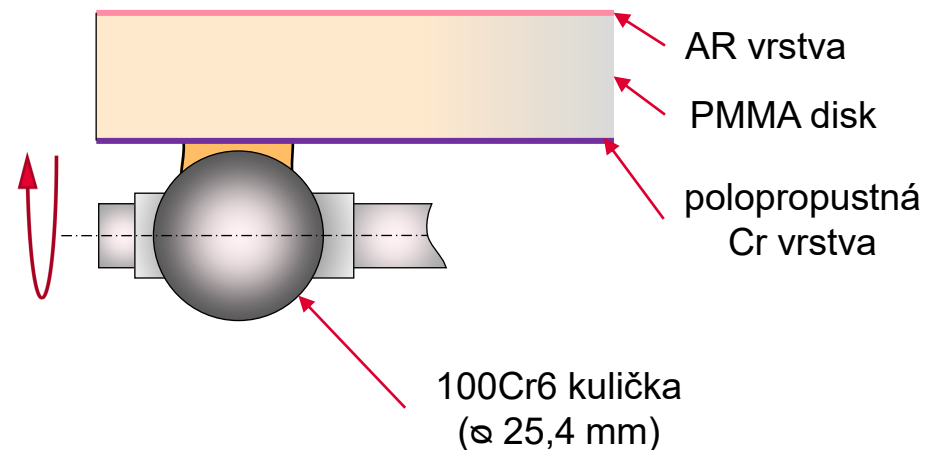
- SRR = 0
- Unášivá rychlost $U = (0,05-0,6)$ m/s
- Zatížení $W = 35$ N ($\approx p=85$ MPa)
- Teplota $T = (24, 40, 70, 80)$ °C
- Modul pružnosti PMMA $E=3300$ MPa

Měření drsnosti povrchu - Optický profilometr Bruker:

- PMMA disk $R_a < 5$ nm
- 100Cr6 kulička $R_a < 10$ nm



Státní doktorská zkouška



18/22

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ

Pozorována deformace běžícího kontaktu v obou osách s rostoucí teplotou oproti statickému kontaktu

NEVEŘEJNÁ DATA

Pozorován pokles modulu pružnosti v závislosti na teplotě a čase

NEVEŘEJNÁ DATA

Odlíšný vývoj centrální tloušťky filmu než uvažují predikce nebyl patrný v celém intervalu teplot

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ

PUBLIKACE (VYDANÉ):

KŘUPKA, Jiří, Petr ŠPERKA, Ivan KŘUPKA a Martin HARTL, 2019. LUBRICATION OF ROLLING - SLIDING POLYMER CONTACTS. In: ENGINEERING MECHANICS 2019. Prague: Institute of Thermomechanics of the Czech Academy of Sciences, 2019-05-13, s. 219-223. DOI: 10.21495/71-0-219. ISBN 978-80-87012-71-0. ISSN 1805-8226.

PUBLIKACE (PŘIPRAVOVANÉ):

- KŘUPKA, J.; ŠPERKA, P.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Formation of fluid film thickness in soft EHL contacts at high temperatures. (Revize školitele)

PREZENTACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

- ENGINEERING MECHANICS 2019; Svatka, *Česká republika*, 2019
- ICMD 2019; Znojmo, *Česká republika*, 2019
- FZG - TUM München; Mnichov, *Německo*, 2018
- IOT - RWTH Aachen University; Cáchy, *Německo*, 2019

ZÁVĚR

Shrnutí

- Identifikace „bílého místa“ v problematice elastohydrodynamického mazání s cílem získání nových poznatků vedoucích k objasnění utváření mazacího filmu v poddajných kontaktech,
- Vytvoření metodiky umožňující splnění vymezeného cíle,
- Realizace dílčích experimentů v oblasti vývoje tloušťky mazacího filmu poskytující nové poznatky určené pro publikaci v odborných člancích.

Hlavní doposud získané poznatky

Vývoj tloušťky mazacího filmu je silně ovlivněn teplotním účinkem jenž nelze po překročení teploty skelného přechodu polymeru adekvátně vyhodnotit.

Nekonzistentní vývoj tloušťky mazacího filmu při použití různých maziv vzhledem ke známým predikčním modelům.

DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Jiří Křupka, Ing.

Jiri.Krupka@vut.cz



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

www.ustavkonstruovani.cz