



FACULTY
OF MECHANICAL
ENGINEERING



INSTITUTE OF
MACHINE AND INDUSTRIAL
DESIGN

In-situ studium změny topografie třecích povrchů v elasto- hydrodynamickém kontaktu

Pojednání ke státní závěrečné zkoušce

Autor: Petr Šperka

Školitel: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

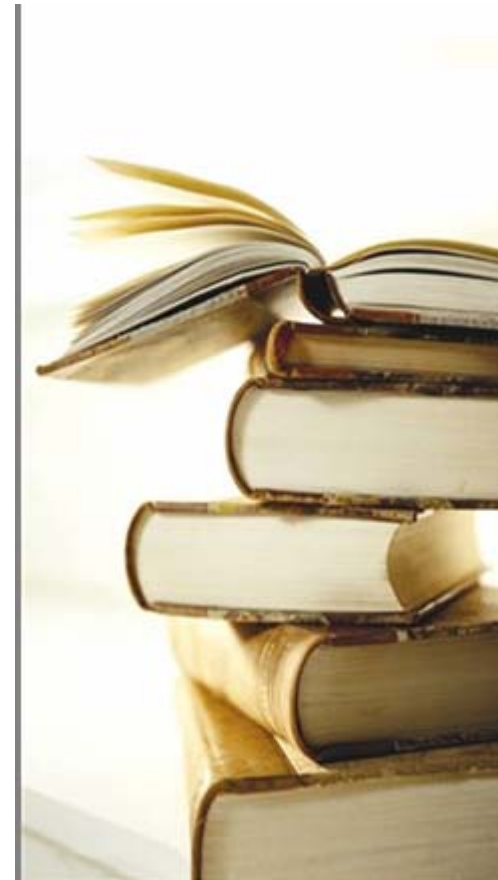
Ústav konstruování

Fakulta strojního inženýrství

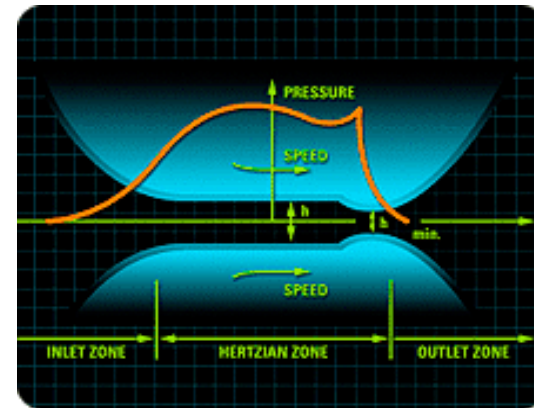
Vysoké učení technické v Brně

Česká Republika

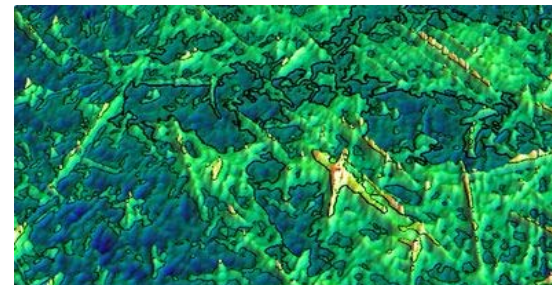
- Úvod do problematiky
- Formulace problému
- Shrnutí současného stavu poznání
- Analýza a zhodnocení poznatků
- Vymezení cíle disertační práce
- Současný stav řešení disertační práce
- Závěr



- Elastohydrodynamický režim mazání
 - ložiska, ozubené kola, vačky a další
 - 2. polovina 20. století
 - hladké kontakty
- Snižování tloušťky mazací vrstvy
 - 21. století
 - tloušťka mazací vrstvy je řádově stejná s drsností kontaktních ploch



timken.com

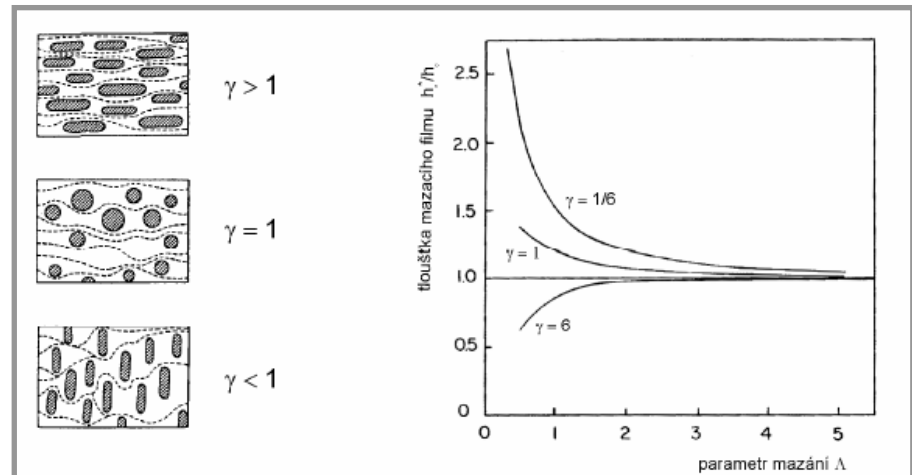


Vliv drsnosti je nutné studovat

- Studium mazání kontaktů s povrchovými nerovnostmi
- Statistický **X** deterministický přístup
- Parametr mazání

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{R_{\text{red}}} = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

- h_{\min} – minimální tloušťka maziva
- R_{red} – redukovaná drsnost třecích povrchů



PATIR N, CHENG H S; 1979

Povrchové nerovnosti se v EHD kontaktu deformují

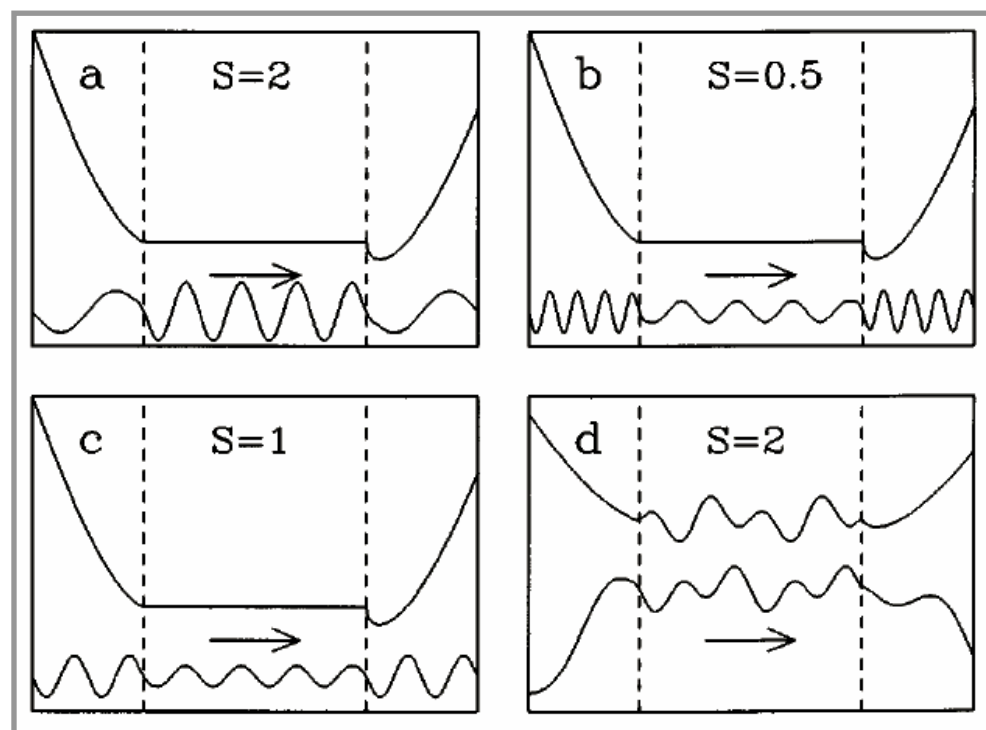
- Moderní vícevrstvé a vícesíťové metody řešení EHD problémů
 - 90. léta 20. století
 - Řešení průchodu 1 mm povrchu přes EHD kontakt zabere cca 5 hodin (2006)
 - Pro praktické použití nevhodné



Cíl: obecný popis chování povrchů v EHD kontaktu

TEORETICKÉ STUDIE

- Deformace povrchových nerovností
- Harmonické nerovnosti



HOOKE C.J., 2000

S - poměr rychlosti povrchu s nerovnostmi
ke střední rychlosti maziva

TEORETICKÉ STUDIE

- Model amplitudového útlumu (Venner, Lubrecht, Hooke 1999)
- Studium povrchu s harmonickými nerovnostmi
- Bezrozměrná vlnová délka (liniový, bodový kontakt)

$$\nabla = \frac{\lambda P^{1,5}}{b S^2},$$

- Amplitudový útlum

$$\frac{A_d}{A_i} = \frac{1}{1 + 0,15\tilde{\nabla} + 0,015\tilde{\nabla}^2}.$$

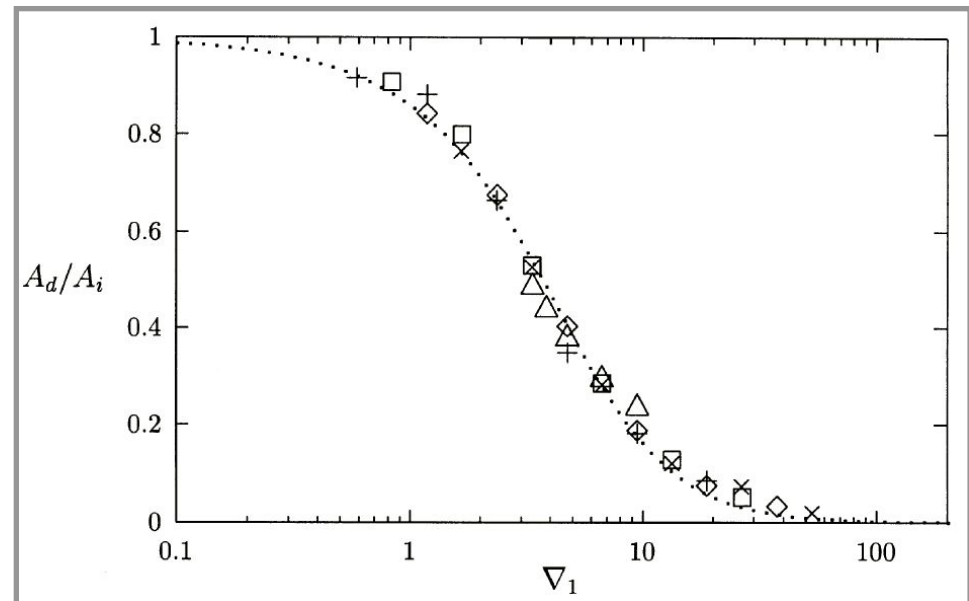
P, S – Greenwoodovy parametry
zatížení a rychlosti

b – šířka Hertzova kontaktu

λ – vlnová délka

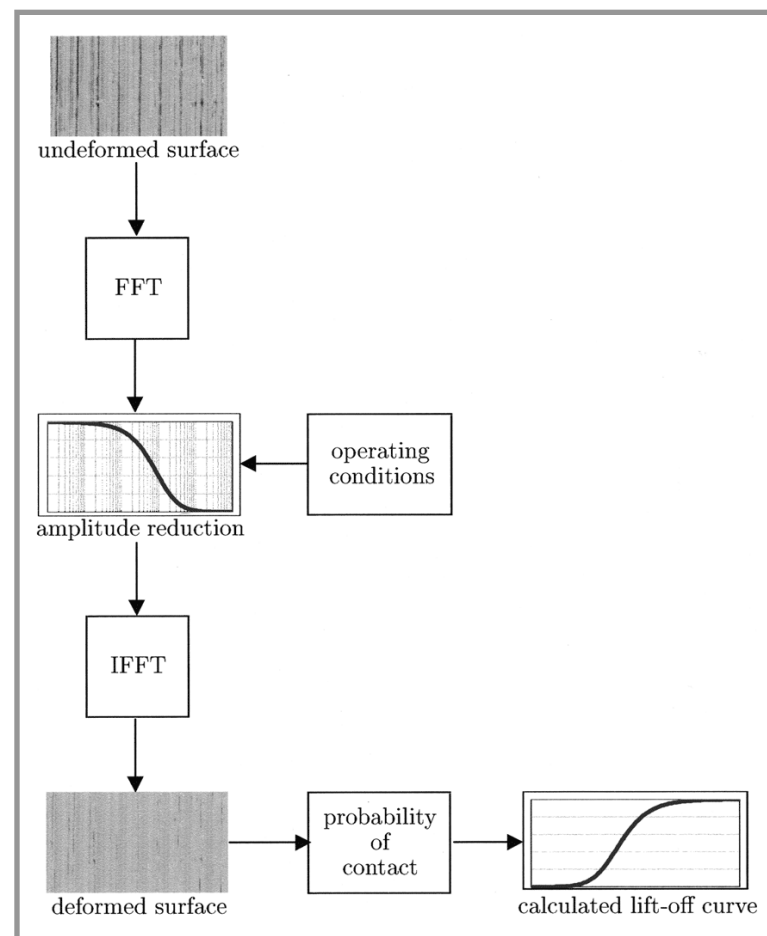
A_d – deformovaná amplituda

A_i – nedeformovaná amplituda



TEORETICKÉ STUDIE

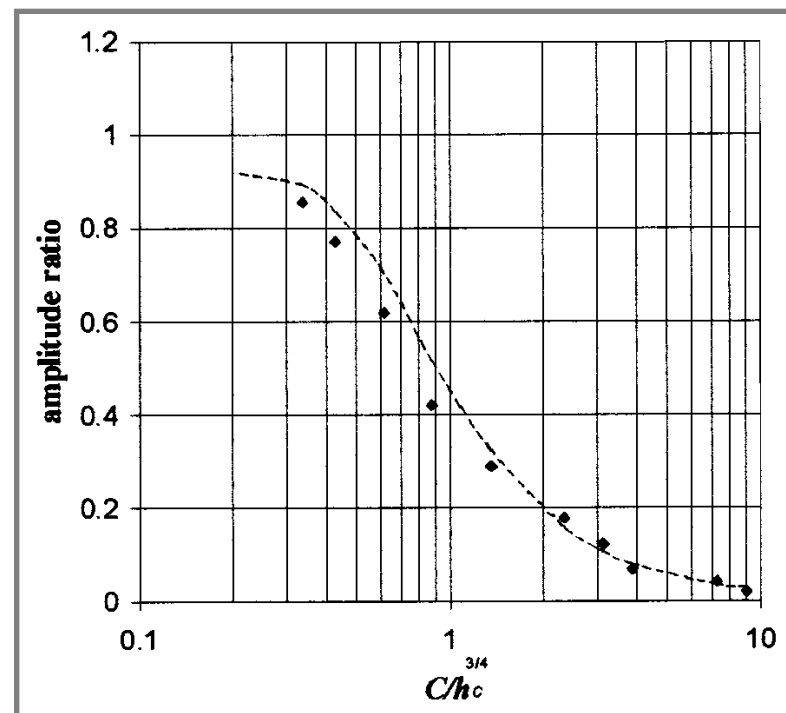
- Potenciálně použitelný na obecné (reálné) povrchy
– Fourierova transformace



MASEN M.A., VENNER C.H. a kol. 2002

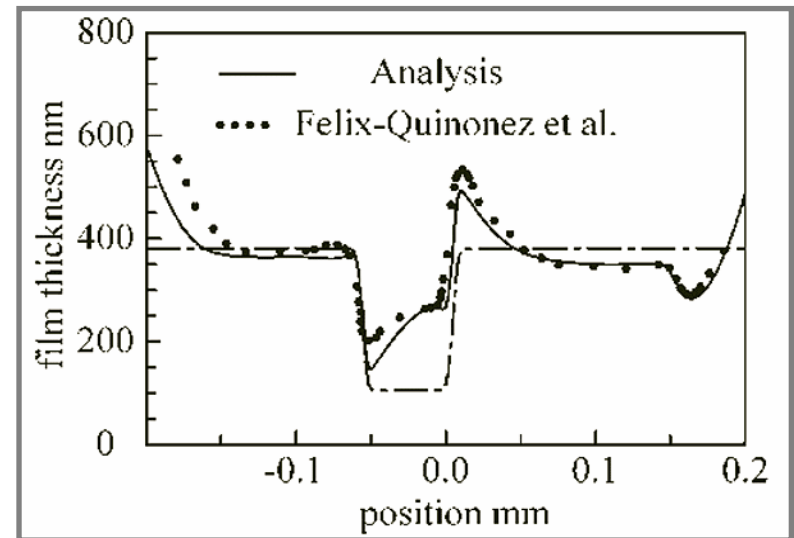
EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE

- Harmonická nerovnost
 - 2000 KANETA M a kol.
 - 2003 GLOVNEA R P a kol.
- Výstupek na povrchu
 - 1998 GUAGTENG G. a kol.
 - 2005 FÉLIX-QUIÑONEZ A a kol.
 - 2003 KANETA M. a kol.
- 3D výstupek na povrchu
 - 2003 CHOO, J. W. a kol.
 - 2007 CHOO, J. W. a kol.



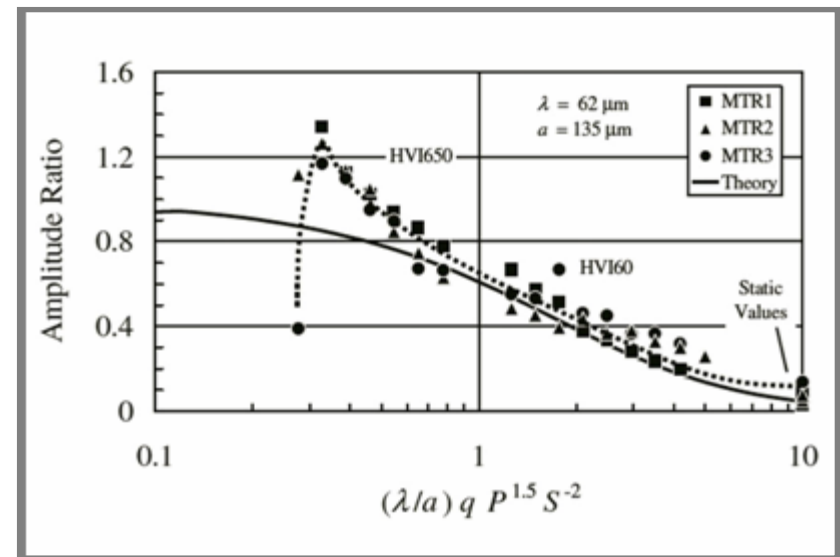
EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE

- Harmonická nerovnost
 - 2000 KANETA M a kol.
 - 2003 GLOVNEA R P a kol.
- Výstupek na povrchu
 - 1998 GUAGTENG G. a kol.
 - 2005 FÉLIX-QUIÑONEZ A a kol.
 - 2003 KANETA M. a kol.
- 3D výstupek na povrchu
 - 2003 CHOO, J. W. a kol.
 - 2007 CHOO, J. W. a kol.



EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE

- Harmonická nerovnost
 - 2000 KANETA M a kol.
 - 2003 GLOVNEA R P a kol.
- Výstupek na povrchu
 - 1998 GUAGTENG G. a kol.
 - 2005 FÉLIX-QUIÑONEZ A a kol.
 - 2003 KANETA M. a kol.
- 3D výstupek na povrchu
 - 2003 CHOO, J. W. a kol.
 - 2007 CHOO, J. W. a kol.

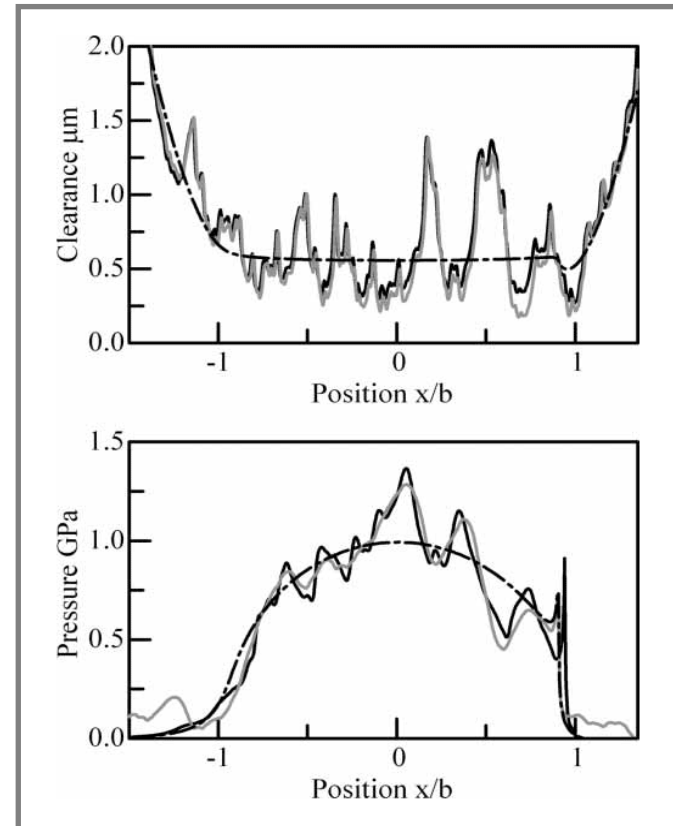


REÁLNÉ POVRCHY

- Srovnání modelu s numerickým řešením
 - 2006 HOOKE C J.
- Experiment
 - 2007 OLVER A V, DINI D.



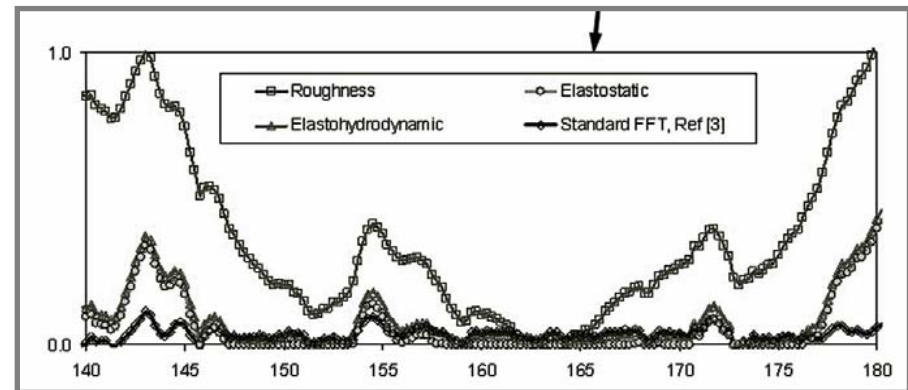
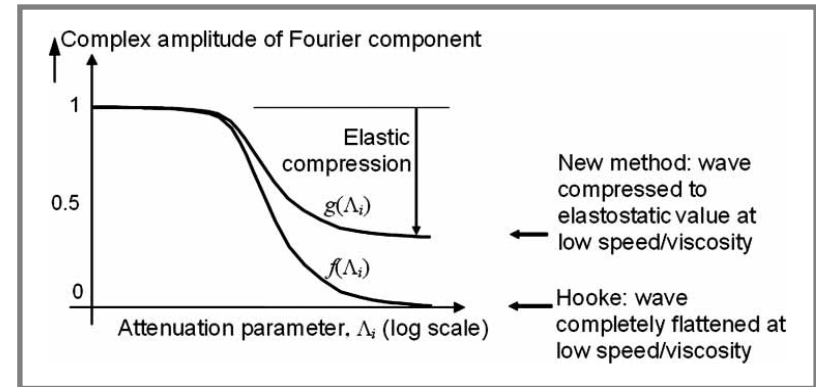
$$g(\nabla_i) = \frac{A_i^L}{A_i^0} = \frac{A_i^E}{A_i^0} + \left(1 - \frac{A_i^E}{A_i^0}\right) f(\nabla_i),$$



REÁLNÉ POVRCHY

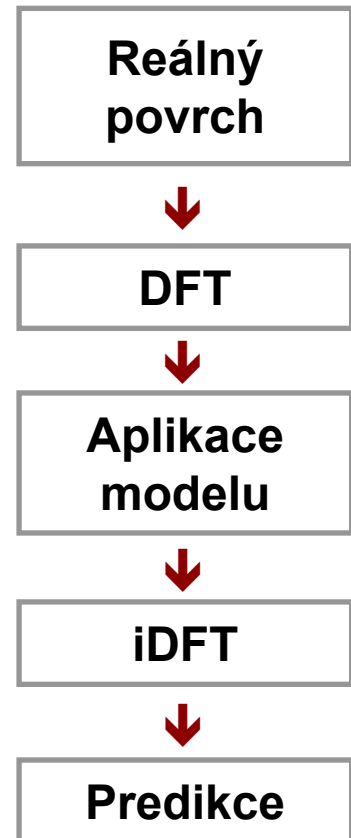
- Srovnání modelu s numerickým řešením
 - 2006 HOOKE C J.
- Experiment
 - 2007 OLVER A V, DINI D. →

$$g(\nabla_i) = \frac{A_i^L}{A_i^0} = \frac{A_i^E}{A_i^0} + \left(1 - \frac{A_i^E}{A_i^0}\right) f(\nabla_i),$$



- Simulace na modelových nerovnostech odhalily jednotný princip, podle kterého se nerovnosti v kontaktu deformují.
- Experimenty na modelových nerovnostech ověřily teoretické předpoklady.
 - Malá část výsledků byly v rozporu s předpoklady.
 - Potvrdily se omezení modelu.
- Pomocí modelu lze teoreticky predikovat chování libovolného povrchu v kontaktu.

Model nebyl dosud na površích s reálnými nerovnostmi ověřen experimenty



Cílem je experimentální ověření teoreticky navrženého modelu chování povrchových nerovností v EHD kontaktu na površích s reálnými nerovnostmi.

▪ Část experimentální

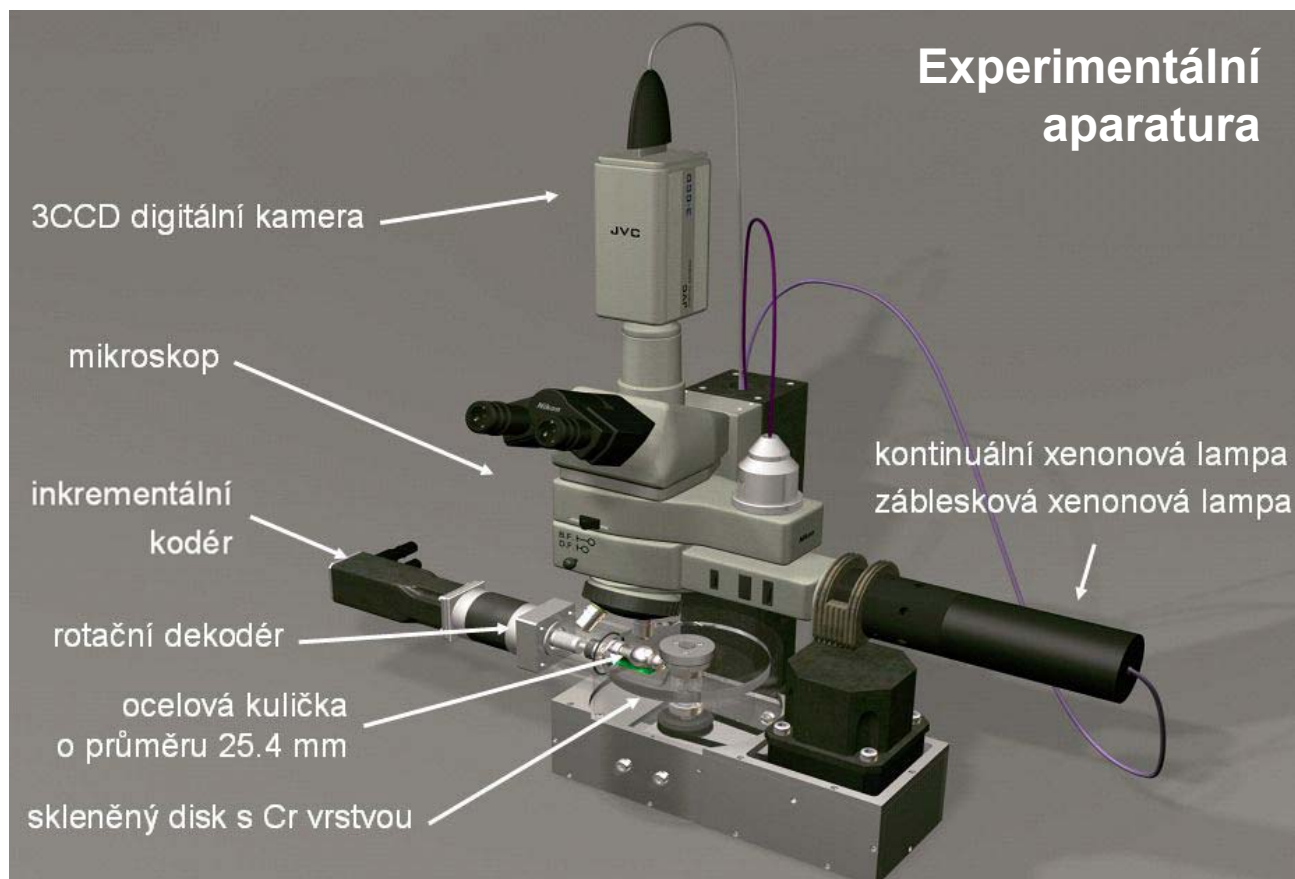
- měření topografie povrchu,
- in-situ měření tloušťky mazací vrstvy.

▪ Část vyhodnocování

- navrhnout vhodný způsob zpracování a vyhodnocení,
- redukovat vliv možných zdrojů chyb na výsledky,
- porovnání výsledků s teoretickými modely, popřípadě nalezení nových obecných pravidel a zákonitostí.



Část experimentální



Část experimentální

In-situ měření

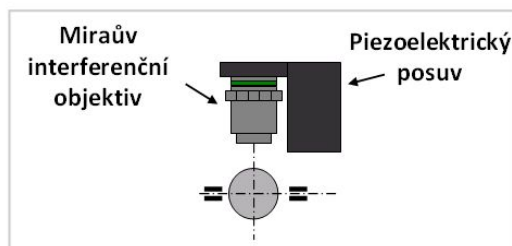
Topografie povrchu



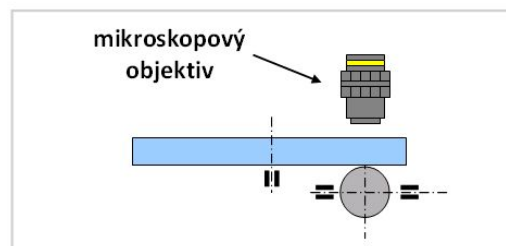
Tloušťka mazacího filmu



Interferometrie s řízenou změnou fáze

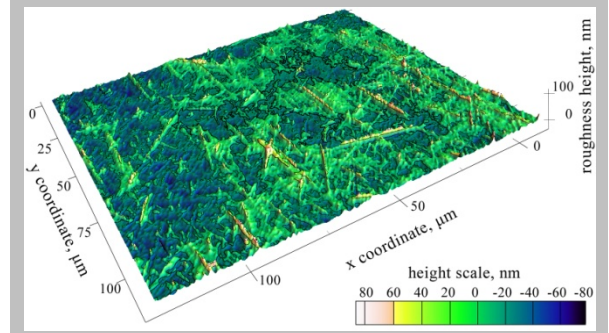


Kolorimetrická interferometrie

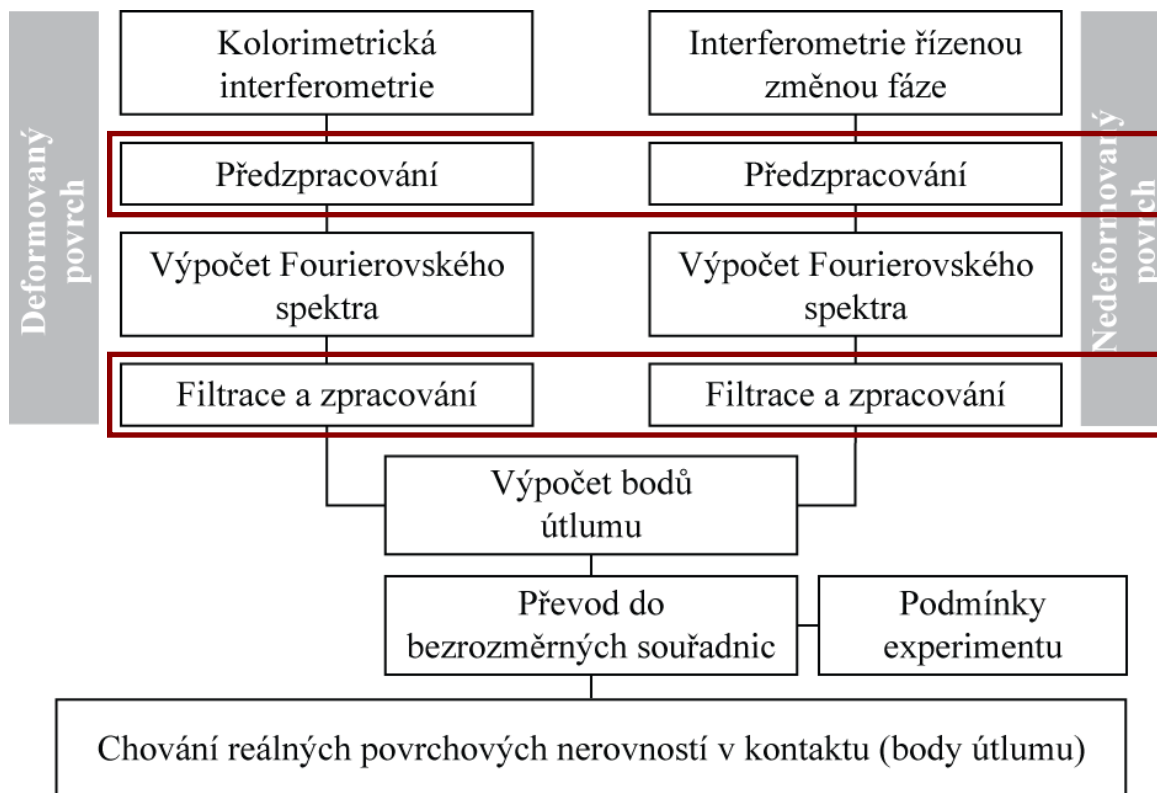


Měření topografie

- implementována metoda PSI (software)
- upravena měřicí aparatura
- ověřena přesnost



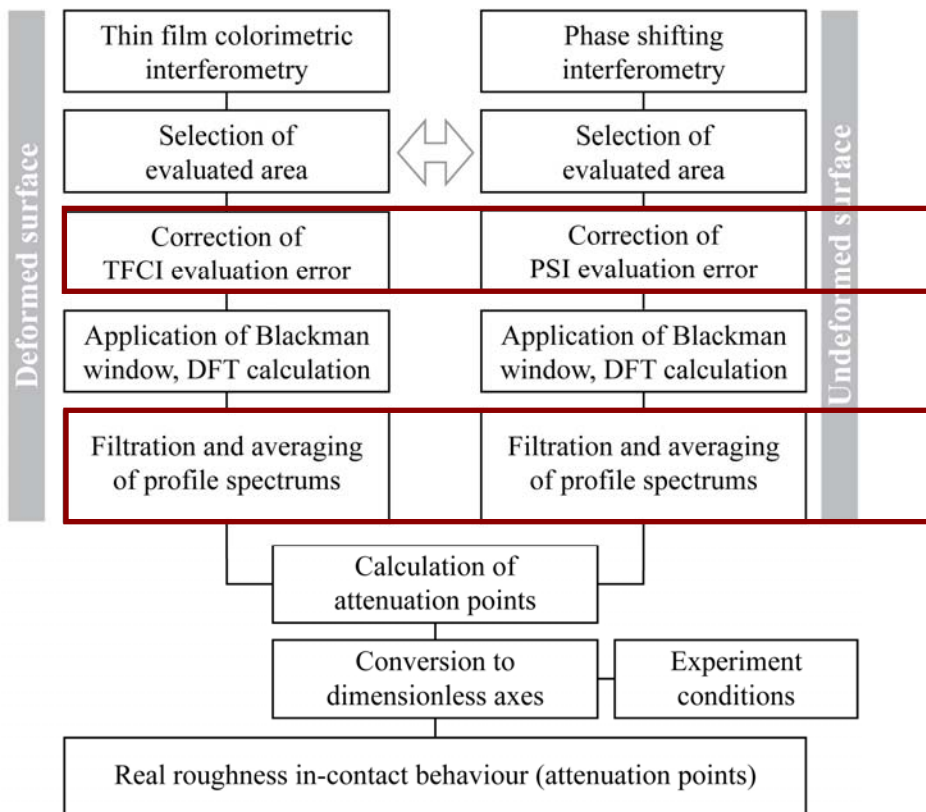
Základní schéma zpracování dat



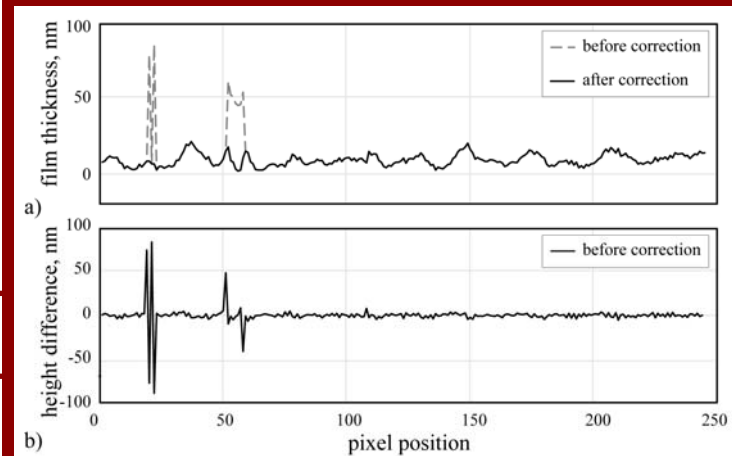
Cílený návrh

- redukce negativní vlivů možných chyb (šum, chyby vyhodnocování apod.)

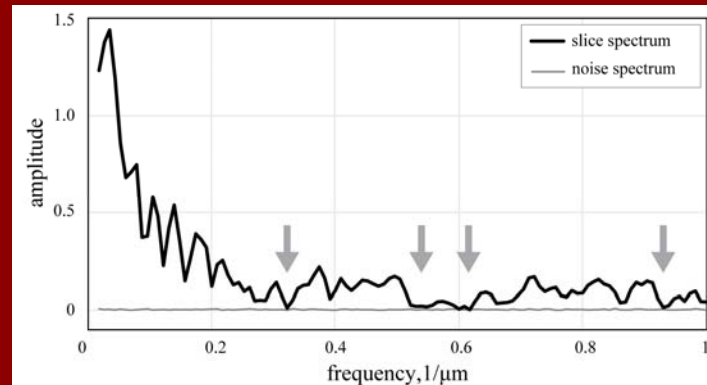
Současné schéma zpracování



Korekce chyb vyhodnocování

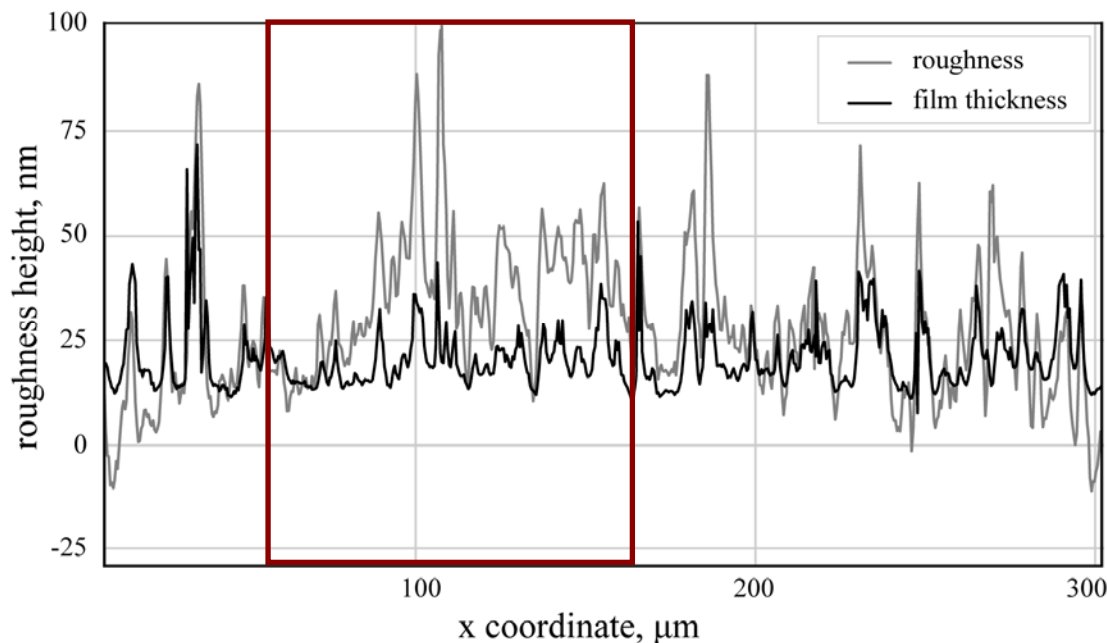


Filtrace a průměr z mnoha řezů



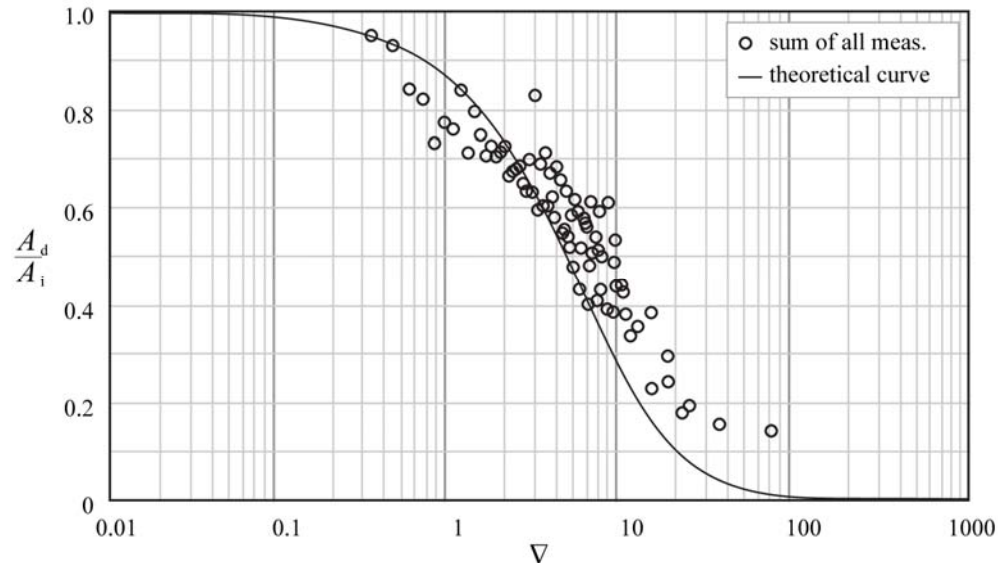
VÝSLEDKY

- Ocelová kulička (AISI 52100) - povrchové nerovnosti bez ztelné směrovosti
- drsnost $R_a = 12,4$ nm, $R_q = 16,9$ nm.
- Experimentální podmínky $p_h = 0,6$ GPa; $b = 195,7$ μm ; $u = 0,00044$ m.s⁻¹.
- Mazivo LSBS $\eta = 0,75$.



**Dlouhé vlnové délky
se deformují více než
krátké vlnové délky**

SOUČASNÉ VÝSLEDKY



- Výsledky prezentovány na konferenci 36th Leeds-Lyon Symposium on Tribology 2009: udělena cena Maurice Godeta.
- A publikovány v článku: „Experimental study of real roughness attenuation in concentrated contacts“.

- Pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje přehled studia chování změn povrchových nerovností při průchodu EHD kontaktem.
- Zaměřuje se na nejaktuálnější a obecný model amplitudového útlumu, který byl poprvé navržen na konci 90. let minulého století.
- Může být použit jako obecný prakticky použitelný nástroj k predikci chování povrchů s libovolnými nerovnostmi v EHD kontaktu, **nebyl dosud na reálných površích dostatečně ověřen.**
- Pro dosažení úspěšného řešení již byly splněny některé dílčí cíle.
- Další práce se zaměří na podmínky nenulového prokluzu a experimenty s neneutonskými mazivy.



Děkuji za pozornost

1: Pojednání neobsahuje charakteristiky zvolených metod řešení. Proto žádám doktoranda, aby objasnil principy a limity použité metody, její výhody a nevýhody.

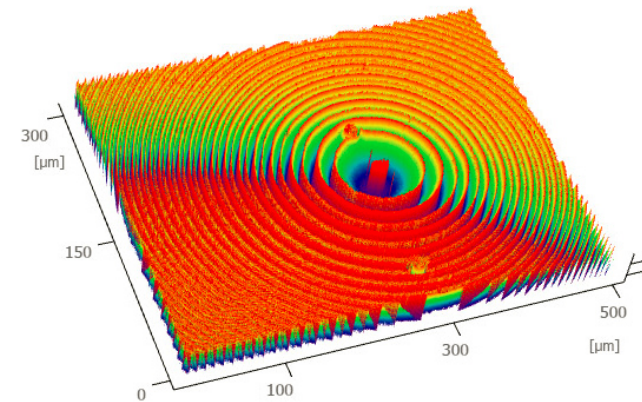
▪ Měření tloušťky mazací vrstvy (TFCI)

- Pracovní rozsah: 0 – 1000nm
- Odpovídá pěti interferenčním řádům - existence nejednoznačnosti
- Nutná kontrola spojitosti ve výsledných datech
- Dynamický rozsah do cca 100 nm

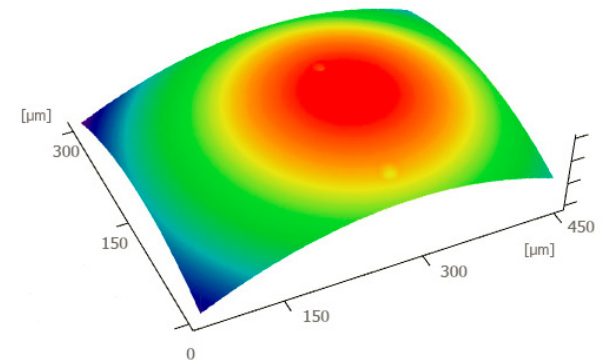
▪ Měření topografie povrchu (PSI)

- Pracovní rozsah omezen hloubkou ostrosti řádově 10 μm
- Nutná korekce spojitosti ve výsledných datech
- Dynamický rozsah do cca 130 nm

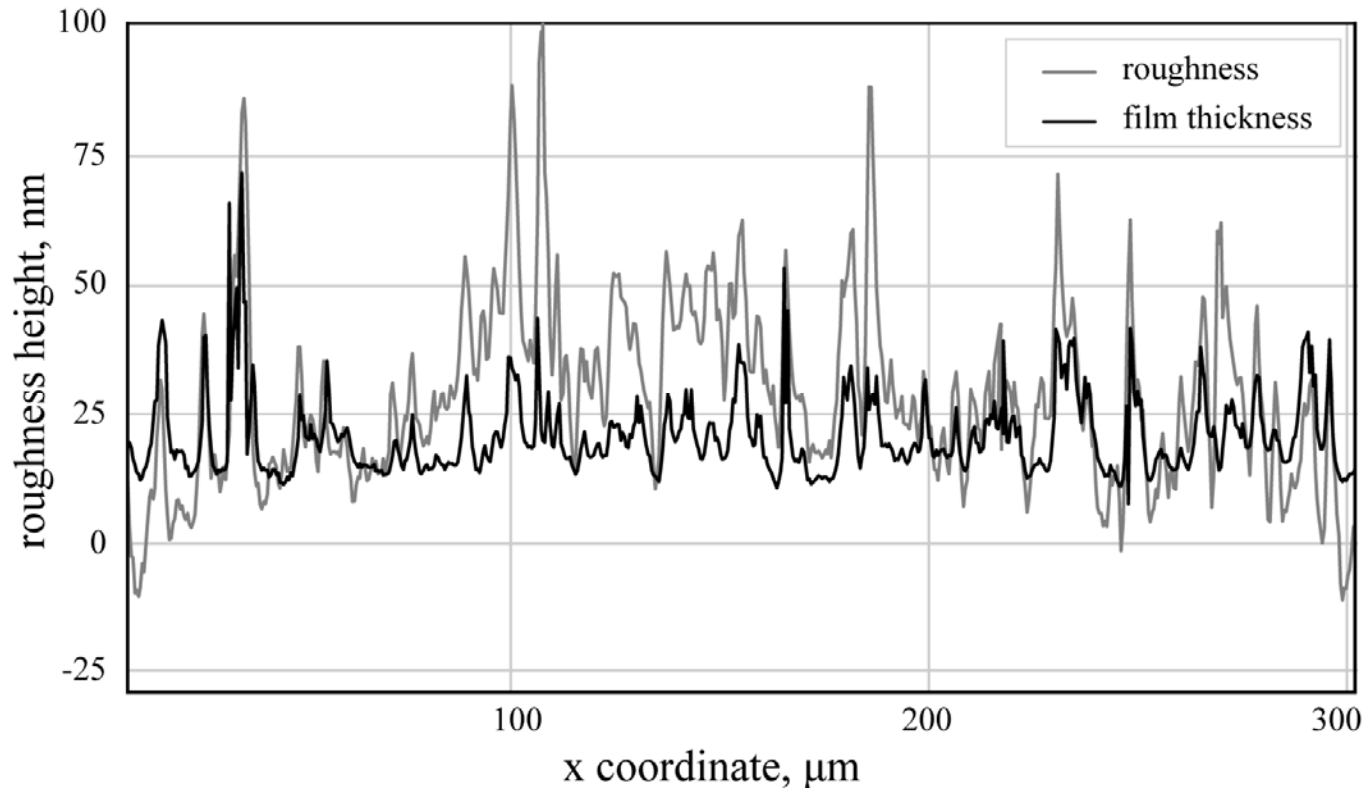
a) před Phase unwrappingem



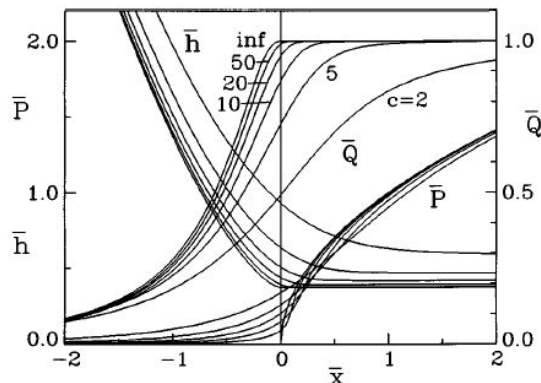
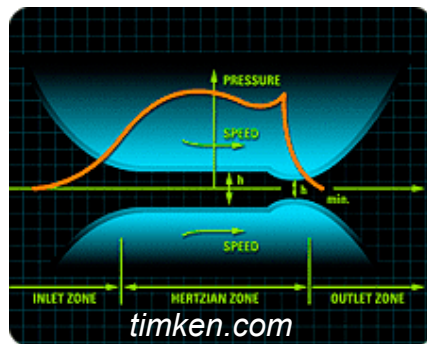
b) po Phase unwrappingu



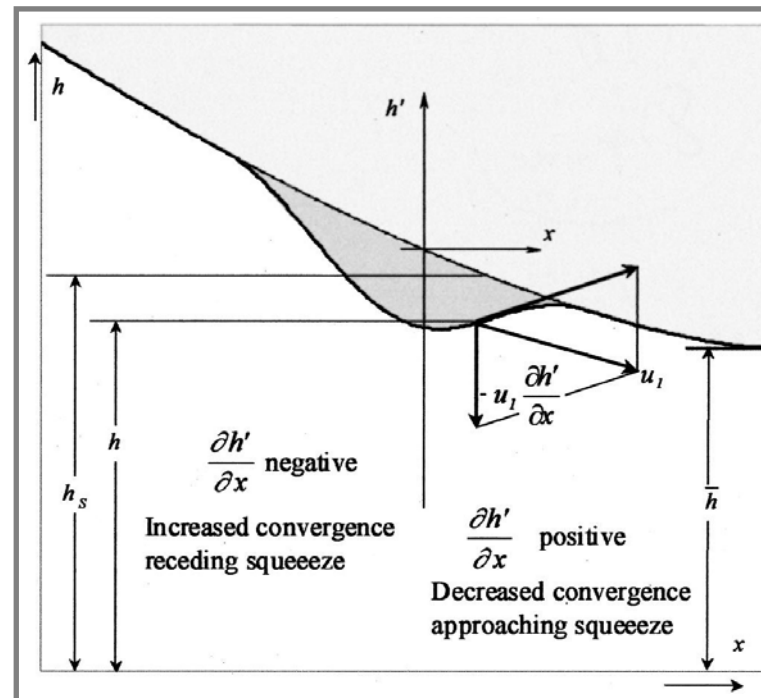
2: V poslední části autor prezentuje již dosažené výsledky, zejména na obr. 33. Zde žádám doktora, aby osvětlil popisovaný „evidentní“ útlum dlouhých vlnových délek, nejlépe popsáním a výkladem k obrázku 33. Žádám dále doktora, aby vysvětlil jeho názor na to, proč jsou kratší vlnové délky méně tlumeny než větší vlnové délky.



- 2:
- Hooke C. J.: parametr ∇ je poměr mezi vlnovou délkou a velikostí vstupní oblasti („inlet pressure sweep“). Přechod nastává v rozsahu parametru $\nabla = 0,1$ až 100 .
 - Venner C. H. a Lubrecht A. A.: „This inlet pressure sweep is the region in which the pressure is sufficiently large to create elastic deformations and sufficiently small to allow viscous flow. It is the small region preceding the point where the viscosity becomes too large (and or the film thickness too small), so that the shear completely dominates.“

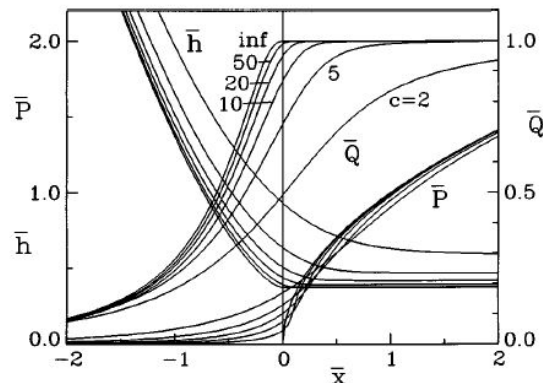
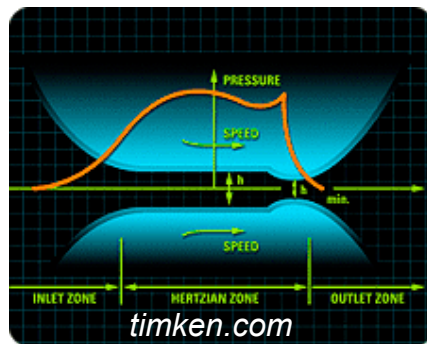


HOOKE C.J., 1999

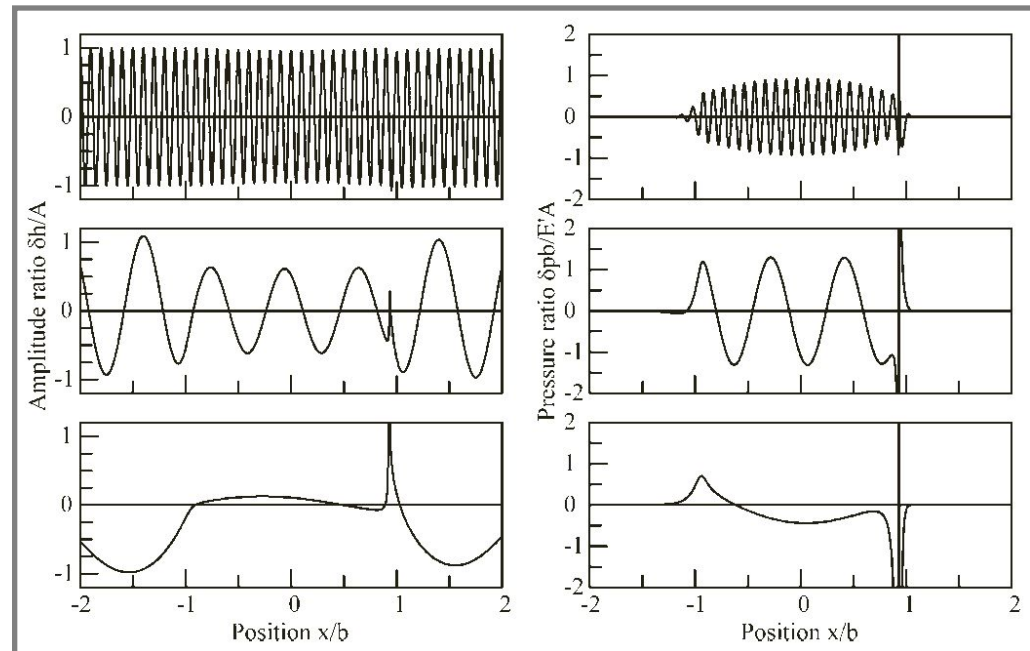


GLOVNEA R.P., 2003

- 2:**
- Hooke C. J.: parametr ∇ je poměr mezi vlnovou délkou a velikostí vstupní oblasti („inlet pressure sweep“). Přechod nastává v rozsahu parametru $\nabla = 0,1$ až 100 .
 - Venner C. H. a Lubrecht A. A.: „This inlet pressure sweep is the region in which the pressure is sufficiently large to create elastic deformations and sufficiently small to allow viscous flow. It is the small region preceding the point where the viscosity becomes too large (and or the film thickness too small), so that the shear completely dominates.“

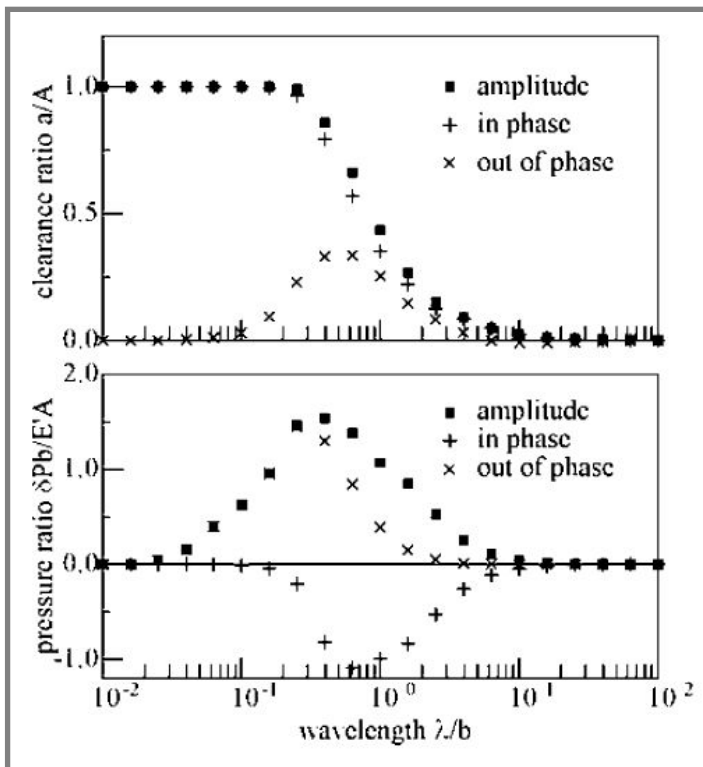


HOOKE C.J., 1999

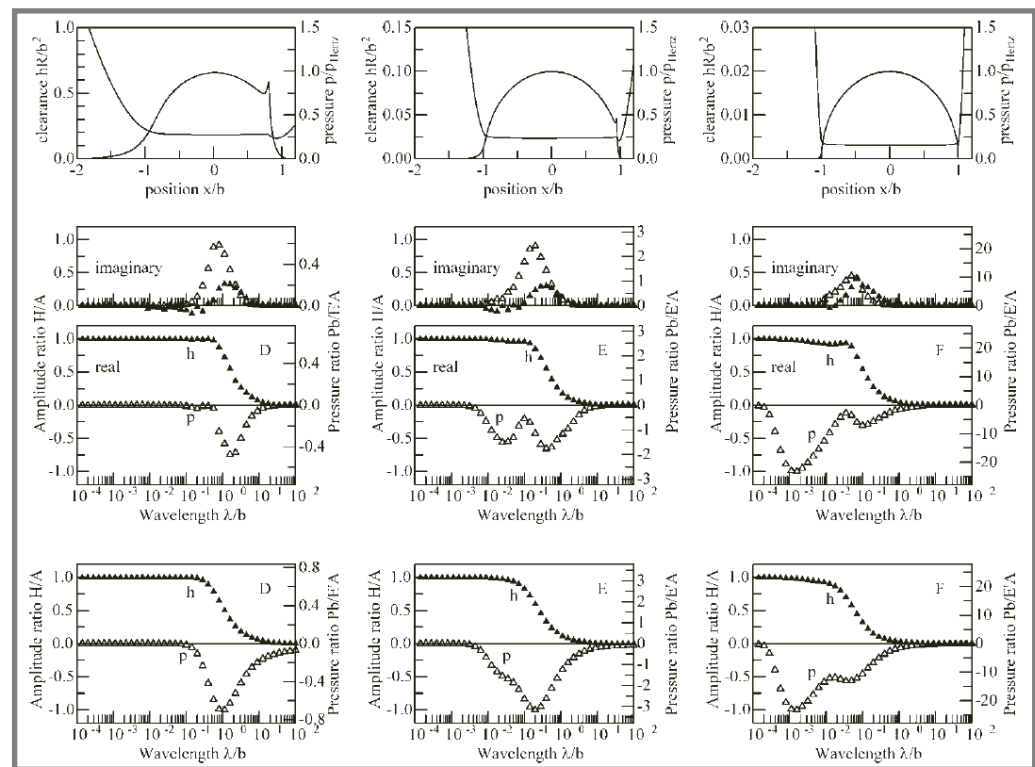


HOOKE C.J., 2006

- 2:
- Hooke C. J.: Long wavelenghts „At these wavelenghts, the pressure depends, primarily, on the elasticity of the surfaces, with fluid compressibility playing a minor role. Thus, the amplitude of the pressure perturbation is also nearly constant across the contact.“
 - Hooke C. J.: „These pressures perturbations are not generated in the inlet but arise, largely, from compressibility effects in the fluid. Essentially, as the clearance enters the conjunction, a fixed amount of fluid is trapped between the surfaces as the pressure and viscosity become large...
...and occur when the flexibility of the fluid becomes comparable with the elasticity of the surfaces.“



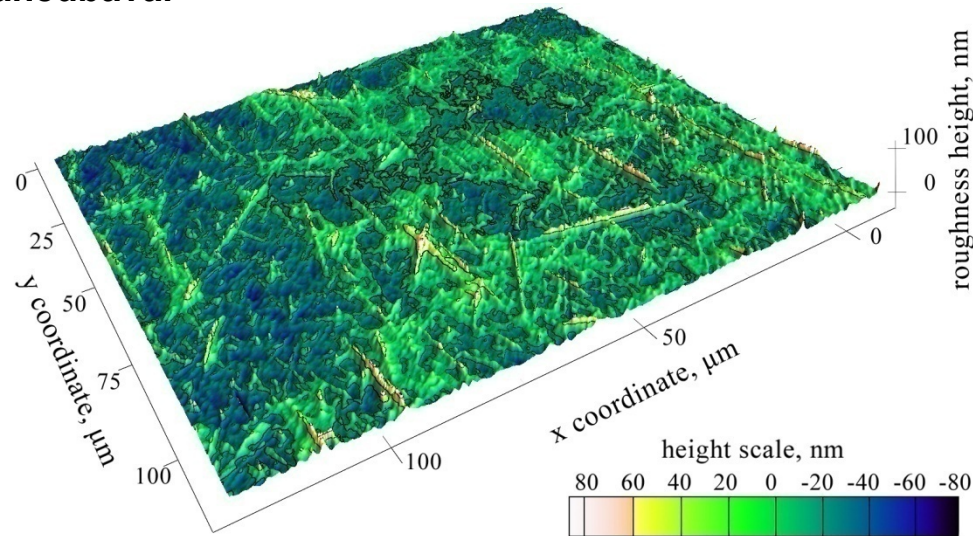
HOOKE C.J., 2006



HOOKE C.J., 2006

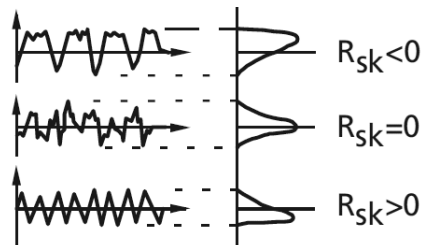
3: Žádám doktora, aby se vyjádřil v obecné rozpravě k existenci různých charakteristik drsnosti povrchu, které takovou věc popisují. Dále se ptám, jestli na obr. 33 je kombinována drsnost obou kontaktních těles, nebo jestli se křivky týkají jen jednoho tělesa, případně jestli se drsnost kotouče zanedbává.

$R_a = 12,4 \text{ nm}$
 $R_q = 16,9 \text{ nm}$
 $R_{sk} = 2,2$
 $R_{ku} = 6,8$



Sklon R_{sk} (Skewness) je hodnota asymetrie hustoty amplitudové křivky. Negativní sklon označuje povrch s dobrou nosností.

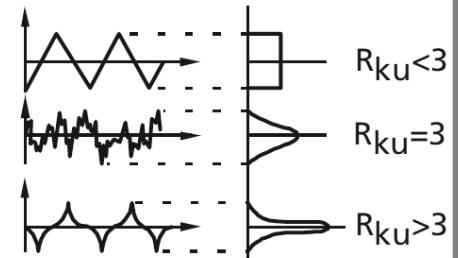
$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \frac{1}{l} \int_0^l |Z^3(x)| dx$$



ZEISS

Strmost R_{ku} (Kurtosis) je hodnotou strmosti hustoty amplitudové křivky. Při normálním rozdělení hodnot profilu je $R_{ku} = 3$.

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \frac{1}{l} \int_0^l |Z^4(x)| dx$$



ZEISS