




# **Studium utváření elastohydrodynamických mazacích filmů u hypoidních převodů**

**M. Omasta**

 Institute of Machine  
and Industrial Design

**Prezentace k obhajobě doktorské dizertační práce  
18. 11. 2013**

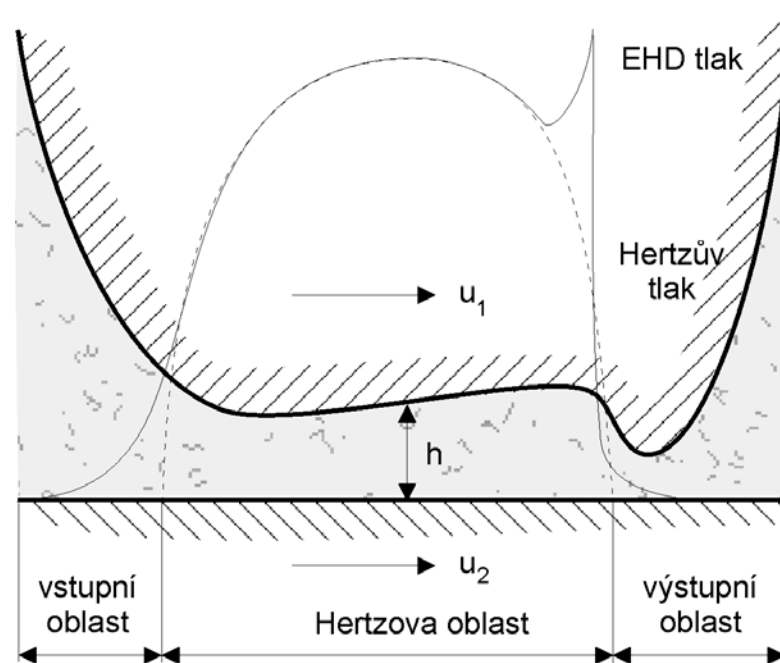
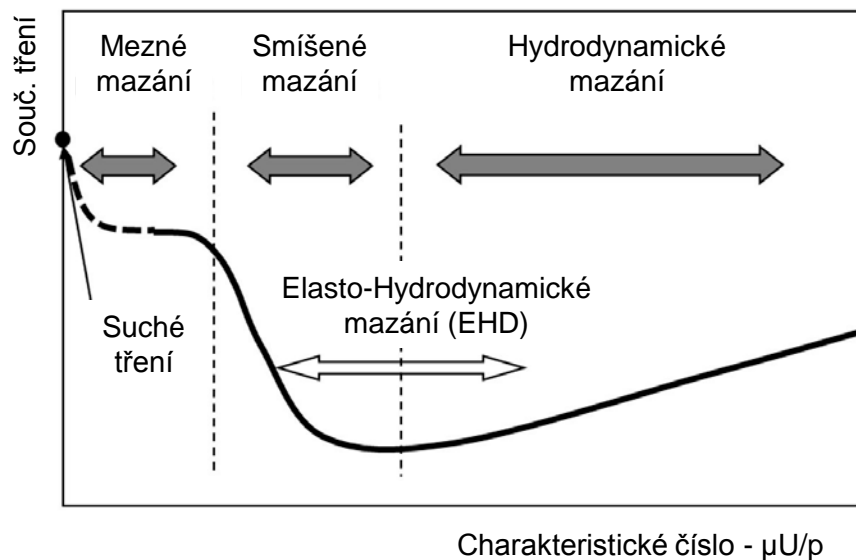
**Institute of Machine and Industrial Design**  
Faculty of Mechanical Engineering  
Brno University of Technology

## **Studium utváření elastohydrodynamických mazacích filmů u hypoidních převodů**

## Studium utváření elastohydrodynamických mazacích filmů u hypoidních převodů

### Elastohydrodynamické (EHD) mazání

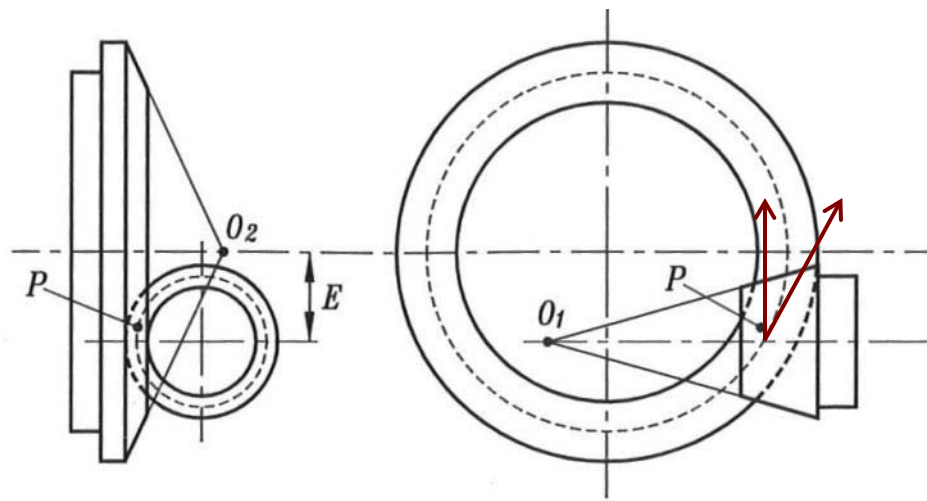
- Kapalinné nebo smíšené tření.
- Významná deformace povrchů vlivem jejich nekonformity.
- Významná změna viskozity maziva s tlakem.



## Studium utváření elastohydrodynamických mazacích filmů u hypoidních převodů

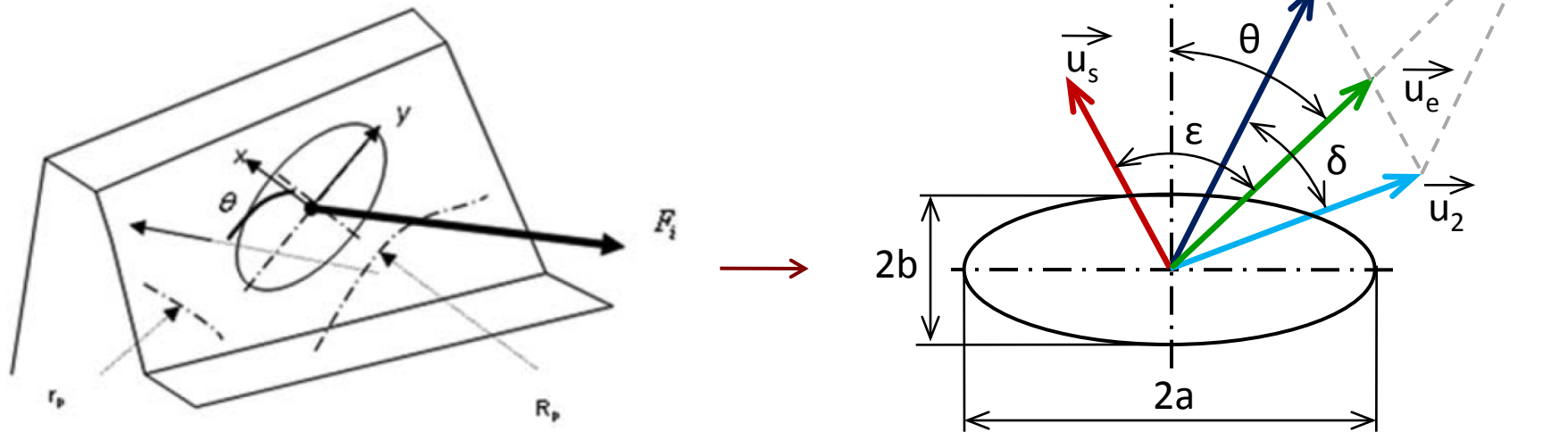
### Hypoidní ozubení

- Vychází z kuželového kola s nepřímým ozubením.
- Osa pastorku je odsazena:
  - různý směr rychlostí povrchů;
  - vyšší ztráty způsobené třením;
  - vyšší únosnost.



## Podmínky v hypoidním soukolí

- eliptický kontakt (zpravidla s velkým poměrem elipticity);
- směr unášivé rychlosti je různě natočený vůči osám kontaktní elipsy;
- významná skluzová složka rychlosti;
- různý směr skluzové a unášivé rychlosti;
- parametry se během záběru mění.



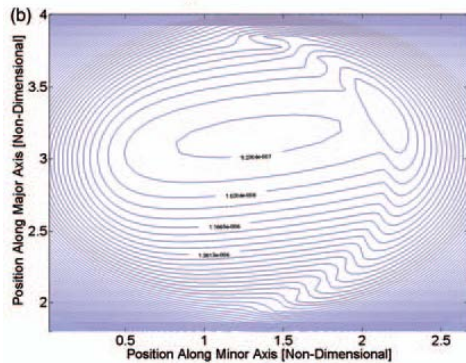
# Současný stav poznání

**Analýza záběru zubů  
v hypoidním soukolí**

**Výkonové  
parametry ozubení**

**Experimentální  
studium**

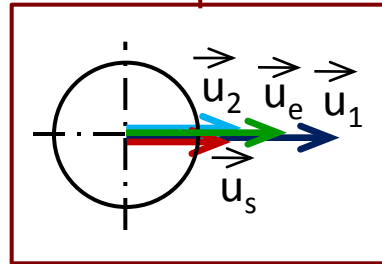
**Numerická analýza  
+ TCA**



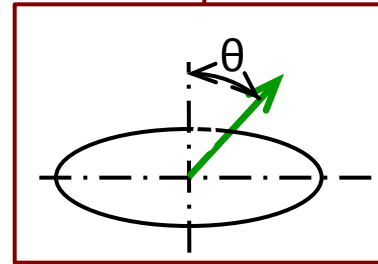
Mohammadpour, 2012

**EHD mazání za podmínek  
v hypoidním soukolí**

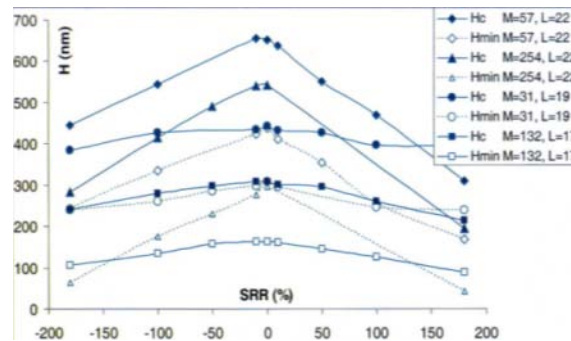
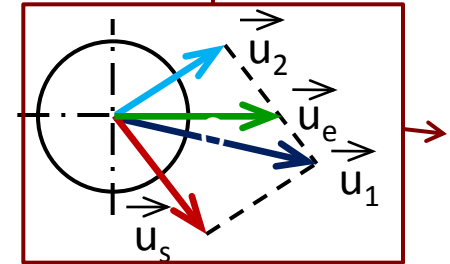
**Vliv sluzové  
rychlosti**



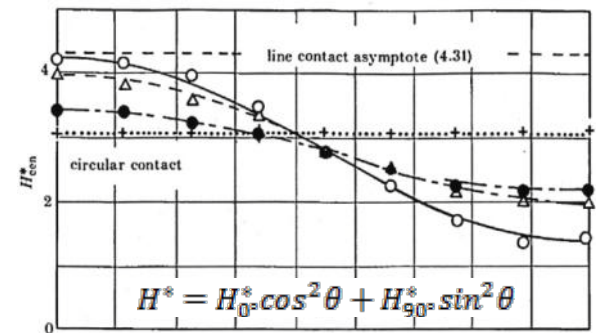
**Vliv natočení  
unášivé rychlosti**



**Vliv směru  
skluzové rychlosti**



Jubault, 2003

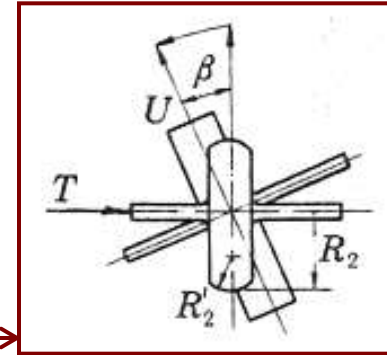


Chittenden, 1985

## Různý směr skluzové a unášivé rychlosti

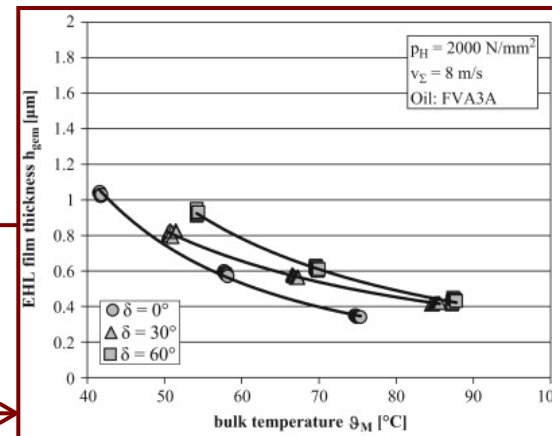
### Způsob dosažení skazu

- Cameron, 1952
- WAM - Wedeven Associates, Inc.
- Johnson, 1977



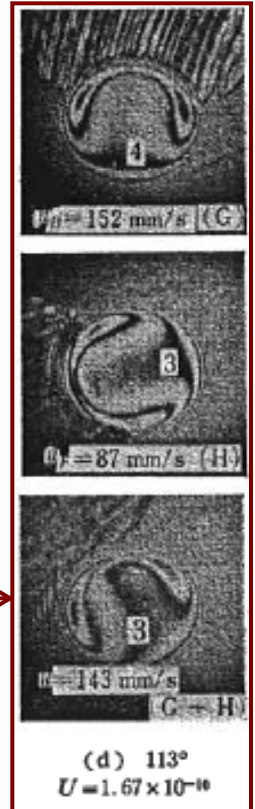
### Optický tribometr

- Foord, 1969
- Kuwano, 1985



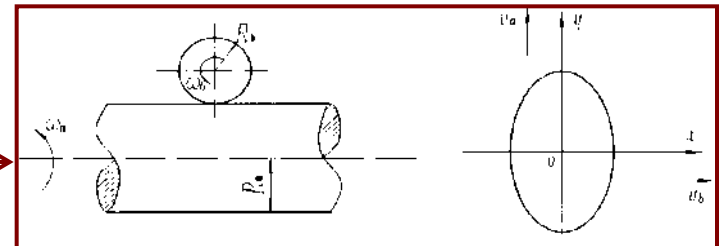
### Twin-disc

- Hoehn, 2011



### Numerický model

- Liu, 2005



## Závěry

- Kombinace TCA a EHD numerické analýzy není vhodná pro základní popis mechanismů utváření mazacího filmu u hypoidních převodů.
- Vliv skluzové rychlosti byl poměrně dobře popsán, ačkoli různé teorie, které tyto projevy popisují, jsou stále předmětem diskuzí.
- Vliv směru unášivé rychlosti u eliptického kontaktu byl především numericky poměrně dobře popsán, ovšem experimentálně lze tento případ (bez skluzové složky) je velmi obtížně modelovat.
- Vliv různého směru unášivé a skluzové rychlosti (u kruhového kontaktu) byl popsán jen velmi stroze a publikovaná zdůvodnění pozorovaných jevů neodpovídají současným poznatkům.



## Cíl práce

- Popsat chování mazacího filmu a mechanismy jeho utváření za podmínek, které se vyskytují při záběru boků zubů hypoidního soukolí.
- Důraz je kladen především na vliv různého směru unášivé a skluzové rychlosti u kruhového kontaktu a směru unášivé rychlosti u eliptického kontaktu.
- Kontakt bude simulován na modifikovaném optickém tribometru a bude použito optické interferenční metody.

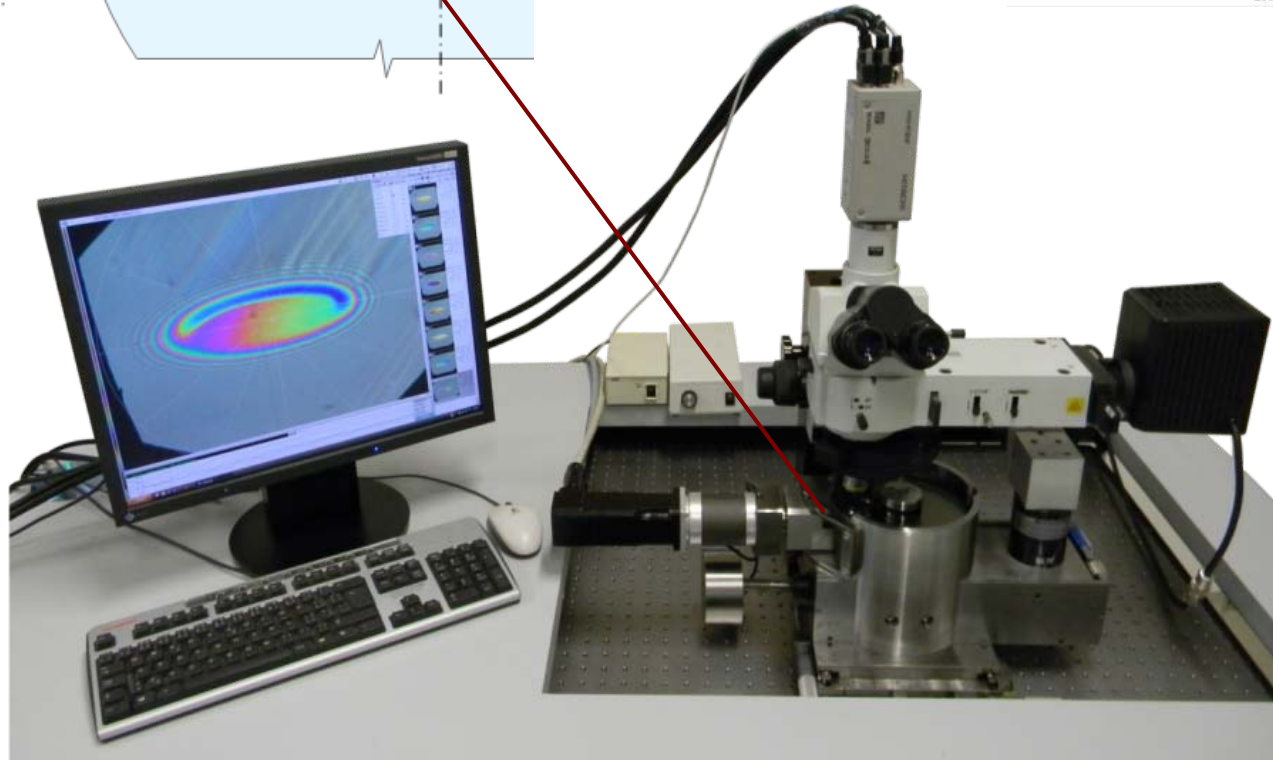
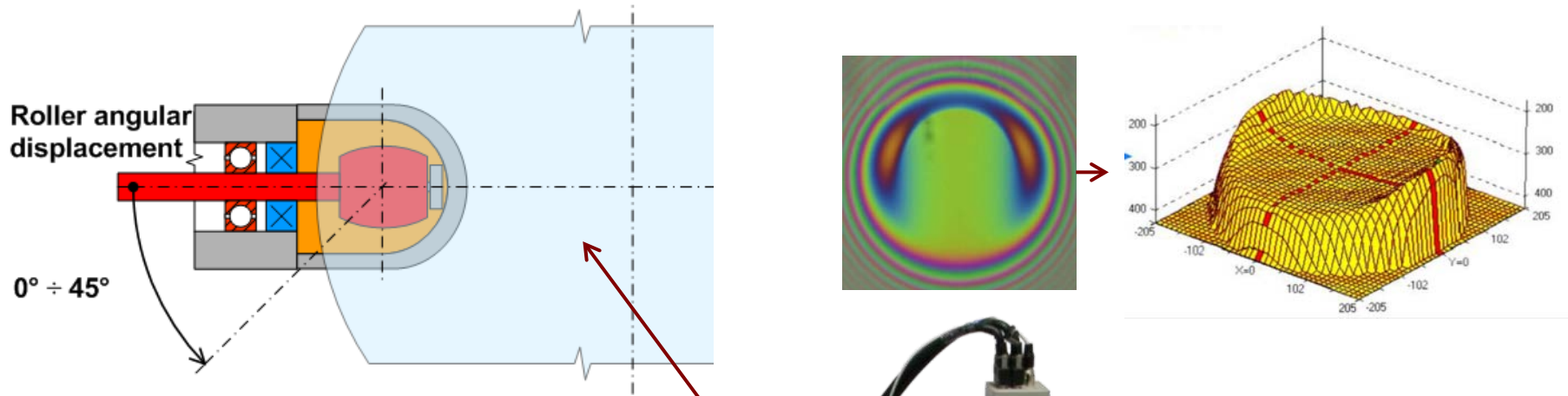
## Vědecká otázka

- *„Jaký je vliv různého směru vektorů třecích povrchů resp. různého směru vektorů unášivé a skluzové rychlosti na rozložení tloušťky mazacího filmu?“*

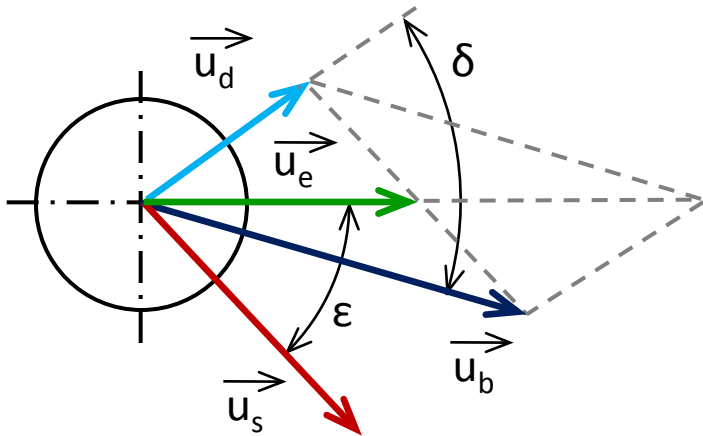
## Pracovní hypotéza (paradigma)

- *„Na utváření mazacího filmu se podílí unášivá složka rychlosti ve směru valení; složka skluzové rychlosti přispívá naopak k redukci tloušťky mazacího filmu a nezáleží na jejím směru.“*





## Vektory rychlostí v kontaktu



**Unášivá rychlost**

$$\vec{u}_e = \frac{\vec{u}_1 + \vec{u}_2}{2}$$

**Skuzová rychlost**

$$\vec{u}_s = \vec{u}_1 - \vec{u}_2$$

**Vstupní parametry**

- $|u_b|$
- $|u_d|$
- $\delta$



**Výsledné parametry**

- $|u_e|$
- $|u_s|$
- $\epsilon$

**Rozsah podmínek**

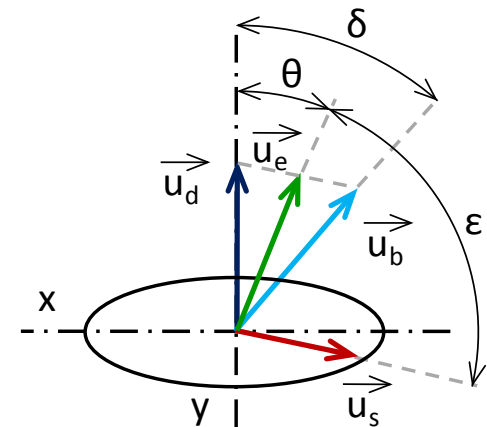
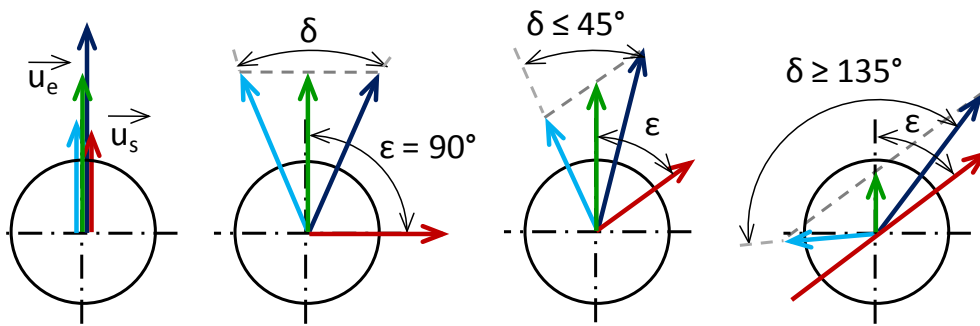
- $\delta = 0 \div 45^\circ, 135 \div 180^\circ$
- $\epsilon = 0 \div 180^\circ$
- $u_s/u_e = 0.83; 4.83$



Podmínky **mírného** skluzu  
vs.  
podmínky **vysokého** skluzu

## Kruhový kontakt

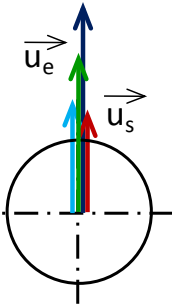
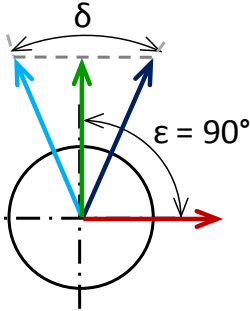
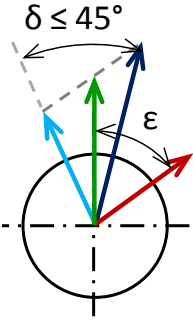
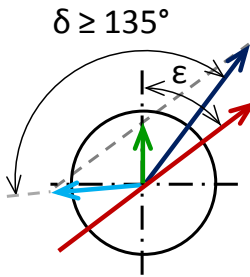
$h = f(\text{SRR}_e)$	$h = f(\delta)$	$h = f(\varepsilon)$	
$\text{SRR}_e = \{0 \div 4\}$	$\delta = \{0 \div 45^\circ; 135^\circ\}$	$\varepsilon = \{0 \div 90^\circ\}$	
$\varepsilon = 0^\circ; \delta = 0^\circ$	$\varepsilon = 90^\circ$	$\delta \leq 45^\circ$	$\delta \geq 135^\circ$
		$u_s / u_e = 0.83$	$u_s / u_e = 4.83$

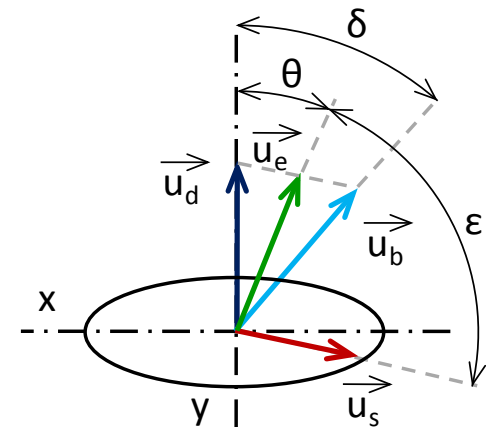


## Eliptický kontakt

$h = f(\delta)$	$h = f(\theta)$	$h = f(u_e)$	$h = f(\varepsilon)$	
$\delta = \{0 \div 45^\circ\}$	$\theta = \{0 \div 90\}$	-	$\varepsilon = \{45^\circ; 90^\circ\}$	
$\text{SRR}_y = \text{konst.}$	$u_s \neq \text{konst.}$	$\varepsilon = 90^\circ; \delta = 45^\circ$	$\delta \leq 45^\circ$	$\delta \geq 135^\circ$
		$u_s / u_e = 0.83$	$u_s / u_e = 0.83$	$u_s / u_e = 4.83$
		$\theta = 67.5^\circ$	$\theta = 22.5^\circ$	$\theta = 67.5^\circ$

## Kruhový kontakt

$h = f(\text{SRR}_e)$	$h = f(\delta)$	$h = f(\varepsilon)$	
$\text{SRR}_e = \{0 \div 4\}$ $\varepsilon = 0^\circ; \delta = 0^\circ$	$\delta = \{0 \div 45^\circ; 135^\circ\}$ $\varepsilon = 90^\circ$	$\varepsilon = \{0 \div 90^\circ\}$ $\delta \leq 45^\circ$ $u_s / u_e = 0.83$	$\delta \geq 135^\circ$ $u_s / u_e = 4.83$
			



## Eliptický kontakt

$h = f(\delta)$	$h = f(\theta)$	$h = f(u_e)$	$h = f(\varepsilon)$
$\delta = \{0 \div 45^\circ\}$ $\text{SRR}_y = \text{konst.}$	$\theta = \{0 \div 90^\circ\}$ $u_s \neq \text{konst.}$	- $\varepsilon = 90^\circ; \delta = 45^\circ$ $u_s / u_e = 0.83$ $\theta = 67.5^\circ$	$\varepsilon = \{45^\circ; 90^\circ\}$ $\delta \leq 45^\circ$ $u_s / u_e = 0.83$ $\theta = 22.5^\circ$
			<b><math>\delta \geq 135^\circ</math></b> <b><math>u_s / u_e = 4.83</math></b> <b><math>\theta = 67.5^\circ</math></b>



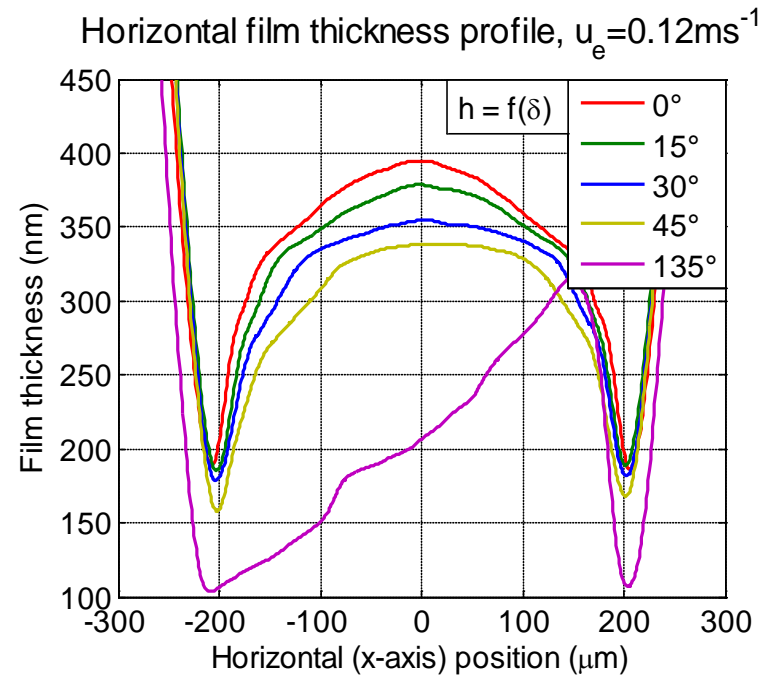
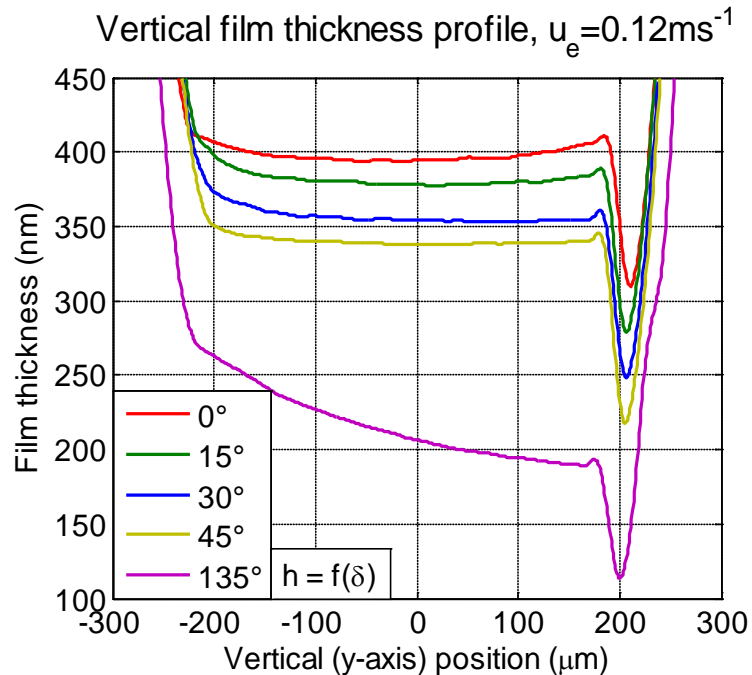
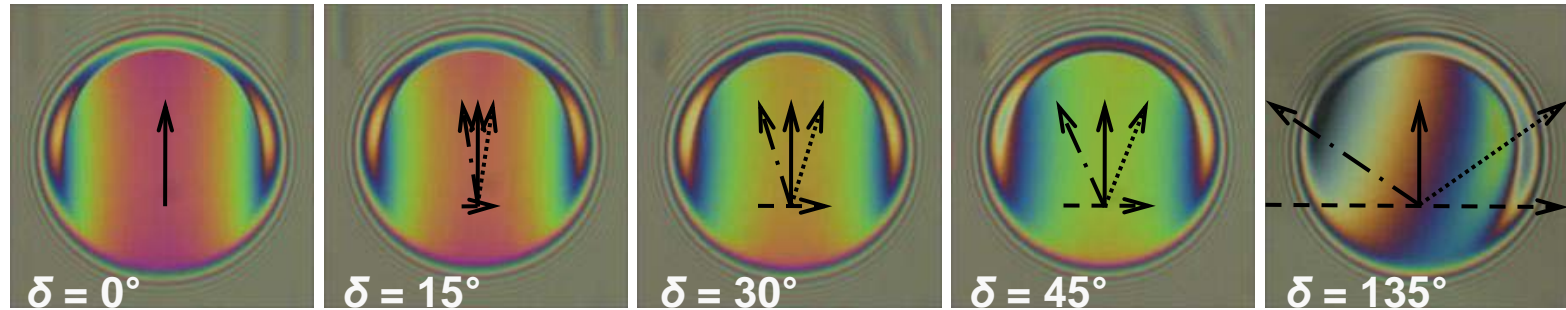
Mechanické a fyzikální vlastnosti	Sklo BK7	Safír	Ocel
Modul pružnosti v tahu (GPa)	81	420	210
Poissonův poměr (-)	0.208	0.29	0.3
Měrná tepelná kapacita ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	858	761	490
Tepelná vodivost ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	1.114	30	43



Mazivo	500N	FVA3	Glycerol
Typ oleje	naftenický	minerální	-
Další vlastnosti	-	ISO VG 100	$\geq 99.5\%$ GC
Viskozita $\eta_0$ ( $Pa \cdot s$ )	0.32	0.23	1.41
Při teplotě ( $^{\circ}C$ )	25	25	20
Tlakově-viskózní koeficient $\alpha$ ( $GPa^{-1}$ )	31	19.4	5.4

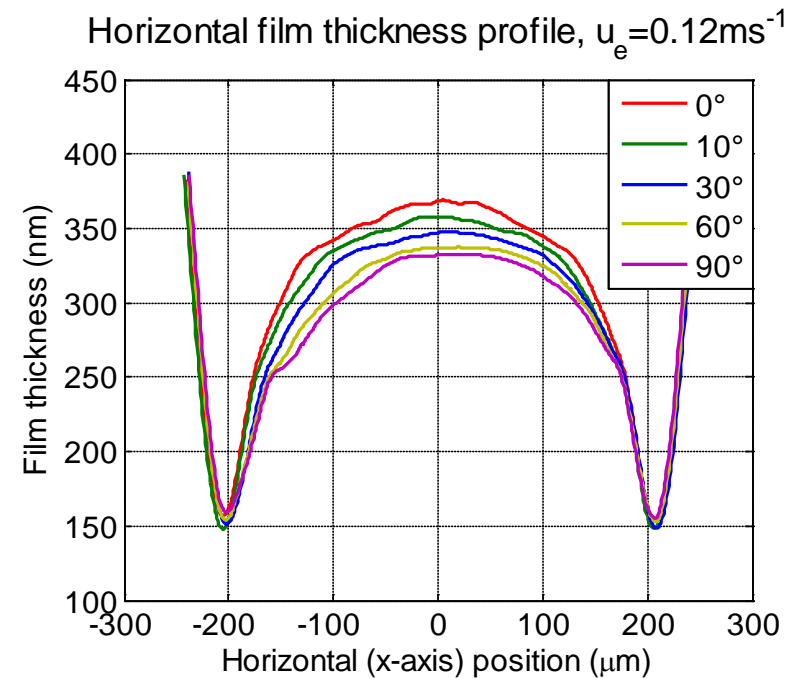
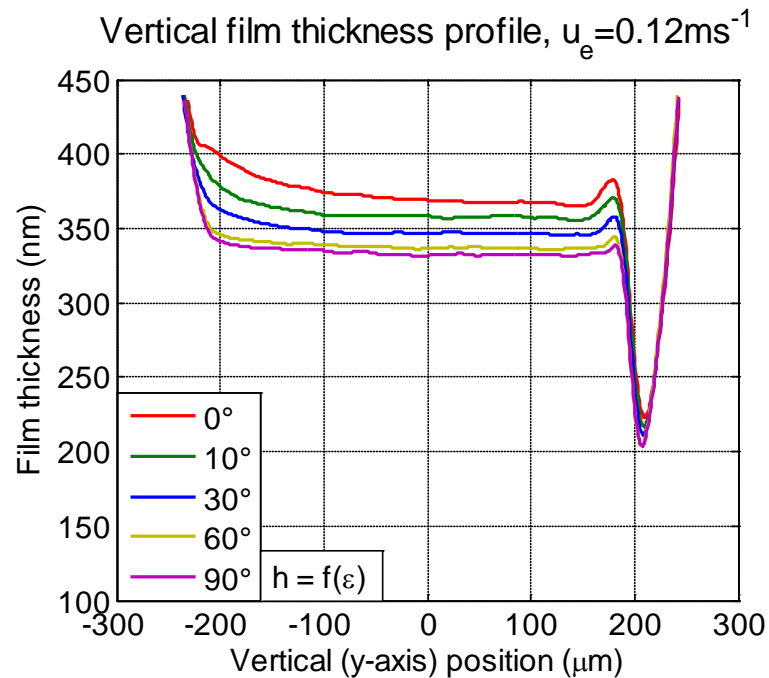
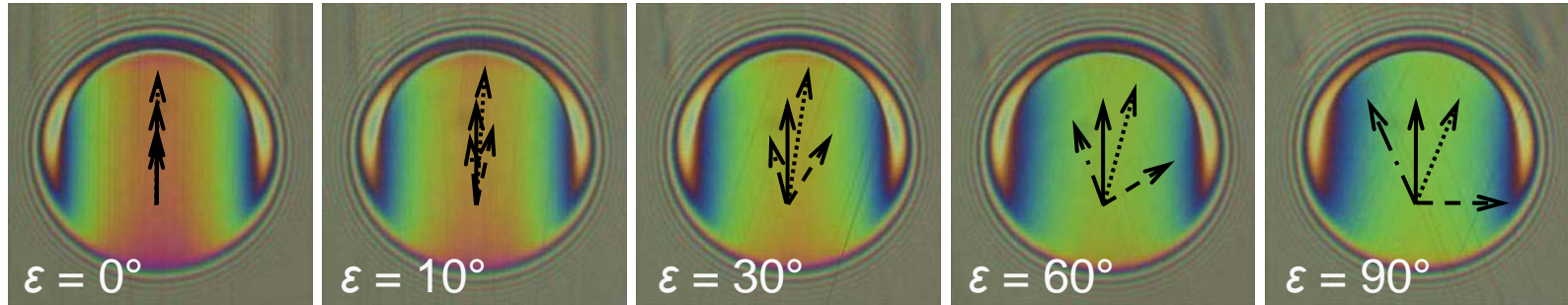
# Výsledky – kruhový kontakt

$h = f(\delta)$ ;  $u_e = 0.12 \text{ ms}^{-1}$ ;  $p_H = 0.71 \text{ GPa}$ ; sklo



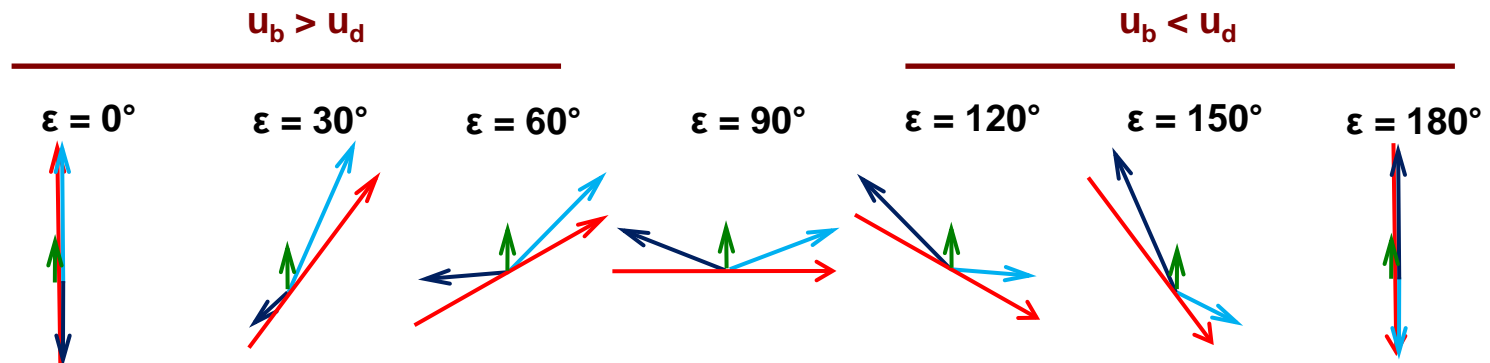
# Výsledky – kruhový kontakt

$h = f(\varepsilon)$ ;  $u_e = 0.12 \text{ ms}^{-1}$ ;  $p_H = 0.71 \text{ GPa}$ ;  $u_s / u_e = 0.83$ ; sklo

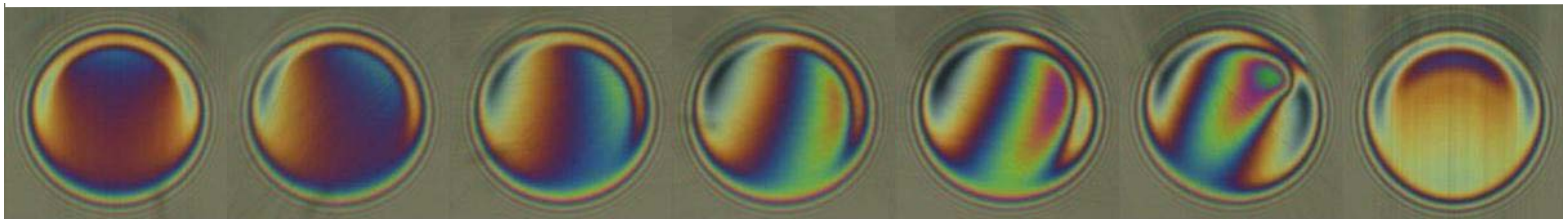


# Výsledky – kruhový kontakt

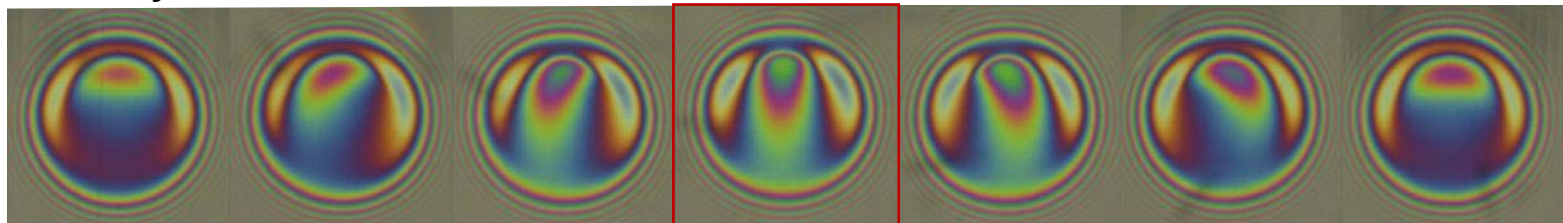
$$h = f(\varepsilon); u_e = 0.2 \text{ ms}^{-1}; u_s / u_e = 4.83$$



Skleněný disk

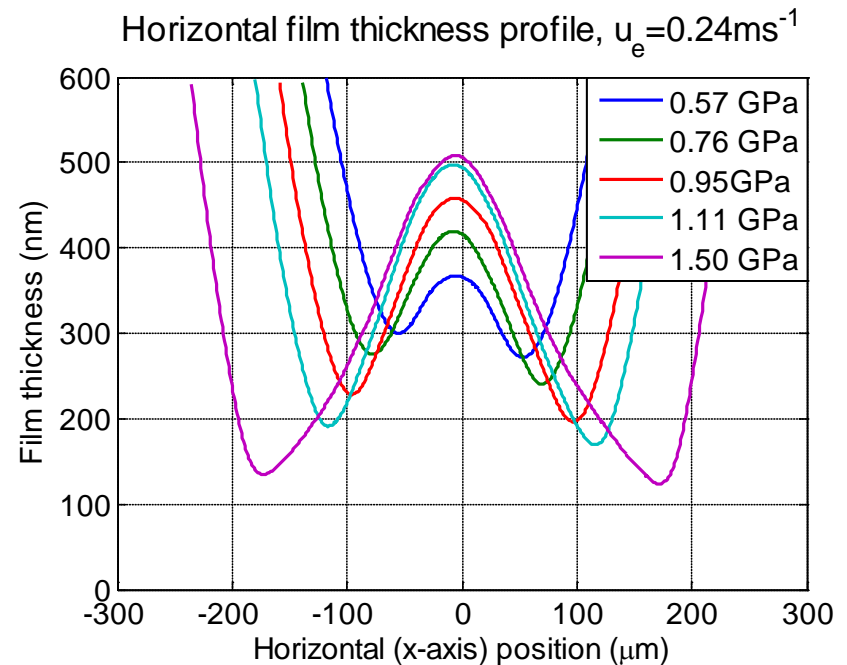
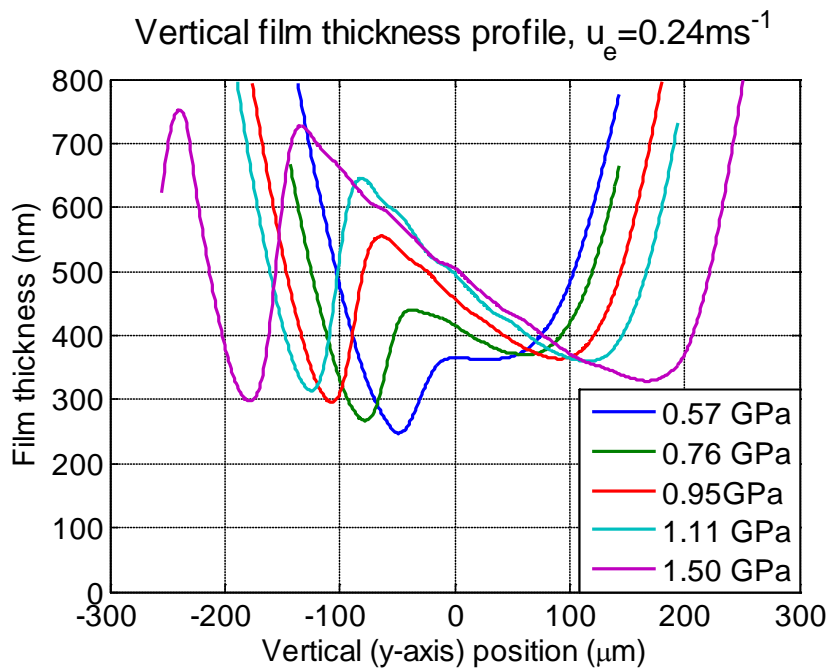
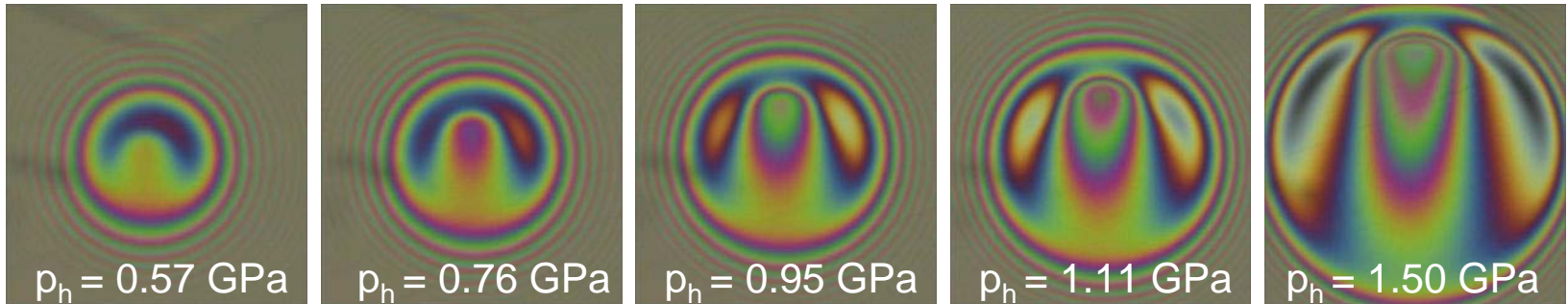


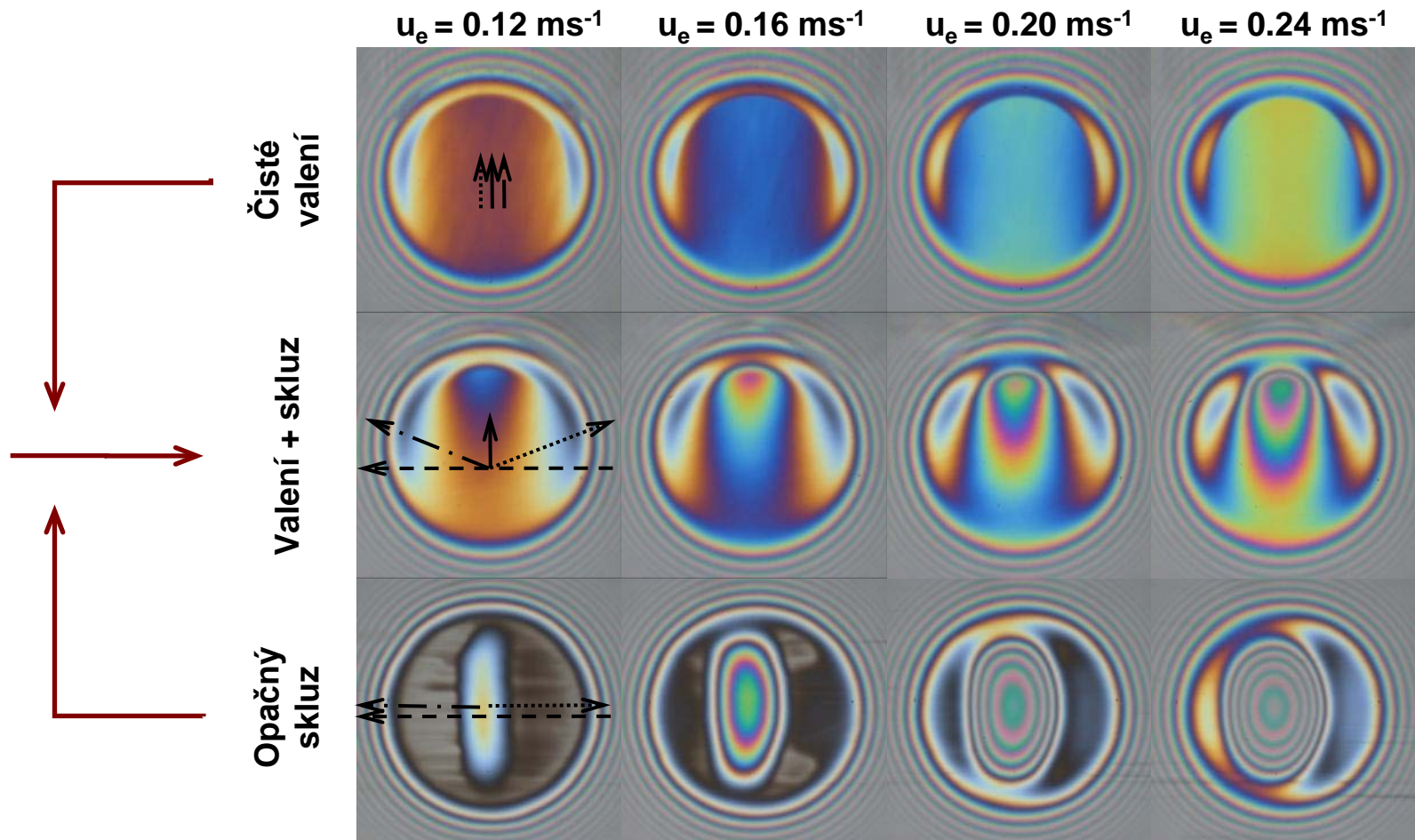
Safírový disk



# Výsledky – kruhový kontakt

$$h = f(p); u_e = 0.2 \text{ ms}^{-1}; u_s / u_e = 4.83; \varepsilon = 90^\circ$$



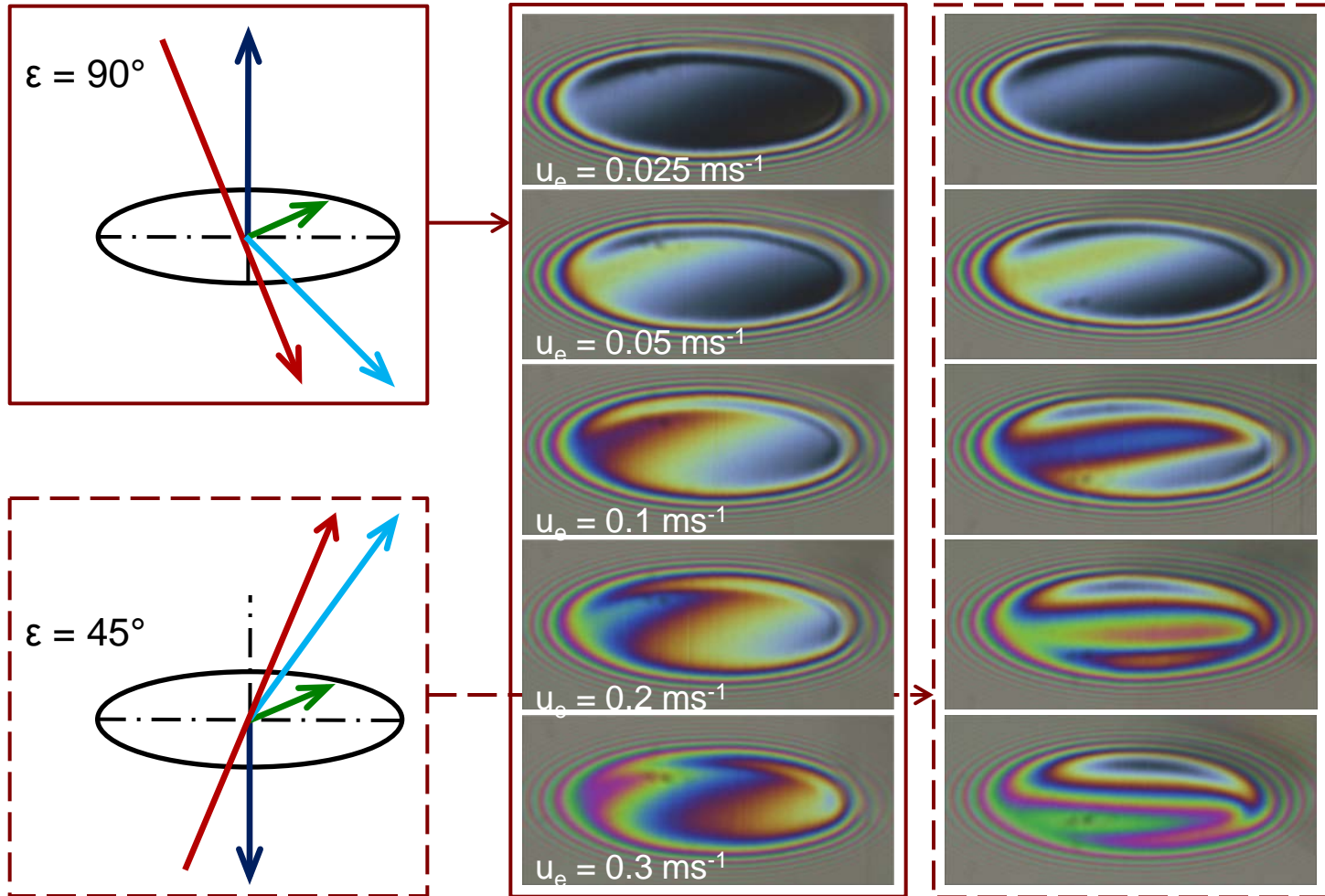


## Mechanismus teplotně-viskozitního klínu

- Teplo generované v kontaktu je vedeno kontaktními tělesy;
- vzhledem k relativnímu pohybu těles je profil teploty a viskozity napříč filmem axisymetrický;
- interakce protisměrných toků maziva o různé viskozitě vytváří nárůst tlaku a formování důlku v tloušťce mazacího filmu.

# Výsledky – eliptický kontakt

$$h = f(\varepsilon); u_s / u_e = 4.83$$



## Vědecká otázka

- „Jaký je vliv různého směru vektorů třecích povrchů resp. různého směru vektorů unášivé a skluzové rychlosti na rozložení tloušťky mazacího filmu?“

## Pracovní hypotéza (paradigma)

- „Na utváření mazacího filmu se podílí unášivá složka rychlosti ve směru valení; složka skluzové rychlosti přispívá naopak k redukci tloušťky mazacího filmu a nezáleží na jejím směru.“

## Závěr

- Hypotéza může být potvrzena nebo falzifikována v závislosti na rozsahu podmínek, ve kterých ji uvažujeme.
- Část hypotézy (o funkci unášivé složky rychlosti) je pravdivá, stejně jako „funkce“ skluzové složky v podobě redukce tloušťky mazacího filmu. Tato funkce je však mnohem komplexnější.
- Obecně lze tvrdit že:

**Pracovní hypotéza je falzifikována**


## Význam práce pro teorii

- Nově bylo prokázáno, že nejen velikost, ale také směr skluzové rychlosti má vliv na tvar mazacího filmu.
  - **Tato skutečnost nebyla dosud v publikacích diskutována.**
- Kromě zvýšení smykového napětí, které vede k celkovému poklesu tloušťky filmu, je významný i tepelný tok kontaktem, který různý směr pohybu vektorů rychlostí povrchů způsobuje.
  - Pro numerické ověření je nezbytné zohlednění termálních jevů v EHD modelu.
- Různý směr vektorů rychlostí umožňuje pozorovat a částečně odlišit jevy, které v případě pohybu ve stejném směru splývají:
  - např.: nikoli směr skluzové rychlosti, ale směr pohybu disku s nízkou tepelnou vodivostí ovlivňuje tvar mazacího filmu v centrální oblasti kontaktu.
  - Práce poskytuje experimentální základ pro rozšíření obecné teorie EHD mazání.

## Význam práce pro praxi

- Při běžných podmínkách, které se vyskytují v hypoidních ozubeních (poměr rychlostí, materiály, úhly) lze akceptovat současný způsob predikce tloušťky filmu.
- Existují aplikace, kde je situace odlišná.
  - Šnekové ozubení.

**M. Omasta**

 Institute of Machine  
and Industrial Design