



# Studium tenkých mazacích filmů spektroskopickou reflektometrií

Ing. Vladimír Čudek

 ústav  
konstruování

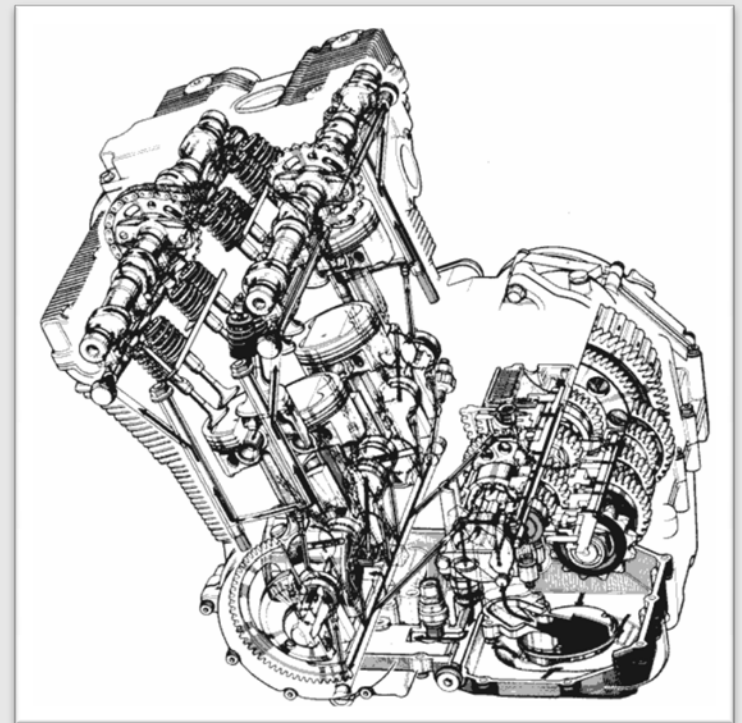
**Ústav konstruování – Odbor metodiky konstruování**

Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

**Obhajoba disertační práce**

15. prosince 2010, FSI VUT v Brně, Česká republika

- EHD mazání a optické měřicí metody
- cíle disertační práce
- experimentální aparatura
- návrh optického designu
- experiment a výsledky
- závěr



## EHD mazání

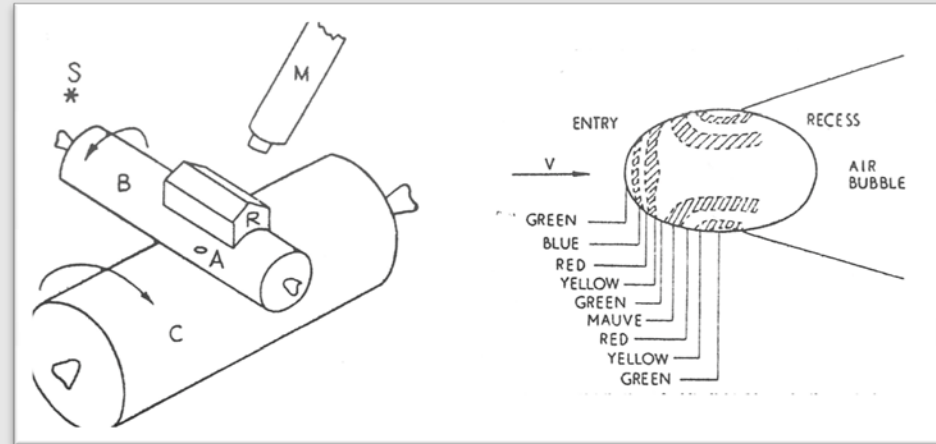
- strojní součásti s vysokými kontaktními tlaky
  - ložiska
  - vačkové mechanismy
  - ozubená kola
- tloušťky řádově v nanometrech



# EHD MAZÁNÍ A OPTICKÉ MĚŘICÍ METODY

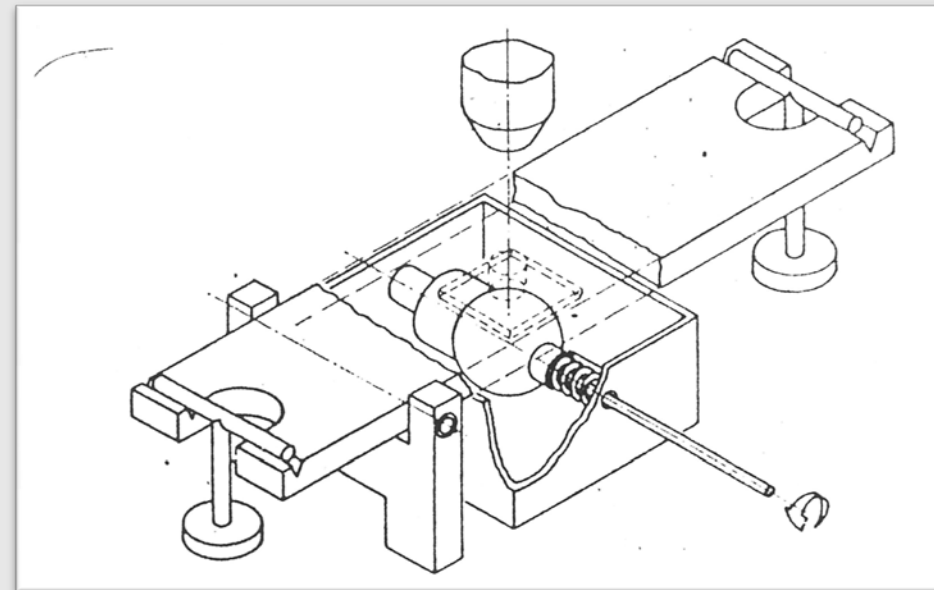
**Nature, 1962, M. T. Kirk**

- základní myšlenka pro optická měření mazacích filmů
- barevný interferogram mezi dvěma válci z Perspexu

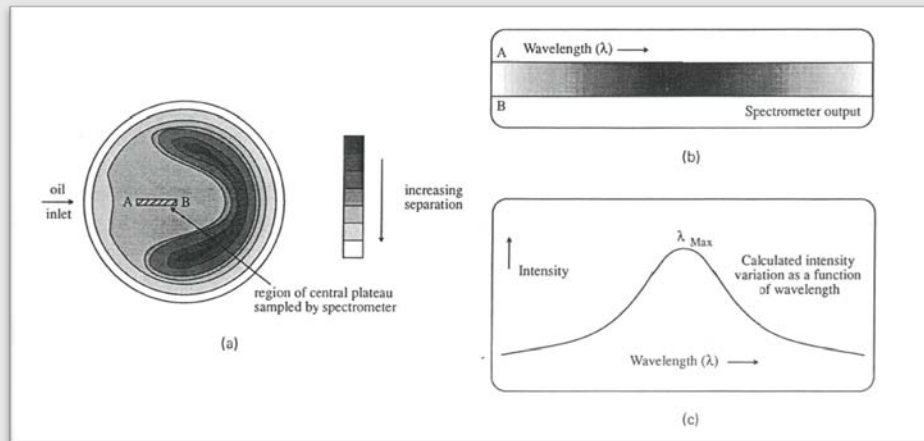


**Nature, 1963, R. Gohar, A. Cameron**

- zrod první optické metody pro studium tloušťky maziva v EHD kontaktu
- základ experimentální sestavy používané dodnes

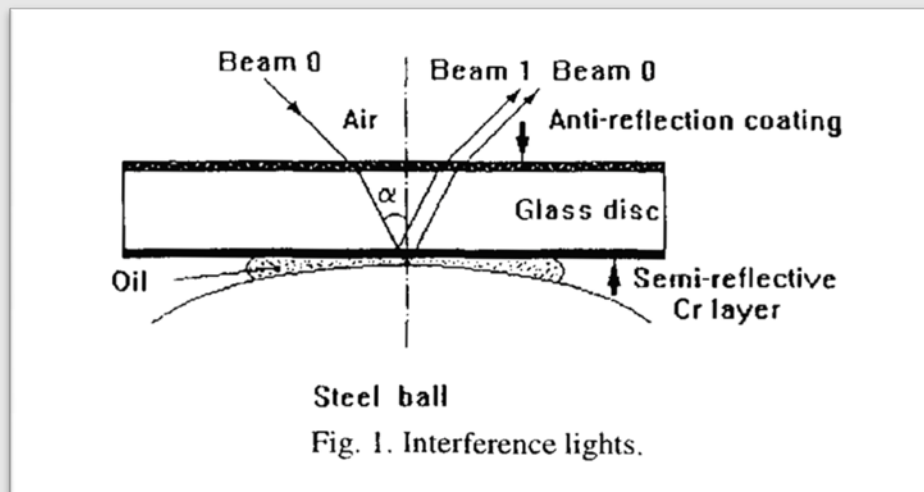


# EHD MAZÁNÍ A OPTICKÉ MĚŘICÍ METODY



1990, G. J. Johnston a kol.

- první metoda založená na studiu spektrální závislosti odraženého světla
- vyhodnocování pomocí lokalizace interferenčních extrémů za pomoci dvousvazkového interferenčního modelu



1996, J. LUO a kol.

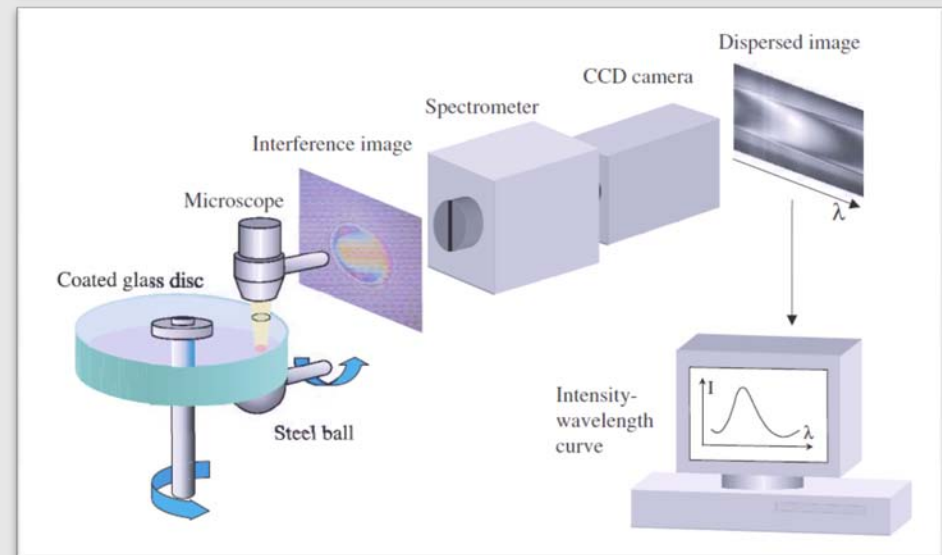
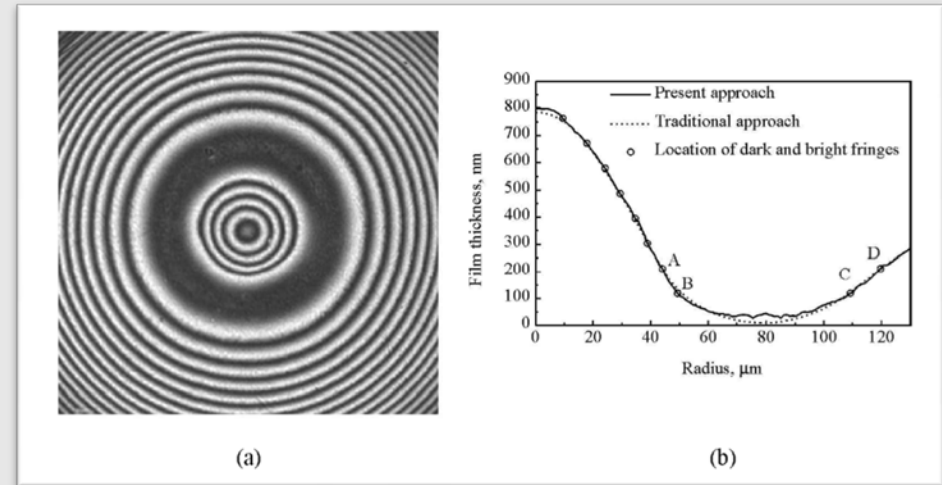
- první optická metoda vázaná na studium rozložení intenzity monochromatického interferogramu
- stejně jako předchozí práce předpoklad dvousvazkové interference

2002, F. Guo a P. L. Wong

- vícesvazkový model v monochromatickém světle
- návaznost na práci publikovanou Luem a kol.
- diskuze chyb vzniklých dvousvazkovým modelem

2003, R. Glovnea a kol.

- vícesvazkový model závislý na vlnové délce
- vyhodnocení pomocí regresní analýzy – relativní odrazivost
- použití nereálných hodnot v matematickém modelu

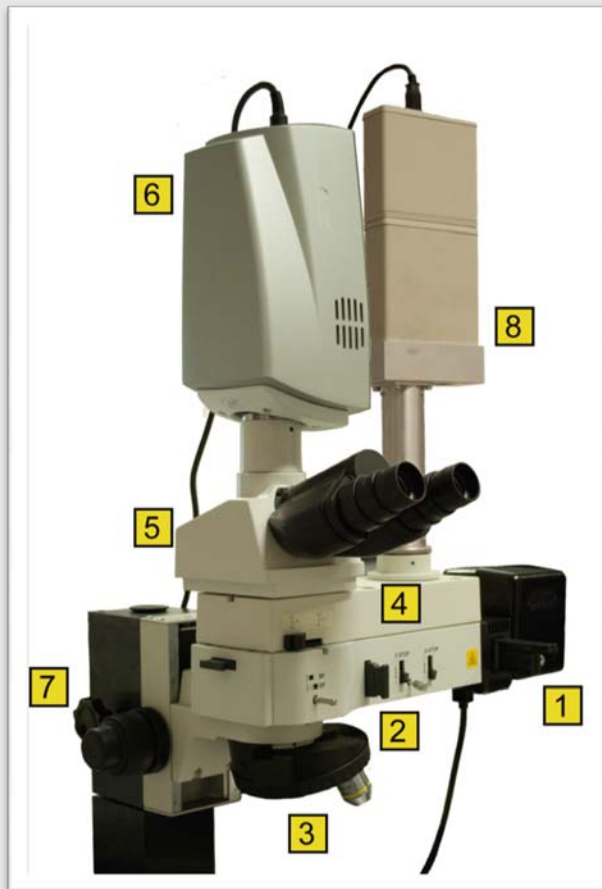


## Cíle disertační práce

- ověřit možnost použití měřicí techniky založené na spektrálním rozkladu pro studium nejen centrální tloušťky maziva v EHD kontaktu
- *spektroskopická reflektometrie*
  - plnohodnotný popis absolutní odrazivosti založený na úplném reflexním koeficientu
  - vyhodnocení pomocí regresní analýzy - závislost tloušťky maziva na rychlosti třecích povrchů
  - možnost získat závislost indexu lomu

*"It was subsequently found that best fit was obtained between theory and experiment when the absorption of the steel was taken as zero. The reason for this is not fully understood."*

## Úprava experimentální aparatury – doplnění spektrofotometru

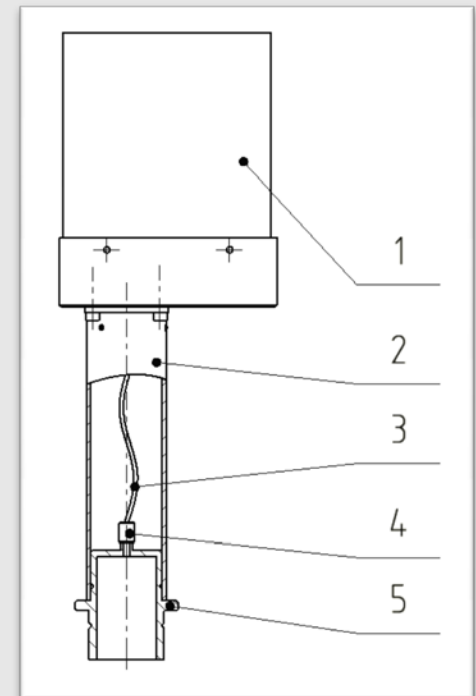


### Mikroskop NIKON ECLIPSE LV150

- 1) halogenová lampa
- 2) Köhlerův osvětlovač
- 3) karusel pro objektivy
- 4) přídatný modul pro boční výstup svazku
- 5) hlava mikroskopu s okuláry
- 6) CMOS kamera
- 7) stojan mikroskopu
- 8) vláknový spektrofotometr

### Redukce spektrofotometru

- 1) spektrofotometr
- 2) tubus vlákna
- 3) optické vlákno
- 4) SMA konektor
- 5) redukční kroužek



## Kontrolní měření a jejich srovnání

- vyhodnocení absolutní odrazivosti
- stabilita zdroje
- kolmost dopadu

Vzorek	Parametry							
	naměřené hodnoty			skutečné hodnoty			odchylka	
	$d$ (nm)	$n_0$	$n_1$	$d$ (nm)	$n_0$	$n_1$	$\Delta_d$ (nm)	$d_n$
Vzorek 1								
TiO <sub>2</sub>	300,6	2,19	63928	302	2,18	63896	1,4	0,0101
Vzorek 2								
TiO <sub>2</sub>	299,7	2,19	63561	301,6	2,18	64282	1,9	0,00753
Vzorek 3								
SiO <sub>2</sub>	501,3	1,45	3229	500,1	1,46	3499	1,2	0,01092
TiO <sub>2</sub>	298,3	2,17	62945	299,2	2,17	63899	0,88	0,00326
Vzorek 4								
SiO <sub>2</sub>	502,1	1,45	3099	500,4	1,46	3499	1,7	0,01137
TiO <sub>2</sub>	300,5	2,17	61255	300,4	2,17	63899	0,1	0,00905
Vzorek 5								
SiO <sub>2</sub>	498,5	1,46	3284	499,3	1,46	3499	0,8	7,36E-04
TiO <sub>2</sub>	297,8	2,18	63021	298,9	2,18	63899	1,1	0,003
Vzorek 6								
SiO <sub>2</sub>	479,5	1,46	3533	480	1,46	3520	0,5	4,45E-05

## Návrh optického designu

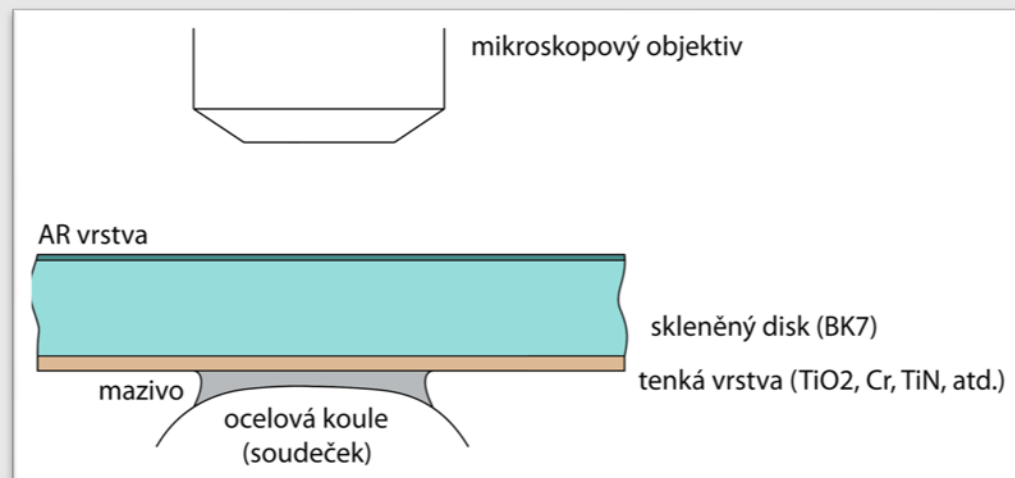
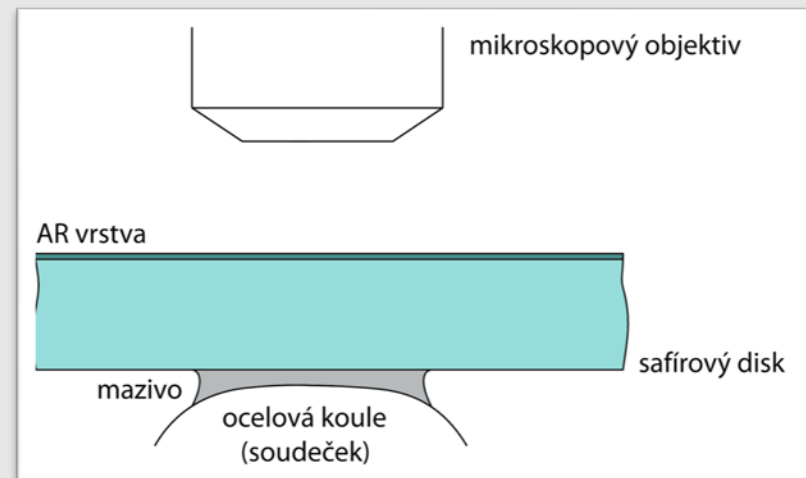
- volba vhodného optického uspořádání
- získání unikátního průběhu odrazivosti pro měřený systém
  - vysoký kontrast, resp. dynamický rozsah odrazivosti
  - výskyt interferenčních extrémů
  - vhodný index lomu případně absorpce materiálů

## Okolí

- nejjednodušší systém – jedna tenká vrstva tvořená mazivem
- sklo BK7, safír, diamant

## Tenká vrstva

- zvýšení kontrastu
- odolnost vůči vysokému tlaku v kontaktní oblasti
- $\text{TiO}_2$ , Cr, TiN,  $\text{In}_2\text{O}_3$ - $\text{SnO}_2$  (ITO)

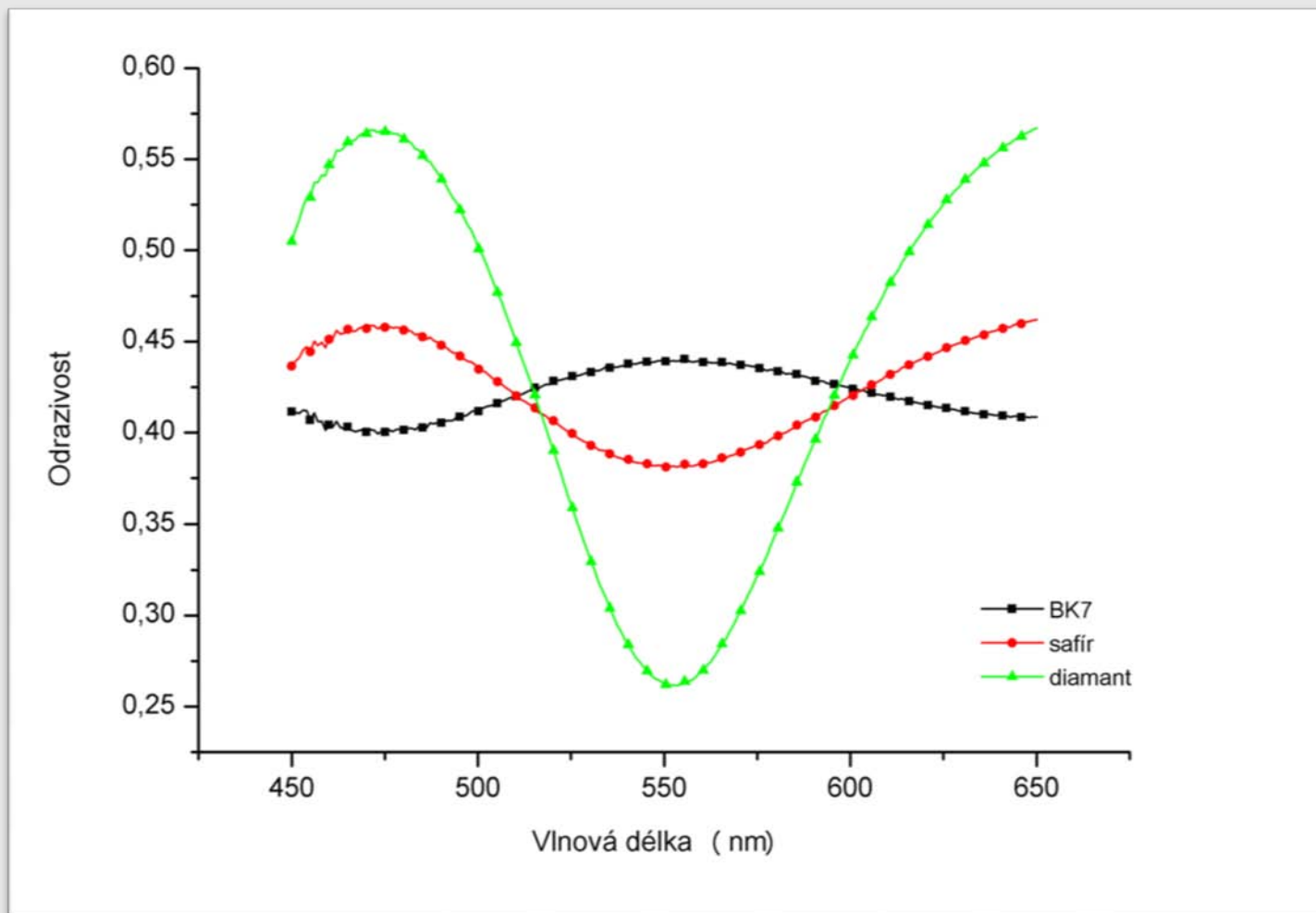


## Okolí

■ sklo BK7

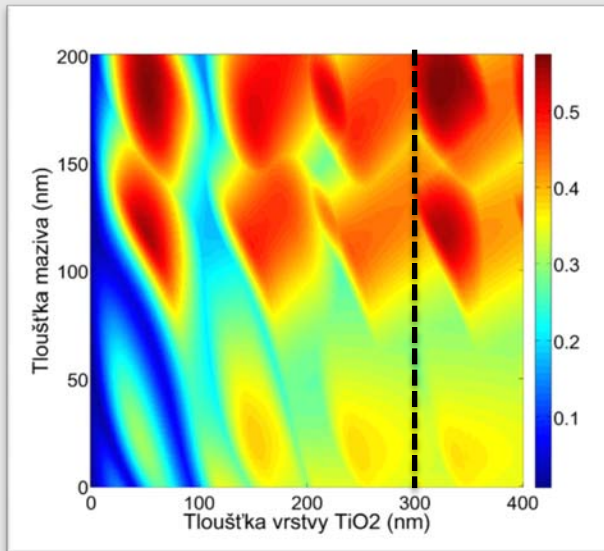
■ safír

■ diamant

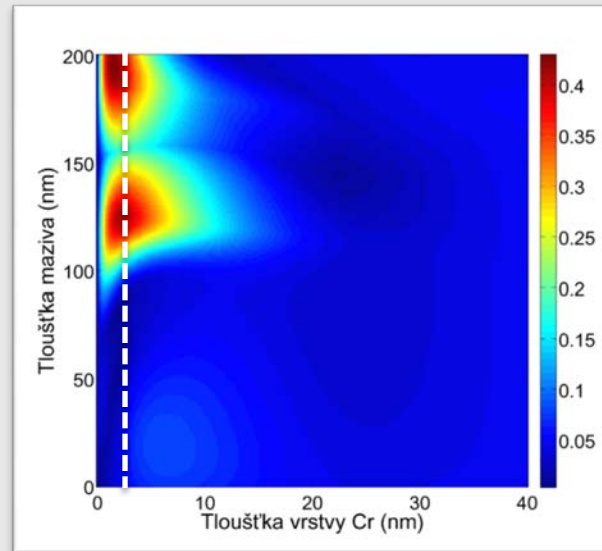


## Tenké vrstvy

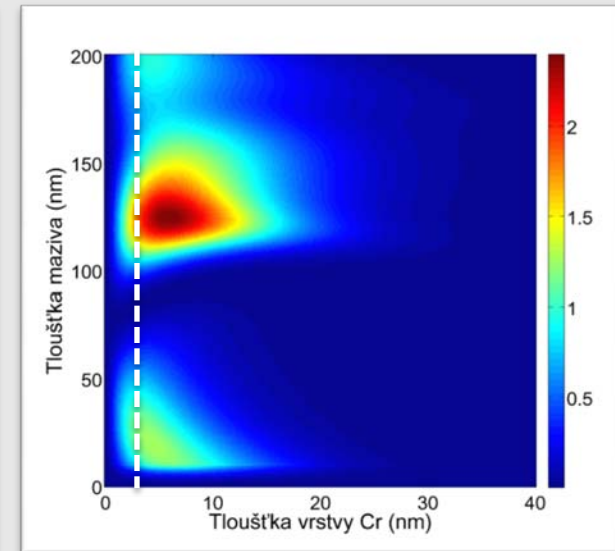
- $\text{TiO}_2$  – dielektrická vrstva
- Chrom – velmi malá tloušťka
- TiN – vrstva podobná chromu
- ITO – často používaná na skle
- volba vhodné tloušťky
  - mapa odrazivosti při změně tl. vrstvy i maziva – vliv indexu lomu i absorpce
  - mapa změny odrazivosti – vliv absorpce



*TiO<sub>2</sub> – 300 nm*

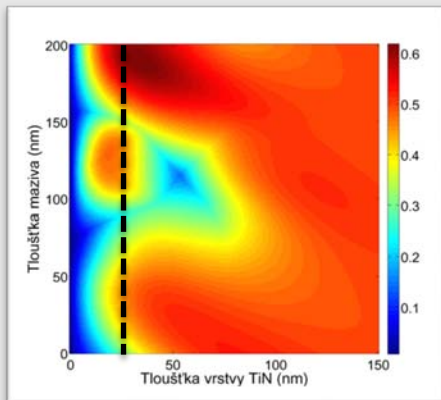


*Chrom – 3-7 nm*

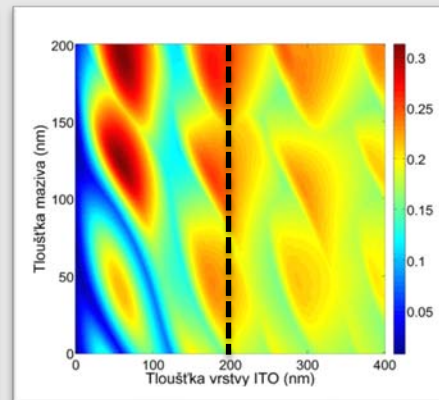
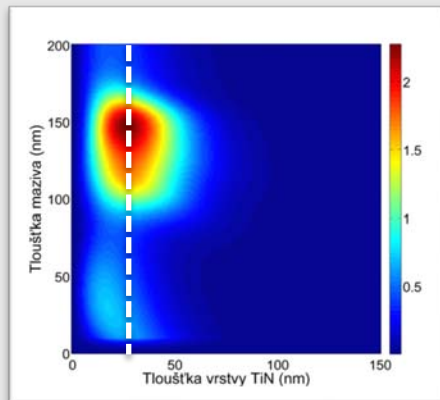


## Tenké vrstvy

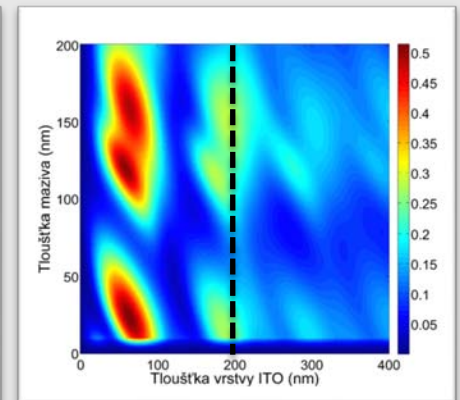
- $\text{TiO}_2$  – dielektrická vrstva
- Chrom – velmi malá tloušťka
- $\text{TiN}$  – vrstva podobná chromu
- ITO – často používaná na skle
- volba vhodné tloušťky
  - mapa odrazivosti při změně tl. vrstvy i maziva – vliv indexu lomu i absorpce
  - mapa změny odrazivosti – vliv absorpce



TiN – 30 nm



ITO – 200 nm

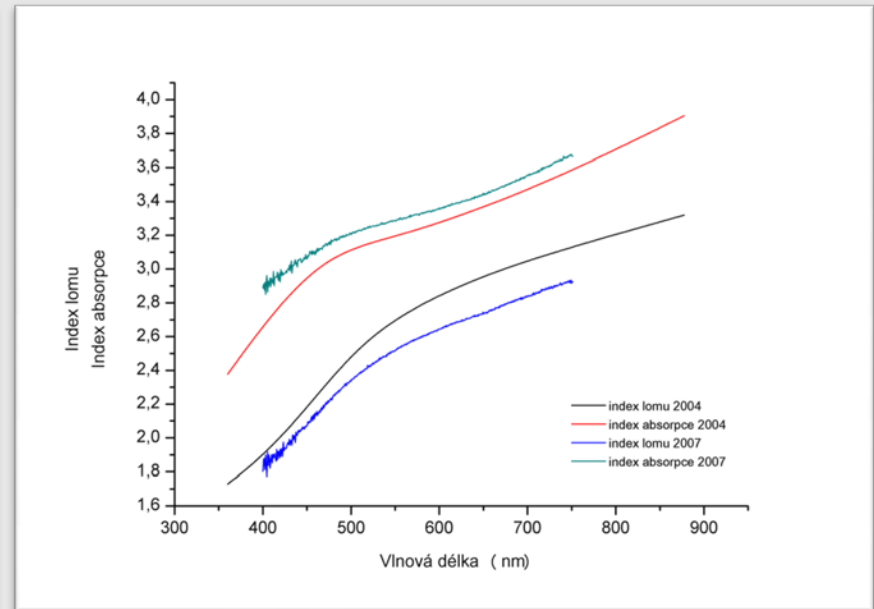
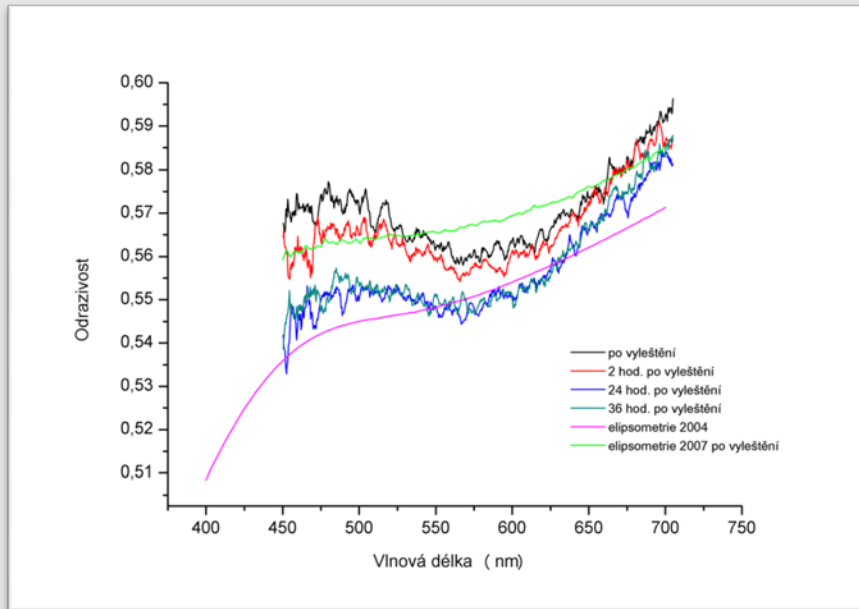


## Postup

- ověření podložky ve statickém kontaktu
- ověření okolí – změna indexu lomu v závislosti na zatížení
- ověření tenké vrstvy
- reálné měření centrální tloušťky a porovnání výsledků

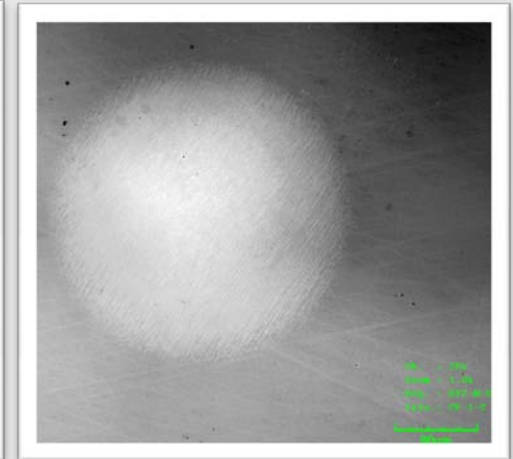
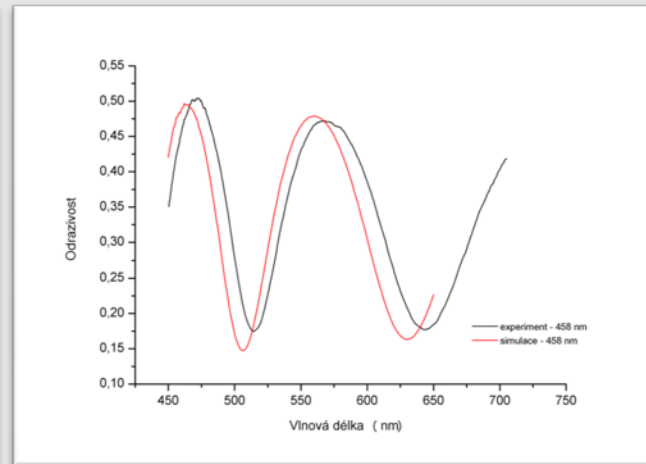
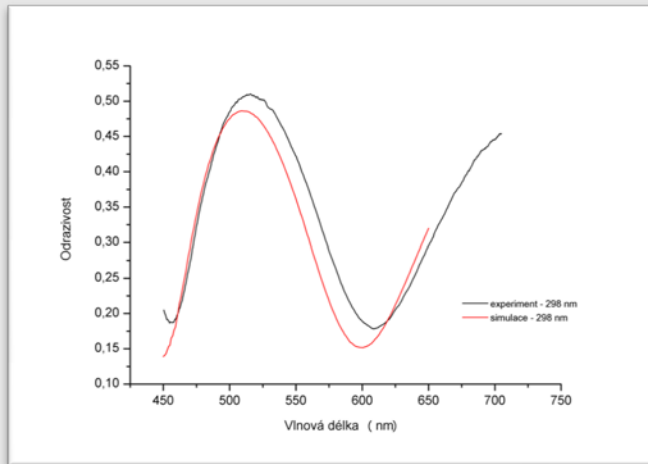
## Vliv růstu oxidů u oceli 100Cr6

- správnost indexu lomu a absorpce
- vliv oxidických vrstev



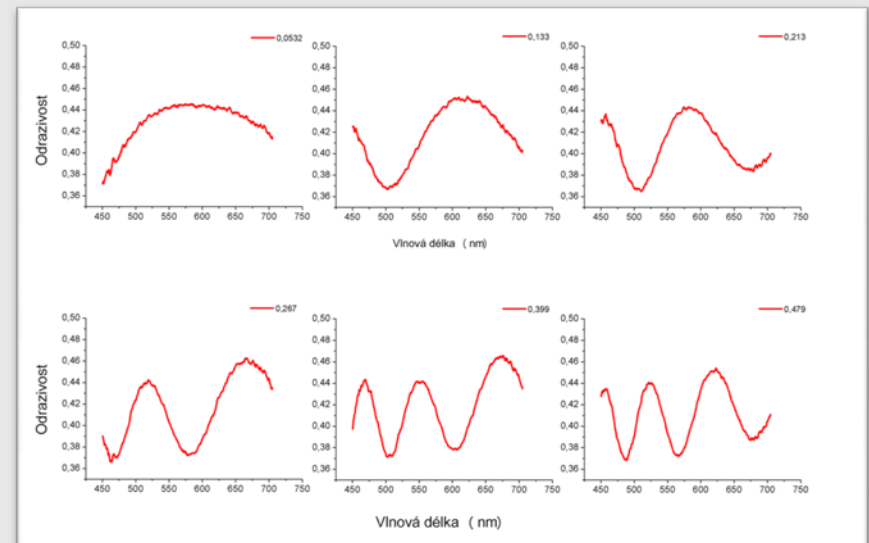
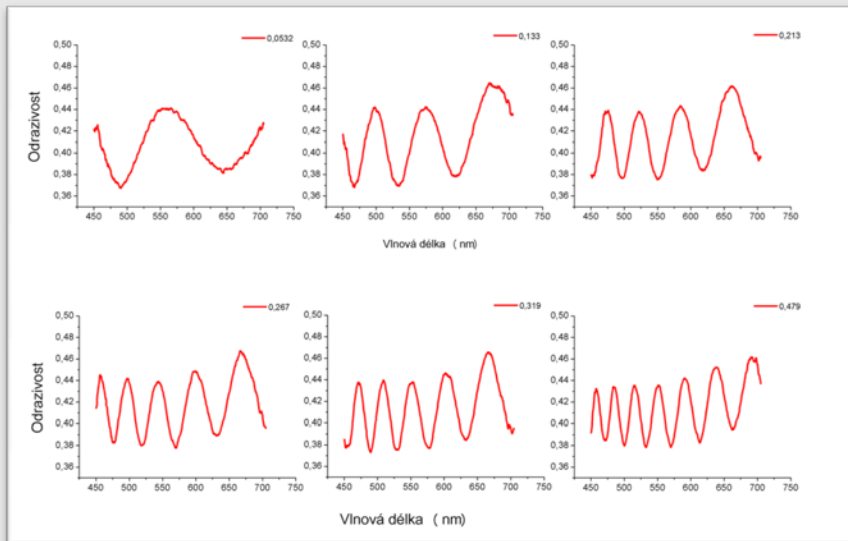
## Použití tenké vrstvy

- $\text{TiO}_2$  – 3 technologie nanášení
- kombinace  $\text{TiO}_2$  a  $\text{SiO}_2$
- vrstva TiN a ITO – získané vzorky – nutnost měření  $n$  a  $k$



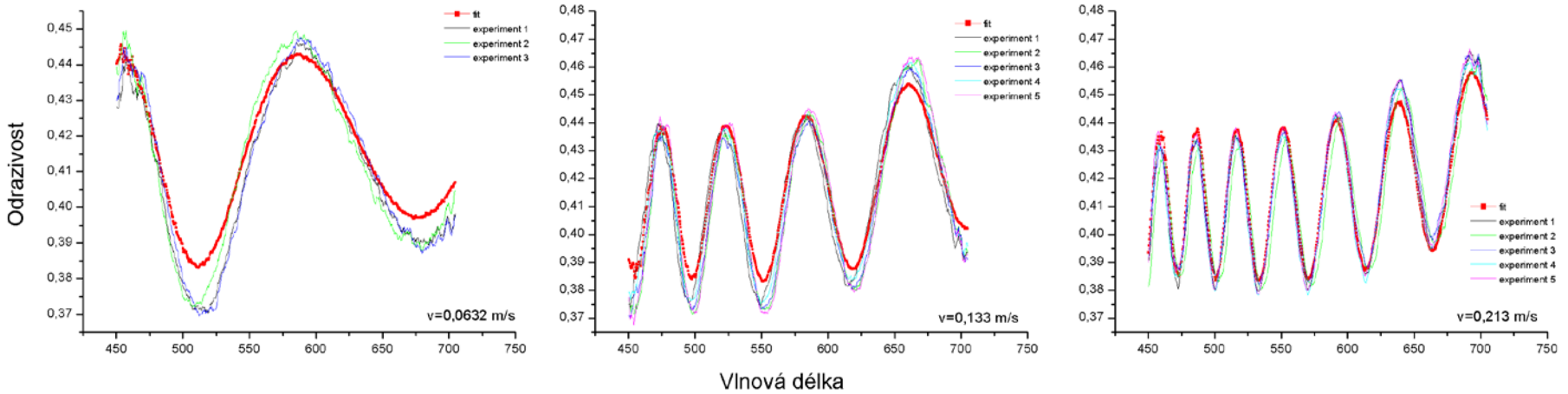
## Měření centrální tloušťky maziva v EHD kontaktu

- měření bez tenké vrstvy
- použití safíru
- základový minerální olej L.S.-B.S.
- kontaktní tlak cca 0,5 Gpa
- teplota 25°C a 55°C

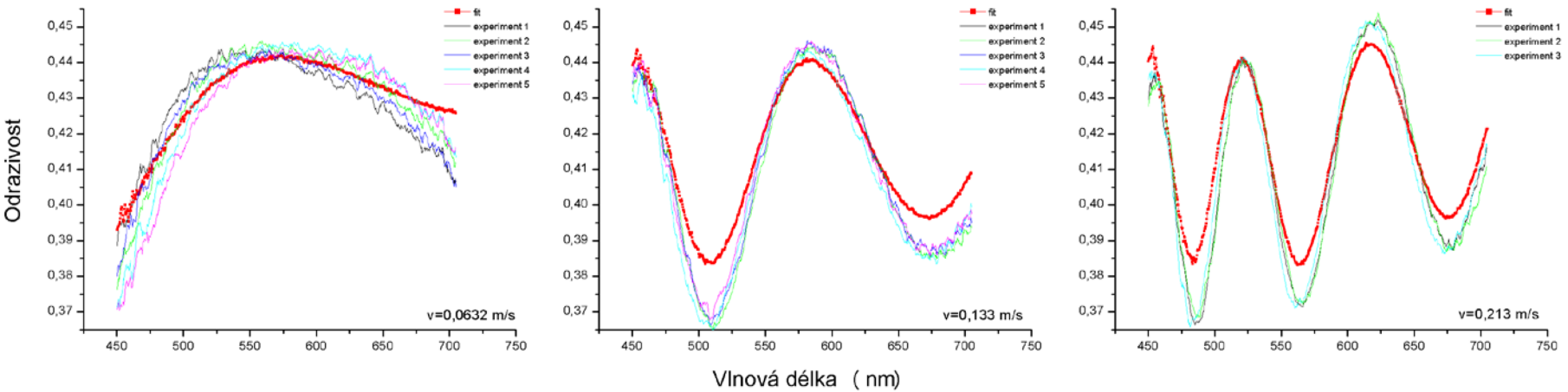


# EXPERIMENT

Teplota 25°C

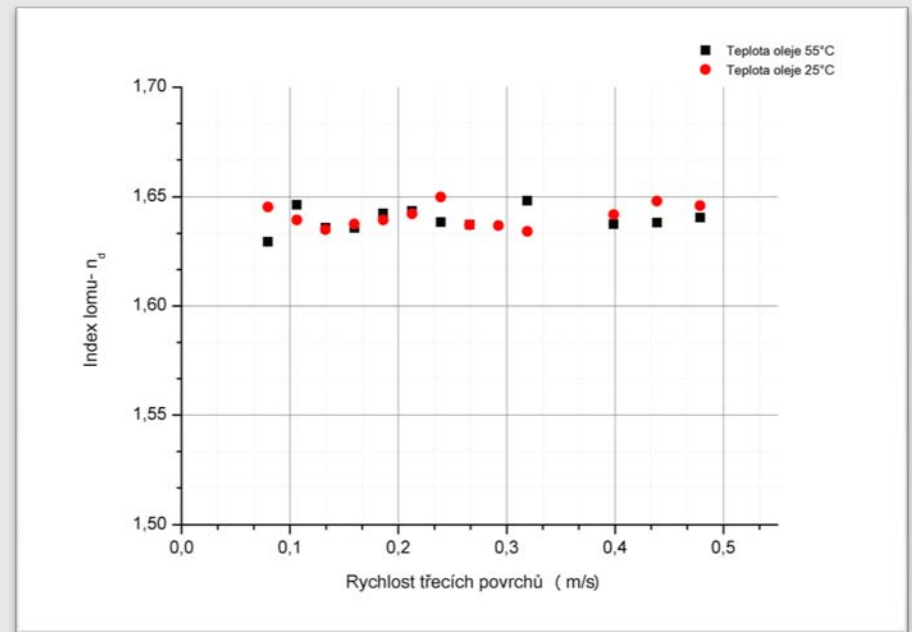
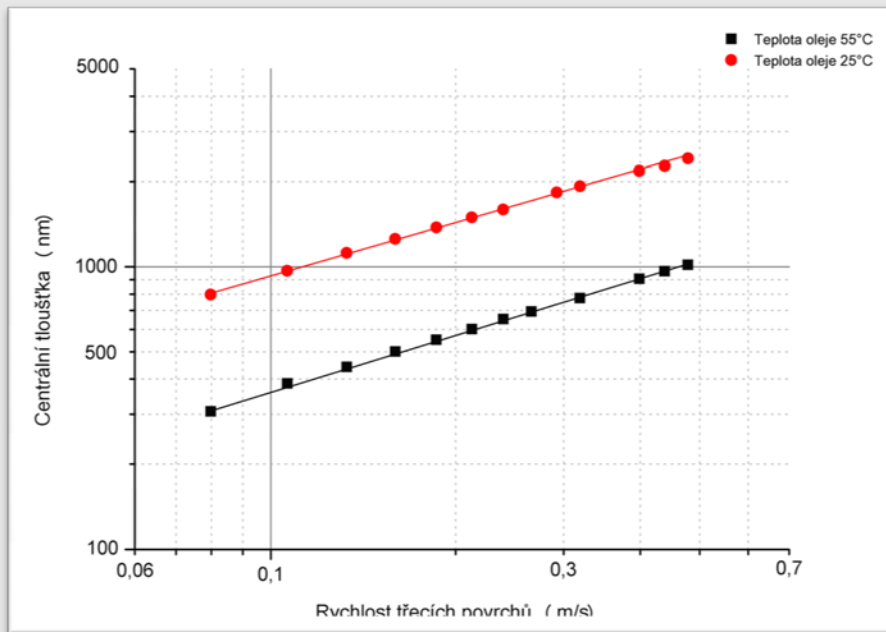


Teplota 55°



## Výsledky získané spektroskopickou reflektometrií

- závislost centrální tloušťky maziva na rychlosti třecích povrchů
- index lomu maziva v centrální oblasti EHD kontaktu



## Závěr

- ověření spektroskopické reflektometrie na stávající měřicí aparatuře
- návržení optického designu pro získání vhodných podmínek při měření
- experimentální měření za použití čistého safíru
  
- komplikace s tenkými vrstvami
- měření maziv s centrální tloušťkou nad 150 nm
  
- nalezení vhodné tenké vrstvy pro EHD podmínky
- použití monochromátoru namísto vláknového spektrofotometru
- měření kontaktního tlaku ze změny indexu lomu maziva



**Děkuji vám za pozornost**

**Vladimír Čudek**

**UK** ústav  
konstruování

**Ústav konstruování – Odbor průmyslového designu**

Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

**Obhajoba disertační práce**

15. prosince 2010, FSI VUT v Brně, Česká republika