

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

Pojednání ke státní doktorské zkoušce v oboru
FYZIKÁLNÍ A MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

**APLIKACE BAREVNÉHO VIDĚNÍ VE STUDIU
ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ**

Ing. Radek Poliščuk

Školitel: Prof. RNDr. Miroslav Liška, DrSc.

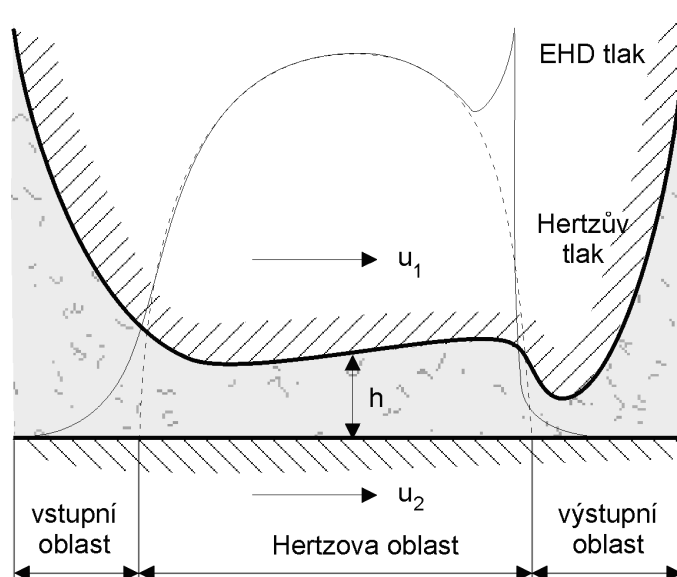
Brno 2004

Obsah:

1. Úvod	3
2. Současný stav problematiky	5
2.1 Interference na tenkých vrstvách	5
2.2 Interferenční metody měření tloušťky tenkých vrstev	9
2.3 Kolorimetrický přístup k vyhodnocování barevné informace	14
3. Cíle disertační práce	21
4. Závěr	23
Literatura	24
Přehled publikační a grantové činnosti	26

1. Úvod

Tribologie, věda zabývající se studiem tření, mazání a opotřebením, hraje stále významnější roli při návrhu, realizaci i provozu moderních strojních soustav. Ačkoliv disponuje velkým množstvím teorií a empirických údajů, rozvoj techniky přináší stále složitější problémy vyžadující nové přístupy a řešení. Mezi tyto problémy patří i chování velmi tenkých mazacích filmů o tloušťkách v řádu jednotek až stovek nanometrů, jejichž výzkum si vyžádal vývoj nových maziv a konstrukce komponent pracujících při vysokém zatížení a za extrémních teplot a rychlostí. U tohoto typu komponent se často setkáváme s mazacími filmy natolik tenkými, že jejich chování nelze považovat za spojité ve smyslu Reynoldsovy teorie [1] a tloušťka vrstvy maziva je výrazně ovlivněna elastickými deformacemi kontaktních povrchů (obr. 1). Mazání tohoto typu pak nazýváme elasto-hydrodynamickým [2].



Obr. 1 Schéma elasto-hydrodynamicky mazaného kontaktu.

Existuje celá řada experimentálních metod studia jevů v kontaktní oblasti, z nichž nejčastěji je dnes využívána simulace na principu optického tribometru, původně navržená Kirkem [3] a Cameronem [4] v 60. letech. Toto zařízení sestává ze dvou kontaktních ploch, z nichž jedna je transparentní a umožňuje „nahlédnutí“ do zkoumané oblasti. Analýzou interferenčních jevů vznikajících na tenké vrstvě maziva je pak možné provést zmapování tloušťky mazacího filmu a dalších parametrů soustavy.

Pro tyto účely je v rámci disertační práce vyvíjena adaptivní metoda počítačového zpracování a interpretace barevné informace z interferogramů v bílém světle, využívající aplikace principů lidského barevného vidění na bázi fotografické a televizní techniky. Výzkum prováděný od roku 1995 na FSI VUT v Brně vychází z rozboru dříve publikovaných prací využívajících spektroskopie [5] a je alternativou k tříkanálovým metodám nezávisle vyvíjených L. Gustafssonem a kol. [6]. Metodami počítačové analýzy chromatických interferogramů se zabývala rovněž diplomová práce autora [7], na niž toto pojednání volně navazuje.

Teoreticky zaměřená část tohoto pojednání shrnuje ve třech podkapitolách současný stav problematiky, od popisu vzniku interference na tenkých vrstvách, přes užívané optické metody měření tloušťky těchto vrstev až po stručný výtah z obecného kolorimetrického aparátu, využitelný dále při analýze interferenčních barev.

Kapitola shrnující cíle budoucí disertační práce naznačuje syntézu teoretického aparátu do experimentální metody barevného vidění, určené pro mapování tloušťky tenkých vrstev. Dále je představena aplikace této metody v laboratorním zařízení pro studium tenkých mazacích filmů, které bylo realizováno v posledních letech na Ústavu fyzikálního inženýrství.

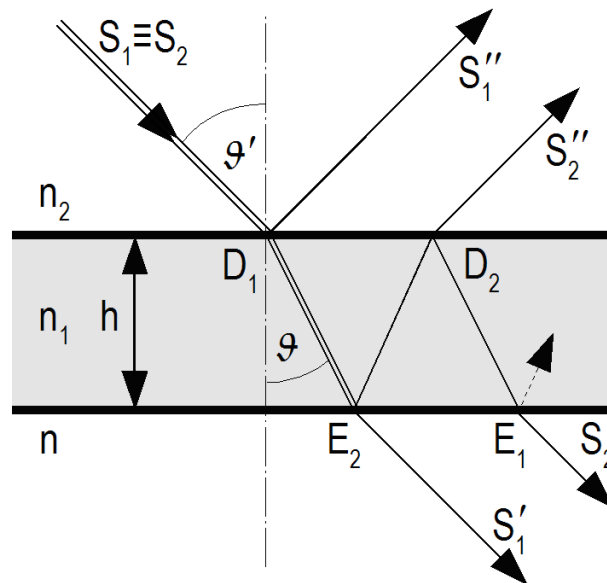
Závěr tohoto pojednání je pak věnován krátkému shrnutí uvedených tezí, perspektivám budoucího výzkumu a možným aplikacím vyvíjeného systému v praxi.

2. Současný stav problematiky

Optické metody založené na využití interference světla přinášejí do praxe široké možnosti přesného, nedestruktivního a bezkontaktního měření vzdáleností v řádech od nanometrů po kilometry. Využití nacházejí i při studiu tenkých vrstev a při měření jejich tloušťky.

2.1 Interference na tenkých vrstvách

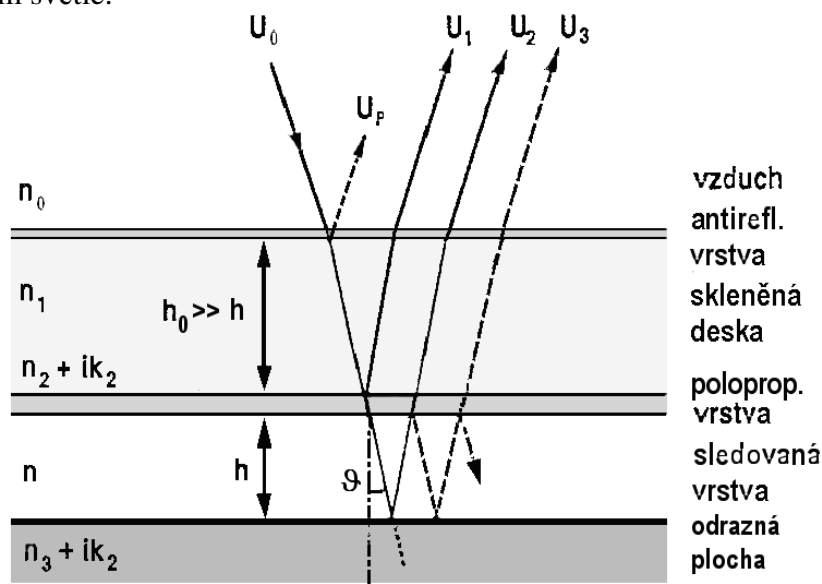
Vznik a charakter interferenčních jevů pozorovatelných například na tenkých kapalinových blánách a bublinách, na tenkých vrstvách nanesených na skle či na uzavřených vzduchových vrstvách je dán koherentní superpozicí světelných vln propouštěných a odražených od jednotlivých rozhraní sledované optické soustavy a parametry jejich odrazivosti, propustnosti a pohltivosti.



Obr. 2 Zjednodušené schéma dělení vstupujícího svazku na tenké planparalelní vrstvě.

Jak je zřejmé z obr. 2, světelný svazek S_2 vstupující z prostředí o indexu lomu n_2 se na rozhraní v bodě D_2 částečně odráží a částečně vstupuje do tenké planparalelní vrstvy o indexu lomu n_1 . Na spodním rozhraní E_2 dochází k dalšímu dělení, kdy se část svazku S_2 odráží zpět a po dalším dělení v bodě D_1 se jeho prošlá část S_2' skládá s odraženým svazkem S_1'' . Zbývající část S_2' pokračuje zpět do vrstvy kde se rovněž skládá se souběžně procházejícím svazkem S_1' . Rozdíly v délkách optických drah, které různé části svazku urazily, ovlivňují fázový rozdíl se kterým dochází k jejich opětovnému skládání. Je-li tento rozdíl časově konstantní, je možné pozorovat interferenční jevy jak v propuštěném, tak v odraženém světle [8].

Protože se v dalším textu budeme zabývat zejména měřením tenkých vrstev na neprůhledném kovovém podkladě, soustředíme se právě na variantu interference v odraženém světle.



Obr. 3 Rozdělení svazku na jednotlivých rozhraních soustavy.

Osvětlovací svazek o amplitudě U_0 dopadá na skleněnou desku a jeho světlo se odráží na jednotlivých rozhraních (obr. 3). V odraženém světle dochází k superpozici vzniklých svazků o amplitudách U_1, U_2, U_3, \dots . Aby odraz světla od prvního rozhraní (vzduch-sklo) nevytvářel superpozici se světlem odraženým od druhého rozhraní (sklo-mazací film) parazitní interference a neúčinné pozadí snižující interferenční kontrast, je na horní povrch krycí skleněné desky nanášena antireflexní vrstva. Vzniklé interferenční jevy v odraženém světle pak můžeme považovat čistě za důsledek skládání světelných vln odražených na studované planoparalelní vrstvě.

Vyjádříme-li komplexní amplitudu U výsledného pole odraženého světla jako součet jednotlivých amplitud

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \dots, \quad (1)$$

pak rozdělení intenzity při interferenci světla odraženého na sledované vrstvě je rovno

$$I = U \cdot U^*, \quad (2)$$

kde U^* je funkce komplexně sdružená k funkci U .

Optické vlastnosti uvedené soustavy vrstev můžeme popsat těmito parametry:

- A_0 amplituda světla dopadajícího na odraznou vrstvu,
- n_1 index lomu skleněné desky,
- $n_2 + ik_2$ komplexní index lomu odrazné vrstvy,
- n index lomu sledované vrstvy,
- $n_3 + ik_3$ komplexní index lomu spodní odrazné vrstvy,
- r_2 součinitel amplitudové odrazivosti rozhraní sklo - polopropustná vrstva
- r'_2 součinitel amplitudové odrazivosti rozhraní polopropust.vrstva - sledovaná vrstva,
- r_3 součinitel amplitudové odrazivosti rozhraní sledovaná vrstva - odrazná plocha,
- t_2 součinitel amplitudové propustnosti polopropustné odrazné vrstvy,

- φ_2 změna fáze při odrazu na rozhraní sklo - polopropustná vrstva,
 φ'_2 změna fáze odrazem na rozhraní polopropustné a sledované vrstvy,
 φ_3 změna fáze odrazem na rozhraní sledované vrstvy a odrazné plochy,
 φ' změna fáze způsobená dvojným průchodem polopropustnou vrstvou,

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} nh \cos \vartheta \quad (3)$$

je změna fáze způsobená dvojným průchodem sledovanou vrstvou, kde

λ značí vlnovou délku užitého světla,

h tloušťku interferenční vrstvy a

ϑ úhel lomu paprsku do sledované vrstvy.

Amplitudy odražených svazků (1) jsou potom podle [9] rovny

$$\begin{aligned}
 U_1 &= A_0 r_2 e^{i\varphi_2}, \\
 U_2 &= A_0 t_2 2r_3 e^{i(\Phi + \varphi_3 + \varphi')}, \\
 U_3 &= A_0 t_2 2r_3 2r'_2 e^{i(2\Phi + 2\varphi_3 + \varphi'_2 + \varphi')}, \\
 U_4 &= \dots,
 \end{aligned} \quad (4)$$

jejich součet pak vede k výrazu pro absolutní amplitudu odraženého světla

$$\begin{aligned}
 U &= A_0 r_2 e^{i\varphi_2} + A_0 t_2^2 r_3 e^{i(\Phi + \varphi_3 + \varphi')} \cdot [1 + r_3 r'_2 e^{i(\Phi + \varphi_3 + \varphi'_2)} + \dots] = \\
 &A_0 r_2 e^{i\varphi_2} + \frac{A_0 t_2^2 r_3 e^{i(\Phi + \varphi_3 + \varphi')}}{1 - r_3 r'_2 e^{i(\Phi + \varphi_3 + \varphi'_2)}}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Rozdělení intenzity ve světle odraženém na sledované vrstvě získáme dosazením amplitudy podle vztahu (5) do výrazu (2). Po úpravách dostaneme

$$\begin{aligned}
 I &= A_0 R_2 + A_0^2 T_2^2 \frac{R_3 + R_3^2 R'_2 - 2R_3 r_3 r'_2 \cos(\Phi + \varphi_3 + \varphi')}{[1 + R_3 R'_2 - 2r_3 r'_2 \cos(\Phi + \varphi_3 + \varphi'_2)]^2} \\
 &+ 2A_0^2 T_2 \frac{r_2 r_3 \cos(\Phi + \varphi_3 + \varphi' - \varphi_2) - R_3 r_2 r'_2 \cos(\varphi' - \varphi_2 - \varphi'_2)}{1 - R_3 R'_2 - 2r_3 r'_2 \cos(\Phi + \varphi_3 + \varphi'_2)},
 \end{aligned} \quad (6)$$

kam jsme zavedli energetické veličiny odrazivosti a propustnosti $R_2 = r_2^2$, $R'_2 = r'^2_2$, $R_3 = r_3^2$ a $T_2 = t_2^2$. Výraz (6) je obecným vztahem pro funkci rozdělení intenzity při mnohosvazkové interferenci. Její hodnota závisí na změně fáze Φ a důsledkem je vznik *interferenčních proužků* lokalizovaných na povrchu sledované vrstvy.

Kontrast a ostrost interferenčních proužků závisí na počtu odražených světelných svazků, které se podílejí na výsledném rozdělení intenzity. O tom, zda interferenci můžeme považovat za obecně dvousvazkovou nebo mnohosvazkovou rozhoduje kombinace odrazivostí a propustností použitých rozhraní - například energetická odrazivost leštěného ocelového povrchu se pohybuje v rozmezí 0,55-0,65, zatímco odrazivost rozhraní neupravené skleněné desky o indexu lomu $n_1=1,58$ s mazivem o indexu lomu $n=1,49$ je $(n-n_1)^2/(n+n_1)^2=9 \cdot 10^{-4}$. Tento poměr je možné upravit například nanesením odrazné vrstvy na spodní povrch skleněné desky (obr. 3), ovšem s přihlédnutím k faktu, že zvláště silnější kovové vrstvy část energie zároveň pohlcují a viditelnost proužků tak snižují [8].

Protože i poté amplitudy U_2, U_3, U_4, \dots postupně klesají vždy na méně než 10% předchozí hodnoty [9], můžeme při fotometrickém měření vycházet z harmonického rozdělení intenzity při dvousvazkové interferenci a v (1) zanedbat vše kromě komplexních amplitud U_1 a U_2 . Rozdělení intenzity je potom dáno výrazem

$$I = I_0 + I_1 \cos(\Phi + \varphi), \quad (7)$$

kde:

$$I_0 = A_0^2(R_2 + T_2^2R_3),$$

$$I_1 = 2A_0^2T_2r_2r_3,$$

$$\varphi = \varphi_3 + \varphi' - \varphi_2.$$

Úhel φ zde vyjadřuje změnu fáze způsobenou odrazem světla od povrchu koule (φ_3), průchodem světla odraznou vrstvou (φ') a odrazem světla od této vrstvy (φ_2).

Při kolmém dopadu světla na odraznou vrstvu ($\vartheta = 0$) vzniká v odraženém světle interferenční obrazec ve formě proužků stejné tloušťky (nebo také *Fizeauových proužků*) s průběhem intenzity podle (3) a (7)

$$I = I_0 + I_1 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}nh + \varphi\right). \quad (8)$$

Její lokální hodnota závisí na fázi funkce kosinus, která může být vyjádřena rovnicí

$$\frac{4\pi}{\lambda}nh + \varphi = 2\pi s, \quad (9)$$

kde s je *interferenční řád*, pomocí něhož je libovolnému místu interferenčního obrazce jednoznačně přiřazeno určité reálné číslo. Maxima intenzity

$$I_{\max} = I_0 + I_1 \quad (10)$$

a tedy světlé proužky proto vznikají v místech, kde s je celočíselné, zatímco minima

$$I_{\min} = I_0 - I_1 \quad (11)$$

a tmavé proužky nastávají v místech kde s nabývá polovinových hodnot.

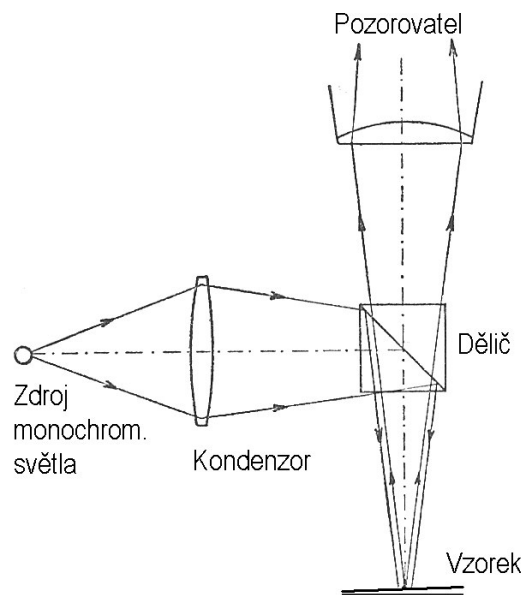
2.2 Interferenční metody měření tloušťky tenkých vrstev

Mezi používané interferenční metody měření tloušťky tenkých vrstev v odraženém světle patří zejména:

- pozorování monochromatických interferenčních proužků (Tolansky, VAMFO),
- spektroskopie proužků stejného chromatického řádu (CARIS),
- vizuální porovnávání interferenčních barev.

Monochromatická interferometrie

Ke stanovení tloušťky tenkých nekovových i kovových vrstev v řádu stovek až tisíců nanometrů je velmi vhodná interferometrická metoda objevená na počátku 20. století Wienerem a jako měřicí metoda popsaná Tolanským [8].



Obr. 4 Schéma vícepaprskového interferometru pro měření v monochromatickém světle.

Tolanského interferometrická metoda je založena na vícepaprskové interferenci odraženého světla na tenké, zpravidla klínovité vrstvě s drobnou poruchou (schodek, rýha...). Odrazivost rozhraní bývá pro maximalizaci interferenčního kontrastu upravena napařením vhodných vrstev. Dráhový rozdíl světelných paprsků odražených na horní a dolní straně této vrstvy je dán vzorcem

$$x = 2nh \cos \vartheta , \quad (12)$$

kde n je index lomu vzorku,
 h je tloušťka měřené vrstvy a
 ϑ je úhel průchodu vrstvou.

Pro kolmý dopad světla je dráhový rozdíl světelných paprsků ve vrstvě roven

$$x = 2nh . \quad (13)$$

Při odrazech světla o vlnové délce λ na kovových zrcadlech však dochází i k fázovým posuvům, které způsobují další zdánlivé zvětšení tloušťky interferenční vrstvy o

$$x_1 = \frac{\lambda}{2\pi}\delta_1 \text{ a } x_2 = \frac{\lambda}{2\pi}\delta_2, \quad (14)$$

kde δ_1 a δ_2 jsou fázové posuvy na horním polopropustném, resp. dolním odrazivém rozhraní. Přitom

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_1 &= \frac{-2n_1k_1}{n_1^2 + n_1^2k_1^2 - 1}, \\ \operatorname{tg} \delta_2 &= \frac{-2n_2k_2}{n_2^2 + n_2^2k_2^2 - 1}, \end{aligned} \quad (15)$$

kde n_1 a n_2 je index lomu a

k_1 a k_2 jsou indexy absorpce příslušné vrstvy.

Jelikož první odraz nastává na přechodu do prostředí opticky řidšího a druhý odraz (na spodním rozhraní vrstvy) na prostředí opticky hustším, lze s přihlédnutím k fázovým posuvům psát podmínku pro vznik interferenčního minima v odraženém světle ve tvaru

$$2nh + x_1 + x_2 = s\lambda, \quad (16)$$

kde s je přirozené číslo označující interferenční řád.

V místech splňujících podmínku (16) na vzorku pozorujeme tmavé proužky a pro $s = k - \frac{1}{2}$ při celočíselném k pozorujeme světlé proužky. Svírá-li vrstva na obr. 4 velmi malý úhel, pak při osvětlení scény monochromatickým světlem o známé vlnové délce λ můžeme pozorovat střídající se tmavé a světlé Fizeauovy proužky rovnoběžné s hranou klínu.

Ze vzorce (16) pro dráhový rozdíl světelných paprsků, který splňuje podmínku minima odrazu řádu s , můžeme pro přírůstek tloušťky mezi dvěma interferenčními minimy (resp. maximy) a známé λ odvodit jednoduchý vztah

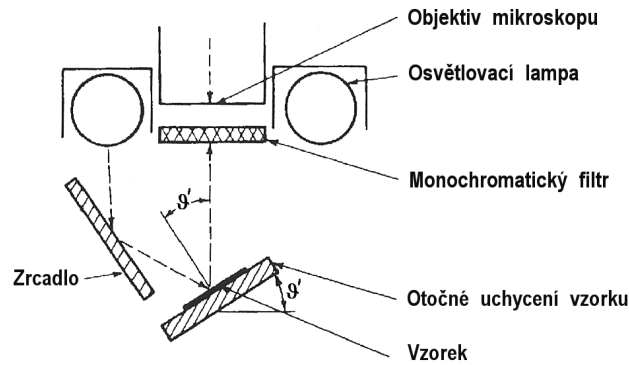
$$2n\Delta h_\lambda = \lambda, \text{ nebo také } \Delta h_\lambda = \frac{\lambda}{2n}. \quad (17)$$

Je-li v některém místě vrstva odstraněna, jsou zde Fizeauovy proužky rovnoběžně posunuty a tento posuv lze změřit mikrometricky. Je-li vzdálenost dvou sousedních proužků dána délkou p a jsou-li v místě nerovnosti posunuty o délku q , pak tloušťku měřené vrstvy můžeme interpolací určit jako

$$h = \frac{\lambda}{2n} \cdot \frac{q}{p}. \quad (18)$$

Tímto způsobem dle [8] měřil Nagase tloušťku tenkých vrstev oxidu hlinitého po anodizaci a jak uvádí Tolansky [10], touto metodou určoval Khamsavi tloušťku tenkých vrstev stříbra a současně jejich hmotu.

Další používanou metodou je *VAMFO* (Variable Angle Monochromatic Fringe Observation), pozorování monochromatických proužků při proměnném úhlu. Na rozdíl od Tolanského metody zde není vyžadována klínovitá vrstva, záchytné schůdky či drážky, ani kolimované osvětlení. Mechanickým nakláněním vzorku se mění úhel ϑ ve vztahu (12) a s ním i délka optické dráhy paprsků odražených přes monochromatický filtr do mikroskopu (obr. 5).

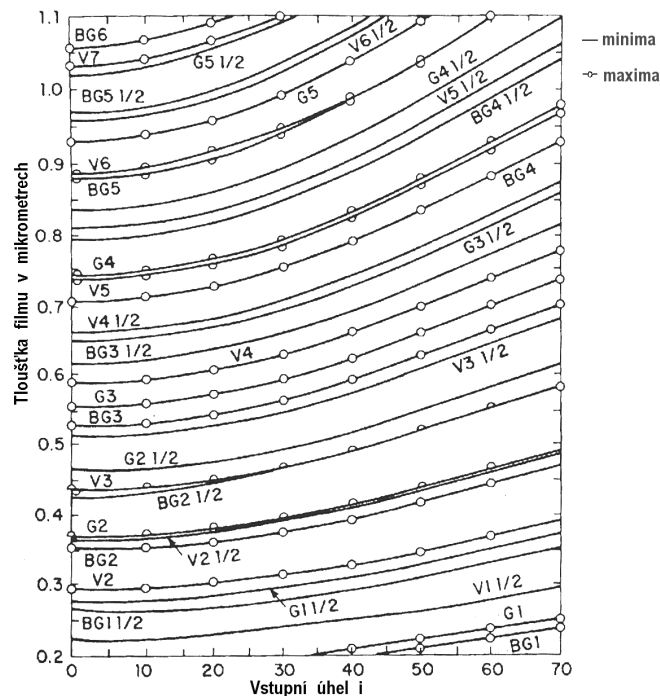


Obr. 5 Schéma uspořádání zařízení pro VAMFO.

Průchodu interferenčních minim je tak postupně dosaženo ve všech bodech obrazu. Tloušťku filmu je možné určovat s pomocí nomogramu (obr. 6) odvozeného ze vztahu

$$h = \frac{\Delta s \lambda}{2n_1(\cos \vartheta_i - \cos \vartheta_j)} = \frac{\lambda}{2n_1 \cdot \Delta \cos \vartheta}, \quad (19)$$

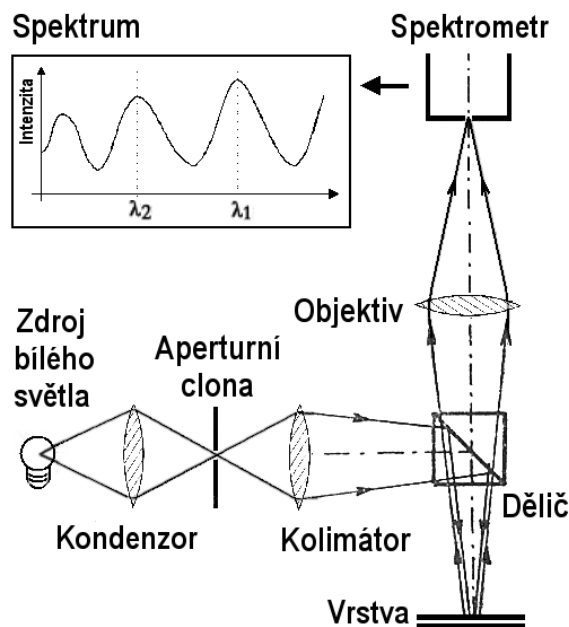
kde Δs je počet proužků prošlých při náklonu vzorku z úhlu ϑ'_i po ϑ'_j .



Obr. 6 Pliskinův nomogram pozic interferenčních minim a maxim dle tloušťky a úhlu pro film SiO_2 a monochromatické filtry 434(V), 519(BG) a 545(G) nm [11].

Spektroskopické metody v bílém světle

Tloušťka tenké vrstvy může být měřena i spektroskopicky, rozkladem barev proužků vznikajících při mnohosvazkové interferenci bílého světla na sledované vrstvě. Protože analyzované paprsky jsou odráženy pod neměnným úhlem, tyto metody se souhrnně označují zkratkou CARIS (Constant Angle Reflection Interference Spectroscopy) [11].



Obr. 7 Schéma vícepaprskového interferometru pro spektroskopické měření v bílém světle.

Po doplnění dříve popsaného Tolanského interferometru o spektroskop a bodový zdroj bílého světla (obr. 7) se při pozorování projeví charakteristické barevné obrazce, jejichž spektrální složky odpovídají nejintenzivněji interferujícím vlnovým délkám. Jelikož podmínka (16) pro interferenční extrémů se při odrazu světla v tenké vrstvě mění s vlnovou délkou λ , zatímco poměr h/λ , určující interferenční řád s , zůstává stálý, nazýváme tyto obrazce proužky stejného chromatického řádu (Fringes of Equal Chromatic Order, FECO) [11][12].

Analyzujeme-li spektrum takto získaného interferogramu, pak polohy vlnových délek lokálních maxim odpovídají tloušťkám podle následujícího vztahu

$$2nh = s\lambda, \quad (20)$$

kde interferenční řád s můžeme podle Tolanského určit z vlnových délek dvojice sousedních spektrálních maxim λ_1 a λ_2 (obr. 7) jako

$$s = \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}. \quad (21)$$

V rámci prvního interferenčního řádu $s = 1$ je možné přímo ztotožnit délku dráhového rozdílu ze vztahu (16) s vlnovou délkou maxima ve spektrogramu [13]. Rozsah měření metodami CARIS je pro postupný zánik interferenčního kontrastu v bílém světle omezen přibližně do řádu $s = 30$ [8].

Porovnávání barev

Jednou z nejstarších a nejjednodušších metod používanou k měření tloušťek tenkých filmů je vizuální porovnávání interferenčních barev vznikajících na vrstvě v odraženém bílém světle. Souvislost mezi tloušťkou vrstvy a barvou odraženého světla byla popsána již Newtonem a rozpracována Rolletem a dalšími [11]. Fyzikálním vysvětlením této relace je vznik interferenčního maxima u právě takové vlnové délky λ ve viditelné části spektra, která splňuje podmínku

$$s\lambda = 2n_1h \cos \vartheta = \sqrt{2h(n_1^2 - \sin^2 \vartheta)}, \quad (22)$$

kde s označuje celé číslo pro interferenční maximum a interferenční řád,
 n_1 index lomu vrstvy (index lomu okolí předpokládáme 1),
 ϑ úhel průchodu svazku od normály a
 h tloušťku sledované vrstvy.

Jeden z prvních precizních vzorníků přiřazující tloušťku k barvě byl vytvořen Blodgettem [11] a umožňoval porovnávání barev s referenčními vzorky stearanu barnatého na podkladu z olovnatého skla. Později byl chemicky i tepelně málo stabilní stearan nahrazen odolnějšími vrstvami oxidu křemičitého na křemíkovém podkladě. Tenká křemíková destička (wafer) je oxidována do předem dané hloubky a poté jsou na vrstvě oxidu postupným leptáním vytvořeny referenční plošky o různých, přesně definovaných tloušťkách.

Kontrola správnosti zvoleného interferenčního řádu může být prováděna porovnáváním průběhu změn okolních barev při postupné změně úhlu pohledu ε na destičku přiloženou na vzorek. Detailní vzorník těchto barev na bázi oxidu křemičitého a rozbor barevných přechodů pro kontrolu interferenčního řádu byl popsán Pliskinem a Conradem [11].

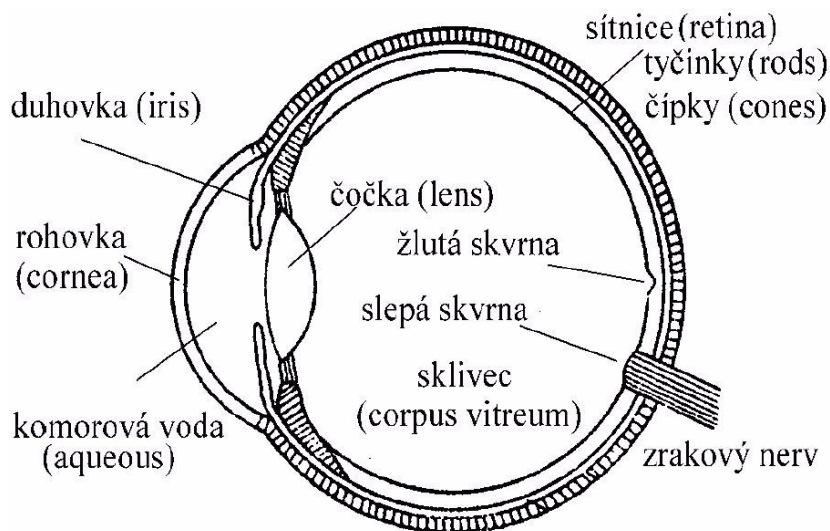
Rozsah měření vizuální srovnávací metodou je omezen na 50-1500 nm, přičemž dosahovaná přesnost je jen v řádu desítek nanometrů [9, 11]. Metoda je však vysoce adaptabilní, neboť relativní porovnávání barev není ovlivňováno volbou základního úhlu pozorování, ani momentálním spektrálním složením osvětlení. Významné zpřesnění je možné dosáhnout objektivizací kolorimetrických schopností subjektivního pozorovatele umělou technologií barevného vidění [7], podrobněji popsanou v následující kapitole.

2.3 Kolorimetrický přístup k vyhodnocování barevné informace

V předchozí kapitole byla představena možnost fyzikálního popisu barevné informace prostřednictvím její energetické spektrální distribuční funkce. Další metodou hodnocení optických vlastností objektů je napodobení schopnosti lidského oka vnímat obrazovou informaci současným zpracováním trojice vhodně zvolených a zakódovaných barevných stimulů (1.Grassmanův zákon [14]). Použitý kolorimetrický aparát zde čerpá zejména ze standardů Commission Internationale de l'Éclairage (CIE, zasedá od roku 1931), které definují mj. vlastnosti základních barevných prostorů a parametry standardního pozorovatele [15].

Principy barevného vidění - oponentní barevné systémy

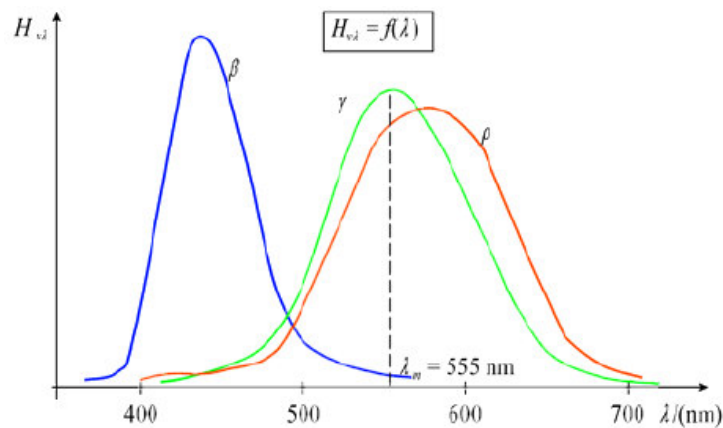
Optická soustava lidského oka (obr. 8) je tvořena čtyřmi optickými prostředími (rohovkou, komorovou vodou, čočkou a sklivcem), které jsou odděleny třemi optickými plochami (rohovka, přední plocha čočky, zadní plocha čočky). Světlo vstupuje a jeho množství je regulováno velikostí zornice v duhovce, je fokusováno čočkou a dopadá na sítnici na zadní straně oka.



Obr. 8 Schéma lidského oka

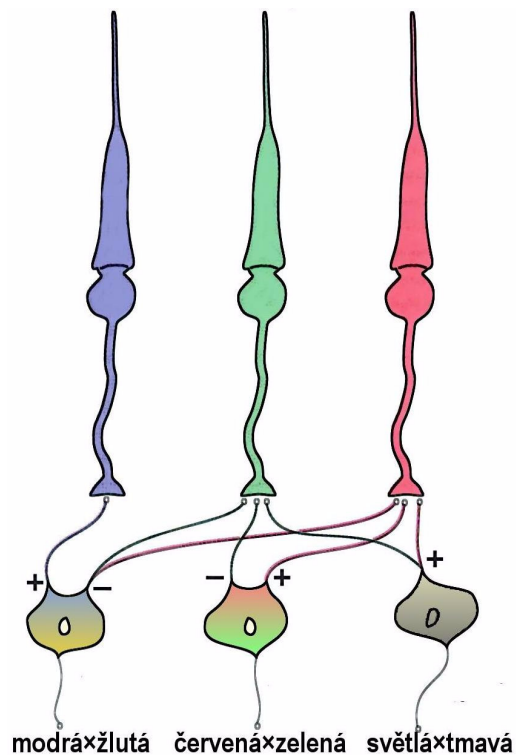
Sítnice obsahuje světlocitlivé buňky nazývané tyčinky a čípky. Tyčinky, které díky své vysoké citlivosti umožňují černobílé vidění za šera, jsou za dostatečných světelných podmínek oslněny a na barevném vidění se nepodílejí. Čípky, používané pro barevné (fotopické) vidění na denním světle a nejhustěji uspořádané v okolí žluté skvrny, na základě fotochemických reakcí vnímají intenzity ve třech širokopásmových oblastech [16]:

- ρ (červený) s maximem citlivosti v okolí 590 nm,
- γ (zelený) s maximem citlivosti v okolí 540 nm a
- β (modrý) s maximem citlivosti v okolí 430 nm.



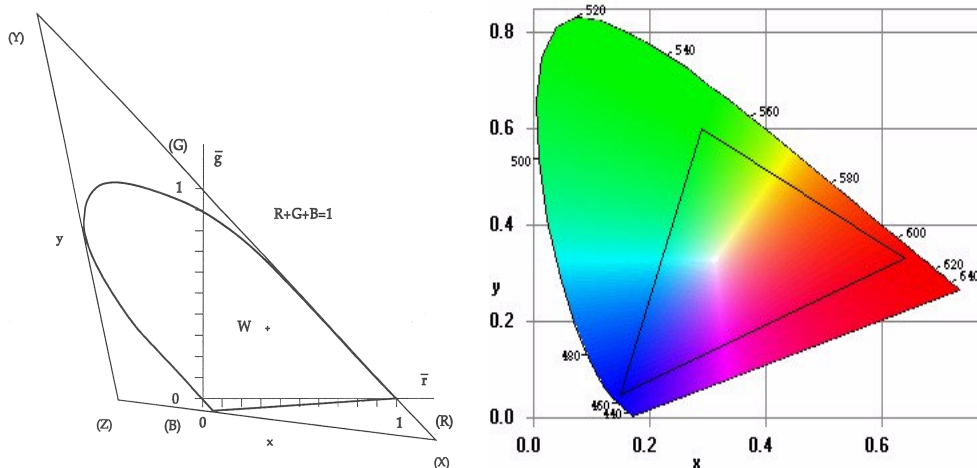
Obr. 9 Spektrální citlivost čípků při barevném vidění

Každá skupina čípků (ρ , γ , β) má svou vlastní spektrální charakteristiku, jejíž typický průběh je na obr. 9. Hodnoty signálů jsou sloučeny podle schématu na obr. 10 a zrakovým nervem elektrochemicky předávány k dalšímu zpracování do mozku.



Obr. 10 Schéma oponentního kódování barvy v čípcích [17].

Tento fyziologický způsob kódování barevné informace se také nazývá **oponentní** [18] a jeho transformace jsou základem referenčních barevných systémů CIE. Numerickým problémem tohoto uspořádání je však fakt, že některé ze stimulů (zejména barvy mezi modrou a zelenou) mohou nabývat záporných hodnot. Řešením je transformace z relativních souřadnic RGB do virtuálních souřadnic XYZ, které obsahují veškeré vnímatelné hodnoty barevných stimulů v prvním kvadrantu (obr. 11).



Obr. 11 Schéma transformace systému RGB do souřadnic XYZ (a) a výsledný kolorimetrický trojúhelník s vyznačením ukázkou rozsahu barev zobrazitelných aditivní RGB technikou (b) [19].

Transformaci systému relativních spektrálních činitelů r , g a b do souřadnic standardního systému XYZ je možné definovat jako

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,412453 & 0,357580 & 0,180423 \\ 0,212671 & 0,715160 & 0,072169 \\ 0,019334 & 0,119193 & 0,950227 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R'_{709} \\ G'_{709} \\ B'_{709} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

kde R'_{709} , G'_{709} , B'_{709} jsou hodnoty RGB transformované dle CCIR709:

$$\begin{aligned} R'_{709} &= 1,099R^{0,45} - 0,099 \\ G'_{709} &= 1,099G^{0,45} - 0,099 \quad \text{vše pro } R, G, B > 0,018 \\ B'_{709} &= 1,099B^{0,45} - 0,099 \end{aligned} \quad (24)$$

a zároveň jako funkci spektrálního rozložení intenzity $I(\lambda)$ (obr. 9)

$$\begin{aligned} X &= \int I(\lambda)\bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= \int I(\lambda)\bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= \int I(\lambda)\bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (25)$$

kde \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} jsou trichromatické činitele popisující spektrální citlivost lidského oka. Funkci rozložení intenzity lze přitom vyjádřit, například s pomocí (7), jako

$$I(\lambda) = E(\lambda)R(\lambda), \quad (26)$$

kde $E(\lambda)$ je funkce spektrální hustoty světelného zdroje a $R(\lambda)$ je reflektance soustavy pro danou vlnovou délku.

Zavedeme-li dále relativní barevné souřadnice

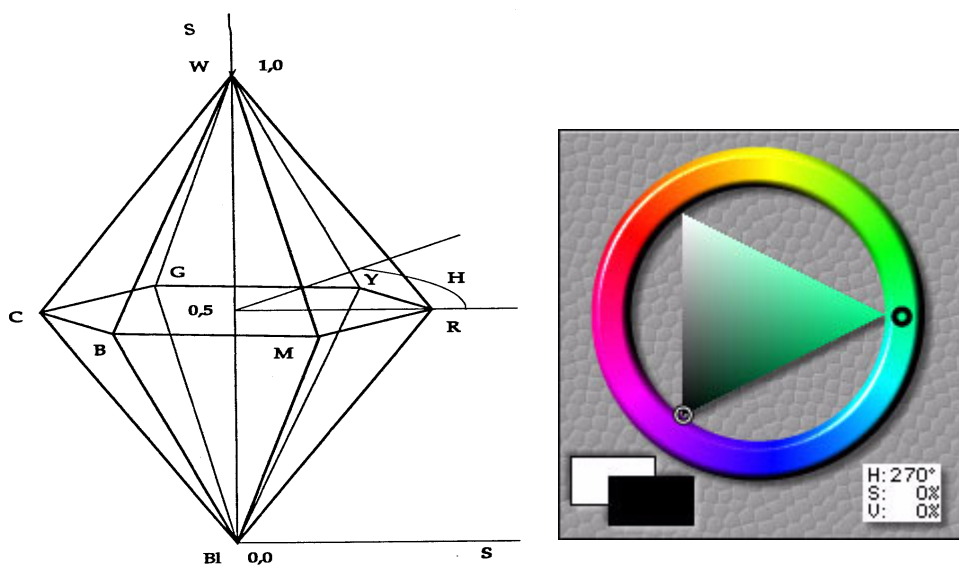
$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z}, \text{ kde } x+y+z=1, \quad (27)$$

můžeme barvu v souladu se schématem na obr. 10 popisovat také jako kombinaci dvou barvonosných složek (x a y) a jedné jasové složky (obvykle Y) [19].

Porovnávání barev v psychometrických barevných systémech

Barva je vizuálním vjemem produkovaným specifickou spektrální odezvou (SPD, spectral power distribution) sítnice. Subjektivní popis barvy je možný v termínech jako *jas* (vjem kterým posuzujeme barvy jako světlé či tmavé), *odstín* (subjektivní poloha barvy ve spektru) a *barevnost* (subjektivní množství barvy).

Toto hodnocení je možné srovnáním s etalonem doplnit objektivními termíny jako *světlost* (jas oproti referenční bílé) a *sytoost* (saturace), neboli vzdálenost od neutrální bílé (obr. 11b). Roku 1905 byl Albertem Munsellem pro potřeby textilního průmyslu na tomto principu vytvořen barevný vzorník seřazující subjektivní barvy podle jejich spektrální polohy do skupin uspořádaných kolem osy *V*, reprezentující škálu od černé do bílé. Z tohoto schématu byly později odvozeny “spektrální” barevné modely (obr. 12) o barvonosných složkách *H* (Hue, spektrální azimut barvy 0-360°), *S* (Saturation, sytoost-čistota barvy, také vzdálenost od osy) a jasové složce *v* (Value, hodnota), respektive *L* (Luminosity, jas - podobná definice jako *V*) nebo *I* (Intensity - celková intenzita) [18, 19].



Obr. 12 Symbolické zobrazení systému HSV a svislý radiální řez kuželem HSV.

Pro transformaci mezi systémy RGB a HSV je možné použít vztahy:

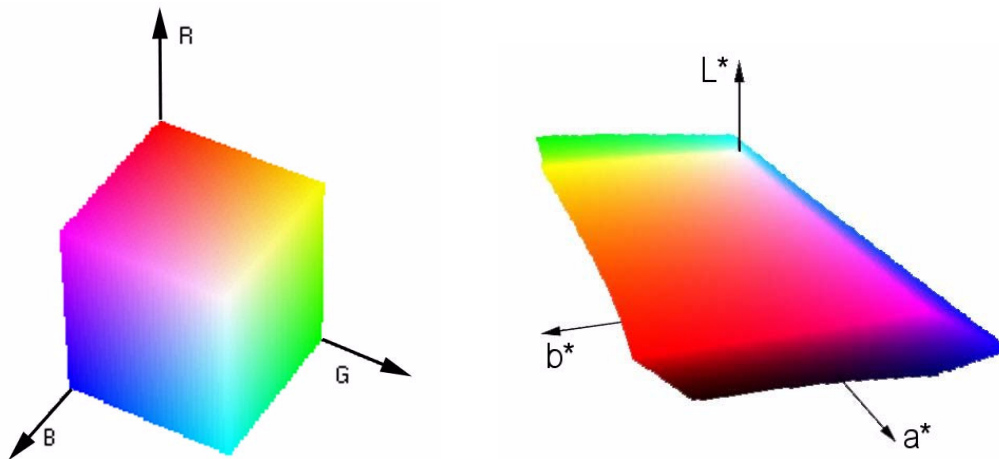
$$\begin{aligned} H &= (60 \cdot H' + 360) \bmod 360, \\ S &= \Delta / \text{Max} \text{ pro } \Delta > 0, \text{ jinak } S = 0, \\ V &= \text{Max}, \end{aligned} \quad (28)$$

kde:

$$\begin{aligned} \Delta &= \text{Max} - \text{Min} && \text{přičemž pro } \Delta = 0 \Rightarrow H' = 0 \\ \text{Max} &= \max(R, G, B) && R = \text{Max} \Rightarrow H' = \frac{G - B}{\Delta} \\ \text{Min} &= \min(R, G, B) && G = \text{Max} \Rightarrow H' = 2 + \frac{B - R}{\Delta} \\ R, G, B &\in \langle 0, 1 \rangle && B = \text{max} \Rightarrow H' = 4 + \frac{R - G}{\Delta} \end{aligned}$$

Barevné systémy typu HSV, založené na lineární transformaci průměrovaných energetických složek R , G a B , jsou snadno použitelné v zařízeních pro záznam a reprodukci barev pracujících na stejném principu. Při pohledu na obr. 9 je však zřejmé že charakteristika lidského oka vykazuje i vážné nelinearity, které ovlivňují způsob vnímání a porovnávání barev a komplikují objektivní hodnocení rozdílů v barvě. Od třicátých let minulého století jsou proto zkoumány i alternativní barevné systémy (vycházející z oponentního schématu na obr. 10), které by svými souřadnicemi vyjadřovaly přímo psychometrické rozdíly barvy v daném místě barevného prostoru.

Prvním takovým systémem byl LAB, definovaný Hunterem ve čtyřicátých letech a standardizovaný CIE v roce 1976 jako CIE 1976 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) a jeho obdoba ve sférických souřadnicích, CIE 1976 $L^*u^*v^*$ (CIELUV)[13].



Obr. 13 Barevná krychle RGB promítnutá do souřadnic $L^*a^*b^*$.

Transformace mezi systémy XYZ (23, 24) a CIELAB je definována jako

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_w}} \text{ pro } \frac{Y}{Y_w} > 0,008856, \text{ respektive} & (29) \\
 L^* &= 903 \frac{Y}{Y_w} \text{ pro } \frac{Y}{Y_w} \leq 0,008856, \\
 a^* &= 500 \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_w}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_w}} \right), \\
 b^* &= 200 \left(\sqrt[3]{\frac{Z}{Z_w}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_w}} \right),
 \end{aligned}$$

kde $X_w = 96,05$, $Y_w = 100$ a $Z_w = 118$ jsou souřadnice standardního iluminantu D65 (bílého světla) [15] a L^* , a^* a b^* jsou smluvní souřadnice prostoru CIELAB.

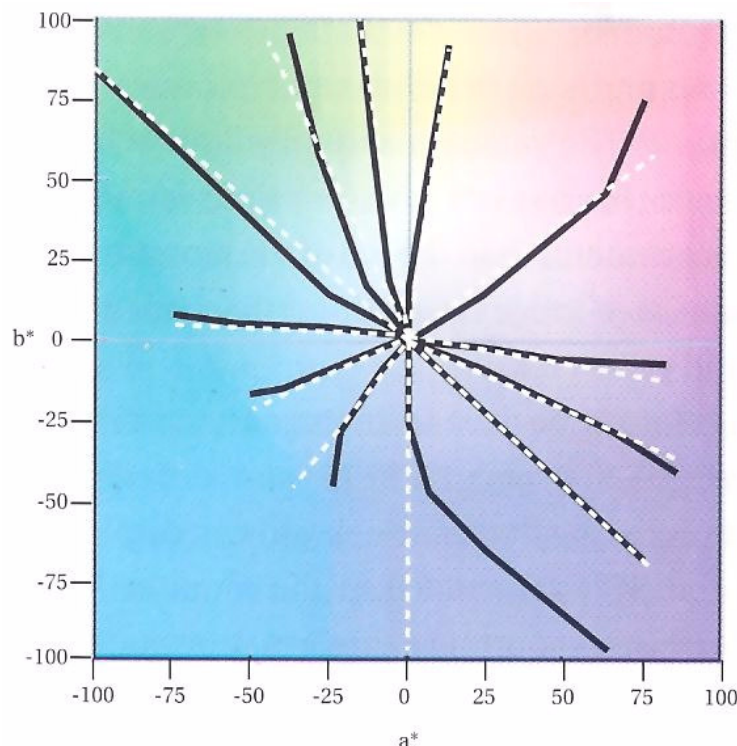
Dále se zavádějí doplňkové souřadnice pro barevnost (Chroma) a odstín (hue) umožňující obdobnou spektrální klasifikaci barev jako v systému HSV (systém $L^*C^*h_{ab}$), jako

$$\begin{aligned}
 C^* &= \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}, & (30) \\
 h_{ab} &= \arctg(b^*/a^*).
 \end{aligned}$$

Systém CIELAB je však unikátní zejména svou definicí pro měření rozdílu libovolných dvou barev jako jejich přímé vzdálenosti v prostoru $L^*a^*b^*$ [14]:

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}. \quad (31)$$

Z kolorimetrických výzkumů [20] prováděných během 80. a 90. let na rozsáhlých vzorcích vyplynulo zjištění, že standardní systém CIELAB obsahuje drobné odchylky od ideálního přiblížení ke schopnostem lidského oka, zejména v oblasti tmavších a více saturovaných indigových a červených barev (obr. 14) a další výzkum se proto zaměřuje na zpřesňování popisu ideálního psychometrického systému a na definici numerické formule pro přesné určování rozdílů mezi barvami (color difference formula).



Obr. 14 Odchylky ve vnímání psychometrického odstínu a odstínu v CIELABu [18].

Jedním z upřesnění je empirická formule $CMC(l:c)$, umožňující lepší rozlišení malých barevných rozdílů, než pomocí elementární formule (31):

$$CMC(l:c) = \sqrt{\left(\frac{\Delta E^*}{l} S_l\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{c} S_c\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_h}\right)^2}, \quad (32)$$

kde $S_l = \frac{0,040975L}{1 + 0,01765L}$ pro $L > 16$, jinak $S_l = 0,511$,

$$S_c = \frac{0,0638C}{1 + 0,0131C},$$

$$S_h = S_c \cdot (f \cdot T + 1 - f),$$

a kde \bar{L} , \bar{C} a \bar{h} jsou střední hodnoty $L_{1,2}$, $C_{1,2}$ a $h_{1,2}$, a

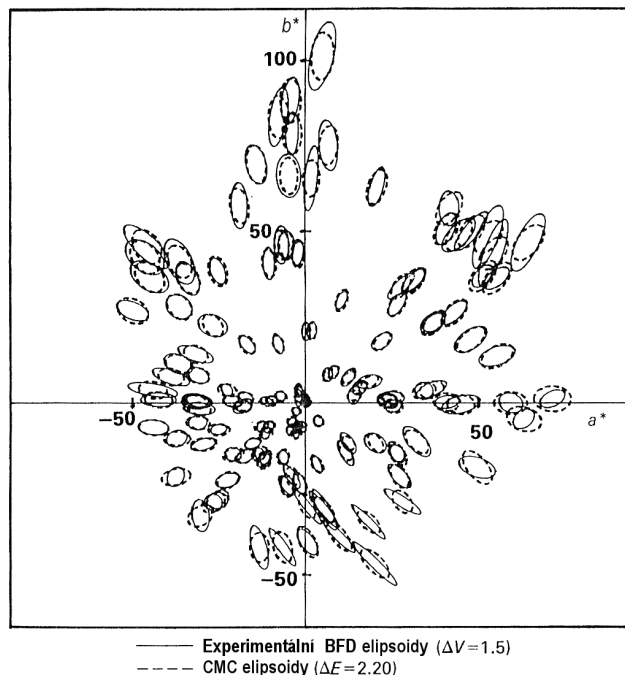
$$f = \sqrt{\frac{C^4}{(C^4 + 1900)}},$$

$$T = 0,36 + |0,4 \cos(h + 0,35)| \text{ pro } h \notin \langle 164, 345 \rangle, \text{ jinak}$$

$$T = 0,56 + |0,2 \cos(h + 168)|.$$

Nejmenší vizuálně rozeznatelný barevný rozdíl je pak definován jako $CMC(1:1) = 1$ [20].

Modifikací formule $CMC(l:c)$ je barevná diferenční formule $BFD(l:c)$, vycházející z rozsáhlých experimentálních měření Lua a Rigga [20], korigující nejen polohu (obr.14), ale i orientaci elipsoidů ohraničujících prostory s danou maximální velikostí vnímaného barevného rozdílu od referenční barvy (obr. 15).



Obr. 15 Srovnání experimentálních elipsoidů stejného rozdílu barvy v BFD a CMC [20].

Barevná diferenční formule BFD ($l:c$) je opět empiricky definována jako

$$BFD(l:c) = \sqrt{\left(\frac{\Delta L(BFD)}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{c \cdot D_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{D_H}\right)^2 + R_T \cdot \frac{\Delta C^*}{D_c} \cdot \frac{\Delta H^*}{D_H}}, \quad (33)$$

kde $D_C = \frac{0,035\bar{C}^*}{1 + 0,00365\bar{C}^*} + 0,521$, $D_H = D_c(GT' + 2 - G)$,

$$T' = 0,627 + 0,055 \cos(\bar{h} - 254^\circ) - 0,040 \cos(2\bar{h} - 136^\circ) + 0,070 \cos(3\bar{h} - 32^\circ) + 0,049 \cos(4\bar{h} + 114^\circ) - 0,015 \cos(5\bar{h} - 103^\circ),$$

$$G = \sqrt{\frac{\bar{C}^{*4}}{\bar{C}^{*4} + 14000}}, \quad R_T = R_H R_C, \quad R_C = \sqrt{\frac{\bar{C}^{*6}}{\bar{C}^{*6} + 7 \cdot 10^7}},$$

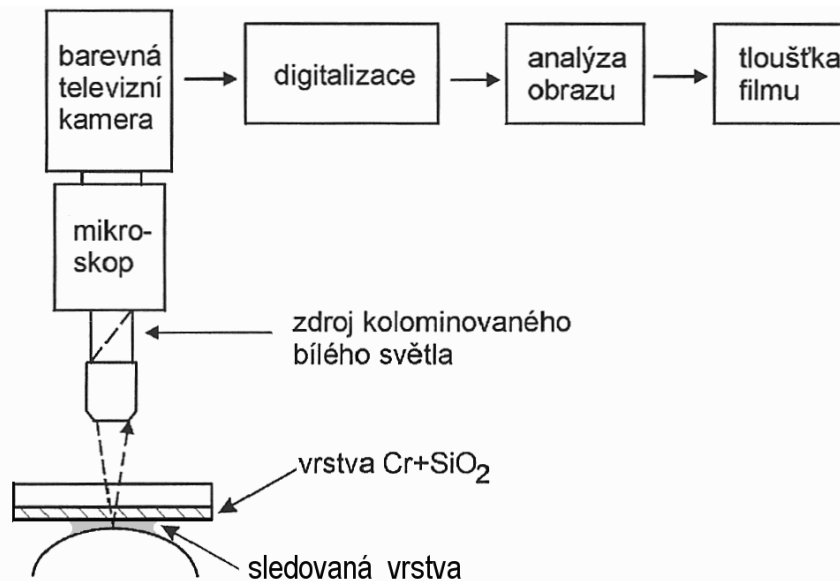
$$R_H = -0,260 \cos(\bar{h} - 308^\circ) - 0,379 \cos(2\bar{h} - 160^\circ) - 0,636 \cos(3\bar{h} + 254^\circ) + 0,226 \cos(4\bar{h} + 140^\circ) + (0,194 \cos 5\bar{h} + 280^\circ) \text{ a}$$

$$L(BFD) = 54,6 \log(Y + 1,5) - 9,6.$$

3. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je návrh metodiky pro barevné vidění, kombinující interferometrii v bílém světle s kolorimetrickými metodami interpretace barev a specializované pro studium tenkých vrstev maziva.

Disertační práce se v teoretické části zaměří na možnosti kolorimetrické analýzy chromatických interferogramů a na výběr optimální metody identifikace interferenčních barev se srovnávacím etalonem ve formě numerického modelu. Experimentální část práce se soustředí na provedení testů na optickém tribometru [21].



Obr. 16 Schéma funkce interferenčního tribometru na principu kulička-disk.

Experimentální aparatura (obr. 16) sestává ze tří základních částí:

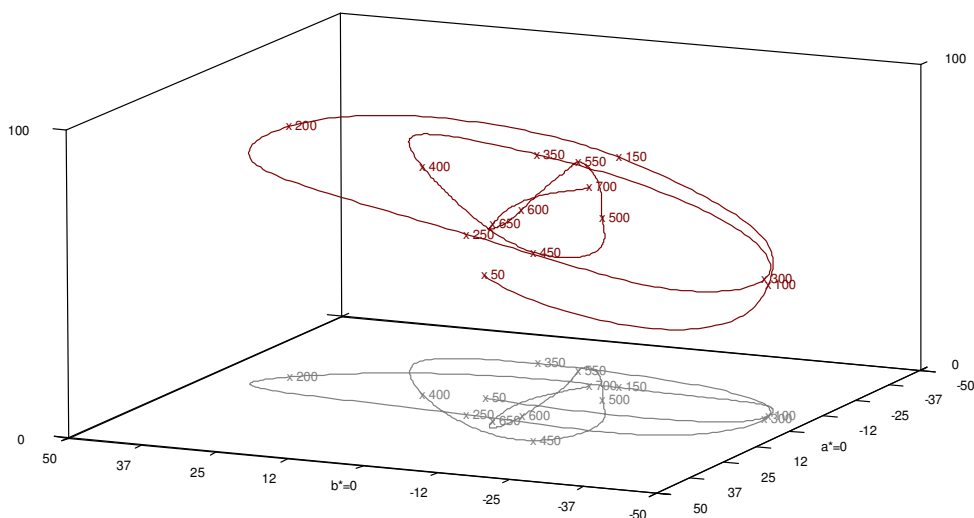
- simulátoru,
- mikroskopového zobrazovacího systému a
- řídicí a vyhodnocovací jednotky.

Princip simulátoru vychází z koncepce navržené R. Goharem [22]. Tenký mazací film je vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou, přičemž osy rotace obou třecích povrchů jsou navzájem kolmé. Horní strana kotouče je pokryta protiodrazovou vrstvou, spodní pak odraznou vrstvou chrómu a případně distanční mezivrstvou oxidu křemičitého (Spacer Layer) o tloušťce cca 200 nm [23, 24]. Kontakt je zatěžován přes skleněný kotouč zavěšený spolu s pohyblivým závažím na dvojzvrtné páce. Oba třecí povrchy mohou být nezávisle poháněny, teplotní stabilita tribologické soustavy je zajištěna tepelnou izolací komory zařízení a užitím uzavřeného vyhřívacího okruhu.

Mikroskopový zobrazovací systém je založen na průmyslovém mikroskopu Nikon Optiphot 150, který je doplněn sekundárním děličem svazku, zdrojem bílého světla o vysoké intenzitě a volitelným monochromatickým nebo dichromatickým filtrem. Sekundární dělič svazku umožňuje současné snímání chromatických interferogramů jak pomocí barevné televizní kamery, tak i vláknovým spektrometrem.

Oba přístroje jsou synchronizovány s pohybem kotouče, takže všechna měření jsou prováděna na stejném místě.

Řídící a vyhodnocovací jednotka sestává z osobního počítače vybaveného pro obousměrnou komunikaci jak se simulátorem, tak s kamerou a spektrometrem. Hlavním vstupem do tohoto systému jsou barevně snímané interferogramy proužků stejného chromatického řádu. Jak vyplývá z předchozí kapitoly, je k popisu interferenční barvy možné použít buď její spektrální distribuční funkci a nebo kolorimetrický aparát na bázi trojice souřadnic RGB nebo CIELAB (obr. 17). Běžně dosahovaný dynamický rozsah až 14 bitů při osmibitovém RGB záznamu přitom naznačuje možnost rozlišení až 0,1 nm [25].



Obr. 17 Typické barvy odpovídající hodnotám spektrální distribuční funkce v závislosti na rostoucí tloušťce vrstvy, zobrazené v kolorimetrických souřadnicích $L^*a^*b^*$.

Úkolem vyvíjeného systému barevného vidění bude zejména:

- Získání a zpracování dat potřebných pro adaptivní kalibraci na aktuální optické vlastnosti zkoumaného objektu za použití monochromatické interferometrie.
- Synchronní záznam obrazových a stavových informací v reálném čase do databáze, umožňující pozdější rekonstrukci průběhu měření.
- Schopnost v reálném čase i na záznamu provádět plošnou kolorimetrickou analýzu snímků a porovnáváním s dříve získanými kalibračními parametry identifikovat a rekonstruovat tloušťku vrstvy zkoumaného maziva.

V závěru experimentální části disertační práce bude provedeno srovnání možností představené metody barevného vidění a ostatních technik na jednom referenčním objektu.

4. Závěr

Pro potřeby měření tloušťky tenkých vrstev byla navržena optická experimentální metoda kombinující interferometrii v monochromatickém a bílém světle s kolorimetrickou interpretací interferenčních barev. Od tohoto přístupu je očekáváno dosažení přenosti pod 1 nm v pracovním rozsahu 0-1000nm s vysokou spolehlivostí a schopnost souvislého mapování ploch v reálném čase.

Experimentální aplikací je vytvoření počítačem řízeného systému barevného vidění, optimalizovaného pro mapování tloušťky tenkých mazacích filmů v tribometru na principu kulička-průhledný disk.

Hlavní přínosy disertační práce budou spočívat jednak v definování spolehlivých algoritmů pro optimalizovanou identifikaci interferenčních barev s tloušťkou tenké vrstvy na které vznikly, a dále v dokončení pokročilého počítačového systému pro automatizovanou analýzu barevných interferogramů, jakožto podkladů pro návazné studium dynamických tribologických jevů.

Podstatná část výsledků představeného výzkumu v oblasti aplikované počítačové diferenční kolorimetrie již byla uveřejněna v publikacích [7], [21], [25]-[27]. Experimentální část prací nadále probíhá v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

Literatura

- [1] REYNOLDS, O.: On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 177, 1886, s. 157-234.
- [2] KŘUPKA, I.-HARTL, M.-ČERMÁK, J.-LIŠKA M.: Elastohydrodynamic Lubricant Film Shape - Comparison between Experimental and Theoretical Results. In: Tribology for Energy Conservation (Proceedings of the 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1998, s. 221-232.
- [3] KIRK, M. T.: Hydrodynamic Lubrication of 'Perspex'. Nature, 194, 1962, s. 965-966.
- [4] GOHAR, R.-CAMERON, A: Optical Measurement of Oil Film Thickness under Elastohydrodynamic Lubrication. Nature, 200, 1963, s. 458-459.
- [5] JOHNSTON, G. J.-WAYTE, R.-SPIKES, H. A: The Measurement and Study of Very Thin Lubricant Films in Concentrated Contacts. Tribology Transactions, 34, 1991, s. 187-194.
- [6] GUSTAFSSON, L.-HÖGLUND, E.-MARKLUND, O.: Measuring Lubricant Film Thickness with Image Analysis. Proceeding Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 208, 1994, s. 199-205.
- [7] POLIŠČUK, R.: Počítačová analýza chromatických interferogramů. Diplomová práce. FSI VUT, Brno 1997.
- [8] VAŠÍČEK, A.: Měření a vytváření tenkých vrstev v optice. Praha, Nakladatelství ČSAV 1957.
- [9] FRANÇON, M.: Optical Interferometry. New York and London, Academic Press 1966.
- [10] TOLANSKY, S.: Multiple Beam Interferometry, Oxford 1948.
- [11] PLISKIN, W. A.: Nondestructive Optical Methods for Thin-Film Thickness Measurements, New York, Plenum 1968.
- [12] TADMOR, R.-CHEN, N.-ISRAELACHVILI, J. N.: Thickness and refractive index measurements using multiple beam interference fringes (FECO). In: Journal of Colloid and Interface Science 264, Elsevier Science B. V. 2003, s. 548-553
- [13] ANGHEL, V.-CANN, P. M.-SPIKES, H. A: Direct Measurement of Boundary Lubricating Films. In: Elastohydrodynamics - '96 (Proceedings of the 23rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1997, s. 459-466.
- [14] BOUMA, P. J.: Physical Aspects of Colour. London and Basingstoke, Macmillan and Co LTD 1971.
- [15] CIE Publication No.15. Paris, Bureau Central De La CIE 1978.
- [16] BILLMEYER, F. W.: Principles of Colour technology. New York, John Wiley & Sons 1981, s.37-44
- [17] FRASER, B.-Murphy, C.-Bunting, F.: Color Management, Berkeley, Peachpit Press 2002.

- [18] Schwartz, M.W.-Cowan, B.W.-Beatty, J.C.: An Experimental Comparison of RGB, YIQ, LAB, HSV and opponent color Models. *ACM Trans.Graph.* 6(2), 123-158 (1987).
- [19] SKALA, V.: Světlo, barvy a barevné systémy v počítačové grafice, ACADEMIA Praha 1993.
- [20] LUO, M.R.-Rigg., B.: BFD(l:c) Colour Difference Formula, New York, JSDC Vol.103, 1997.
- [21] HARTL, M.-KŘUPKA, I.,-POLIŠČUK R-LIŠKA M.: An Automatic System for Real-Time Evaluation of EHD Film Thickness and Shape Based on the Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*, 42, 1999, s. 303-309.
- [22] GOHAR, R.: A Ball-Plate Machine for Measuring Elastohydrodynamic Oil Films. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3G*, 182, 1967-1968, s. 43-45.
- [23] WESTLAKE, F. J.-CAMERON, A: A Study of Ultra-Thin Lubricant Films Using an Optical Technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3G*, 182, 1967-1968, s. 75-78.
- [24] CANN, P. M.-SPIKES, H. A-HUTCHINSON, J.: The Development of a Spacer Layer Imaging Method (SUM) for Mapping Elastohydrodynamic Contacts. *Tribology Transactions*, 39, 1996, s. 915-921.
- [25] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK R-LIŠKA, M.-MOLIMARD J.-QUERRY M.-VERGNE P.: Thin Film Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*, 44, 2001, s. 270-276.
- [26] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK R-LIŠKA M.: Computer-Aided Chromatic Interferometry. *Computer & Graphics*, 22, 1998, s. 203-208.
- [27] HARTL, M.-MOLIMARD J.-KŘUPKA, I.-VERGNE P.-QUERRY, M.-POLIŠČUK R.- LIŠKA, M.: Thin Film Lubrication Study by Colorimetric Interferometry. In: *Thinning Films and Tribological Interface Conservation (Proceedings of the 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology)*. Amsterdam, Elsevier Science B. V. 2000, s. 695-704.

Přehled publikační a grantové činnosti

ŘEŠITEL

Projekty ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky

1998 Aktivní účast na mezinárodní konferenci Nordtrib 98 (PG98297)

SPOLUŘEŠITEL

Granty Grantové agentury České republiky

2000-2002 Experimentální studium dynamických jevů v mazacích filmech kolorimetrickou interferometrií (č. 101/00/0155)

1998-1999 Vědecké centrum nanotechnologií a povrchového inženýrství (č. 101/97/K009)

2003- Studium únavového poškození elastohydrodynamicky mazaných třecích povrchů narušených vtiskem cizí částice (č. 101/03/0525)

Projekty ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky

1999 Presentace výsledků výzkumu na mezinárodní tribologické konferenci 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology (č. PG 99078)

1998-2003 Společný výzkum elastohydrodynamického mazání při neustálených provozních podmínkách (ME607)

2002-2003 Společný výzkum smíšeného mazání reálných povrchů (ME631)

1999-2003 Progresivní a nanostrukturní materiály (výzkumný záměr č. J22/98:262100002)

TVŮRČÍ A PUBLIKAČNÍ ČINNOST NA MEZINÁRODNÍM FÓRU

Původní články v mezinárodních vědeckých časopisech

- [1] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.-MOLIMARD, J.-QUERRY, M.-VERGNE, P.: Thin Film Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*, 44, duben 2001, č. 2, s. 270-276.
- [2] KŘUPKA, I.-HARTL, M.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: An Experimental Study of Elastohydro-dynamic Central and Minimum Film Thicknesses for Various Material Parameters. *Lubrication Science*, 12, květen 2000, č. 3, s. 239-251.
- [3] KŘUPKA, I.-HARTL, M.-POLIŠČUK, R.-ČERMÁK, J.-LIŠKA, M.: Experimental Evaluation of EHD Film Shape and Its Comparison With Numerical Solution. *Journal of Tribology - Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering)*, 122, říjen 2000, č. 4, s. 689-696.
- [4] KŘUPKA, I.-HARTL, M.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: Experimental Study of Central and Minimum Elastohydrodynamic Film Thickness by Colorimetric Interferometry Technique. *Tribology Transactions*, 43, říjen 2000, č. 4, s. 611-618.
- [5] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: An Automatic System for Real-Time Evaluation of EHD Film Thickness and Shape Based on the Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*, 42, duben 1999, č. 2, s. 303-309.
- [6] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: Computer-Aided Chromatic Inter-ferometry. *Computer & Graphics*, 22, březen-červen 1998, č. 2-3, s. 203-208.

Původní příspěvky do mezinárodních vědeckých knižních publikací

- [1] KŘUPKA, I.-HARTL, M.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: Experimental Study of Central and Minimum Film Thickness in Elastohydrodynamic Elliptic Contacts. In: DOWSON, D.: *Tribology Research: From Model Experiment to Industrial Problem*. Tribology Series 39. Amsterdam, Elsevier Science B. V. 2001, s. 495-504.
- [2] HARTL, M.-MOLIMARD, J.-KŘUPKA, I.-VERGNE, P.-QUERRY, M.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: Thin Film Lubrication Study by Colorimetric Interferometry. In: DOWSON, D.: *Thinning Films and Tribological Interface*. Tribology Series 38. Amsterdam, Elsevier Science B. V. 2000, s. 695-704.

Původní příspěvky na mezinárodních vědeckých konferencích publikované ve světovém jazyku ve sborníku

- [1] KŘUPKA, I.-HARTL, M.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: Experimental Study of Elastohydro-dynamic Lubrication by Colorimetric Interferometry. In: *Proceedings of 4th International and 8th Annual Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers*. Teheran, Sharif University of Technology 2000, s.247-254.
- [2] KŘUPKA, I.- HARTL, M.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: The Study of Dimple Phenomena in EHD Contacts. In: *VIIth International Symposium Intertribo '99 Proceeding*. Bratislava, Slovak University of Technology 1999, s. 81-84.
- [3] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: Experimental Study of Elastohydro-dynamic Central and Minimum Film Thickness for Various Material Parameters. In: *NORDTRIB '98: Proceeding of the 8th International Conference on Tribology*. Aarhus, Danish Technological Institute 1998, s. 329-335.
- [4] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: The Measurement and Study of Elasto-hydrodynamic Lubricant Films by Computer Processed Chromatic Interferograms. In: *International Conference on Measurement - Measurement 97 Proceeding*. Bratislava, Slovak Academy of Sciences 1998, s. 144-147.
- [5] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: Chromatic Interferogram Evaluation by Computer Differential Colorimetry. In: *AIC Color 97 (Proceeding of the 8th Congress of the International Colour Association)*. Tokyo, Color Science Association of Japan 1997, s. 407-410.
- [6] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK, R.-LIŠKA, M.: Computer-Aided Evaluation of Chromatic Interferograms. In: *Proceeding of the Fifth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualisation '97*. Plzeň, University of West Bohemia 1997, s. 45-54.