

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
BIOMEDICÍNSKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2018**

**LUCIE  
PORTOVÁ**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta biomedicínského inženýrství  
Katedra přírodovědných oborů

## **Povrchové úpravy brýlových čoček**

## **Surface treatment of spectacle lenses**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

**Autor bakalářské práce: Lucie Portová**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Písařík, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jan Mikšovský, Ph.D.

---

**Kladno 2018**

Katedra přírodovědných oborů

Akademický rok: 2017/2018

## Z a d á n í   b a k a l á ř s k é   p r á c e

Student:           **Lucie Portová**  
Obor:               Optika a optometrie  
Téma:               **Povrchové úpravy brýlových čoček**  
Téma anglicky:    Surface treatment of spectacle lenses

### Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :

V rámci bakalářské práce student provede rešerši používaných materiálů pro výrobu brýlových čoček a jejich povrchových úprav (jako např. antireflexní vrstvy, UV vrstvy, vrstvy zvyšující odolnost a trvanlivost). Popíše jejich základní parametry a zhodnotí jejich výhody a nevýhody. Student u čoček s jednotlivými vrstvami bude měřit jejich propustnost světla a odolnost vrstev proti opotřebení. Student vyhodnotí získaná data a porovná je s připravenou vrstvou diamantu podobného uhlíku.

### Seznam odborné literatury:

- [1] VESELÝ, P., ŠIMOVIČ, P., PETROVÁ, S., Konvenční a Free-Form technologie výroby brýlových čoček, ed. 1., NCONZO Brno, 2014, 141 s., ISBN 978-80-7013-566-2
- [2] BENEŠ, J., KYMPLOVÁ, J., VÍTEK, F., Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi, ed. 1, Praha: Grada, 2015, ISBN 978-80-247-4712-5
- [3] RANDULOVÁ, J., Sklo a plasty jako materiály brýlových čoček, povrchové úpravy brýlových čoček, 2010, Brno, Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně

Zadání platné do:   20.09.2019  
Vedoucí:            Ing. Petr Písařík, Ph.D.  
Konzultant:        Ing. Jan Mikšovský, Ph.D.

.....  
vedoucí katedry / pracoviště

.....  
děkan

V Kladně dne 19.02.2018

## **Název bakalářské práce: Povrchové úpravy brýlových čoček**

### **Abstrakt:**

Bakalářská práce se zabývá brýlovými čočkami, jejich materiály a povrchovými úpravami (tvrzení, antireflexní vrstva, hydrofobní vrstva, oleofobní vrstva, antistatická vrstva, reflexní vrstva, barvení, UV vrstva, fotochromatické čočky a polarizační čočky). Jsou zde popsány jejich základní parametry a zhodnoceny výhody a nevýhody. Experimentální část práce se věnuje transmisivitě čoček s jednotlivými úpravami a jejich tribologickým vlastnostem, tedy odolnosti proti opotřebení. Výzkum byl prováděn za pomoci spektrometru a tribometru. Z výsledku vyplývá, že transmisivita vrstev je závislá na základním materiálu čočky. Čočky s indexem lomu 1,5 (CR-39) mají výrazně vyšší propustnost než čočky s indexem lomu 1,6 (MR-8) a 1,68 (MR-10). Čočky s vyšším indexem lomu pak poskytují vyšší ochranu před UV zářením. Testy na tribometru prokázaly, že větší odolnost mají čočky se speciálními vrstvami, než čočky s běžným tvrzením a antireflexní úpravou. Kromě komerčních vrstev byly připraveny a testovány čtyři čočky s vrstvou diamantu podobného uhlíku (DLC).

### **Klíčová slova:**

Materiály brýlových čoček, tvrzení brýlových čoček, antireflexní vrstva, fotochromatické čočky, polarizační čočky

## **Bachelor's Thesis title:** Surface treatment of spectacle lenses

### **Abstract:**

The bachelor thesis deals with glass lenses, their materials and finishes (hard coating, antireflective layer, hydrophobic layer, oleophobic layer, antistatic layer, reflective layer, dyeing, UV layer, photochromatic lenses and polarized lenses). Their basic parameters, advantages and disadvantages are described here. The experimental part deals with transmissivity of lenses with individual modifications and their tribological properties. The research was carried out using a spectrometer and a tribometer. The result is that the transmissivity of the layers is dependent on the base material of the lens. Lenses with a refractive index of 1.5 (CR-39) have a significantly higher throughput than a lens with a refractive index of 1.6 (MR-8) and 1.68 (MR-10). Lenses with a higher refractive index then provide higher UV protection. Tribological tests have shown that lenses with specific coatings are more resistant than lenses with conventional hard coatings and antireflective layers. In addition to commercial layers, four lenses with a diamond like carbon (DLC) were prepared and tested.

### **Key words:**

Spectacle lenses, hard coating, antireflective layer, photochromatic lenses, polarization lenses

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu Ing. Petrovi Písaříkovi, Ph.D za vedení mé práce, za jeho čas a cenné rady. Dále bych ráda poděkovala paní Lence Krkavcové z firmy Omega Optix za provedení po výrobní části firmy a vysvětlení jednotlivých kroků při výrobě čoček.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Povrchové úpravy brýlových čoček“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V *Kladně* dne .....

.....

podpis

# Obsah

Úvod .....	1
1 Materiály brýlových čoček .....	2
1.1 Minerální čočky .....	2
1.2 Organické čočky .....	3
2 Povrchové úpravy brýlových čoček .....	6
2.1 Tvrzení .....	6
2.1.1 Tepelné tvrzení minerálních čoček .....	6
2.1.2 Chemické tvrzení minerálních čoček .....	6
2.1.3 Tvrzení organických čoček ponořením do tvrdícího laku .....	7
2.1.4 Tvrzení organických čoček rotačním nanášením tvrdícího laku .....	7
2.1.5 Tvrzení organických čoček ve formě .....	8
2.1.6 Vakuové tvrzení organických čoček .....	8
2.2 Antireflex .....	8
2.3 Hydrofobní a oleofobní úprava, antistatická vrstva .....	10
2.4 Anti Fog .....	11
2.5 Barevné čočky .....	11
2.5.1 Barvení minerálních čoček .....	11
2.5.2 Barvení organických čoček .....	12
2.5.3 Reflexní vrstva .....	12
2.6 Čočky s UV filtrem .....	13
2.6.1 Vliv UV záření na oko .....	13
2.6.2 Implementace UV absorbéru .....	14
2.6.3 Čočky chránící před modrým světlem .....	14
2.7 Fototropní čočky .....	14
2.7.1 Minerální fototropní čočky .....	15
2.7.2 Fototropní organické materiály .....	15
2.8 Polarizační čočky .....	16
2.9 Fotopolarizační čočky .....	17
2.10 DLC vrstva .....	18



---

3	Experimentální část .....	19
3.1	Přístroje použité pro výzkum .....	19
3.1.1	Spektrometr .....	19
3.1.2	Tribometr .....	19
3.2	Testované čočky .....	21
3.2.1	Čočky bez povrchových úprav .....	21
3.2.2	Tvrzená čočka.....	22
3.2.3	Vrstva HMC .....	23
3.2.4	Vrstva HMC+ a SHMC .....	25
3.2.5	Brýlová čočka Omega MAX a Omega MAX UV.....	27
3.2.6	Povrchová úprava LotuTec.....	29
3.2.7	Povrchová úprava DuraVision Platinum .....	30
3.2.8	Čočky s ochranou proti modrému světlu.....	31
3.2.9	Čočky pro řidiče .....	33
3.2.10	Vrstvy DLC .....	34
3.2.11	Výsledky měření.....	36
4.	Diskuse .....	39
	Závěr.....	40
	Seznam použité literatury .....	42
	Seznam symbolů a zkratek .....	45
	Seznam obrázků.....	46
	Seznam tabulek.....	47

## Úvod

Zrak je pro člověka nejdůležitějším z pěti smyslů. Až 80 % veškerých informací vnímáme zrakem. Umožňuje nám vnímat světlo, barvy, tvary a v neposlední řadě se podílí na vnímání prostoru. Protože pro většinu z nás je zrak samozřejmostí, neměli bychom zapomínat, že je o něj potřeba řádně pečovat a chránit. Nedílnou součástí našeho života by proto měly být brýle. Ať už se jedná o brýle dioptrické, které nám zajišťují ostré vidění, brýle sluneční, které chrání náš zrak před škodlivým UV zářením. Ani nositelé kontaktních čoček by na brýle neměli zapomínat, aby se jejich oči mohly „nadýchat čerstvého vzduchu“. Brýle by tedy měl mít každý, nehledě na to, jestli pociťuje potíže se zrakem nebo ne.

Ve své bakalářské práci se zabývám brýlovými čočkami a jejich povrchovými úpravami. V první kapitole představuji materiály, ze kterých se v současné době brýlové čočky vyrábí. V kapitole druhé se zaměřuji na povrchové úpravy brýlových čoček, tedy tvrzení čoček, antireflexní úpravu, hydrofobní úpravu, oleofobní úpravu, antistatickou úpravu, reflexní vrstvu atd. Dále představuji čočky barevné, fotochromatické a polarizační.

Třetí kapitola je věnována experimentální části mé práce. V té se zabývám zkoumáním transmisivity jednotlivých vrstev a jejich odolností proti opotřebení. K dispozici jsem měla čočky od firem Omega Optix, Zeiss a čočky s povrchovou vrstvou diamantu podobného uhlíku (DLC) vyrobené pro můj výzkum na společném pracovišti Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT a 1. lékařské fakulty UK na Albertově v laboratoři excimerového laseru. Transmisivita byla zkoumána pomocí spektrometru. Z naměřených dat jsem vyhodnocovala propustnost čoček pro UV záření, rychlost vzrůstu propustnosti čočky mezi UV oblastí a viditelnou oblastí spektra, průměrnou transmisivitu čočky a její maximální naměřenou hodnotu. Opotřebení čoček jsem zkoumala pomocí tribometru. Každá vrstva byla testována pro zátěž 0,25 N celkem pětkrát na pěti různých testovaných vzdálenostech (1, 2, 3, 5 a 10 m). Pomocí mikroskopu jsem pak vyhodnocovala odolnost jednotlivých vrstev proti opotřebení a šíře případných vrypů v čočce. Na závěr byly výsledky testů vyhodnoceny a diskutovány.

Cílem mojí práce je najít optimální řešení mezi transmisivitou, UV ochranou a odolností vrstvy proti opotřebení.

# 1 Materiály brýlových čoček

Prvním materiálem, ze kterého se začaly vyrábět brýlové čočky, bylo sklo. Historie skla jako optické pomůcky sahá do 13. století, kdy italští mniši začali sklo brousit a používat jako tzv. čtecí kameny. O 200 let později pak byly zhotoveny brýle vizuálně podobné dnešním brýlím. Na konci 18. století se pak začaly vyrábět brýle s jednou čočkou, tzv. monokly. Ve Francii se pak staly oblíbené brýle s nosní svorkou neboli cvikry. První optické materiály, které by mohly nahradit sklo, se začaly objevovat ve 20. letech 20. století. Prvním materiálem byl polymethylmetakrylát (PMMA), od jeho používání se však kvůli jeho nízké odolnosti proti mechanickému poškození ustoupilo. Během 2. světové války nastal rozvoj materiálů, které se v pozdější době ukázaly jako vhodná náhrada skla. [1,2]

Dnes brýlové čočky dělíme podle materiálu na 2 skupiny - čočky minerální a čočky z organických materiálů, mezi které patří např. CR 39, polymethylmetakrylát (PMMA), polykarbonát (PC) nebo Trivex. [2,3]

Výhodou minerálních čoček je především jejich vysoká odolnost proti poškrábání. Díky své hustotě jsou navíc skleněné čočky tenčí než čočky plastové, mají také velký rozsah indexů lomu, od 1,5 do 1,9, což je u vysokých dioptrií přínosem zejména z estetického hlediska. Oproti plastovým čočkám mají mnohem lepší optické vlastnosti a vytváří méně chromatických vad. Nedají se však použít do všech typů brýlových obrub. [2,3]

Oproti tomu plastové čočky jsou mnohem lehčí, a tedy pohodlnější na nošení. Jejich další výhodou je vysoká odolnost proti rozbití, navíc se plastové čočky neroztříští, jsou tedy pro nositele mnohem bezpečnější než čočky skleněné, které jsou křehké a snadno se rozbijí. Jejich nevýhodou je potom menší rozsah indexů lomu, a to mezi 1,5–1,74. [2,3]

## 1.1 Minerální čočky

Sklo je amorfní materiál. Při běžné teplotě (23 °C) se vyskytuje v pevném skupenství a lze ho rozbít, pokud však teplotu zvýšíme, přivedeme tak sklo do viskózního stavu. Sklo získáváme z tzv. sklářského kmene. Ten se v teplotě okolo 1500 °C přivádí do stavu taveniny. [3,4]

Standardní sklářský kmen obsahuje přibližně 70 % tzv. sklotvorných oxidů (oxid křemičitý ve formě křemenného písku, oxid boritý a oxid fosforečný), 20 % tavidel (uhličitan sodný a uhličitan draselný), stabilizátory (oxid vápenatý), odbarvovače, barviva a další přísady. Abychom zajistili vysokou teplotu, používáme tavidla. K zajištění chemické stálosti, mechanické pevnosti a tvrdosti skla pak používáme stabilizátory. Oxid hlinitý, oxid zinečnatý

a oxid manganatý pak zajišťuje zpevnění skla. Díky oxidu olovnatému a oxidu barnatému pak můžeme měnit index lomu skla na požadovanou hodnotu. [3,4]

V první fázi zahříváme kmen v tavicí peci na teplotu 1200 °C. Při tomto procesu probíhá velké množství fyzikálně-chemických reakcí, během kterých vzniká velké množství plynů, zejména oxid uhličitý. Během druhé fáze proto do sklářského kmene přidáváme čeřiva, která mají za úkol odstranit vzniklé bubliny a plyny z taveniny. V poslední fázi sklo stáčíme do přehřátých van, ve kterých dochází k chlazení. Chlazení může trvat až několik měsíců a jeho způsob umožňuje malé úpravy indexu lomu a disperze skla. [3,4]

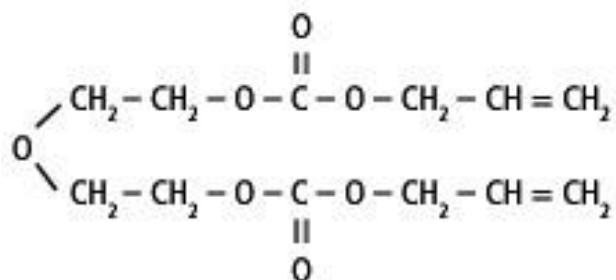
## 1.2 Organické čočky

Materiály pro výrobu organických brýlových čoček dělíme na dvě hlavní skupiny – termoplasty a reaktoplasty. **Termoplasty** jsou plasty, které lze působením tepla tavit. Pokud na termoplast působíme zvýšenou teplotou na hranici teploty tání, plast měkne a lze ho následně upravovat (např. tvarovat, lisovat, ohýbat, vyfukovat, táhnout). Při dalším zahřívání termoplast zkapalní. V kapalném stavu lze termoplast zpracovávat dalšími technologiemi (např. vstřikováním). Následným ochlazením plast ztuhne, jeho vlastnosti se však podstatně nemění. Tento fyzikální proces lze opakovat. Z materiálů pro výrobu brýlových čoček sem řadíme například polymethylmetakrylát (PMMA) nebo polykarbonát (PC). Čočky se nejčastěji vyrábí lisováním. [2,3]

**Reaktoplasty** neboli termosety jsou plasty teplem tvrditelné. Nejčastější metodou výroby je metoda lití (casting), kdy je k tekutému reaktoplastu přidáno tvrdidlo, které se s reaktoplastem smísí a dále se zpracovávají. Při zahřátí měknou a následným zahříváním dochází k jejich vytvrnutí. Po vytvrnutí je není možné dále tvarově měnit. V brýlové optice používáme nejčastěji materiál CR-39. [3]

Nejběžnějším materiálem pro výrobu organických brýlových skel je od roku 1955 **CR-39** (allyldiglykolkarbonát – ADC). Plast byl vyvinutý v roce 1940 společností Columbia Southern Chemical Company, dceřinou společností PPG Industries' (Pittsburgh Plate Glass). Ta zkoumala v průběhu 2. světové války možnosti netermoplastických materiálů. Její projekt nesl název "Columbia Resins". 39 je potom pořadové číslo zkušební směsi monomeru ADC, která se ukázala jako nejvýznamnější, a to díky svým jedinečným vlastnostem. Strukturní vzorec materiálu CR-39 je znázorněn na obrázku 1. Největší výhodou tohoto materiálu oproti skleněným čočkám je jeho hmotnost, čočky z CR-39 jsou přibližně o 40 % lehčí než čočky skleněné. Oproti jiným plastovým materiálům je pak více odolný proti poškrábání a rozbití.

Materiál je nepropustný pro UV záření do vlnové délky 355 nm. Materiál je snadno barvitelný, navíc jeho kopolymer CR-307 umožňuje adsorpci fotoaktivních molekul – používá se tak pro výrobu fototropních brýlových čoček. Jeho nevýhodou je pak nízký index lomu, a to v rozmezí 1,49 – 1,5. lze jej tak použít pouze u nižších dioptrií. [3,5,6,7]



**Obrázek 1:** Strukturální model CR-39 [6]

Materiály **MR** používáme k výrobě vyšších indexů lomu čoček. Tyto materiály vyvíjela v 90. letech 20. století japonská společnost Mitsui Toatsu Chemicals. Jejich největší výhodou je jejich hmotnost a tloušťka (s narůstajícím indexem lomu hmotnost i tloušťka čočky klesá). Další výhodou je 100 % UV filtr, který nepropouští světlo do vlnové délky 400 nm. Vysokoindexové čočky jsou velmi odolné proti mechanickému rozbití, jsou tak vhodné pro vrtané a vázané brýle. Nevýhodou je pak nízká odolnost proti povrchovému poškození. Další nevýhodou je, že se zvyšujícím se indexem lomu čočky klesá propustnost světla čočkou a klesá také hodnota Abbeova čísla, tedy se zvyšuje chromatická vada čočky. Pro výrobu čoček s indexem lomu 1,6 používáme materiál MR-8, pro index lomu 1,67 používáme MR-10 a pro čočky s indexem lomu 1,74 používáme materiál MR-74. [5,8]

**Polykarbonát (PC)** je termoplast s dobrými vlastnostmi pro tváření, odlévání a vstřikování. Poprvé byl vyroben v roce 1955. je to polymer s amorfni strukturou. Strukturu tvoří atomy uhlíku, metylové radikály a zbytek fenolu. Jeho výhodou je především velká odolnost proti nárazu. Díky svým dobrým mechanickým vlastnostem je vhodný pro vrtané brýle. Další výhodou je nízká hustota, díky které je oproti skleněným čočkám až o 50 % lehčí. Materiál je dobře barvitelný a nepropustný pro UV záření do 380 nm. Jeho nevýhodou je pak nízké Abbeovo číslo (30) a tedy horší optické vlastnosti. Polykarbonát je snadno napadán rozpouštědly (např. aceton). [3,7,9]

**Polymethylmetakrylát (PMMA)** je zdravotně nezávadný termoplast. Poprvé byl vyroben ve 20. letech 20. století v Německu a jeho využití bylo převážně pro vojenské účely. Materiál je dobře opracovatelný a díky své nízké hustotě je oproti skleněným čočkám o 50 % lehčí. Dále

je velmi houževnatý, nevytváří ostré střepy. Jeho další výhodou je vysoká hodnota Abbeova čísla (58). Nevýhodou je pak nízký index lomu – 1,49. Dále je snadno napadán rozpouštědly a snadno poškrábatelný. Od jeho používání se však začalo ustupovat a dnes se pro běžnou výrobu brýlových čoček nepoužívá. [3]

**Trivex** je polyuretanový polymer. Brýlové čočky z Trivexu jsou vyráběny metodou odlévání, díky tomu nemají vnitřní pnutí a čočka je tak odolnější. Materiál je vysoce odolný proti chemickým a mechanickým vlivům (v armádě se používá např. na výrobu neprůstřelných skel vrtulníků). Díky tomu je nevhodnějším materiálem pro výrobu čoček do vrtaných obrub. Je velmi odolný proti nárazu, prasknutí či rozbití, a tedy vhodný pro dětské a sportovní brýle. Navíc ze všech materiálů pro výrobu brýlových čoček má nejnižší hustotu ( $1,1\text{g/cm}^3$ ) a tedy nejlehčí. Jeho index lomu je 1,53, toto číslo však můžeme navýšit smícháním Trivexu s vysokoindexovými materiály. Vysokoindexovými modifikacemi Trivexu jsou např. Hivex (1,57) nebo Tribid (1,6). Pro nositele pak poskytuje 100 % UV ochranu, materiál je nepropustný pro záření do vlnové délky 380 nm. Jeho nevýhodou je pak špatné opracovávání během broušení, materiál vytváří dlouhé třísky. [3,7,9]

## 2 Povrchové úpravy brýlových čoček

### 2.1 Tvrzení

Tvrzení provádíme jak u minerálních, tak u organických čoček. U každého materiálu má však tvrzení jiný význam. Zatímco u minerálních čoček nám jde především o ochranu nositele, u organických čoček chráníme povrch čočky. [2,3,10]

Čočky minerální jsou vysoce odolné proti poškrábání. Tvrzení za účelem zesílení této vlastnosti by tedy postrádalo svůj význam. Tyto čočky jsou ale velmi křehké a např. při pádu brýlí či při nárazu se snadno rozbijí a vytváří tak velké ostré střepy, které by mohly nositele poranit. Čočky tedy tvrdíme za účelem zpevnění, sklo se pak po nárazu roztrhne, ale na malé zaoblené kousky. Tvrzení provádíme tepelnou nebo chemickou metodou. [2,3,10]

Materiály organických čoček jsou oproti sklu měkčí, a tedy náchylnější na poškrábání. Čočku tedy tvrdíme, aby její povrch byl odolnější, a tedy se prodloužila životnost čočky. [2,3,10]

#### 2.1.1 Tepelné tvrzení minerálních čoček

Brýlovou čočku nejprve zahříváme na teplotu 650 °C po dobu 50–200 sekund (záleží na tloušťce čočky) a následně ji prudce ochladíme vzduchem nebo ponoříme do chladicí kapaliny. Čočka se tak ochladí na povrchu, zatímco jádro se ochlazuje pomaleji. Vznikne tak tlakové napětí působící směrem dovnitř čočky, v jádře pak vzniká napětí tahové. Tento způsob tvrzení je jednoduchý, rychlý a levný. Není však vhodný pro čočky s tenkou středovou tloušťkou, čočky s dioptriemi nad +/- 10 D, čočky s vysokými cylindry a bifokální čočky. U fototropních čoček můžeme touto metodou změnit barvu a rychlost zbarvení. [2,3]

#### 2.1.2 Chemické tvrzení minerálních čoček

Chemicky můžeme tvrdit pouze skla obsahující sodíkové ionty. Čočku ponoříme do roztoku dusičnanu sodného s malým množstvím kyseliny křemičité. Při teplotě 400 °C čočku zahříváme po dobu 16 hodin. Během ponoření se ze skla uvolňují sodíkové ionty, které jsou nahrazeny ionty draselnými. Vzhledem k rozdílným velikostem draselných a sodíkových iontů dochází po vychlazení ke smrštění skla. Tato metoda tvrzení je efektivnější než metoda tepelná, protože nezáleží na tloušťce tvrzeného skla, je však časově a finančně náročnější, a tedy méně používaná. [2,3]

### 2.1.3 Tvrzení organických čoček ponořením do tvrdícího laku

Metoda tvrzení čoček ponořením do tvrdícího laku neboli Dip coating je nejběžnější metodou pro tvrzení organických čoček. Zároveň jde ale také o metodu nejnáročnější a vyžadující naprostou čistotu během celého procesu. [3]

Brýlovou čočku musíme nejprve zbavit veškerých nečistot, otisků apod. Dokonalá čistota čočky nám zajistí dokonalou adhezi mezi lakem a čočkou. Pokud chceme tvrdit vysokoindexový materiál, musíme použít ještě mezivrstvu mezi čočkou a lakem, tzv. primer, kterou zajistíme větší adhezi. Čočky umístíme do stojanů, které vložíme do stroje s laky. V těchto strojích musí být konstantní teplota všech médií, proudění a vlhkost vzduchu, stejně tak se kontroluje koncentrace laků. Čočky ponoříme do tvrdícího laku. Následné vynořování nám ovlivní tloušťku tvrzené vrstvy – čím rychleji čočku vynoříme, tím bude vrstva silnější. Tento proces trvá přibližně 1 hodinu. Čočky poté položíme do vodorovné polohy, aby se vrstva laku rovnoměrně rozlila po celém povrchu čočky, a vložíme do polymerizační pece. V té jsou čočky při teplotě 100-120 °C až 4 hodiny (záleží na materiálu čočky). [2,3]

Tvrdící lak se skládá z oxidu křemičitého a oxidu titaničitého. Jeho hustotu lze změnit přidáním metanolu a T-butylalkoholu. Jeho index lomu by měl přibližně odpovídat indexu lomu tvrzené čočky (index matching), čímž eliminujeme nerovnosti povrchu čočky. V případě, že by se na čočce objevily nečistoty, můžeme lak odstranit pomocí hydroxidu draselného a čočku lakovat znovu. [3]

Tloušťka nanášené vrstvy je obvykle 2 (+/- 0,5)  $\mu\text{m}$ . Takto silná vrstva zajistí čočce povrchovou odolnost proti poškrábání. Větší vrstva by zapříčinila menší odolnost proti otěru, menší pak snižuje povrchovou tvrdost čočky. [3]

### 2.1.4 Tvrzení organických čoček rotačním nanášením tvrdícího laku

Druhá metoda používaná pro tvrzení organických čoček je pomocí rotace. Tuto metodu nazýváme Spin coating. Brýlovou čočku očistíme pomocí methanolu a isopropylalkoholu a upneme na rotující zařízení. Na střed čočky pak aplikujeme proud laku (převážně o indexu lomu 1,5), který se díky rotaci rozprostře po celé ploše čočky. Tuto technologii používáme při výrobě malých sérií brýlových čoček. Polymerizace se dosahuje během několikaminutového působení UV-zářením. Celkové zalakování jedné strany čočky trvá přibližně 5 minut. Tloušťka vrstvy je řádově 3-5 mikronů. Metoda je velice jednoduchá a rychlá, ale ve výsledku méně odolná proti poškrábání. Lak je měkčí v porovnání s DIP metodou. Výhodou je, že tato vrstva má vysokou savost a je ji možné dobře barvit, čehož se využívá hlavně u čoček s vyšším



indexem lomu. Tato technologie není tak náročná na čistotu jako DIP, protože přístroje mají vlastní mikroklima. [3]

### 2.1.5 Tvrzení organických čoček ve formě

Jak už sám název napovídá, touto metodou tvrdíme čočku již ve formě při jejím formování. Nejprve formu zahřejeme a otevřeme. Následně do formy vložíme silikonový vak, obsahující zahřátý roztok aktivovaného termosetu s iniciátorem a metalickou solí. Uvnitř silikonového vaku se pak za pomoci tlaku (30-130 kPa na 1,5-5 minut) vytvoří tenká vrstva laku naléhající na vnitřní stranu formy. Následně pak do formy vstříkneme termoplastickou hmotu, která zformuje výsledný tvar brýlové čočky. Vrstva tvrdícího laku k materiálu čočky velmi dobře přilehne, nelze ji však dodatečně barvit. [3]

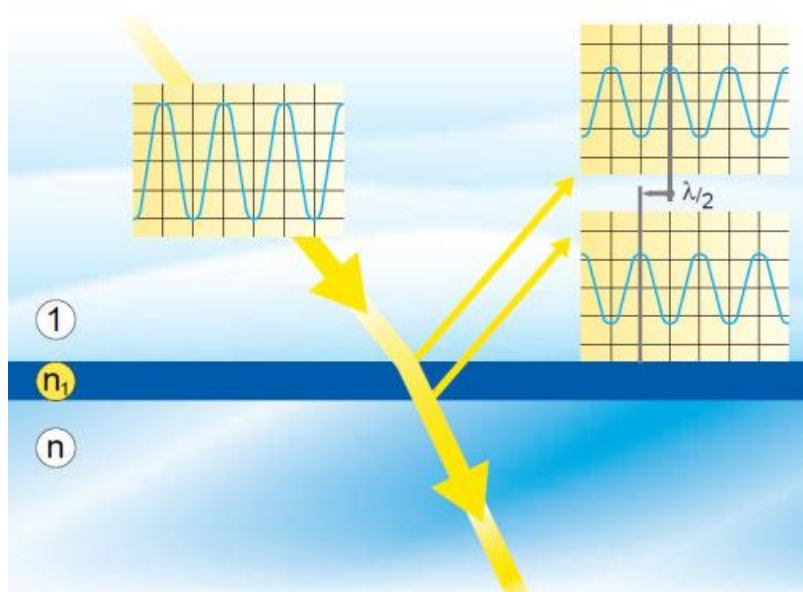
### 2.1.6 Vakuové tvrzení organických čoček

Principem této metody je vakuové nanesení tenké vrstvy na povrch brýlové čočky. Ve většině případů se nanáší molekuly oxidu křemičitého mezi základní metody řadíme metodu PVD (Physical Vapor Deposition), kde se nanášené atomy odpařují z pevného povrchu zdrojového materiálu, metodu LP – CVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition), u které jde o chemickou evaporaci základního materiálu, který je rozkládán chemicky nebo teplem, nebo metoda PECVD (Plasma-enhanced CVD), kterou lze použít zároveň s nanášením antireflexní vrstvy. [3]

## 2.2 Antireflex

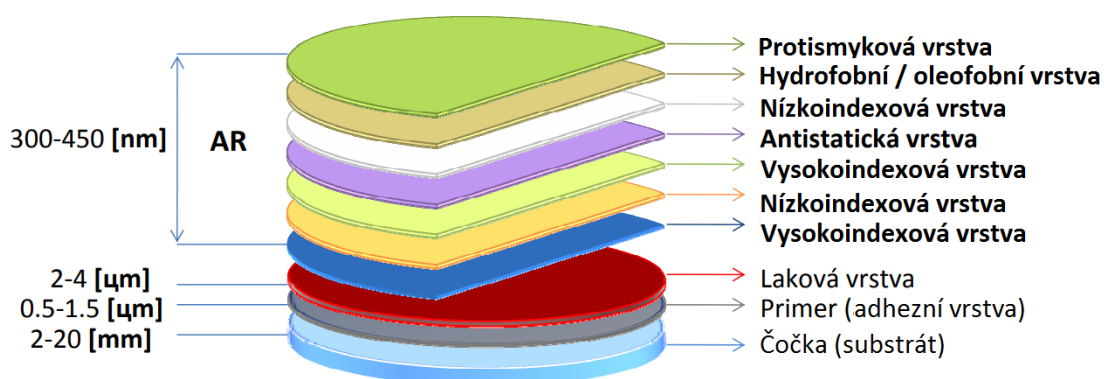
Každý materiál brýlových čoček způsobuje nežádoucí odrazy (parazitické efekty) a absorpci světla. Na sítnici oka se tedy paprsky nezobrazí v bodě, nýbrž ve skvrně. Dva body v prostoru tak můžeme vnímat jako bod jeden. Výrazně se tedy snižuje kontrastní citlivost oka. To může způsobovat bolesti hlavy a únavu očí, obzvláště při používání počítače a nočním řízení. K eliminaci odrazů brýlových čoček slouží antireflexní (AR) úpravy, a to pomocí tzv. destruktivní interference. [2,3,11,12]

Aby se dvě světelné vlny mohly eliminovat, musí být posunuty o polovinu vlnové délky – fázová podmínka. Zároveň musí být splněna i amplitudová podmínka, tedy že velikost obou amplitud světelných vln musí být stejná. Tloušťka antireflexní vrstvy je tak přesně definovaná, musí dosahovat  $\frac{1}{4}$  vlnové délky světla, aby došlo k vyrušení odrazů. Tento princip vidíme na obrázku 2. [2,3]



Obrázek 2: Princip antireflexu [3]

První antireflexní vrstvy byly jednovrstvé, v dnešní době se nanáší až 10 vrstev. Poslední nanesená vrstva bývá hydrofobní, popř. oleofobní. U některých čoček se nanáší i protismyková vrstva, která se aplikuje kvůli broušení, po zabroušení čočky do obruby je tato vrstva odstraněna. Složení čočky s antireflexní vrstvou je znázorněno na obrázku 3. [2,3,11]



Obrázek 3: Složení čočky s AR úpravou [11]

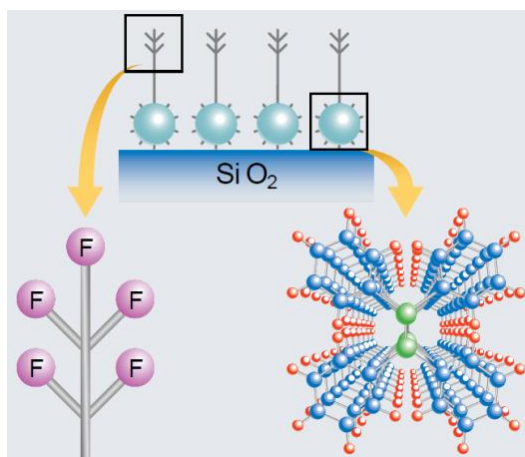
„Při nanášení antireflexu je nutné zajistit, aby vrstva měla konstantní a specifickou hodnotu indexu lomu, byla absolutně transparentní, měla konstantní tloušťku, výbornou přilnavost k čočce, povrch byl tak hladký, jako je povrch brýlové čočky a optické vlastnosti byly podobné podkladu.“ To umí zajistit technologie vakuového nanášení antireflexu (PVD), která je nejběžnější metodou nanášení. [2,3,11]

Materiály (anorganické oxidy kovů) s různými indexy lomu jsou vypařované elektronovým paprskem na povrch brýlových čoček ve vysokém vakuu o přesně stanovené váze. PVD má tři metody vakuového napařování: tepelná (Thermal Evaporation Deposition), plasmatická (Plasma Sputtering Deposition) a iontovým svazkem (Ion Beam Assisted Deposition). Technologie má celkem 3 kroky – sublimace materiálu, atomy nebo molekuly materiálu prochází vakuem k cílovému povrchu, a nakonec usazování materiálu na povrchu cílového povrchu. [2,3,11]

Nejčastěji používanými oxidy jsou  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Ti_3O_5$ ,  $Ti-Al-O$ ,  $Ta_2O_5$ . [3,11]

### 2.3 Hydrofobní a oleofobní úprava, antistatická vrstva

Antireflexní vrstva je díky nanášení ve více vrstvách pórovitá, a tudíž náchylnější na usazování prachu a jiných nečistot. Proto na její povrch nanášíme ještě hydrofobní a oleofobní (neboli lipofobní) vrstvu. Vrstvy nejčastěji nanášíme metodou dip coating, vakuově anebo plazmatickou polymerizací. Skládají se z fluoridů (fluoridované polysilazany) a hydrouhlíkových řetězců, ty obsahují specifické molekulární spojky, díky kterým se látky udržují na povrchu brýlové čočky. „Koncové části molekul jsou neutrální nebo nepolární. Na druhé straně tyto látky velice intenzivně odpuzují vodu a nečistoty.“ [2,3,12]



Obrázek 4: Struktura hydrofobní vrstvy [3]

**Antistatickou vrstvu** se nanášíme současně s antireflexní vrstvou. Jedná se o elektricky vodivý povlak, který snižuje nebo dokonce zcela zamezuje vzniku statické elektřiny na povrchu brýlové čočky, který by způsoboval větší přilnavost čočky k prachu a nečistotám. Pomocí antistatické vrstvy tedy snižujeme její přilnavost a tím zabraňujeme usazování prachu a nečistot na povrchu čočky. [2,3,13]

## 2.4 Anti Fog

Anti Fog je relativně nová úprava brýlových čoček. Jejím úkolem je zrychlit dobu odpařování zamlžených čoček a tím zajistit větší komfort nositele při změně teploty prostředí. Tuto vrstvu aplikujeme hlavně na plastové čočky, neboť na rozdíl od minerálních mají menší tepelnou vodivost. [3,14]

Na povrchu čočky je tenká vrstva, která zvyšuje smáčivost čočky, tedy zvyšuje povrchové napětí tekutiny a snižuje tak její kontaktní úhel. Voda kondenzující na brýlové čočce se tak spojí ve slabou vrstvu, která se pak rychleji odpařuje a čočka zůstává stále transparentní (obr. 5). Některé čočky s touto povrchovou úpravou musí být aktivovány speciální utěrkou, která tyto vlastnosti ještě umocňuje. [3,14]



Obrázek 5: Technologie optifog [3]

## 2.5 Barevné čočky

Barvení čoček lze provádět dvěma způsoby. Prvním způsobem je přidání barviva do materiálu ještě před vyrobením čočky, druhým způsobem je pak nanesení tenké vrstvy na povrch čočky. Tuto vrstvu nanášíme ještě před tvrzením, popř. nanesením AR vrstvy. Barvení minerálních a organických čoček se liší. [2,3]

### 2.5.1 Barvení minerálních čoček

Minerální čočku můžeme nabarvit tím, že barviva přidáme k základním surovinám už při výrobě skla. Tato barviva dělíme na iontová ( $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), molekulární (selen,  $\text{CdS}$ ,  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) a koloidní ( $\text{AuCl}_3$ ,  $\text{AgNO}_3$ ). Jedná se o složitý technologický proces, u kterého je výsledný odstín čočky závislý na chemickém složení skla, postupu zpracování a způsobu chlazení. [2]

Druhým způsobem pak můžeme čočku nabarvit nanesením tenké vrstvy kovu na povrch čočky. Čočku zahřejeme na teplotu mezi 200-300 °C a stejně jako u antireflexní vrstvy aplikujeme vrstvu pomocí vakuového napařování (PVD). Nejčastěji k barvení používáme směs chromových, molybdenových nebo titanových oxidů s křemíkem, oxidem křemičitým nebo fluoridem hořečnatým. [3]

### 2.5.2 Barvení organických čoček

První způsob, kterým můžeme barvit organické čočky je tzv. pevné barvení, kdy barvivo smícháme s monomerem ještě před procesem polymerizace. [3]

Druhým, a také používanějším způsobem je pak nanášení barvy na povrch čočky. Toto barvení provádíme ručně a správná intenzita barvy tak závisí převážně na zkušenostech odborníka. Čočku nejprve uchytíme do speciálních držáků a následně ponoříme do barvicího laku. U laku udržujeme konstantní teplotu kolem 90 °C (čím vyšší teplota, tím lépe barva proniká do materiálu čočky, nesmí však přesáhnou teplotu varu). Libovolnou barvu čočky získáváme míšením 3 základních pigmentů – červený, modrý, žlutý. Jiné složení barev v barvicím laku vyžadují vysokoindexové čočky. Délka procesu barvení se pak odvíjí od materiálu čočky, indexu lomu čočky, skladbě barev a požadované intenzity barvy. Jednu čočku tedy můžeme barvit v rozmezí 1 minuty až 4 hodin. Po vyjmutí z lázně čočku vložíme do roztoku vody se saponátem, který je zahřátý na teplotu 90 °C. Čočku tím neutralizujeme a eliminujeme tím zbytkovou barvu v materiálu. [2,3]

Speciální typ barvení provádíme u gradálních čoček. Ty jsou specifické tím, že intenzita barvy (někdy i barva samotná) je na horním a spodním okraji čočky rozdílná. Gradálního efektu docílíme tím, že čočku z barevné lázně vyjímáme a opět ponořujeme. Tento postup opakujeme až do požadovaného rozdílu intenzit barev. [2,3]

### 2.5.3 Reflexní vrstva

Nanesením reflexní, někdy také zrcadlové vrstvy, docílíme zvýšení odrazivosti na povrchu čočky. Reflexní vrstva je v podstatě protikladem antireflexní vrstvy, docílíme tedy konstruktivní interference, a tedy snížíme transparentnost čočky. [2,3]

Reflexní vrstvu nanášíme na přední stranu čočky, a to nejčastěji metodou vakuového napařování ve 4-6 vrstvách. Odrazivost čočky je pak závislá na indexu lomu (index lomu vrstvy je vyšší než index lomu čočky), absorpci nanášeného kovu a na intenzitě zbarvení. Zrcadlový efekt je pak nejčastěji modrý, zlatý nebo stříbrný a závisí na tloušťce nanesené vrstvy. [2,3]

Reflexní vrstvu využíváme nejčastěji u brýlí určených pro sportovce. Nositel reflexních čoček je pak chráněn nejen před oslněním, ale také před UV zářením. [2,3]

## 2.6 Čočky s UV filtrem

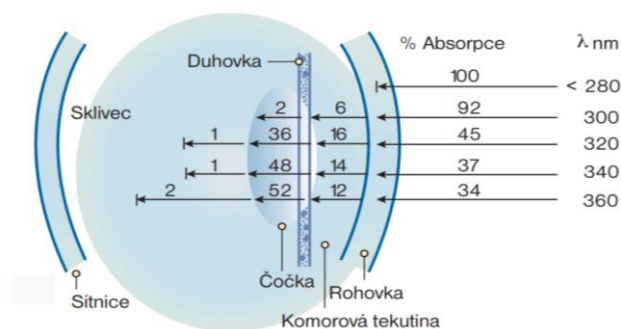
Ultrafialové záření má kratší vlnové délky než viditelné světlo. Je umístěno za modrým koncem viditelné části spektra elektromagnetického vlnění. Vlnová délka tohoto světla je v rozmezí 100-400 nm. UV záření dále dělíme na UV-A (blízké pásmo) o vlnových délkách 400 až 315 nm, UV-B (střední pásmo) o vlnových délkách 320-280 nm a UV-C (vzdálené pásmo) s vlnovými délkami 280-100 nm. UV záření dopadající na zemský povrch se skládá z 95 % z UV-A a z 5 % z UV-B záření. Záření UV-C je absorbováno ozonovou vrstvou. [15,16]

### 2.6.1 Vliv UV záření na oko

„Oko je chráněno před slunečním světlem reflexním stažením zorniček, které minimalizuje penetraci slunečních paprsků. Tato bariéra ale není stoprocentní a její omezení nastává zejména v případech jako je odraz UV záření ze země, vodní hladiny, písku nebo sněhu.“ [17] Nejvýznamnější roli při absorpci UV záření hrají rohovka a čočka. Celková absorpce oka pro UV záření je znázorněna na obrázku 6. [16,17]

Rohovka absorbuje většinu záření pod 300 nm (UV-B). Při dlouhodobém působení (6-8 hodin) UV záření na rohovku dochází ke vzniku fotokeratitidy neboli sněžné slepotě. Při tomto onemocnění dochází k poškození a odlupování epitelových buněk a dráždění citlivých nervových zakončení v rohovce. To se projevuje bolestmi očí, slzením, fotofobií a blefarospasmem. [16,18]

Čočka absorbuje záření UV-A s vlnovou délkou kratší než 370 nm. Náhlá intenzivní nebo dlouhodobá expozice UV zářením způsobuje vznik katarakty. Působením UV záření dochází ke změnám proteinů v čočkových vláknech, které se kumulativně načítají v průběhu celého života. [16,18]



**Obrázek 6:** Nitrooční filtrace UV záření očními tkáněmi [16]

## 2.6.2 Implementace UV absorbéru

Přestože samotný materiál čočky částečně chrání oko před UV zářením, můžeme ochranu zvýšit pomocí UV absorbéru. Díky němu čočka absorbuje UV záření až do vlnové délky 400 nm. Absorbér lze na čočky nanášet dvěma způsoby. V prvním případě přidáváme látku do směsi při výrobě samotné čočky. V druhém pak čočku nejprve očistíme v etanolu, neutralizujeme v saponátu o teplotě přibližně 50 °C a následně čočku ponoříme do roztoku s UV absorbérem. Touto metodu nanášíme absorbér na povrch čočky před jejím případným barvením, tvrzením a nanesením antireflexní vrstvy. [3]

## 2.6.3 Čočky chránící před modrým světlem

Ve viditelném spektru je světlo o vlnové délce 380-500 nm označováno jako tzv. vysoce energetické viditelné světlo (HEV). Toto modré a modrofialové světlo najdeme hned za hranicí UV záření. Přestože modré světlo je pro naše tělo užitečné (reguluje naše biologické rytmy, stimuluje pocit pohody, ovlivňuje naši únavu, produktivitu soustředěnost atd.), příliš mnoho tohoto světla může mít negativní vliv na naše oko. Modré světlo o vlnových délkách 380-420 nm považujeme za nejvíce škodlivé. Dlouhodobé vystavení tomuto záření nám může poškodit sítnici, neboť na rozdíl od UV záření, které je téměř celé pohlcené rohovkou a přední částí oka, modré záření dopadá na sítnici téměř bez filtrace. Je tak prokázáno, že vystavení modrému záření způsobuje záněty spojivek, záněty rohovky, zakalení čočky a přispívá ke vzniku fotoretinitidy a makulární degenerace. [19,20,21]

Přestože největší množství modrého záření vyzařuje ze slunce, modrému světlu se nevyhneme ani v interiéru. V dnešní době vyzařují modré světlo LED diody, úsporné zářivky, monitory počítačů, televizí, nebo např. obrazovka mobilu či tabletu. [19,20,21]

Čočky chránící naše oko před modrým světlem mají tedy ochranu před UV zářením do vlnové délky 420 nm. Jsou čiré, takže je lze využívat i v interiéru. Jsou určeny především pro ty, kteří často pracují s počítačem nebo jinými technologiemi vyzařující modré světlo. [19,20,21]

## 2.7 Fototropní čočky

Fototropní brýlové čočky jsou ideálním řešením pro ty, kteří brýle nosí během celého dne a často tak přechází z interiérů do exteriérů a naopak. Obzvláště ve slunečních dnech tak chrání svého nositele před nepříjemným oslněním či neustálým střídáním brýlí. Hlavním úkolem

fototropní brýlové čočky je změna intenzity zabarvení (absorpce) v závislosti na intenzitě slunečního záření (světla). U většiny fototropních materiálů však tuto závislost nelze realizovat samostatně, ale UV zářením. To je důvodem, proč se většina fototropních čoček zabarvuje i přesto, že na čočku nedopadá přímé sluneční záření (slunce je za mrakem), ale odráží se od určitých předmětů (sníh, vodní plocha apod.). K podobným problémům může docházet také při opačném procesu, procesu odbarvení. To u většiny fototropních materiálů závisí na teplotě prostředí – v chladném prostředí se čočka odbarvuje pomaleji, v prostředí teplém je odbarvení rychlejší a intenzivnější. Intenzita zabarvení je proto výrobci vztahována k teplotě 21-23 °C. [2,3,22]

### 2.7.1 Minerální fototropní čočky

K výrobě minerálních fototropních čoček používáme borosilikátové sklo, do jehož taveniny přidáme halogenidy stříbra (AgCl, AgBr nebo AgI). Materiál pak reaguje na intenzitu slunečního záření modifikací své absorpce. Principem ztmavení je uvolnění elektronu z atomu chloru, bromu nebo jodu a jeho následné přijetí atomem stříbra, který se tím zvýší svou absorpcí pro světlo. Čočka opět zesvětlá, pokud na ni přestane působit UV záření a elektron se uvolní od atomu stříbra a vrátí se zpět k původnímu atomu. [2,22]

### 2.7.2 Fototropní organické materiály

První fotochromatické čočky byly objeveny v 70. letech 20. století. Z organických materiálů se fototropní čočky začaly vyrábět v roce 1990. V současné době existují 2 způsoby, jak vložit fotoaktivní látku do již chemicky upraveného materiálu čočky. [3,22]

Prvním způsobem je smíchání látky s tekutým monomermem před procesem polymerizace (In-Mass Technology). [3,22]

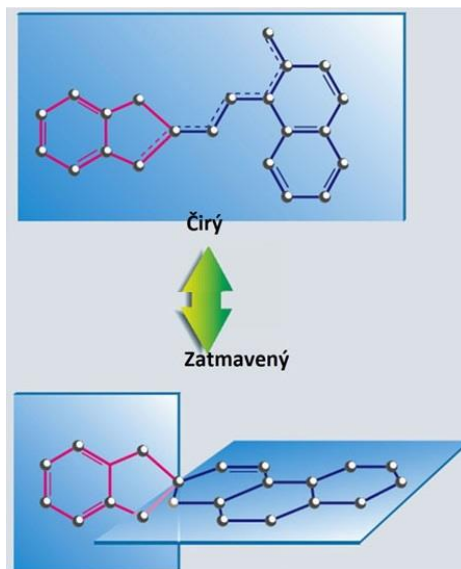
Druhým způsobem je tepelná inkorporace částic fotoaktivní látky do povrchových vrstev základního materiálu procesem zvaným imbibice. Fotoaktivní látka tak proniká pod povrch čočky vždy ve stejné tloušťce (100–150 μm pod povrch). [3,22]

Některé materiály (např. vysokoindexové) však těmito způsoby upravit nelze. V těchto případech se pro nanesení fotoaktivní látky používá metoda Trans-Bonding. Při této metodě je tenká povrchová vrstva fotoaktivní látky zapuštěna pod tvrzenou a antireflexní vrstvu. [3,22]

Fotoaktivní látky mohou být oxazinové molekuly (např. tetrahydro-1,4-oxazine), pyranony (C<sub>5</sub>H<sub>6</sub>O) nebo fulgidy (anhydrid kyseliny dialkylenjantarové). Po ozáření UV světlem dochází



ke změně konformace této molekuly, která rotuje a tím zvyšuje svou absorpci vůči světlu (obr.7). [3,22]

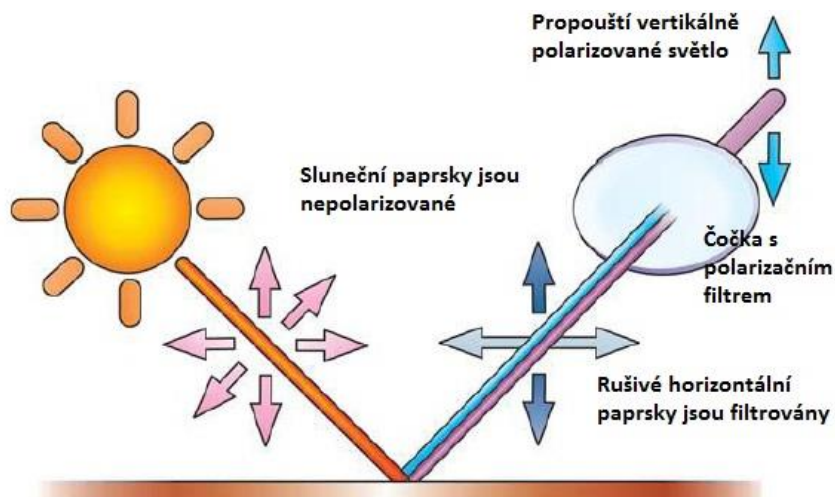


**Obrázek 7:** Reakce fotoaktivní molekuly při fototropní reakci [3]

## 2.8 Polarizační čočky

Přirozené světlo je nepolarizované. Elektrická a magnetická složka vycházejí svazkem ze zdroje nahodile. Oproti tomu polarizované světlo je takové, které nemění rovinu kmitání. K polarizaci světla dochází, pokud paprsek světla dopadá na hladký povrch (vodní hladina, mokrá silnice apod.), od kterého se odráží. Takové světlo pak způsobuje nepříjemný a oslňující odraz, který snižuje naši viditelnost. [3,15,22,23]

Polarizační čočky obsahují speciální filtr, který blokuje intenzivní odražené světlo. V čočkách jsou krystaly, které pohlcují řádný paprsek (horizontální paprsek) a propouští paprsek mimořádný (vertikální paprsek), ten je navíc zeslaben absorpcí (obr.8). Látka, která zajišťuje polarizaci absorpcí je v polarizačních čočkách polyvinylacetát (PVA). [3,22,23]



**Obrázek 8:** Princip polarizačních čoček [3]

Při výrobě dioptrických polarizačních brýlí používáme dvě metody vkládání polarizačního materiálu na čočku. První je tzv. technologie zapaštění (Embedded Film Technology), při které se polarizační hmotu vkládáme do formy před vyplněním a polymerizací materiálu čočky. Tuto metodu používáme u reaktoplastů. Druhou metodou je Wafer Technology neboli plátková metoda, kdy vkládáme tenký polarizační film pod poslední vrstvu na přední straně čočky a následně ji na čočku lisujeme. Tuto metodu používáme u materiálů s vyšším indexem lomu a u polykarbonátů. [3,22]

## 2.9 Fotopolarizační čočky

Jedná se o kombinaci fototropních a polarizačních brýlových čoček. Tyto čočky byly vynalezeny pro potřeby řidičů, tedy kontrastní vidění a ochrana před oslněním. [2,3,22,24]

Za oblačného počasí, tedy při nízké intenzitě světla je na čočce aktivní pouze polarizační filtr, který blokuje odlesky a zvyšuje kontrast. V tomto stavu má čočka vysoce kontrastní zelenožlutou barvu a její absorpce světla je 63 %. [2,3,22,24]

Při denním světle má čočka měděnou barvu. Jelikož přední sklo auta chrání řidiče před UV zářením, musela být vyvinuta nová technologie aktivace fotochromatických molekul. Ty už tedy nereagují na UV záření, neboť by se v autě nezabarvovaly, ale jsou aktivovány viditelným světlem. Absorpce této čočky je 75 %. [2,3,22,24]

Za jasného venkovního světla, kdy řidič není chráněn předním sklem jsou fotoaktivní látky navíc aktivovány UV zářením. Barva čočky se tak mění na tmavě hnědou a absorpce světla stoupá k 85 %. Oko je přitom chráněno 100 % UV ochranou. [2,3,22,24]

## 2.10 DLC vrstva

Vrstva DLC (diamond – like carbon) je tenká vrstva diamantu – podobnému uhlíku. Tato vrstva je chemicky odolná a extrémně tvrdá, její tvrdost se za určitých podmínek blíží diamantu. Její vlastnosti jsou podobné diamantu, ale vrstva je amorfni. [25]

Vrstvu nanášíme pomocí pulsní laserové depozici (PLD). Ve vakuové depoziční komoře máme grafitický terč a naproti němu držák podložky (čočky). Pulzním excimerovým laserem vystřelíme pulz, který dopadne na grafitický terč. Díky vysoké energii se tak vytrhnou z terče částice, které tak vytvoří plazmový obláček. Ten vyletí kolmo na terč a dopadá tak na upevněnou podložku (čočku), kde vytvoří tenkou vrstvu. [25]

## 3 Experimentální část

V této části práce se zabýváme optickými a mechanickými vlastnostmi čoček. Pro experimentální část byly použity brýlové čočky od firem Zeiss, Omega Optix a čočky s vrstvou DLC vyrobené na společném pracovišti Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT a 1. lékařské fakulty UK na Albertově v laboratoři excimerového laseru.

Experiment se skládá ze dvou částí. V první části se zaměřujeme na transmisivitu čoček, speciálně tedy na jejich propustnost UV záření. V druhé části se pak zaměříme na jejich odolnost proti opotřebení.

Čočky s indexem lomu 1,5 byly z materiálu CR-39 (s výjimkou jedné minerální čočky), index lomu 1,6 byl z materiálu MR-8 a index lomu 1,68 byl z materiálu MR-10.

### 3.1 Přístroje použité pro výzkum

#### 3.1.1 Spektrometr

Pro měření transmisivity jsme použili UV-VIS vláknový spektrometr USB2000+ od firmy Ocean optics s rozsahem 200-900 nm pro spektrofotometrická (transmisní i reflexní) a fluorescenční měření.

Transmisivitu čoček jsme měřily ve vlnových délkách od 350 do 750 nm. V této oblasti jsme hodnotili vzestup propustnosti a pomocí směrnice přímky jsme vypočetly propustnost vrstev pro UV záření.

V oblasti 450-700 nm jsme poté vypočetli průměrnou hodnotu transmisivity. V této oblasti jsme také hodnotili maximální naměřenou propustnost a na které vlnové délce byla tato hodnota naměřena.

Celkové výsledky z měření transmisivity čoček jsou uvedeny v tabulce 3 (str. 37).

#### 3.1.2 Tribometr

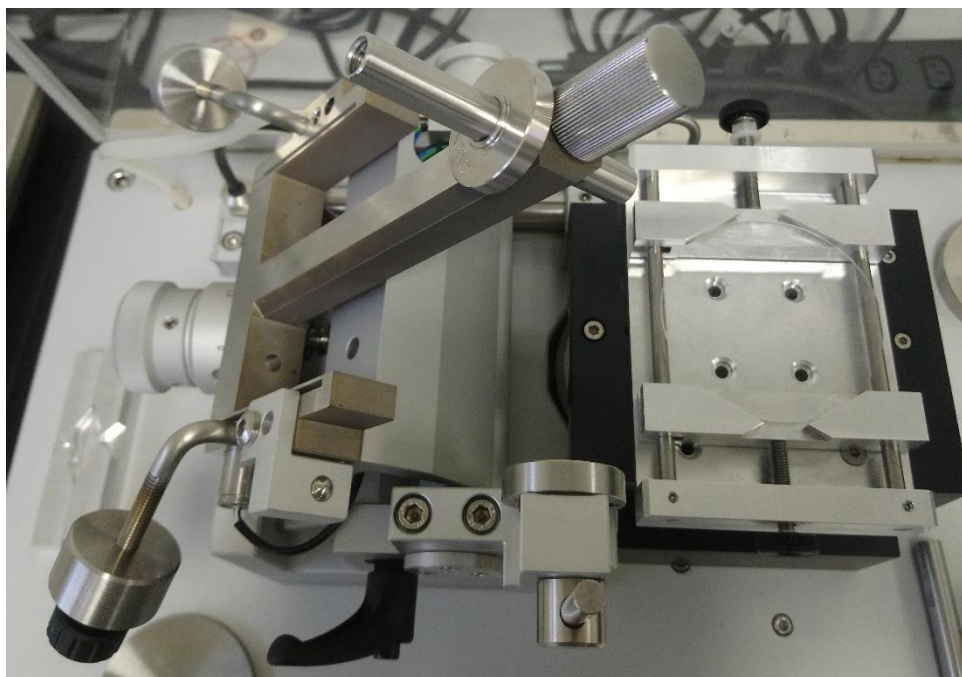
Pro zkoumání mechanických vlastností čoček jsme použily tribometr firmy Anton Paar s možností studia korozních vlastností a opotřebení.

Pro uchycení čočky do tribometru jsme museli navrhnout a vyrobit speciální držák (obr.9). Po upevnění čočky v držáku byla nad čočku nainstalována ocelová kulička o průměru 6 mm, která během pokusu přejížděla po čočce v rozmezí 8 mm a působila na čočku silou 0,25 N. Pokus byl na každé čočce proveden celkem pětkrát.

Parametry jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 1.

Každá čočka byla před vložením do držáku očištěna ethanolem a vysušena hadříkem z mikrovlákna. Stejný postup byl prováděn také s testovací kuličkou. Ta byla pokaždé sérii měření vyjmuta z držáku, a zkontrolována, jestli třením o čočku nedošlo k jejímu poškození.

Kompletní výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 4 na straně 38.



**Obrázek 9:** Tribometr se speciálním držákem pro brýlové čočky

**Tabulka 1:** Parametry měření na tribometru

Měření	Celková vzdálenost [m]	Amplituda [mm]	Počet cyklů	Čas [mm:ss]
1.	1	8	62	00:31
2.	2	8	124	01:02
3.	3	8	187	01:33
4.	5	8	312	02:35
5.	10	8	624	05:11

## 3.2 Testované čočky

### 3.2.1 Čočky bez povrchových úprav

Nejprve jsme měřili čočky z plastu a z minerálu. Žádná z čoček neměla na sobě žádnou povrchovou úpravu. Obě čočky měly index lomu 1,5.

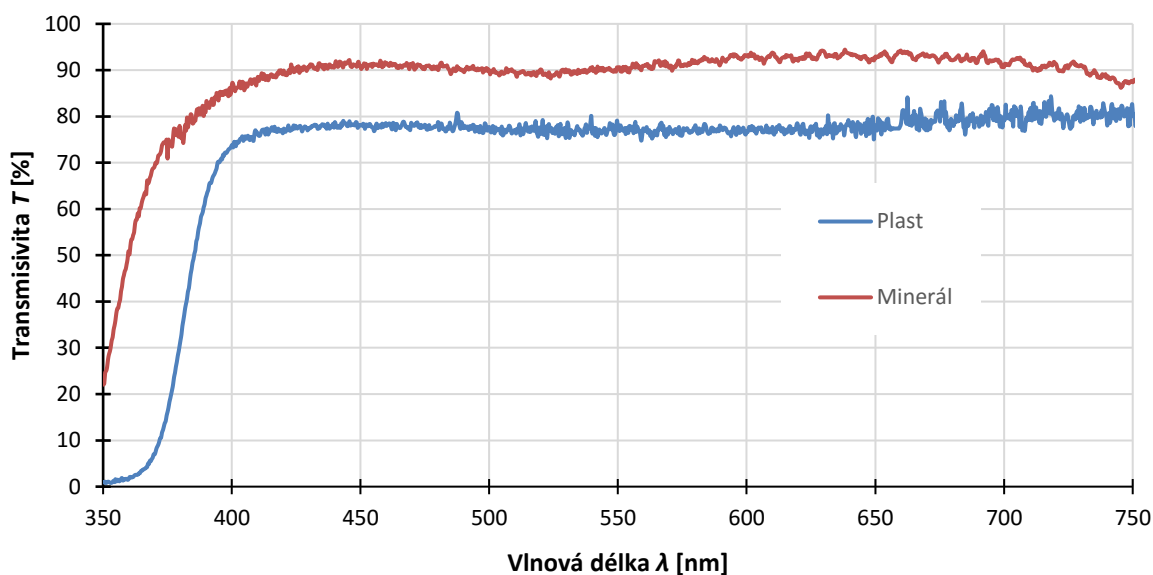
Dioptrické hodnoty čoček byly:

Plast            +2,50 D

Minerál        +2,00 D

Z grafu na obrázku 10 lze vyčíst, že vyšší propustnost pro světlo má čočka minerální. Od vlnové délky 425 nm se hodnoty transmisivity pohybují převážně nad hranicí 90 %. Nejvyšší hodnoty transmisivity čočka dosahuje na vlnové délce 638 nm, a to 94,44 %. Čočka ale poskytuje menší ochranu před UV zářením.

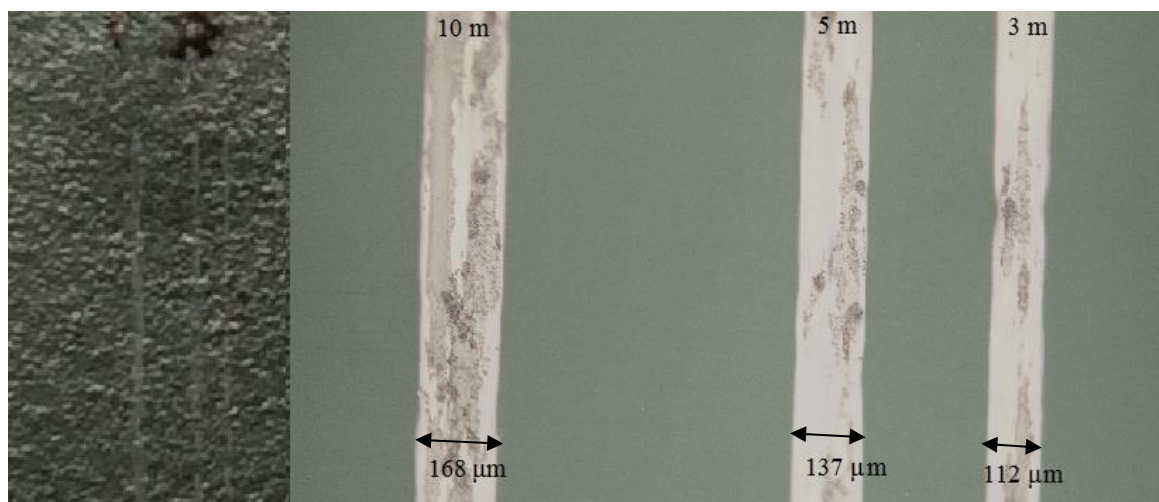
Ve srovnání s minerální čočkou má plastová čočka transmisivitu přibližně o 10 % nižší. Její hodnoty se na vlnových délkách 400–650 nm pohybují v rozmezí 75–80 %. Na vlnových délkách od 650 nm hodnota transmisivity čočky mírně stoupá. Svého maxima pak čočka dosahuje na 676 nm – 83,27 %.



**Obrázek 10:** Graf rozdílu transmisivity plastové a minerální čočky

Podle očekávání, v testování odolnosti dopadla lépe minerální čočka. Zatímco známky poškození na plastové čočce se objevili téměř okamžitě, minerální čočka byl v prvních 2 měření bez závad. Během třetího měření se ale i na minerální čočce začali objevovat známky poškození

(obr. 11). Šíře rýhy po kuličce po třetím měření, tedy po 3 m, byla 112  $\mu\text{m}$ , po 5 m se rýha rozšířila na 137  $\mu\text{m}$  a po 10 m byla šíře rýhy 168  $\mu\text{m}$ .



**Obrázek 11:** Viditelnost poškození na minerální čočce (vlevo makroskopická fotografie, vpravo mikroskopická)

### 3.2.2 Tvrzená čočka

K dispozici jsme měli 3 čočky od firmy Omega Optix o různých indexech lomu. Tvrzení čoček ve firmě probíhá ponořením čoček do tvrdícího laku.

Použité čočky:

1,5 -2,00 D

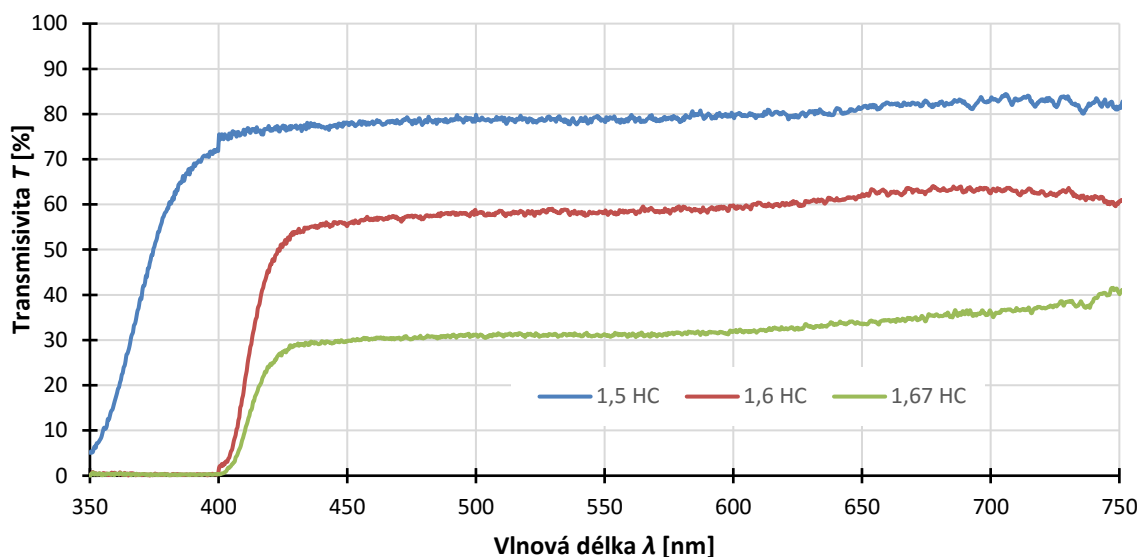
1,6 +4,00 D

1,67 +6,50 D

Jak je vidět na grafu na obrázku 12, nejvyšší procento transmisivity vykazuje čočka s indexem lomu 1,5. Propustnost této čočky se od vlnové délky 400 nm drží na hranici 80 %, na vlnových délkách nad 650 nm propustnost ještě vzrůstá. Nejvyšší naměřená hodnota byla 84,42 % na vlnové délce 705 nm. Co se ochrany před UV zářením týče, čočka už na vlnové délce 350 nm propouští 5 % světla, na hranici viditelného světla, tedy 380 nm, je transmisivita 59,11 %.

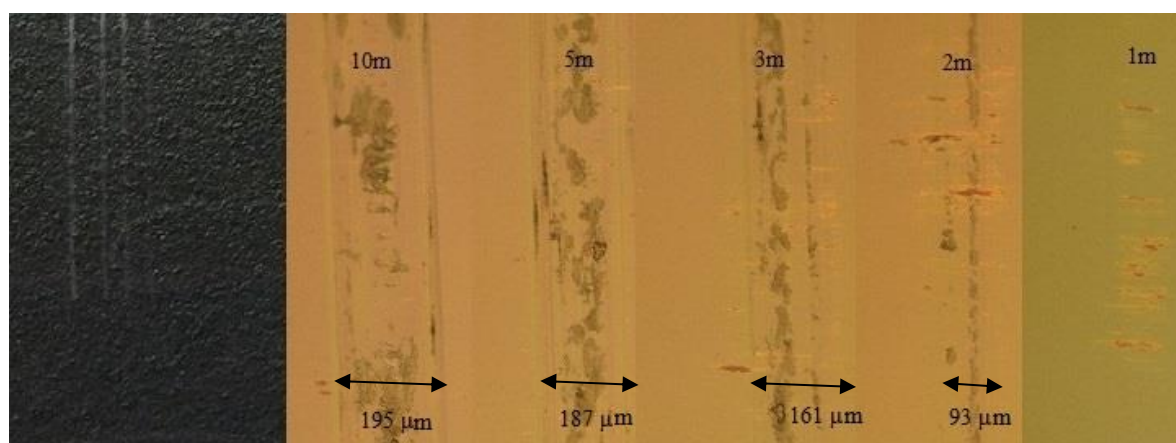
U čoček s indexem lomu 1,6 a 1,67 se ochrana proti UV záření výrazně zvyšuje. Až do 400 nm tyto čočky nepropustí více jak 0,5 % záření. Celková propustnost čoček je ale nižší než u čočky s indexem 1,5. Transmisivita čočky s indexem 1,6 se podle grafu pohybuje v rozmezí 55–65 %. Nejvyššího bodu pak dosahuje na vlnové délce 677 nm kdy je propustnost 64,05 %. Čočka s indexem lomu 1,67 má pak propustnost přibližně 30 %, hodnota začíná mírně stoupat

od vlnové délky 575 nm, svého maxima pak čočka dosahuje na vlnové délce 747 nm kde je hodnota transmisivity 41,54 %.



**Obrázek 12:** Graf transmisivity tvrzených čoček o různých indexech lomu

Co se tvrdosti této vrstvy týče, jak je vidět na obrázku 13, vrstva se velmi rychle poničí. Již po půl minutě se na čočce objevují mikroskopické známky poškození. Po minutě je pak poškození vidět také makroskopicky. Šíře poškození je po 2 metrech uražených kuličkou 93  $\mu\text{m}$ , po 3 metrech 161  $\mu\text{m}$ , po 5 m 187  $\mu\text{m}$  a po 10 m je šíře rýhy 195  $\mu\text{m}$ .



**Obrázek 13:** Opotřebení tvrzené čočky – vlevo fotografie čočky, vpravo fotografie pod mikroskopem

### 3.2.3 Vrstva HMC

Tuto povrchovou úpravu nabízí jak firma Zeiss, tak Omega Optix. Jedná se o tvrzenou čočku s antireflexní a hydrofobní úpravou. Propustnost těchto čoček by měla být 99,5 %. Na čočkách je viditelný zbytkový zelený reflex. [26,27]



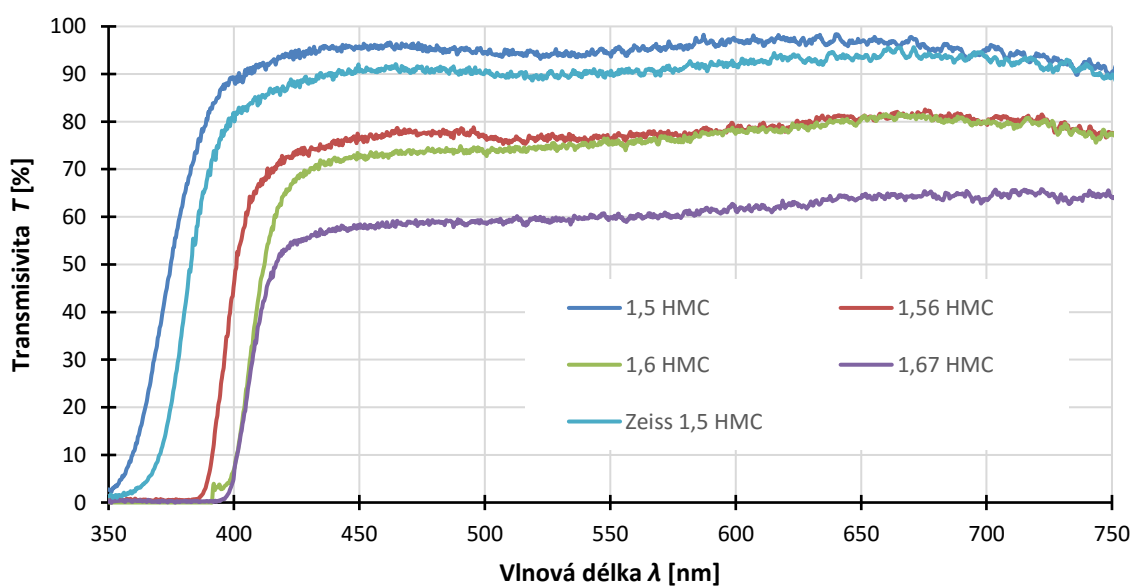
Použité čočky pro měření transmisivity:

Omega HMC	1,5	-0,50 D
Omega HMC	1,6	-0,50 D
Omega HMC	1,56	+2,5 D
Omega HMC	1,67	-5,00 D
Zeiss HMC	1,5	-0,50 D

Jak je vidět na obrázku 14, nejvyšší procento propustnosti má z daných čoček čočka od Omega Optix s indexem lomu 1,5. Od vlnové délky 400 nm se hodnoty propustnosti pohybují nad 90 %. Nejvyšší propustnost má na vlnové délce 639 nm, kde je její propustnost 98,35 %. Obdobně je na tom čočka s indexem lomu 1,5 od firmy Zeiss. Její propustnost je sice o několik procent nižší, také se ale pohybuje na hranici 90 %. Nejvyšší naměřená propustnost této čočky byla 95,65 % na 670 nm.

Propustnost čoček s indexem lomu 1,56 a 1,6 klesá k 75-80 %. Nejvyšší naměřené hodnoty byly u těchto čoček byly 82,56 % na 675 nm pro čočku indexem 1,56 a 81,76 na 665 nm pro čočku s indexem 1,6.

Nejnižší propustnost pro světlo pak měla čočka s indexem lomu 1,67. Maximální naměřená hodnota této čočky byla 65,8 % na 721 nm. Tato čočka ale poskytuje nejvyšší ochranu před UV zářením. 1 % světla začíná propouštět v 396 nm.

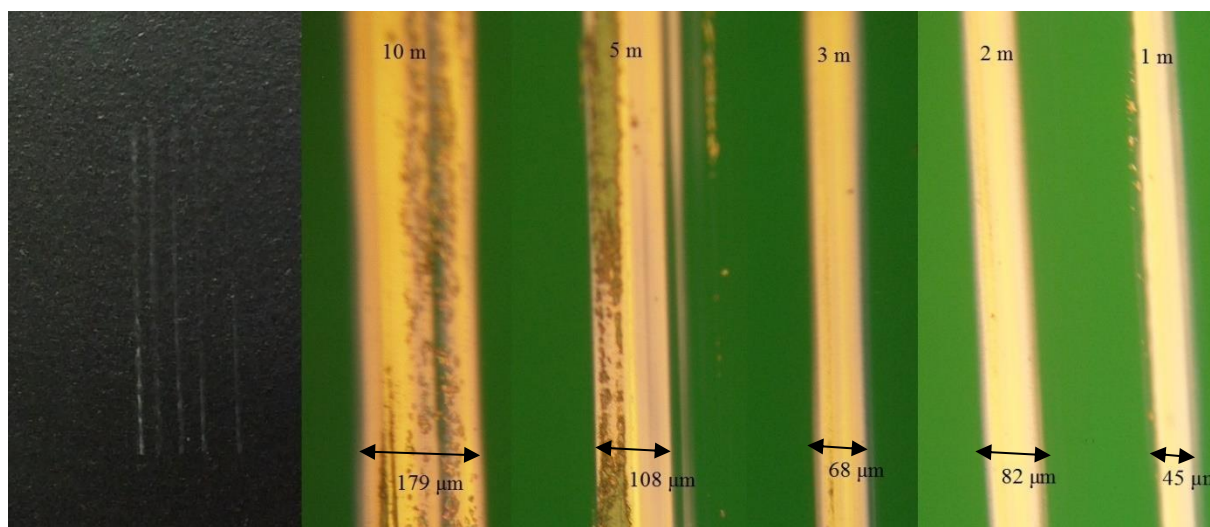


**Obrázek 14:** Graf transmisivity vrstev HMC

Přestože je čočka s povrchovou úpravou HMC tvrzená, již po několika vteřinách testování jsou na čočce viditelné známky poškození. Po prvním měření čočky Omega je šířka rýhy na

čočce 60  $\mu\text{m}$ , po druhém a třetím měření, tedy po 2 m a 3 m, je šíře viditelného poškození 120  $\mu\text{m}$ . Minimální rozdíl je pak u posledních dvou měření – po 5 m jsme naměřili šíři 133  $\mu\text{m}$  a po 10 m šíři rýhy 137  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 15 pak vidíme poškození čočky s HMC úpravou od firmy Zeiss, kde byly opět viditelné známky poškození již po prvním měření, kde byla šíře rýhy 45  $\mu\text{m}$ . Po 2 m byl výsledek 82  $\mu\text{m}$ , po 3 m 68  $\mu\text{m}$ , po 5 m 108  $\mu\text{m}$  a po 10 m byla šíře 179  $\mu\text{m}$ . Menší hodnota u třetího měření mohla být způsobena zakřivením čočky.



**Obrázek 15:** Poškození vrtvy HMC firmy Zeiss – vlevo fotografie poškozené čočky, vpravo viditelnost poškození pod mikroskopem

### 3.2.4 Vrstva HMC+ a SHMC

Povrchová úprava SHMC (Satin) firmy omega Optix se skládá z tvrzené vrstvy, 7 vrstev antireflexní vrstvy se zbytkovým zeleným reflexem. Na povrchu je superhydrofobní úprava. Propustnost této čočky pro světlo je 99,5 %. [26,27]

Použité čočky:

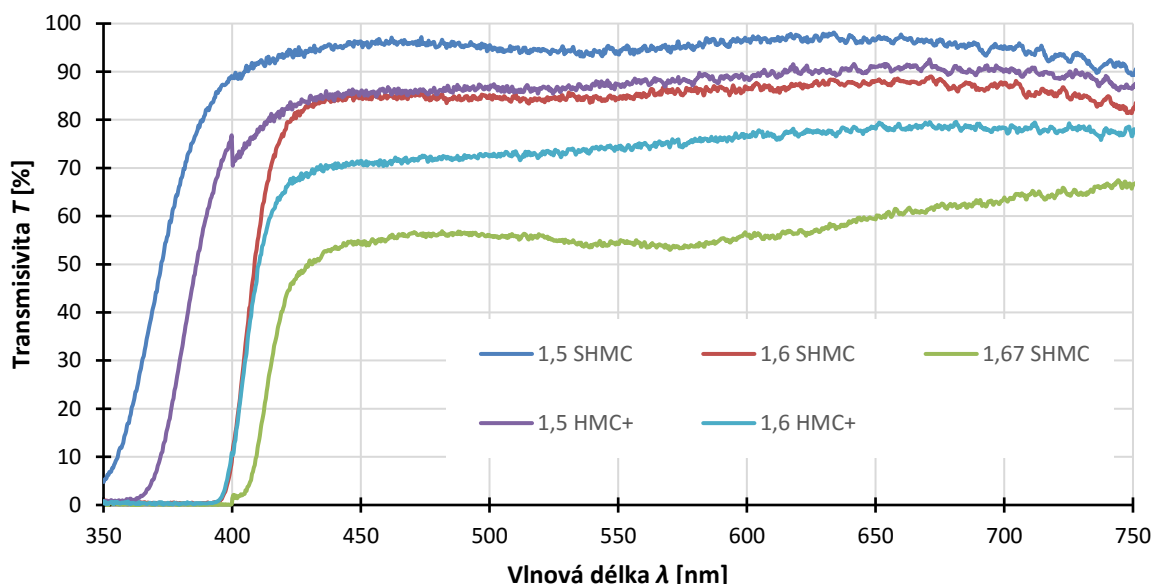
SHMC	1,5	-0,25 D
SHMC	1,6	-1,00 D
SHMC	1,67	+7,00 D
HMC+	1,5	+0,50 D
HMC+	1,6	-2,25 D

Na obrázku 16 vidíme graf transmisivity těchto vrstev. Nejvyšší naměřené hodnoty byly u čočky s povrchovou úpravou SHMC a indexem lomu 1,5. Od vlnové délky 400 nm se hodnoty transmisivity pohybují nad hranicí 90 %, pod kterou mírně klesají až na 750 nm. Nejvyšší naměřená hodnota této čočky je 98,11 na 633 nm. Čočka ale už na vlnové délce 350 nm

propouští 4,79 % světla. Čočka se stejným indexem lomu a povrchovou vrstvou HMC+ má propustnost o něco nižší. Nejvyšší transmisivita je na 670 nm, 92,59 %. Na hranici 90 % ale křivka propustnosti dosahuje až na 645 nm.

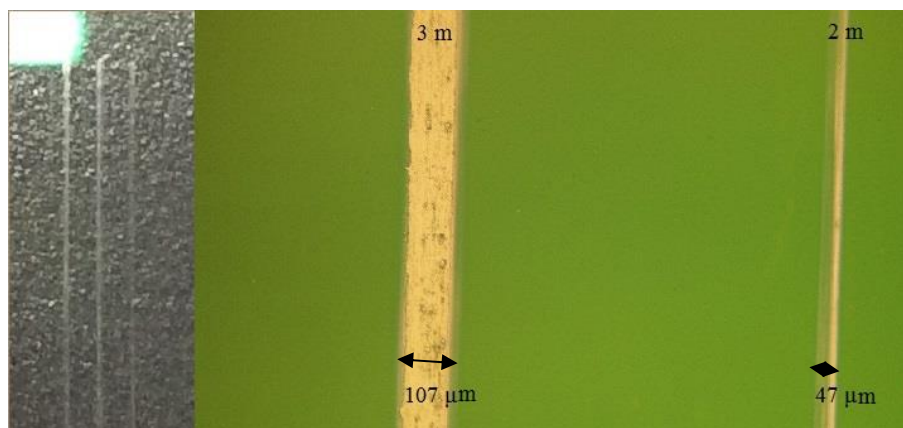
Čočky s úpravami SHMC a HMC+ s indexem lomu mají do 405 nm přibližně stejný průběh. Propustnost čočky SHMC ale vystoupá až za hranici 80 %, svého maxima pak dosahuje na 671 nm, kde je hodnota transmisivity 89,03 %, zatímco propustnost čočky HMC+ se drží pod hranicí 80 %. Maximu této čočky je 79,58 % na vlnové délce 681 nm.

Nejhůře je pak na tom čočka s nejvyšším indexem lomu, tedy 1,67. Její procento transmisivity je až do vlnové délky 650 nm pod 60 %. Ve větších vlnových délkách pak propustnost čočky mírně vzrůstá, nejvyšší naměřená hodnota je 67,44 % na vlnové délce 744 nm.



**Obrázek 16:** Graf transmissivity vrstev HMC+ a SHMC

Zatímco na čočce s HMC+ úpravou jsou známky opotřebení téměř nezatelné (poškození čočky není na čočce pouhým okem vidět, pod mikroskopem jsou vidět stopy, kudy se čočka pohybovala, jsou však špatně viditelné a jejich šíře nezměřitelná), na čočce s úpravou SHMC jsou stopy poškození vidět už po druhém měření. Přestože toto poškození na čočce není vidět, pod mikroskopem jsme naměřili šíři 15-47  $\mu\text{m}$  (obr.17). Po třetím měření pak šíře vzrostla na 107  $\mu\text{m}$ . Šíře rýhy naměřená po čtvrtém a pátém měření, tedy po 5 a 10 m, byla 145  $\mu\text{m}$ .



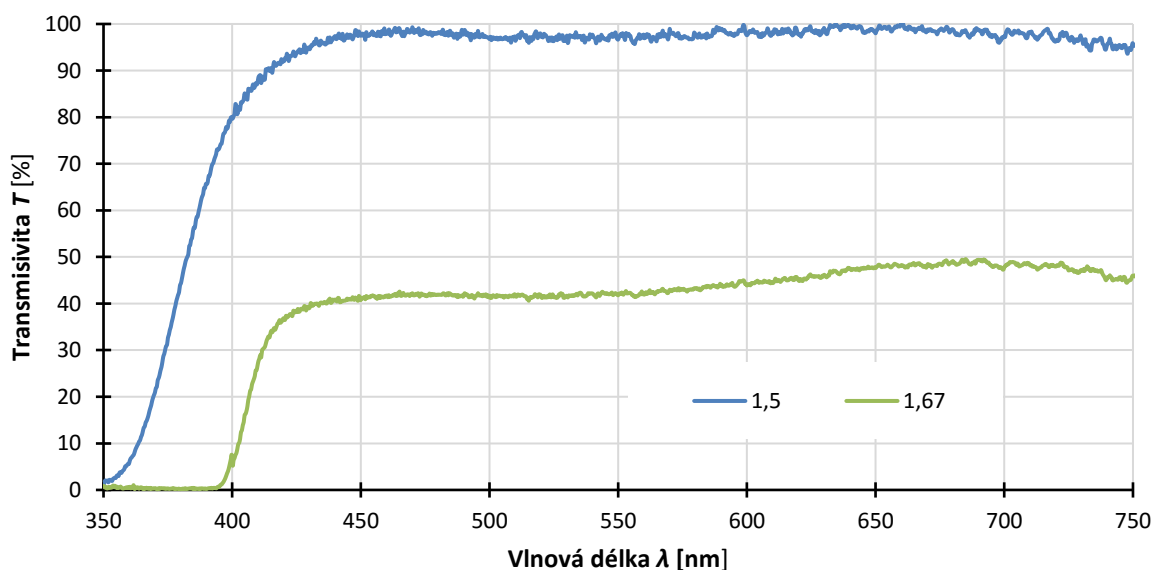
Obrázek 17: Viditelnost poškození čočky SHMC po 3. a 2. měření

### 3.2.5 Brýlová čočka Omega MAX a Omega MAX UV

Tyto brýlové čočky firmy Omega Optix jsou tvrzené, obsahují 9 vrstev antireflexní vrstvy. Na povrchu čoček je superhydrofobní a oleofobní úprava. Navíc obsahuje nanovrstvu, díky které je čočka dvojnásobně odolná proti poškrábání oproti jiným čočkám. Propustnost světla pro tyto čočky je 99,6 %. [27]

Omega MAX	1,5	+0,5 D
Omega MAX	1,67	-4,25 D
Omega MAX UV	1,5	+1,50 D
Omega MAX UV	1,6	-2,75 D

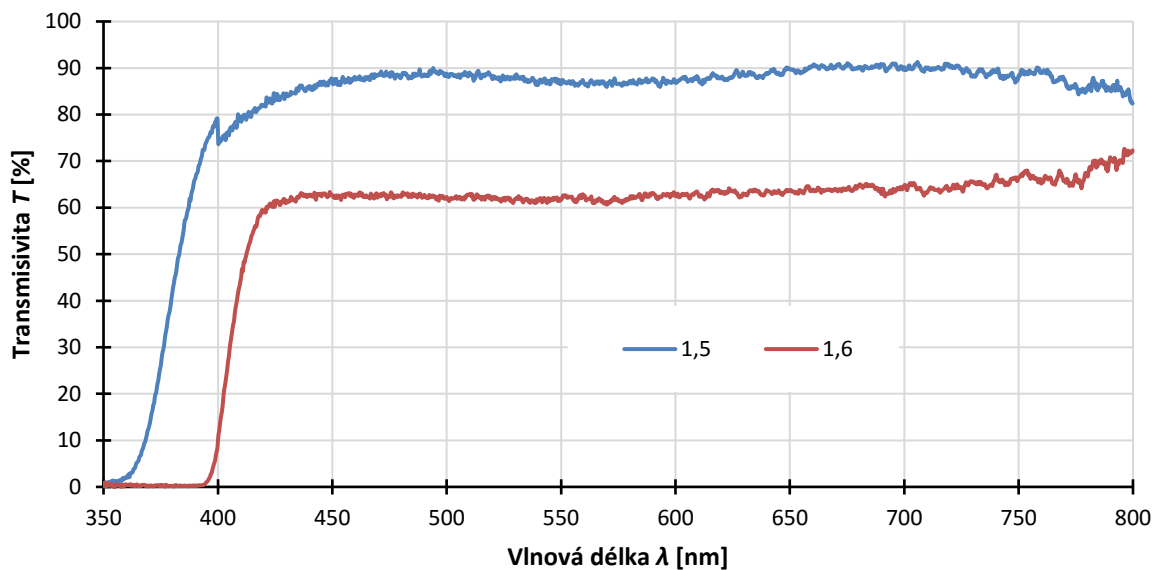
Jak je vidět na obrázku 18, rozdíl čoček s indexem lomu 1,5 a 1,67 je velmi výrazný. Zatímco první čočka dosahuje na 634 nm a na 660 nm hodnoty 100 %, maximální hodnota naměřená u indexu lomu 1,67 je 49,53 % na vlnové délce 684 nm.



Obrázek 18: Graf transitivity čoček Omega MAX

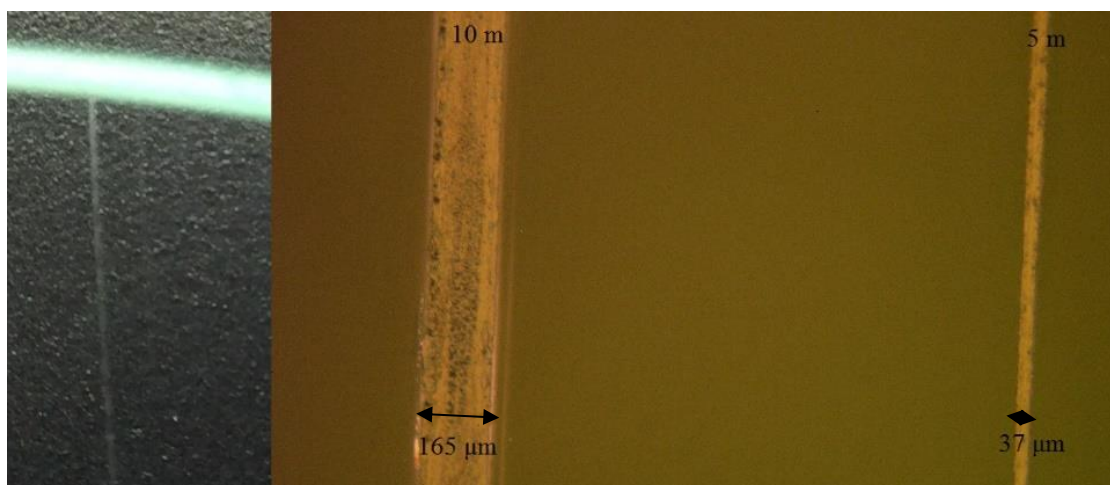
Na obrázku 19 vidíme graf transmisivity čoček s povrchovou úpravou Omega MAX UV. V porovnání s čočkou Omega MAX má čočka Omega MAX UV s indexem lomu 1,5 přibližně o 10 % nižší propustnost pro světlo. Od vlnové délky 450 nm se čočka sice pohybuje na hranici 90 %, její maximum je však 91,3 % na vlnové délce 705 nm

U druhé čočky bohužel nemáme srovnání se stejným indexem lomu. Propustnost čočky s indexem 1,6 se pohybuje mezi 60-70 %. Nejvyšší hodnota této čočky je 67,95 % na 753 nm.



**Obrázek 19:** Graf transmisivity čoček Omega MAX UV

Čočky Omega Max jsou odolnější než předchozí čočky. Jak je vidět na obrázku 20, poškození čočky je viditelné až u čtvrtého měření, kde se v čočce vytvoří rýha o šířce 37 μm, při dlouhodobějším působení se pak rýha rozšíří na 165 μm.



**Obrázek 20:** Viditelnost poškození čočky Omega MAX po 4. a 5. měření – vlevo fotografie poškozené čočky, vpravo viditelnost poškození pod mikroskopem

### 3.2.6 Povrchová úprava LotuTec

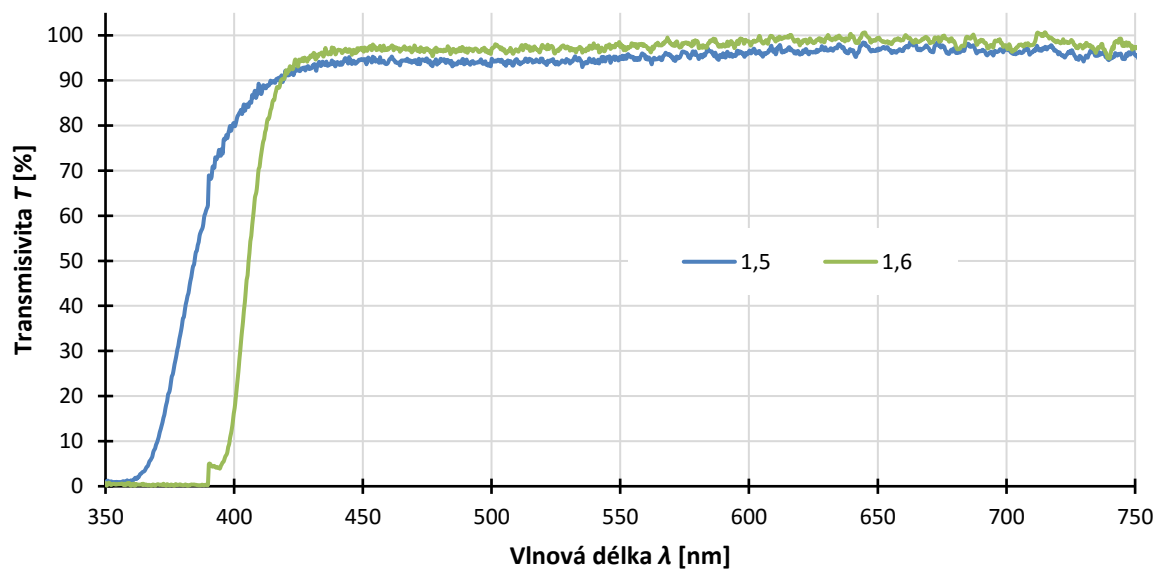
Povrchová úprava LotuTec je zaměřena na udržování čistoty čočky. Vrstva odpuzuje vodu, mastnoty a nečistoty. Nečistoty a kapaliny tvoří na vrstvě kapičky, které z povrchu čočky stékají. Vrstva je zpevněna prostřednictvím iontového bombardování. [28]

Použité čočky:

LotuTec 1,5 +1,50 D

LotuTec 1,6 -2,25 D

Na obrázku 21 vidíme transmisivitu čoček s povrchovou úpravou LotuTec o indexech lomu 1,5 a 1,6. Na první pohled je vidět, že propustnost těchto čoček je velmi vysoká. Obě tyto čočky přesahují na 418 nm hranici 90 % transmisivity. Propustnost čoček od 418-750 nm je velmi podobný, čočka s nižším indexem lomu, tedy 1,5, má transmisivitu o 2-3 % nižší než čočka s vyšším indexem lomu. Maximální naměřená hodnota čočky s indexem lomu 1,5 byla 98,64 % na 662 nm. Maximální hodnota transmisivity čočky s indexem lomu 1,6 byla na 644 nm a 715 nm dokonce 100 %. Čočka s indexem lomu 1,6 poskytuje také větší ochranu před UV zářením, propustnost této čočky začíná na 394 nm, zatímco propustnost čočky s indexem lomu 1,5 začíná na 358 nm.



**Obrázek 21:** Graf transmisivity čoček s úpravou LotuTec

Čočka s povrchovou vrstvou LotuTec je velmi odolná proti opotřebení. Ani po pátém měření jsme na čočce nenašli známky poškození.

### 3.2.7 Povrchová úprava DuraVision Platinum

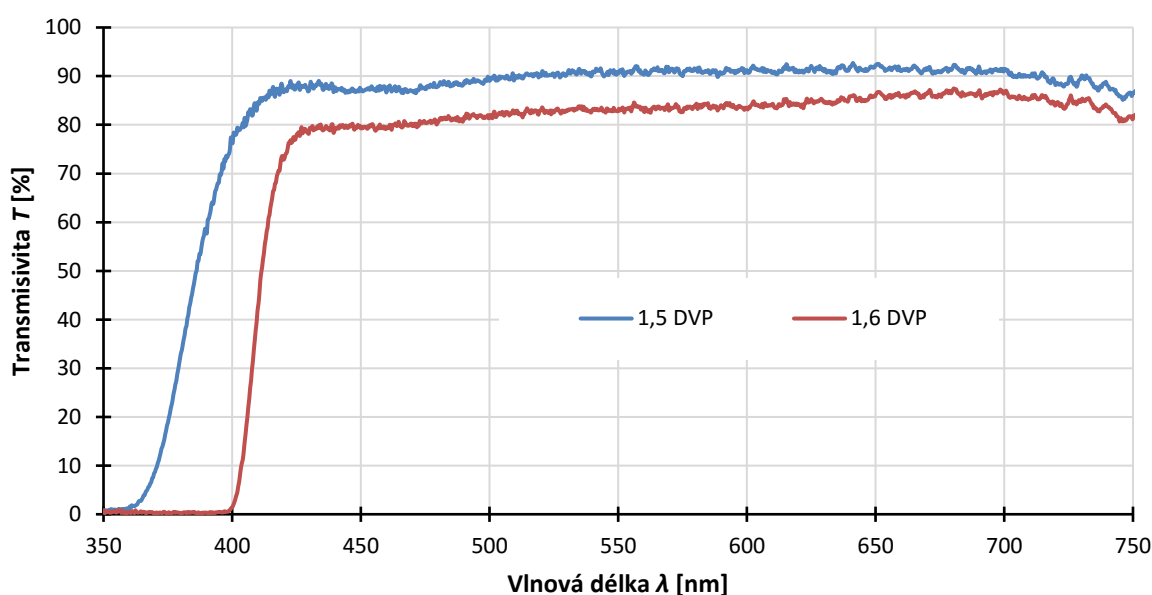
Čočky s touto povrchovou úpravou jsou nejtvrdší čočky, které firma Zeiss nabízí. Jsou třikrát tvrdší než čočky s běžnou antireflexní vrstvou a dokonce o 35 % tvrdší než čočky minerální. Toho je docíleno díky iontovému bombardování povrchových vrstev. Celkem devět ultratenkých vrstev je na povrchu hustě zkomprimováno díky iontově-asistovanému ukládání. Ionty při svém dopadu na brýlovou čočku předávají molekulám povrchové úpravy svou kinetickou energii což způsobuje, že jsou povrchové vrstvy zkomprimovány hustěji. Čočka navíc vykazuje zbytkový modrý reflex, který o více než 20 % redukuje světelnou odrazivost a zvyšuje tak propustnost světla čočkou. [29]

Pro výzkumy byly zvoleny čočky:

DVP 1,5 +0,75 D

DVP 1,6 +2,50 D

Jak je vidět na obrázku 22, s propustností světla dopadla lépe čočka s indexem lomu 1,5. Od 420 nm se transmisivita této čočky pohybuje na hranici 90 %, zatímco čočka s indexem lomu 1,6 na hranici 80 %. Svého maxima 92,71 % dosahuje čočka 1,5 na 641 nm a její průměrná transmisivita je 90,42 %. Maximum čočky 1,6 bylo naměřeno na vlnové délce 680 nm, kde propustnost čočky byla 87,49 % a její průměrná hodnota transmisivity je 83,61 %. Propustnost těchto čoček pro UV záření je pro index lomu 1,5 od 366 nm, čočka 1,6 má ochranu vyšší, světlo začíná propouštět až na 401 nm.



Obrázek 22: Graf transmisivity čoček s úpravou DVP

Čočka s touto povrchovou úpravou je velmi odolná proti poškození. Ani po pátém měření na čočce nejsou viditelné známky poškození, a to ani makroskopicky, ani pod mikroskopem.

### 3.2.8 Čočky s ochranou proti modrému světlu

Prvním zástupcem tohoto typu čoček je povrchová vrstva Blue firmy Omega Optix. Tato čočka je tvrzená s 9 vrstvami antireflexní úpravy. Čočka obsahuje superhydrofobní a oleofobní vrstvu. Její propustnost pro světlo je 99,6 %. UV ochrana této čočky je 5x vyšší než u běžných čoček a 25x vyšší než bez čoček žádných. [27]

Druhým zástupcem této kategorie je také od firmy Omega Optix s názvem +420 BlueCut. Tato čočka je nepropustná pro světlo až do vlnové délky 420 nm a poskytuje tak komplexní ochranu před UV paprsky dopadající na přední i zadní stranu čočky. Navíc poskytuje ochranu před modrým světlem jak ze slunečního záření, tak z digitálních přístrojů. Čočka má díky tomu lehce nažloutlou barvu se zbytkovým modrým reflexem. Na povrchu má čočka superhydrofobní, oleofobní a antistatickou vrstvu. Díky nano vrstvě má tato čočka nejvyšší odolnost proti poškrábání oproti běžným brýlovým čočkám firmy. [30]

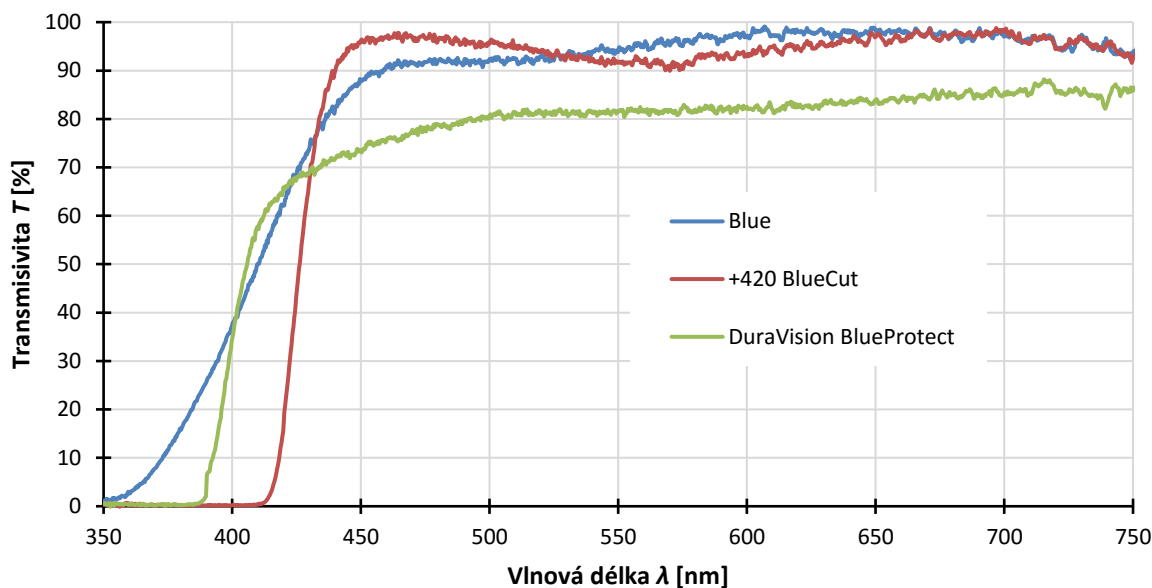
Jediným zástupcem firmy Zeiss je čočka s názvem DuraVision BlueProtect (DVBP). Tato vrstva snižuje propustnost světla ve spektru 380–455 nm. Čočka je velmi odolná proti poškrábání, obsahuje hydrofobní, oleofobní a antistatickou vrstvu. Na povrchu čočky je viditelný zbytkový modrý reflex. [31]

Na grafu z obrázku 23 vidíme porovnání transmisivít jednotlivých čoček. Co se propustnosti pro UV záření týče, nejlépe dopadla čočka +420 BlueCut. Tato čočka začíná propouštět světlo od vlnové délky 316 nm, odtud pak transmisivita čočky prudce stoupá nahoru a už na 440 nm dosahuje 90 % propustnosti. Svého maxima dosahuje na 969 nm, kde je její propustnost 98,8 %.

Nižší ochranu pak poskytuje čočka DVBP. Ta začíná propouštět světlo na 389 nm. V rozsahu 25 nm propustnost této čočky vzrůstá na 60 %, a od 412 nm propustnost čočky pomalu stoupá až k hranici 90 %. Maximální naměřená hodnota této čočky byla 88,2 % na 715 nm.

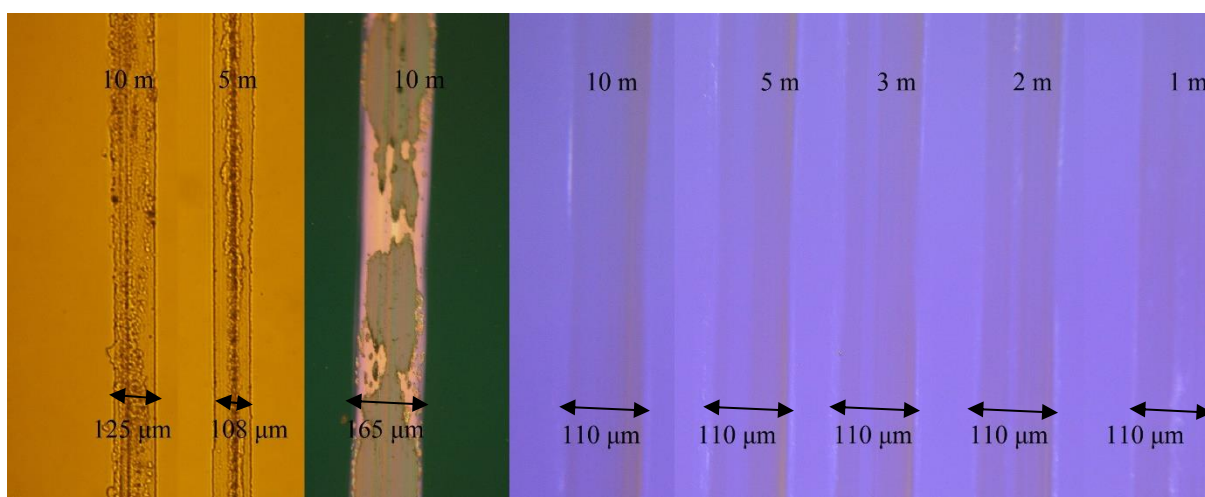
Nejnižší ochranu poskytuje čočka s úpravou Blue, která začíná propouštět světlo už na 362 nm. Její propustnost však stoupá pozvolna a čočka transmisivity 90 % dosahuje až na 460 nm. Její maximum, 99,06 %, je na 607 nm.





**Obrázek 23:** Graf transmisivity čoček s ochranou proti modrému světlu

Jak je vidět na obrázku 24, odolnost čoček Blue a +420 BlueCut je vysoká. První známky opotřebení se u čočky Blue projeví až při čtvrtém měření, tedy po pěti metrech uražené vzdálenosti. Šíře vrypu byla 108  $\mu\text{m}$ , při posledním měření pak šíře vzrostla na 128  $\mu\text{m}$ . U čočky +420 BlueCut se známky opotřebení objevily dokonce až při posledním měření. Šíře vrypu pak byla 165  $\mu\text{m}$ . Přestože u čočky DVBP na první pohled není viditelné žádné poškození, pod mikroskopem se tato vrstva poškodila už při prvním měření. Šíře vrypů byla u všech měření stejná – 110  $\mu\text{m}$ .



**Obrázek 24:** Viditelnost poškození čoček Blue (vlevo), +420 BlueCut (uprostřed) a DVBP (vpravo) pod mikroskopem

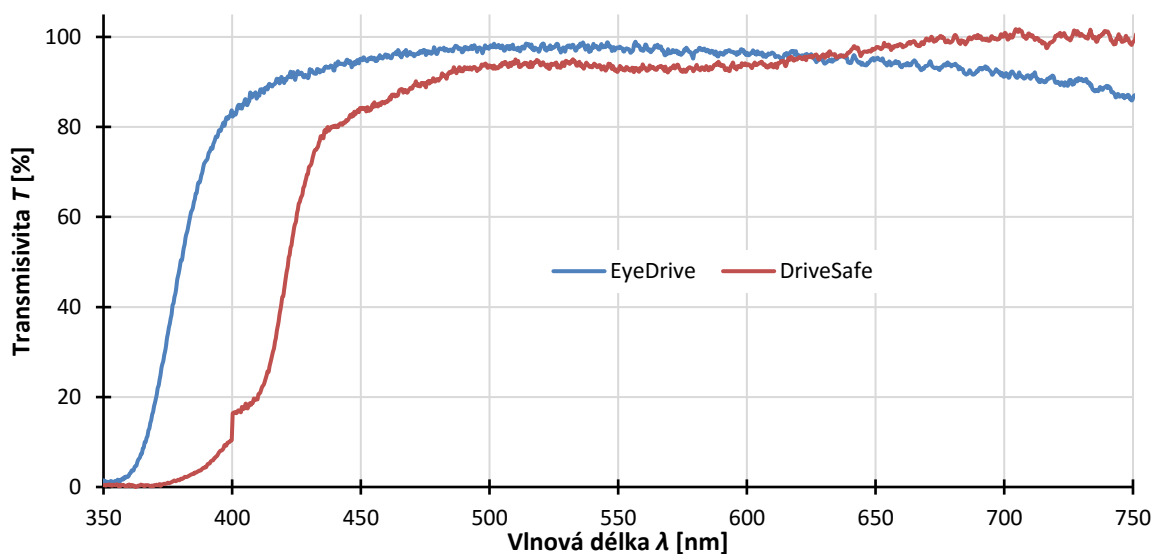
### 3.2.9 Čočky pro řidiče

Tento typ čóček je navržen tak, aby kvalita vidění byla pro nositele stále stejná během celého dne, tedy bez ohledu na aktuální počasí a denní dobu. Čóčky jsou speciálně uzpůsobeny především potřebám řidičů, kteří potřebují vidět za všech světelných podmínek. Čóčky snižují oslnění, filtrují a minimalizují odlesky od různých světelných zdrojů, jako jsou např. světla protijedoucích aut a zvyšují tak kontrast hlavně za špatných světelných podmínek (tma, šero, déšť...). [32,33]

Brylové čóčky DuraVision DriveSafe (Zeiss) pro tyto účely využívá technologii Luminance Design (LDT), která zohledňuje velikosti zornice za odlišných světelných podmínek. Čóčky jsou tak přizpůsobeny velikosti zornice při fotopickém, skotopickém, ale také mezopickém vidění. Tato úprava navíc částečně blokuje propustnost modrého světla, čímž snižuje vnímané oslnění až o 64 %. [32]

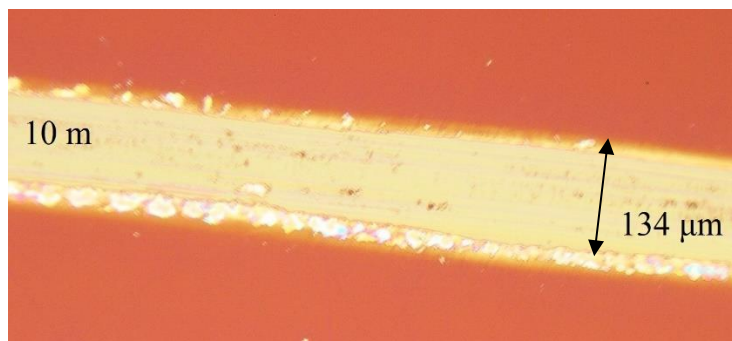
Čóčky EyeDrive využívají technologie Reflect Control minimalizující odlesky různých světelných zdrojů a zvyšuje tak kontrast. Čóčka se uzpůsobí aktuálním světelným podmínkám. [33]

Jak je vidět na obrázku 25, propustnost těchto dvou čóček je rozdílná. Zatímco čóčka EyeDrive má vyšší propustnost než čóčka DriveSafe do 725 nm, transmisivita čóčky DriveSafe je vyšší než čóčky EyeDrive od 725 nm. Průměrná transmisivita těchto čóček je velmi podobná, čóčka EyeDrive má průměrnou transmisivitu 95,96 %, čóčka DriveSafe 94,21 %. Vyšší ochranu před V zářením pak poskytuje čóčka DriveSafe, ta propouští světlo od 375 nm, čóčka EyeDrive propouští světlo od 362 nm.



Obrázek 25: Graf transmissivity čóček EyeDrive a DriveSafe

Na čočce DriveSafe nejsou ani po pátém měření viditelné žádné známky opotřebení, a to ani pod mikroskopem. Čočka EyeDrive byla poškozena až u pátého pokusu, tedy 10 m, kdy byla šíře rýhy 134  $\mu\text{m}$  (obr.26).



**Obrázek 26:** Poškození čočky EyeDrive po pátém měření

### 3.2.10 Vrstvy DLC

Vrstvy byly připraveny metodou PLD na společném pracovišti Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT a 1. lékařské fakulty UK na Albertově v laboratoři excimerového laseru.

Laser, který byl používán při experimentech, je pulsní excimerový laser Lumonics PM 842, vyráběný firmou LightMachinery. Parametry laseru použitých při depozici jsou vlnová délka  $\lambda = 248 \text{ nm}$ , délka pulsu  $\tau = 20 \text{ ns}$  a opakovací frekvence  $f = 10 \text{ Hz}$ .

Experiment byl zaměřen na vyhodnocení tribologických a optických vlastností vrstev DLC nanesených na čočkách (CR-39). Pro toto ohodnocení byly připraveny čtyři různé vrstvy DLC lišící se tloušťkou a zastoupením diamantu-podobných a grafitu-podobných vazeb, které ovlivňují průhlednost samotné vrstvy. Vrstvy byly deponovány v atmosféře argonu za pokojové teploty. Shrnuté parametry jednotlivých depozic vrstev jsou v tabulce 2.

Změna počtu pulsů ovlivňuje tloušťku vrstvy.

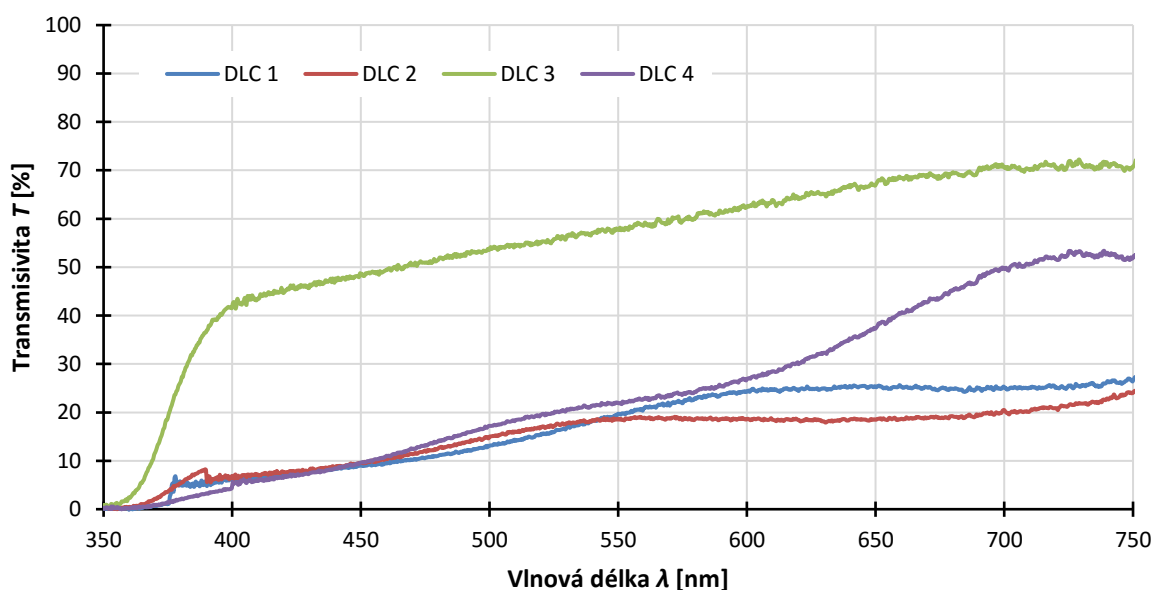
Změna hustoty energie laseru ovlivňuje zastoupení grafitu-podobných a diamantu-podobných vazeb ve vrstvě. Se zvyšující se hustotou energie roste i počet diamantu-podobných vazeb a tím i průhlednost a tvrdost vrstvy.

**Tabulka 2:** Parametry depozice DLC vrstev na brýlové čočky

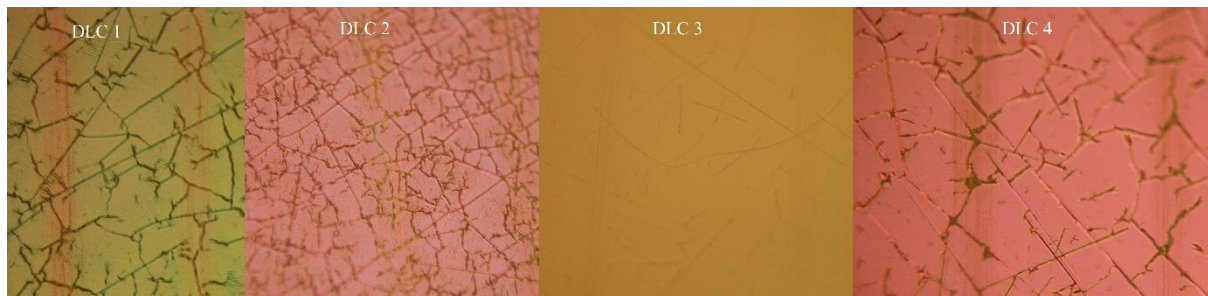
	CR39: DLC-1	CR39: DLC-2	CR39: DLC-3	CR39: DLC-4
Substrát	CR39 S +1,5	CR39 S +1,5	CR39 S 0	CR39 S 0
Počet pulsů	7 000	3 500	1 000	10 000
Frekvence laseru [Hz]	10	10	10	10
Laserová stopa na terči [mm]	2 x 1,1	2 x 1,1	2 x 1,25	2 x 1,25
Energie z laseru / za čočkou [mJ]	390 / 165	750 / 330	670 / 242	670 / 242
Hustota energie laseru [J/cm <sup>2</sup> ]	6	12	10	10
Přibližná tloušťka vrstvy [nm]	130	150	40	300

Jak je vidět na obrázku 27, nejlépe dopadla čočka s úpravou DLC3. Čočka začíná propouštět světlo na 361 nm, odkud její propustnost mírně vstoupá. Své maximální propustnosti, tedy 72,25 %, dosahuje čočka na 729 nm.

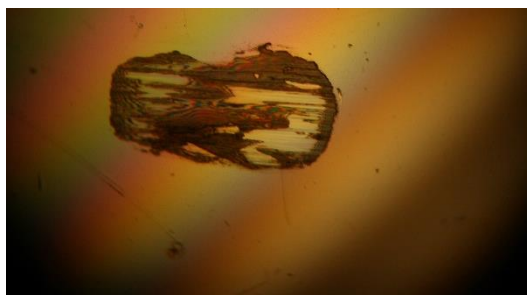
Na zbylých třech čočkách došlo mezi nanesením vrstvy a měřením jejich transmisivity k popraskání těchto vrstev. Popraskání bylo způsobeno vysokým pnutím na povrchu čočky. Na spektrometru tedy dochází k disperzi světla a tím k nižší propustnosti pro světlo.

**Obrázek 27:** Graf transmisivity čoček s DLC vrstvou

Přestože vrstvy byly popraskané, jejich odolnost proti opotřebení je vysoká. Jak je vidět na obrázku 28, na čočkách jsou pod mikroskopem viditelné stopy po kuličce, nelze však přesně naměřit jejich šíři. Povrch kuličky byl navíc po sérii pěti měření poškozený (obr.29)



**Obrázek 28:** Viditelnost poškození na čočkách s vrstvami DLC



**Obrázek 29:** Poškození ocelové kuličky po pěti měřeních na čočce s vrstvou DLC

### 3.2.11 Výsledky měření

V následujících tabulkách jsou shrnuty kompletní výsledky experimentální části. V tabulce 3 jsou uvedeny výsledky měření na spektrometru, tedy průměrná transmisivita jednotlivých vrstev  $\bar{T}$ , maximální naměřená transmisivita  $T_{max}$  a na které vlnové délce byla tato hodnota naměřena, dále pak vypočtená propustnost čočky pro UV záření a rychlost vzrůstu propustnosti čočky mezi UV oblastí a viditelnou oblastí spektra  $k$ .

V tabulce 4 jsou uvedeny šířky vrypů vzniklých po jednotlivých měřeních. Hodnoty jsou udávány v  $\mu\text{m}$ .

Tabulka 3: Výsledky měření jednotlivých vrstev na spektrometru

Povrchová úprava	Index lomu $n$ [-]	Materiál	Průměrná transmisivita (450-700 nm) $\bar{T}$ [%]	Maximální transmisivita $T_{max}$ [%]	Vlnová délka v $T_{max}$ [nm]	Propustnost pro UV záření [nm]	Rychlost vzrůstu propustnosti UV-VIS $k$ [-]
žádná	1,5	minerál	91,52	94,44	638	340	2,31
žádná	1,5	CR-39	77,66	84,36	718	368	284
HC	1,5	CR-39	79,75	84,42	705	351	2,12
HMC (Omega)	1,5	CR-39	95,68	98,35	639	355	2,67
HMC (Zeiss)	1,5	CR-39	91,81	95,65	670	367	3,09
HMC+	1,5	CR-39	88,38	92,59	670	367	2,65
SHMC	1,5	CR-39	95,66	98,11	633	347	1,91
Omega MAX	1,5	CR-39	97,95	100	660	356	1,91
Omega Max UV	1,5	CR-39	88,28	91,3	705	365	2,65
LotuTec	1,5	CR-39	95,53	98,64	662	358	0,94
DuraVision Platinum	1,5	CR-39	90,42	92,72	641	366	2,45
HMC	1,56	Midle	78,47	82,56	675	385	3,27
HC	1,6	MR-8	59,56	64,05	677	402	2,88
HMC	1,6	MR-8	76,91	81,76	665	397	3,3
HMC+	1,6	MR-8	75,32	79,64	755	397	3,89
SHMC	1,6	MR-8	85,97	89,03	671	405	2,88
Omega MAX UV	1,6	MR-8	62,71	67,95	753	395	2,42
LotuTec	1,6	MR-8	97,98	100	715	394	4,21
DuraVision Platinum	1,6	MR-8	83,61	87,49	680	401	4,4
HC	1,67	MR-10	32,21	43,16	759	404	1,68
HMC	1,67	MR-10	61,18	65,80	722	397	2,95
SHMC	1,67	MR-10	56,89	69,48	759	405	2,88
Omega MAX	1,67	MR-10	44,23	49,53	684	396	1,54
+420 BlueCut			94,9	98,8	696	416	4,91
Blue			95,17	99,06	607	362	1
DVBP			81,68	88,2	715	389	3,09

**Tabulka 4:** Výsledky měření jednotlivých vrstev na tribometru, v tabulce je udána šíře poškození [ $\mu\text{m}$ ]

<b>Povrchová úprava</b>	<b>1. měření (1 m)</b>	<b>2. měření (2 m)</b>	<b>3. měření (3 m)</b>	<b>4. měření (5 m)</b>	<b>5. měření (10 m)</b>
<b>HC</b>	*	93	161	187	195
<b>HMC (Omega)</b>	60	120	120	133	137
<b>HMC (Zeiss)</b>	45	82	68	108	179
<b>SHMC</b>	**	15	107	145	145
<b>Omega MAX</b>	**	**	**	37	165
<b>BLUE</b>	**	**	**	108	128
<b>+420 BlueCut</b>	**	**	**	**	165
<b>DVBP</b>	410***	410***	410***	410***	410***
<b>EyeDrive</b>	**	**	**	**	134
<b>DriveSafe</b>	**	**	**	**	**
<b>DLC 1</b>	**	*	*	*	*
<b>DLC 2</b>	**	*	*	*	*
<b>DLC 3</b>	**	*	*	*	*
<b>DLC 4</b>	**	*	*	*	*

\* Na čočce jsou pod mikroskopem viditelné stopy poškození

\*\* Čočka je bez známek poškození

\*\*\* Na první pohled je čočka bez poškození, pod mikroskopem jsou ale viditelná místa, kde se kulička pohybovala

## 4. Diskuse

Z testování čoček na spektrometru vyplývá, že na propustnost UV záření a viditelného světla má velký vliv základní materiál čočky. Čočky s nižším indexem lomu (1,5) mají výrazně větší propustnost pro světlo než čočky s vyššími indexy lomu (1,6; 1,68). Výhodou vysokoindexových čoček je pak 100 % ochrana proti UV záření, jelikož tyto čočky nepropouští světlo do vlnové délky 400 nm. Nejvyšší ochranu před UV zářením poskytovaly z nízkoindexových čoček čočky s vrstvami HMC a HMC+ od firmy Zeiss, kde propustnost čoček začínala na 367 nm. Vliv na měření na spektrometru mělo zahřátí lampy (tepelný drift) a umístění čočky – některé čočky byly již vybroušené do brýlové obruby, nebyly tak umístěny přímo na středu a tím docházelo ke konvergenci nebo divergenci svazku. Tím vznikly drobné odchylky od skutečných hodnot (např. stoprocentní propustnost některých čoček).

Výsledky druhé části experimentální části, tedy měření odolnosti čoček proti opotřebením na tribometru, ukázalo, že více odolné jsou čočky se speciálními vrstvami. Čočky s tvrzením a běžnou antireflexní úpravou (HC, HMC, HMC+, SHMC) vykazovali nejpozději po druhém měření (tedy po 2 m) viditelné známky opotřebením. Čočky se speciálními vrstvami měly odolnost proti opotřebením výrazně vyšší. Nejlépe dopadly vrstvy LotuTec a DuraVision Platinum, které ani po pátém měření nejevily jakékoliv známky poškození. Tyto dvě vrstvy jsou při nanášení iontově bombardovány.

Výsledky u čoček s DLC vrstvou výrazně ovlivnilo popraskání tří ze čtyř vzorků. Toto popraskání bylo způsobeno vysokým pnutím na povrchu čočky. Na spektrometru pak dochází k disperzi světla, a propustnost čočky je tak nižší. Popraskání této vrstvy ale nemělo vliv na testování na tribometru. Na první pohled se čočky zdají bez poškození. Přestože na čočkách byly pod mikroskopem viditelné dráhy, ve kterých se kulička pohybovala, nedošlo k prodření vrstvy a tím poškození samotného materiálu čočky.



## Závěr

Ve své bakalářské práci jsem provedla rešerši materiálů, které se v dnešní době používají pro výrobu brýlových čoček, tj. minerálních a organických materiálů. Speciálně jsem se zaměřila na dodatečné povrchové úpravy brýlových čoček. Mezi tyto úpravy jsem zařadila jak vrstvy chránící čočku před poškozením, tedy tvrzení, antireflexní úprava, hydrofobní a oleofobní úprava a antistatická úprava, tak čočky chránící zrak nositele nebo zajišťující komfortnější vidění. To jsou například čočky s UV ochranou, barevné a fototropní čočky, polarizační čočky nebo čočky s reflexní vrstvou či vrstvou optifog. U jednotlivých vrstev a úprav jsem popsala jejich základní parametry, funkci jednotlivých vrstev, způsoby nanášení, jejich výhody, nevýhody a pro koho jsou jednotlivé typy určeny.

V experimentální části byla zkoumána transmisivita čoček pomocí spektrometru. Z naměřených dat byly sestaveny grafy propustností jednotlivých vrstev čočky, vypočtena průměrná transmisivita čočky, pomocí rovnice tečny pak byla vypočtena propustnost čoček pro UV záření. Tím byla prokázána závislost transmisivity vrstev na materiálu čočky, a tedy indexu lomu čočky. Čím nižší je index lomu čočky, tím vyšší je transmisivita dané čočky. Nejvyšší transmisivitu tedy mají čočky s indexem lomu 1,5 a nejnižší čočky s indexem lomu 1,67. Materiál čočky také velmi ovlivňuje propustnost čočky pro UV záření. Nejnižší ochranu před UV zářením poskytují čočky s indexem lomu 1,5, které začínají propouštět světlo mezi 350-370 nm. Vyšší ochranu pak poskytují čočky s indexem lomu 1,56 (naměřena byla transmisivita jedné čočky o tomto indexu lomu, její propustnost pro UV záření je na 385 nm) a nejvyšší, tedy 100 % ochranu, poskytují čočky s indexem lomu 1,6 a 1,67. Hlavním rozdílem čoček se stejným indexem lomu a různými povrchovými úpravami je rychlost nárůstu propustnosti čočky na rozmezí UV a viditelného světla. Nejrychlejší nárůst měla čočka +420 BlueCut – 4,91. Naopak nejpomalejší nárůst měla čočka LotuTec (0,94) o indexu lomu 1,5.

Měření na tribometru prokázalo závislost odolnosti čočky na povrchové úpravě čočky. U tvrzených čoček a čoček s běžnou antireflexní úpravou bylo poškození znatelné téměř okamžitě. Například čočky pouze tvrzené a čočky s vrstvou HMC byly poškozeny už během prvního měření, tedy na 1 m. U speciálních čoček je pak odolnost proti poškození vyšší. Například u čoček určených pro řidiče (EyeDrive) nebo čoček filtrujících modré světlo (+420 BlueCut) došlo k poškození až během testování na nejdelší vzdálenost – 10 m. U čoček s úpravou DVP a LotuTec pak nedošlo k žádnému viditelnému poškození.

Vysokou odolnost také prokázala vrstva DLC. Její propustnost pro světlo byla sice nižší než u ostatních čoček, toto mínus však vynahradila svými tribologickými vlastnostmi, které dopadly lépe než např. čočka minerální. Další výzkumy této vrstvy by tedy mohly do budoucna vést k výrobě nových odolných brýlových čoček.

Cílem mé práce bylo najít nejvhodnější povrchovou úpravu, která optimálně řeší transmisivitu, ochranu před UV zářením a odolnost proti opotřebení. Z tohoto hlediska dopadla nejlépe čočka +420 BlueCut s průměrnou transmisivitou 94,9 %, ochranou před UV zářením do 416 nm a vysokou odolností proti opotřebení (čočka byla poškozena až po pátém měření). Velmi dobré výsledky měla také čočka s povrchovou úpravou LotuTec o indexu lomu 1,6, která měla průměrnou transmisivitu 67,68 % a propouštěla světlo od 394 nm. U této čočky navíc ani po pátém testování nedošlo k jejímu narušení.

## Seznam použité literatury

- [1] Historie brýlí. *Carl Zeiss AG* [online]. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [https://www.zeiss.cz/vision-care/cs\\_cz/better-vision/porozumneni-videni/brylove-cocky-a-reseni-vaseho-videni/historie-bryli.html](https://www.zeiss.cz/vision-care/cs_cz/better-vision/porozumneni-videni/brylove-cocky-a-reseni-vaseho-videni/historie-bryli.html)
- [2] J. RANDULOVÁ: *Sklo a plasty jako materiály brýlových čoček, povrchové úpravy brýlových čoček*. Brno, 2010. Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí práce Petr Veselý.
- [3] P. VESELÝ, P. ŠIMOVIČ, S. PETROVÁ: *Konvenční a free-form technologie výroby brýlových čoček*. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2014. ISBN 978-80-7013-566-2.
- [4] Z praxe optika. Technologie výroby brýlových čoček: Minerální polotovary pro výrobu brýlových čoček. *Česká oční optika*. 2013, **54**(1), 8-11. ISSN 1211–233X
- [5] Přehled materiálů skel. *Rodinná oční optika - J. A. optik* [online]. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: <https://www.jaoptik.cz/informace/rady-a-tipy/prehled-materialu-skel.html>
- [6] *Plastic: Materials used for Plastic Lenses* [online]. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [https://www.zeiss.com/vision-care/en\\_us/eye-care-professionals/optical-knowledge/optical-basics/lens-materials/plastic.html](https://www.zeiss.com/vision-care/en_us/eye-care-professionals/optical-knowledge/optical-basics/lens-materials/plastic.html)
- [7] A. K. BHOOTRA: *Ophthalmic lenses*. New Delhi: Jaypee, 2009. ISBN 9788184486049
- [8] *Mitsui Chemicals* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.mitsuichem.com/en/special/mr/products/index.htm>
- [9] Materiál brýlových čoček. *Omega Optix s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://www.omega-optix.cz/cs-cz/produkty/brylove-cocky>
- [10] C. FOWLER, K. L. PETRE: *Spectacle lenses: theory and practice*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 9780750623704
- [11] P. ŠIMOVIČ: Antireflexné úpravy a kontrola kvality. *Česká oční optika*. 2012, **53**(04), 46-49. ISSN 1211–233X.
- [12] G. HEITING: *Anti-Reflective Coating: See Better And Look Better* [online], 2017 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <http://www.allaboutvision.com/lenses/anti-reflective.htm>
- [13] *Anti Static Coating* [online]. [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: [http://www.gf-technology.com/cute\\_file/AntiStaticCoating.pdf](http://www.gf-technology.com/cute_file/AntiStaticCoating.pdf)
- [14] Eyeglass Lens Coatings: Anti-Reflective, Scratch-Resistant, Anti-Fog and UV. HAITING, Gary. *All About Vision* [online]. 2017 [cit. 2017-12-30]. Dostupné z: <http://www.allaboutvision.com/lenses/coatings.htm>

- [15] J. BENEŠ, J. KYMPLOVÁ, F. VÍTEK: *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-4712-5.
- [16] K. WALSH: *UV radiation and the Eye* [online]. 2009 [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: [https://www.jnjvisioncare.ae/sites/default/files/public/tvci\\_uv\\_radiation\\_and\\_the\\_eye.pdf](https://www.jnjvisioncare.ae/sites/default/files/public/tvci_uv_radiation_and_the_eye.pdf)
- [17] VLIV UV ZÁŘENÍ NA LIDSKÉ OKO. [Http://fbmi.sirdik.org/](http://fbmi.sirdik.org/) [online]. [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/9-kapitola/96.html>
- [18] J. WOLFFSOHN: *Nutnost ochrany zraku před UV zářením* [online]. In: . [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: [http://www.thevisioncareinstitute.cz/sites/default/files/content/cz/TVCI\\_Wolffsohn\\_Nutnost%20ochrany%20zraku.pdf](http://www.thevisioncareinstitute.cz/sites/default/files/content/cz/TVCI_Wolffsohn_Nutnost%20ochrany%20zraku.pdf)
- [19] *UV +420cut: Lens technology* [online]. [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://uv420cut.com/>
- [20] *Nejbezpečnější brýlová čočka od Omega Optix* [online]. [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.omega-optix.cz/cs-cz/novinky#4312>
- [21] *Modré světlo: klady a zápory. Carl Zeiss AG* [online]. [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: [https://www.zeiss.cz/vision-care/cs\\_cz/better-vision/porozumneni-videni/oko-a-ideni/modre-sv\\_tlo-klady-a-zapory.html](https://www.zeiss.cz/vision-care/cs_cz/better-vision/porozumneni-videni/oko-a-ideni/modre-sv_tlo-klady-a-zapory.html)
- [22] P. VESELÝ, P. ŠIMOVIČ: *Technologie výroby brýlových čoček: Organické fototropní, polarizační a fotopolarizační materiály. Česká oční optika* [online]. 2013, **54**(3), 10-14 [cit. 2017-12-27]. ISSN 1211-233X.
- [23] E. MORGAN: *Polarized Sunglasses. All About Vision* [online]. 2017 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://www.allaboutvision.com/sunglasses/polarized.htm>
- [24] *Technologie brýlových čoček Drivewear. Drivewear* [online]. [cit. 2017-12-30]. Dostupné z: <http://www.drivewear.cz/techno.html>
- [25] M. JELÍNEK: *Laserová depozice tenkých vrstev*. České vysoké učení technické v Praze, 2005.
- [26] *HMC+/HMC AR Coatings* [online]. 2016 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: [http://synchronylenses.com/static\\_exentriqdotcom/documents/Synchrony%20Lens\\_85121/35ecf77c-156f-4d8c-a94e-abe1b869f8e6.pdf](http://synchronylenses.com/static_exentriqdotcom/documents/Synchrony%20Lens_85121/35ecf77c-156f-4d8c-a94e-abe1b869f8e6.pdf)
- [27] *Antireflexní úpravy* [online]. 2014 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.omega-optix.cz/cs-cz/produkty/antireflexni-upravy>
- [28] *LotuTec: ZEISS povrchové úpravy brýlových čoček pro křišťálově čisté vidění* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: [https://www.zeiss.cz/vision-care/cs\\_cz/eye-care-professionals/produkty-a-sluzby/povrchove-upravy-vrstvy/povrchove-upravy/lotutec.html](https://www.zeiss.cz/vision-care/cs_cz/eye-care-professionals/produkty-a-sluzby/povrchove-upravy-vrstvy/povrchove-upravy/lotutec.html)

- [29] *DuraVision® Platinum společnosti ZEISS: To nejlepší z ZEISS prémiových povrchových úprav* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: [https://www.zeiss.cz/vision-care/cs\\_cz/eye-care-professionals/produkty-a-sluzby/povrchove-upravy-vrstvy/povrchove-upravy/duravision-platinum.html](https://www.zeiss.cz/vision-care/cs_cz/eye-care-professionals/produkty-a-sluzby/povrchove-upravy-vrstvy/povrchove-upravy/duravision-platinum.html)
- [30] *Nejbezpečnější brýlová čočka od Omega Optix* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.omega-optix.cz/cs-cz/novinky>
- [31] *DuraVision® BlueProtect společnosti ZEISS: ZEISS řešení blokace modro-fialového světla* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: [https://www.zeiss.cz/vision-care/cs\\_cz/eye-care-professionals/produkty-a-sluzby/povrchove-upravy-vrstvy/povrchove-upravy/duravision-blueprotect.html](https://www.zeiss.cz/vision-care/cs_cz/eye-care-professionals/produkty-a-sluzby/povrchove-upravy-vrstvy/povrchove-upravy/duravision-blueprotect.html)
- [32] *Novinka – brýlové čočky ZEISS DriveSafe: Jedny brýle pro každodenní nošení a bezpečnější řízení* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: [https://www.zeiss.cz/vision-care/cs\\_cz/eye-care-professionals/produkty-a-sluzby/precizni-cocky-zeiss/brylove-cocky-drivesafe.html](https://www.zeiss.cz/vision-care/cs_cz/eye-care-professionals/produkty-a-sluzby/precizni-cocky-zeiss/brylove-cocky-drivesafe.html)
- [33] *EyeDrive* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.eyedrive.cz/>

## Seznam symbolů a zkratek

### Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$n$	-	Index lomu
$T$	%	Transmisivita
$\lambda$	nm	Vlnová délka

### Seznam zkratek

Zkratka	Význam
DLC	Diamantu podobný uhlík ( <i>Diamond like carbon</i> )
PMMA	Polymethylmetakrylát
PC	Polykarbonát
ADC	Allyldiglykolkarbonát
PVD	Fyzikální depozice vrstev ( <i>Physical Vapor Deposition</i> )
LP – CVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
PECVD	Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition
AR	Antireflexní vrstva
HEV	Vysoce energetické viditelné světlo
PVA	Polyvinylacetát
PLD	Pulzní laserová depozice
DVBP	DuraVision BlueProtect

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Strukturní model CR-39 [6] .....	4
Obrázek 2: Princip antireflexu [3] .....	9
Obrázek 3: Složení čočky s AR úpravou [11] .....	9
Obrázek 4: Struktura hydrofobní vrstvy [3] .....	10
Obrázek 5: Technologie optifog [3] .....	11
Obrázek 6: Nitrooční filtrace UV záření očními tkáněmi [16].....	13
Obrázek 7: Reakce fotoaktivní molekuly při fototropní reakci [3] .....	16
Obrázek 8: Princip polarizačních čoček [3] .....	17
Obrázek 9: Tribometr se speciálním držákem pro brýlové čočky.....	20
Obrázek 10: Graf rozdílu transmisivity plastové a minerální čočky .....	21
Obrázek 11: Viditelnost poškození na minerální čočce (vlevo makroskopická fotografie, vpravo mikroskopická).....	22
Obrázek 12: Graf transmisivity tvrzených čoček o různých indexech lomu.....	23
Obrázek 13: Opotřebení tvrzené čočky – vlevo fotografie čočky, vpravo fotografie pod mikroskopem .....	23
Obrázek 14: Graf transmisivity vrstev HMC .....	24
Obrázek 15: Poškození vrstvy HMC firmy Zeiss – vlevo fotografie poškozené čočky, vpravo viditelnost poškození pod mikroskopem .....	25
Obrázek 16: Graf transmisivity vrstev HMC+ a SHMC .....	26
Obrázek 17: Viditelnost poškození čočky SHMC po 3. a 2. měření.....	27
Obrázek 18: Graf transmisivity čoček Omega MAX .....	27
Obrázek 19: Graf transmisivity čoček Omega MAX UV .....	28
Obrázek 20: Viditelnost poškození čočky Omega MAX po 4. a 5. měření – vlevo fotografie poškozené čočky, vpravo viditelnost poškození pod mikroskopem .....	28
Obrázek 21: Graf transmisivity čoček s úpravou LotuTec.....	29
Obrázek 22: Graf transmisivity čoček s úpravou DVP .....	30
Obrázek 23: Graf transmisivity čoček s ochranou proti modrému světlu .....	32
Obrázek 24: Viditelnost poškození čoček Blue (vlevo), +420 BlueCut (uprostřed) a DVBP (vpravo) pod mikroskopem .....	32
Obrázek 25: Graf transmisivity čoček EyeDrive a DriveSafe.....	33
Obrázek 26: Poškození čočky EyeDrive po pátém měření .....	34
Obrázek 27: Graf transmisivity čoček s DLC vrstvou .....	35
Obrázek 28: Viditelnost poškození na čočkách s vrstvy DLC .....	36
Obrázek 29: Poškození ocelové kuličky po pěti měřeních na čočce s vrstvou DLC .....	36

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry měření na tribometru.....	20
Tabulka 2: Parametry depozice DLC vrstev na brýlové čočky.....	35
Tabulka 3: Výsledky měření jednotlivých vrstev na spektrometru.....	37
Tabulka 4: Výsledky měření jednotlivých vrstev na tribometru, v tabulce je udána šíře poškození [ $\mu\text{m}$ ].....	38