

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Komunikace, multimédia a elektronika

Obor: Aplikovaná elektronika



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studium vlastností polymerních materiálů
pro fotonické aplikace

Autor: Martin Šťastný
Vedoucí: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
Akademický rok: 2017/2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šťastný** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **437455**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Studium vlastností polymerních materiálů pro fotonické aplikace

Název bakalářské práce anglicky:

Properties study of polymeric materials for photonic applications

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s materiály používanými pro fotonické aplikace.
- 2) Věnujte zvláštní pozornost polymerním materiálům.
- 3) Seznamte se s měřicími metodami používanými pro charakterizaci polymerních materiálů.
- 4) Navrhněte postup pro diagnostiku polymerních materiálů se zaměřením na určení maximální provozní teploty a stanovení životnosti.
- 5) Podílejte se na měření a charakterizaci vybraných materiálů.
- 6) Dosažené výsledky shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 až 70 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. S. Bäumer: Handbook of plastic optics, Weinheim : Wiley-VCH, 2010. 4.NP, regál 4B/080 TA1800 .H36 2010 A 46624
2. K. Novotný: Optická Komunikační Technika, ČVUT 1998.
3. J.D. Menczel, R.B. Prime: Thermal Analysis of Polymers, Fundamentals and Applications. Wiley 2008, ISBN 978-0-471-76917-0.
4. I. Kudláček: Degradace procesy I., Vydavatelství ČVUT 1994

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze

.....
Martin Šťastný

Poděkování

Děkuji především doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a pomoc při realizaci mé práce. Dále děkuji doc. Ing. Pavle Někviňové, Ph.D. za pomoc při měření indexů lomu. Za poskytnutí vzorků děkuji Petru Vrbelovi z Optiky Čivice s.r.o., Reinhardu Schellerovi ze Zeon Europe GmbH a Markusovi Paruselovi z Evonik Industries AG.

Martin Šťastný

Název: Studium vlastností polymerních materiálů pro fotonické aplikace

Autor: Martin Šťastný

Obor: Aplikovaná elektronika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D., Katedra mikroelektroniky

Konzultant: —

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá studiem polymerních materiálů, jejich teplotní odolností a s tím spojenou možností použití pro teplotně odolné optické planární vlnovody. V práci jsou obsaženy materiály pro fotonické aplikace, metody pro zjištění teplotní odolnosti a výsledky testů vybraných materiálů.

Klíčová slova: Polymerní materiály, optické planární vlnovody, teplotní odolnost

***Title:* Properties study of polymeric materials for photonic applications**

Author: Martin Štastný

Abstract: The bachelor thesis is aimed at a study of polymeric materials, their thermal endurance linked to the possibility of usage as thermal endurant optical planar waveguides. In this thesis are included materials for photonic applications, methods for establishment of the thermal endurance and results for selected materials.

Key words: Polymeric materials, optical planar waveguides, thermal endurance

Obsah

1	Úvod	13
2	Materiály pro fotoniku	15
3	Měřicí metody	21
3.1	Zkouška teplotní odolnosti	21
3.2	Měření hmotnosti	21
3.3	Měření indexu lomu	22
3.4	Měření absorpčních spekter	22
3.5	Termogravimetrická analýza	23
3.6	Diferenční kompenzační kalorimetrie	23
3.7	Teplota měknutí	24
3.8	Měření geometrických rozměrů	24
3.9	Zrychlené stárnocí testy	24
3.9.1	Principy stárnutí	24
3.9.2	Návrh testu	25
3.9.3	Další metody	26
4	Měření	29
4.1	Teplotní stálost	29
4.1.1	Měření hmotnosti	29
4.1.2	Index lomu	34
4.1.3	Absorpce	40
4.1.4	Zjednodušená termogravimetrie	45
4.1.5	Vyhodnocení teplotní stálosti	46
4.2	Termogravimetrická analýza	47
4.3	Diferenční kompenzační kalorimetrie	48
4.4	Teplota měknutí dle Vicata	49
4.5	Zrychlené stárnocí testy	49
5	Závěr	53
A	Hmotnosti vzorků pro zkoušku teplotní odolnosti	i
B	Tloušťky vzorků pro měření Vicat	vii
C	Hmotnosti vzorků pro zrychlené stárnutí	viii

Seznam zkratek

<i>Zkratka</i>	<i>Význam</i>
3D	Trojrozměrný (Three dimensions)
abs.	Absorpce
ADC	Allyldiglikolkarbonát (Allyl diglycol carbonate)
CD-DA	Kompaktní disk (Compact disc - digital audio)
COP	Cyklo-olefin polymer (Cyclo-olefin polymer)
DSC	Diferenční kompenzační kalorimetrie (Differential scanning calorimetry)
ESC	Environmentální stresové praskliny (Environmental stress cracking)
HDT	Heat deflection temperature
IR	Infračervený (Infrared)
PC	Polykarbonát (Polycarbonate)
PDMDPS	Polydimetyl-difenylosiloxan (Polydimethyl-diphenylsiloxane)
PDMS	Polydimetysiloxan (Polydimethylsiloxane)
PMMA	Polymetylmetakrylát (Polymethyl methacrylate)
PMMI	Polymetylmetakrylimid (Polymethyl methacrylimide)
POF	Plastické optické vlákno (Plastic optical fiber)
PPSU	Polyfenylsulfon (Polyphenylsulfone)
PUR	Polyuretan (Polyurethan)
PVC	Polyvinylchlorid (Polyvinyl chloride)
RT	Pokožová teplota (Room temperature)
SMMA	Styrenmetylmetakrylát (Styrene methyl methacrylate)
TU	Thiouretan (Thiourethan)
UV	Ultrafialový (Ultraviolet)
UVA	Spektrální oblast ultrafialového záření (400 – 320 nm)

Seznam symbolů

<i>Symbol</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
δ_m	Absolutní rozdíl hmotností	g
Θ_c, Θ_s	Kritický úhel dopadu	°
Θ_m	Úhel dopadu	°
λ	Vlnová délka	$\mu\text{m}, \text{nm}$
A	Pre-exponenciální faktor	s^{-1}
D_{130}	Změna hmotnosti z testu 130°C	g
D_m	Změna hmotnosti	%
D_R	Referenční změna	%
E	Reakční energie	J
$K(T)$	Reakční míra	-
m	Hmotnost	g
\bar{m}	Průměrná hmotnost	g
m_0	Hmotnost před testem	g
m_k	Hmotnost z kontrolního měření	g
n	Index lomu	-
n_D	Index lomu při vlnové délce Fraunhoferovi čáry D (589 nm)	-
n_p	Index lomu hranolu	-
R	Plynová konstanta	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
T	Absolutní teplota	K
T_g	Teplota skelného přechodu	°C
T_p	Přirozená teplota	°C
t_p	Doba požadovaného zestárnutí	měs.
T_s	Teplota zrychleného stárnutí	°C
t_s	Doba zrychleného stárnutí	měs.
TG	Hmotnost vzorku	%
u_{mA}	Nejistota typu A z naměřené hmotnosti	g
u_{mB}	Nejistota typu B z naměřené hmotnosti	g

Kapitola 1

Úvod

Polymery jsou v současné době rozšířené do různých odvětví a to i do fotoniky. Největší výhodou polymerů je snadné zpracování a nízké výrobní náklady, které v závislosti na fyzických vlastnostech jednotlivých materiálů vytvářejí ideální výrobní materiál. Co se týká fyzických vlastností mohou se polymery lišit nejen zbarvením, ale i parametry, které nejsou na první pohled zřetelné. Takovými parametry mohou být elektrická vodivost, index lomu, teplotní odolnost a mnohé další.

Problémem nejpoužívanějších polymerů je nízká teplotní odolnost. Otázkou je, který polymer by mohl standardně používané polymery nahradit pro použití za vysokých teplot. Tato práce je zaměřena na hledání materiálů, které budou dostatečně odolné a bude je možné provozovat při teplotě alespoň 120°C a mají potřebnou hodnotu indexu lomu a nízký optický útlum, respektive absorpci pro vytváření planárních vlnodů.

Tyto materiály by mohly být použity v místech se zvýšenou teplotou např. motorová část - blízkost motoru nebo kdekoliv jinde, kde se může teplota pohybovat okolo 120°C, přičemž může dosahovat až k hodnotě 130°C.

Pomocí hodnot uvedených výrobcí je možné vybrat polymery, které by měly dané podmínky splňovat, ale ne vždy se jedná o polymery určené pro optické aplikace. Není tedy zaručené, jak se tento materiál bude chovat při vystavení vysokým teplotám, zda-li se nezmění index lomu nebo absorpce. Zároveň je možné, že výrobce z důvodu zaručení doby provozuschopnosti, či jiného, uvádí nižší provozní teplotu, než materiál skutečně vydrží, proto je zapotřebí se zaměřit i na takovéto materiály.

Dalším problémem, i v případě nalezení materiálu splňujícího všechny předchozí podmínky, je otázka, jak dlouho vydrží tento materiál provoz při vysoké teplotě. Při vysokých teplotách dochází ke zrychlenému stárnutí, je tedy důležité zaručit, nebo alespoň zjistit dobu bezchybné provozuschopnosti.

Kapitola 2

Materiály pro fotoniku

Fotonika je moderní obor, který se zabývá studiem optických a optoelektronických vlastností materiálů [1]. Fotonika je úzce propojená s optikou a optoelektronikou. V závislosti na aplikaci se používají různé materiály, které se vyznačují svými speciálními vlastnostmi.

Pro fotoniku se používají polovodiče, optická skla a krystaly. V poslední době jsou vyvíjeny nové speciální polymerní materiály, které mají srovnatelné vlastnosti s polovodiči a optickými skly, ale dají se snadněji vyrobit.

Polovodiče

Základem fotoniky je interakce mezi fotonem a elektronem, tento děj probíhá nejčastěji v polovodičích. V závislosti na vlastnostech polovodičů je možné užití pro různé aplikace, v případě elektroluminescenčních diod a detektorů je jedním z nejdůležitějších parametrů vlnová délka, kterou jsou schopny generovat, případně detekovat. Nejčastěji používané polovodiče jsou shrnuty v tabulce 2.1, kde n_D je index lomu při vlnové délce Fraunhoferovy čáry D (589 nm).

Tabulka 2.1: Přehled vybraných polovodičů [2, 3, 4].

Název	Vzorec	Provozní spektrální rozsah λ [μm]	Index lomu n_D [-]
Křemík	Si	0,50-1,00	3,973
Karbid křemíku	SiC	0,40	2,647
Germanium	Ge	1,00-1,80	5,724
Arsenid gallia	GaAs	0,85	3,944
Arsenid india-gallia	InGaAs	1,00-1,67	3,908
Nitrid gallia	GaN	0,35-0,36	2,399
Fosfid gallia	GaP	0,50-0,70	3,777
Fosfid india	InP	0,90	3,587
Selenid zinečnatý	ZnSe	0,40-0,60	2,611
Sulfid zinečnatý	ZnS	0,40-0,60	2,367

Optická skla a optické krystaly

Optická skla a krystaly jsou základním stavebním kamenem optiky, jak klasické, tak i dalších odvětví z ní vyvinutých. Optická skla se využívají jako objemové optické prvky (čočky, hranoly,...), nebo přímo jako optické vlnovody, které mohou být vytvořeny např. pomocí iontové výměny do objemového skla.

Optická skla

Optická skla pro optické aplikace se liší především tvarem. Různými zakřiveními lze realizovat čočky a jiné optické prvky. U objemových prvků se pro změnu vlastností skel nezdávka užívá metoda tenkých vrstev, díky kterým je možné například filtrovat potřebné vlnové délky. Skla se ale mohou lišit i svým složením. Nejčastěji používaná skla jsou uvedena v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2: Přehled vybraných optických skel [3, 5, 6].

Název skla	Materiál	Index lomu n_D [-]
Křemenné	97% SiO ₂	1,458
Sodno-vápenné	74% SiO ₂ , 16% Na ₂ O, 5% CaO	1,523
Boro-křemenné	80% SiO ₂ , 13% B ₂ O ₃ ,	1,517
Germaniové	100% GeO ₂	1,586

Pro vlnovody je nejčastěji využíváno křemenné sklo, příklad použití jsou jádra optických vláken v páteřních sítích optických rozvodů, ale využívá se i sklo boro-křemenné, především pro aplikace, kde může být dosahováno vyšších teplot. Ve speciálních případech se využívají křemenná skla s příměsí germania (GeO₂). Lze tak dosáhnout vyššího indexu lomu, než u čistého křemenného skla.

Optické krystaly

Krystaly jsou velká skupina, jednou z nejdůležitějších podskupin pro optiku jsou krystaly určené pro aplikace nelineární optiky. Výběr používaných krystalů je v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Přehled vybraných optických krystalů [3, 7].

Název	Vzorec	Provozní spektrální rozsah λ [μm]	Index lomu n_D [-]
Lithium niobát	LiNbO ₃	0,42-5,20	2,300
Lithium tantalát	LiTaO ₃	—	2,181
Lithium triborát	LiB ₃ O ₅	0,16-2,60	1,576
Barium borát	BaB ₂ O ₄	0,19-3,50	1,671
Vápenec	CaCO ₃	0,35-2,30	1,658
Safír	Al ₂ O ₃	0,15-5,50	1,768
Fluorit	CaF ₂	—	1,434

Polymerní materiály

V současnosti je velký rozmach optoelektroniky a pro potřeby převedení optického signálu na krátké vzdálenosti se začínají používat polymerní materiály ve formě plastických optických vláken (POF - plastic optical fiber). Kromě POF se polymerní materiály používají i v jiných optických aplikacích.

Materiály pro optické aplikace

Stejně jako u optických skel, jsou polymerní materiály využívány také jako objemové prvky. Tyto materiály mohou být zároveň používány pro výrobu optických vláken, jejich plášťů nebo podkladových vrstev (v závislosti na indexu lomu). Tyto materiály lze dále dělit podle typu polymerů na polymethylmetakryláty, styrenmethylmetakrylát, polykarbonáty, cyklo-olefin polymery, allyldiglykolkarbonáty, polyfenylsulfony, thiouretany, polyuretany, polymethylmetakrylimidy a mnoho dalších.

Akryláty

Polymethylmetakrylát (PMMA) patří mezi akrylátové polymery, je jedním z nejpoužívanějších optických polymerů, je též známý jako plexisklo nebo akrylátové sklo a má dalších několik obchodních názvů. Je velice všestranně použitelný a právě díky jeho velkému rozšíření, snadnému zpracování a indexu lomu se využívá jako jádro plastických optických vláken. Slouží také jako krycí materiál a je z něj možné vyrábět čočky [8].

Styrenmethylmetakrylát (SMMA) je dalším zástupcem akrylátových polymerů, lze jej také zařadit mezi styrenové kopolymery. Svým vzhledem je velice podobný PMMA, ale díky vlastnostem styrenových kopolymerů je odolný vůči nárazům a vyšším teplotám než PMMA. Díky své nízké výrobní ceně a tomu, že neobsahuje bisfenol A vytlačuje v některých aplikacích standardně používané plasty, jedná se především o potravinářský, ale i lékařský průmysl [9, 10].

Polymethylmetakrylimid (PMMI), registrovaný pod obchodní značkou Acrymid společnosti Evonik Industries AG patří také do skupiny akrylátových polymerů, je využíván především jako krycí materiál pro světla, vyrábí se z něj například kryty světel v automobilovém, leteckém a zdravotnickém průmyslu, ale i v dalších odvětvích. Materiál je pro tyto účely vhodný díky vysoké transmisii, čistotě, teplotní odolnosti a odolnosti vůči vlivům prostředí [11].

Polykarbonáty

Polykarbonáty (PC) jsou termoplasty a díky vyšší teplotní odolnosti, malému množství nečistot a vysokému indexu lomu vcelku využívány k výrobě CD-DA (compact disc - digital audio) a dalších nosičů. Díky odolnosti vůči nárazům bývá využíván jako neprůstředné sklo. Kromě toho slouží také k výrobě čoček, tenkých vrstev pro optické aplikace a tekutých krystalů. V kombinaci s materiály zhášející plamen může být použit i za vysoké teploty bez značných projevů degradace.

Cyklo-olefin polymery

Cyklo-olefin polymer (COP) byl vyvinut a používán pro optické prvky, u kterých byla zapotřebí vysoká kvalita. Vzhledem ke své struktuře nemá hygroscopické vlastnosti, je teplotně odolný a nepodléhá vlivům prostředí. Vzhledem k jeho vlastnostem je již komerčně rozšířený pod různými názvy v závislosti na výrobci [8].

Allyldiglykolkarbonát

Jedná se o pryskyřici ze skupiny allylových esterů. Allyldiglykolkarbonát (ADC) je známý pod názvem CR39, původně byl vyvinutý jako vojenský materiál společností PPG Industries, Inc. a v dnešní době se využívá především pro výrobu brýlových čoček [12].

Polyfenylsulfon

Polyfenylsulfon (PPSU) má vynikající tepelnou odolnost. Dále je odolný vůči zatížení a chemickým činitelům. Nevýhodou tohoto materiálu je nízká odolnost vůči slunečnímu záření, není tedy vhodné použití ve venkovních podmínkách [13].

Polyuretanové polymery

Polyuretany (PUR) jsou rozšířené především v podobě pěnového polyuretanu známého jako molitan, ale existují i další podoby, například termoplastické polyuretany, materiály pro optiku na bázi polyuretanu, ale i mnohé další [14].

Nejznámější optický materiál na bázi polyuretanu je Trivex, vyvinutý společností PPG Industries, Inc. v roce 2001. Tento materiál je primárně určen pro výrobu brýlových čoček, jako náhrada polykarbonátu. Velkou výhodou tohoto materiálu je odolnost, proto je využíván především pro výrobu dětských a ochranných brýlí. Materiál je odolný vůči nárazu, záření a chemickým činidlům. Zároveň je materiál lehčí než polykarbonát, nevýhodou tohoto materiálu je vyšší cena oproti polykarbonátu [15].

Thiouretan (TU) s vysokým obsahem síry je využíván jako materiál v optickém průmyslu pro čočky s vysokým indexem lomu [16].

Přehled vybraných materiálů, jež byly k dispozici pro měření je uveden v tabulce 2.4.

Tabulka 2.4: Přehled objemových polymerů.

Typ	Označení Polymeru	Index lomu n_D [-]	Provozní tep. [°C]	Transmise [%] (μm)	Citace
PC	Makrolon GP clear	1,586	120	89 (—)	[17]
COP	Zeonex E48R	1,531	110	90 (0,30-1,40)	[18]
SMMA	NAS 21	1,570	80 ¹	91 (0,55)	[19]
TU	MR-8	1,600	118 ¹	—	[16]
ADC	CR39	1,498	65 ¹	89-91 (—)	[20]
PUR	TRIVEX	1,530	—	89-92 (—)	[15]
PC	Europlex F7 clear	—	115	—	[21]
PPSU	Europlex PPSU-Natur	—	195	—	[22]
PMMI	Pleximid TT70	1,540	149 ¹	91 (—)	[23]
PMMI	Pleximid TT50	1,530	132 ¹	91 (—)	[24]
PMMI	Pleximid 8813	1,510	111 ¹	92 (—)	[25]
PMMA	PMMA Zenit	1,489	80		[26]
PMMA	Plexiglas 7N	1,490	65 ¹	92 (—)	[27]

Materiály pro 3D tisk

Vzhledem k rozmachu 3D tisku, vznikají v současnosti i materiály pro tisk opticky čirých a dokonce optických prvků. Takovými materiály jsou například VeroClear a VisionClear.

VeroClear je produkt společnosti Sculpteo a jedná se o polyethylenovou pryskyřici vytvrzovanou pomocí UV záření. Dle výrobce by měl mít podobné vlastnosti jako PMMA. Vzhledem k tomu, že bývá využíván spíše k ochranným nebo ozdobným účelům, nemá výrobce uvedený index lomu. Z hodnot HDT (Heat Deflection temperature) vyplývá, že materiál by měl být použitelný do teploty 45°C [28, 29].

¹Z důvodu neznámé provozní teploty je uvedena HDT (Heat Deflection Temperature).

VisionClear od společnosti Luxexcel patří do skupiny akrylátů, vytvrzuje se stejně jako VeroClear pomocí UV záření. Narozdíl od VeroClearu se jedná o materiál využívaný k tisku optických prvků, především čoček. Index lomu tohoto materiálu je $n_D = 1,530$ a měl by být schopný odolat teplotám do 60°C [30].

Optické silikony

Kromě výše zmíněných polymerů je mnoho dalších, ale za zmínku stojí alespoň optické silikony. Jedná se o PDMS (Polydimetylsiloxan) a PDMDPS (polydimetyl-difenilsiloxan), tyto silikony by měly být schopny vydržet vysoké teploty a být celkově odolnější, než standardní objemové polymery. Velkým potenciálem pro využití tohoto materiálu je integrovaná optoelektronika (microfluidic chips), dále je možné použít materiál jako povrchovou ochranu a pro další různé účely [31]. Vybrané polymery jsou uvedeny v tabulce 2.5.

Tabulka 2.5: Přehled vybraných optických silikonů.

Typ	Označení Polymeru	Index lomu n_D [-]	Provozní tep. [$^\circ\text{C}$]	Transmise [%] (μm)	Citace
PDMS	LS6941	1,410	240	98 (400)	[32]
PDMDPS	LS6943	1,430	260	—	[33]
PDMS	Sylgard 184	1,423	200	—	[34]

Materiály pro vlnovody

Pro vlnovodné vrstvy, v případě planárních vlnovodů, se používají UV světlem vytvrzované polymery (resp. monomery), kdy pomocí UV, případně i změnou teploty dojde k polymerizaci materiálu. Jedná se především o epoxidové pryskyřice, které v závislosti na příměsích mohou dosahovat různých vlastností. Epoxidové pryskyřice jsou obecně používány jako lepidla, ale pouze transparentní pryskyřice se specifickými indexy lomu je možné využít v optice. Takovýchto pryskyřic je na trhu dostatečné množství, aby obsáhly různé požadavky.

Vybrané vzorky EpoCore a EpoClad pochází z firmy společnosti Microresist Technology GmbH, NOA u dalších vzorků značí Norland Opical Adhesive od společnosti Norland Products, Inc., dále je uveden jeden vzorek od Epoxy Technology, Inc. a Dymax Corporation.

Tabulka 2.6: Přehled polymerů pro jádra optických vlnovodů.

Označení Polymeru	Index lomu n_D [-]	Provozní tep. [$^\circ\text{C}$]	Transmise [%] (μm)	Citace
EpoCore	1,60	>230	—	[35]
EpoClad	1,58	>230	—	[35]
NOA83H	1,56	125	99 (0,45-1,25)	[36]
NOA72	1,56	90 (125^1)	99 (0,40-1,25)	[37]
NOA88	1,56	90 (125^1)	99 (0,35-1,25)	[38]
EpoTek OG113	1,51	150	98 (0,50-1,67)	[39]
Dymax OP4	1,55	—	90 (0,45-0,90)	[40]

¹V případě nanosené ochranné vrstvy.

Kapitola 3

Měřicí metody

3.1 Zkouška teplotní odolnosti

Teplota se při tomto testu zvyšuje, dokud nedojde k selhání materiálu. Za selhání materiálu se považují jakékoliv nezvratné změny, např. změna barvy, tečení a deformace [41]. Cílem je nalézt materiály, které vydrží alespoň 120°C. Abychom se vyhnuli vzorkům, které by při teplotě 120°C vydržely s mezními hodnotami, je testovací teplota zvolena 130°C.

Pro ověření teplotní odolnosti se vzorky vloží do pece na 24 hodin při teplotě 130°C a pozorují se změny, pro tento test byla k dispozici pec **Memmert UF30^{PLUS}** [42].

3.2 Měření hmotnosti

Hmotnost vzorků byla měřena pomocí analytických vah **OHAUS Adventurer[®] AX224**, tyto přesné váhy měří hmotnost v gramech na 4 desetinná místa s opakovatelností $\pm 0,0001$ g [43].

Statistické zpracování

Zpracování naměřených dat bylo provedeno pomocí statistických metod, standardně užívaných k těmto účelům [44]. Aritmetický průměr je počítán za použití vzorce:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.1)$$

kde n je počet měření, x_i naměřená hodnota i -tého měření a \bar{x} je vypočtená průměrná hodnota. Aritmetický průměr bývá provázen hodnotou standardní nejistoty typu A, vyjádřenou vztahem:

$$u_{xA} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.2)$$

kde u_{xA} je standardní nejistota typu A, n počet měření, x_i naměřená hodnota i -tého měření a \bar{x} je průměrná hodnota.

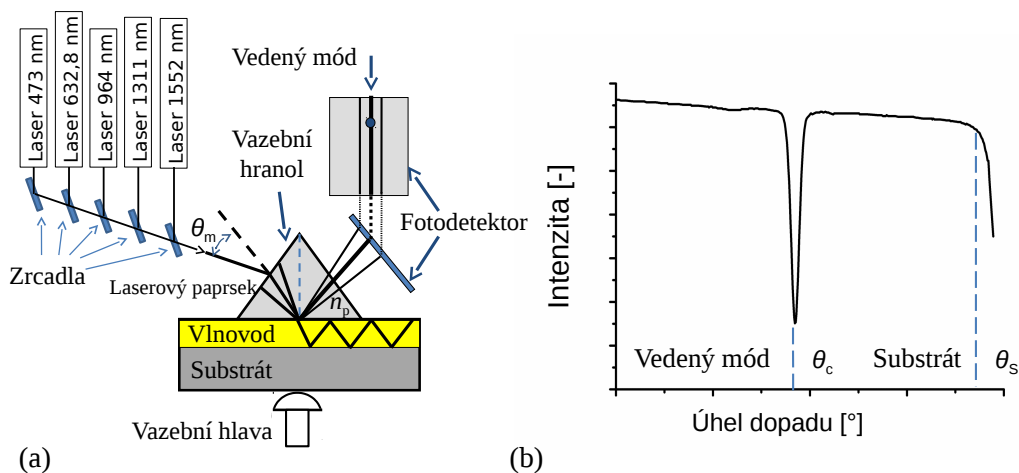
3.3 Měření indexu lomu

Index lomu je jedna z nejdůležitějších vlastností materiálů určených pro optické účely, nás především zajímá, zda-li je žíháním index lomu ovlivněn. Pro měření indexu lomu byl použit přístroj **Metriton Model 2010/M**. Měření indexu lomu lze provést na různých vlnových délkách (v závislosti na použitém laseru), přičemž světelný svazek je navázán do vlnovodu pomocí vazebního hranolu o známém indexu lomu. Měření pracuje na principu hledání kritického úhlu dopadu θ_c , ze kterého je možné určit index lomu (Obr. 3.1 (b)). Zařízení je možné použít pro objemové materiály, přičemž princip je prakticky stejný, opět se pouze hledá kritický úhel, který je v tomto případě pouze jeden [45].

Index lomu určený kritickým úhlem dopadu lze vyjádřit ze vztahu:

$$\Theta_m = \arcsin\left(\frac{n}{n_p}\right), \quad (3.3)$$

kde n_p je známý index lomu hranolu, n hledaný index lomu a Θ_m je úhel dopadu. Princip je popsán na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: (a) Princip jednohranolové vidové spektroskopie; (b) Stanovení kritického úhlu dopadu θ_c a θ_s , použitého pro vyhodnocení indexu lomu vedeného módu planárních optických vlnovodů [46].

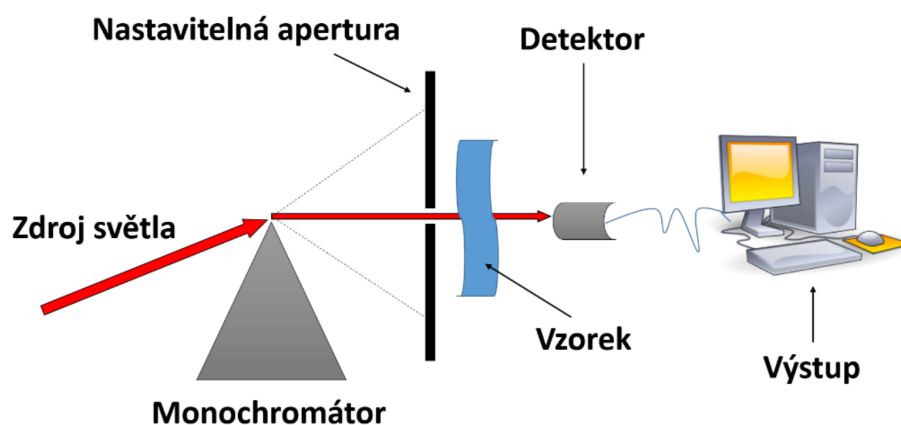
3.4 Měření absorpčních spekter

Měření absorpčních spekter slouží k tomu, aby bylo zřejmé, pro které vlnové délky je vhodné materiál použít. V našem případě je cílem zjistit, zda-li se absorpční spektra nezmění po žíhání. Pro toto měření byl k dispozici přístroj **UV-VIS-NIR Shimadzu UV-3600**. Fotografie přístroje je zobrazena na obrázku 3.2 [47].



Obrázek 3.2: Přístroj pro měření absorpčních spekter UV-VIS-NIR Shimadzu UV-3600 [48].

Metoda spočívá v tom, že světlo vycházející ze širokopásmového zdroje prochází přes Czerného-Turnerův monochromátor a průchodem přes vzorek dopadá na detektor. Měření bylo provedeno na vlnových délkách od 300 nm do 1600 nm. Při UV a viditelném záření byl použit jako detektor R - 28 fotonásobič, pro IR záření InGaAs fotodioda. Princip měření je zobrazen na obrázku 3.3 [48].



Obrázek 3.3: Princip měření absorpčních spekter [48].

3.5 Termogravimetrická analýza

Termogravimetrie je jednou z nejjednodušších termických analýz. Jedná se o sestavu citlivých laboratorních vah a pece. Vzorek je teplotně zatěžován a z hodnot jeho změny je možné zjistit, pro jaké teploty je vzorek ještě vhodný a kdy dochází k jeho degradaci. Narozdíl od DSC (diferenční kompenzační kalorimetrie) nedochází k porovnávání s referencí, ale zkoumá se pouze měřený vzorek a jeho změna. Tato změna je vynášena do grafu úbytku hmotnosti (v procentech) v závislosti na teplotě, z něhož lze určit teplotní odolnost jednotlivých materiálů, ze kterých je materiál složen [49].

Zjednodušená termogravimetrie

V případě, že není v laboratoři zařízení určené k termogravimetrické analýze, lze použít pece a přesných vah. Sérií několika testů při postupně se zvyšujících teplotách a následných převáženích lze zjistit teplotu, kterou vzorek dokáže snést.

3.6 Diferenční kompenzační kalorimetrie

Diferenční kompenzační kalorimetrie DSC je metoda termické analýzy, kterou je možné zjistit teplotu tání, teplotu skelného přechodu, různé druhy krystalizací, tepelnou kapacitu nebo teplotu degradace.

Metoda spočívá v ohřívání měřeného a referenčního vzorku (prázdné komory). Vzorky jsou ohřívány definovaným přírůstkem teploty a ze změny naměřeného vzorku je možné zjistit měřené veličiny. Pro zjištění těchto veličin jsou specifické normy a postupy, které z grafu tepelného toku v závislosti na teplotě dokáží díky určit přesné hodnoty [50].

3.7 Teplota měknutí

Teplota měknutí se stanovuje, aby byla zjištěna použitelnost materiálu v závislosti na teplotě. Princip metody stanovení teploty měknutí dle Vicata je takový, že postupným zvyšováním se hledá teplota, při které se sonda kruhového průřezu o obsahu 1 mm^2 vtlačí za definovaného zatížení (1000 g) 1 mm pod povrch testovaného vzorku o tloušťce 12,7 mm (dle normy) [51]. Také je možnost stanovit teplotu měknutí pomocí tzv. ohybového napětí. Stanovená teplota měknutí je závislá na teplotě skelného přechodu T_g a viskozitě materiálu. Zároveň je zapotřebí rozlišit T_g od teploty měknutí, protože tyto dvě hodnoty si mohou být blízké.

Často spojováno s metodou HDT, kterou se zjišťuje tvarová stálost při zatížení v závislosti na teplotě. Stálost je zkoušena různě velkou zátěží v závislosti na normě.

3.8 Měření geometrických rozměrů

Pro měření geometrických rozměrů bylo použito posuvné měřítko EXTOL PREMIUM (8825225) s přesností $\pm 0,02\text{ mm}$ [52]. Měření bylo provedeno opakovaně, metoda zpracování dat je popsána v části 3.2.

3.9 Zrychlené stárnuocí testy

Tento test simuluje až roky stárnutí materiálu. Přičemž závisí na použití materiálu, jak tyto testy probíhají. Pokud se jedná o materiál, který by měl být vystavován specifickému prostředí, je to zohledněno v této zkoušce. Standardně jsou tyto testy prováděny za pomoci klimatických komor, kde se materiály vystavují „extrémním“ teplotám (zkouška teplotním cyklováním). Kromě teploty se jako další používá změna vlhkosti. Dále je možné využít UV, případně IR záření.

Hodnocení testů probíhá v několika rovinách. Zkoumají se makroskopické (změna zbarvení,...) i mikroskopické (rozpad polymerů na monomery,...) změny. Pokud je namáhaný materiál součástí funkčního celku, ověřuje se funkčnost. Všechny tyto změny mohou být buď trvalé, vratné nebo přechodné [53].

3.9.1 Principy stárnutí

Stárnutí polymerů je specifická problematika a je zde důležité pochopit, co se během zkoušky děje s polymerními materiály [41].

Teplotní stárnutí

Zvýšená teplota urychluje většinu degradačních procesů, vyskytujících se v polymerech. Především se jedná o oxidaci, ale teplota také urychluje i chemický rozklad a mechanické tečení.

Termo-oxidace je způsobena volnými radikály v polymeru, které na sebe za zvýšené teploty váží kyslík za vzniku peroxidového radikálu. Volné radikály jsou běžnou součástí polymerů, ale je možné jejich počet zvýšit vystavením světelnému záření, ionizujícímu záření, nebo přítomnosti přechodných kovů. Utvořené peroxidové radikály procházejí pomalejšími propagačními reakcemi, což způsobuje rozpad polymeru.

Teplotní roztažnost je další jev, ke kterému dochází za zvýšené teploty. Tento děj je vratný, jedná-li se o jednolitý materiál. V případě kompozitů, nebo připevněných prvků může dojít k trvalé změně z důvodu různé rozpínatosti materiálů.

Foto-oxidace

Jedná se především o vliv UV záření, které je zodpovědné za rozpad vazeb v polymerních řetězcích. Vznikají tak volné radikály, které se po sérii chemických reakcí mohou stát dekompozičními produkty v podobě aldehydů či ketonů. Přítomnost karbonylových skupin je možné použít jako měřítko degradace.

Jeden z důležitých faktorů je dostatečné množství kyslíku a teplota, která urychluje chemické procesy. Dále bývá využíváno střídání světelných a temných fází, zároveň tak se využívají změny vlhkosti.

Chemický rozklad

Využívá se hydrolýzy, alkalické hydrolýzy nebo kyselá hydrolýzy. Při tomto ději se polymery postupně štěpí až na monomery.

Stresové praskliny

Stresové praskliny jsou jednou z nejčastějších příčin selhání polymerů. Vznikají hned z několika příčin, difúzí kapalin, vznikem povrchových puklin (crazing) a šířením prasklin v materiálu.

Ionizující záření

Působením ionizujícího dochází k uvolnění volných radikálů a iontů, které se účastní rozkladných chemických reakcí. Na zemském povrchu je úroveň ionizujícího záření nízká natolik, že nedochází k ovlivnění materiálů.

Biologický rozklad

Tento jev je způsoben mikroorganismy a je prokázán pouze u některých polyuretanů a aditiv v PVC.

Tečení

Materiál pod určitou zátěží začíná „téct“ (v závislosti na teplotě), tj. se posouvají jednotlivé vrstvy materiálu a může dojít k prasklinám, nebo k tvárným, či křehkým selháním materiálů.

Únava

Únava materiálu přichází po opakovaném vystavení namáhání. Jako výstup testu je graf křivek vystavené námahy (S) vůči počtu cyklů před selháním (N), takzvaný S-N graf.

3.9.2 Návrh testu

Pomocí zvýšené teploty se simulují roky stárnutí materiálu. Vystavením polymeru vysoké teplotě, bez překročení T_g . K výpočtu zestárnutí se užívá Arrheniův vztah [41]:

$$K(T) = Ae^{\frac{-E}{RT}}, \quad (3.4)$$

kde $K(T)$ je reakční míra, A pre-exponenciální faktor, E reakční energie, R plynová konstanta a T absolutní teplota. Vzhledem k dlouhé době existence tohoto vztahu je ozkoušené, že se hodnoty pohybují mezi 1,8 a 2,5, s výjimkou polymerů poblíž T_g , kde může být hodnota reakční míry až 10 [54]. Z reakční míry je možné spočítat dobu stárnutí t_s jako:

$$t_s = \frac{t_p}{K(T_S - T_P)/10}, \quad (3.5)$$

kde t_p je požadovaná doba zestárnutí v měsících, K reakční míra a $T_S - T_P$ je rozdíl teploty přirozené a teploty stárnutí.

Pro odhad doby stárnutí byl použit vzorec 3.5, z něhož byly vypočítány různé možnosti zrychleného stárnutí, viz tabulka 3.1. Výsledná doba stárnutí je nejvíce ovlivněna koeficientem K , jenž se standardně pohybuje mezi 1,8 a 2,5, přičemž se nejčastěji používá hodnota 2 nebo 2,3 a to i v testech pro lékařské přístroje a může dosáhnout až hodnoty 10 v případě, že se teplota pohybuje poblíž T_g [54].

V tabulce 3.1 jsou simulovány doby testů pro různé testovací teploty, koeficient stárnutí a požadovanou dobu zestárnutí, přičemž bych za optimální považoval $K = 2,5$, rozdíl teplot 20°C (testovací teplota 150°C) a požadovanou dobu zestárnutí 12 měsíců. Tato metoda je nevyhovující pro vzorky, jejichž T_g je nižší než testovací teplota (150°C). Testy není možné v našich podmínkách provádět po delší dobu. Je-li T_g materiálu nižší než 130°C , je zbytečné takový materiál testovat, protože není vhodný pro naše potřeby.

Tabulka 3.1: Odhad stárnutí.

t_p [měs.]	K [-]	T_S [$^\circ\text{C}$]	T_P [$^\circ\text{C}$]	t_s [měs.]
12	2,0	150	130	3,00
12	2,3	150	130	2,27
12	2,5	150	130	1,92
24	5,0	150	130	0,96
12	2,0	160	130	1,50
12	2,3	160	130	0,99
12	2,5	160	130	0,77
84	5,0	160	130	0,67
12	2,0	140	130	6,00
12	2,3	140	130	5,22
12	2,5	140	130	4,80
12	5,0	140	130	2,40

Po testu se provede porovnání vzorků před a po testu, zda-li nedošlo ke změně zabarvení, případně struktury. Pro zajištění změn by se dále měli před a po měření zjistit fyzické parametry (hmotnost, rozměry, index lomu,...).

Zásadním kritériem pro délku testu je stárnocí koeficient K . Vzhledem k tomu, že pro zařízení používaná v lékařství se používá $K = 2,3$ a pro polymery poblíž T_g může K dosáhnout až 10, lze použít $K = 2,5$ s tím, že doba zestárnutí bude minimálně doba, kterou budeme simulovat.

S tímto koeficientem je možné provést zestárnutí o jeden rok na 150°C za 2 měsíce. Polymer, který projde tímto testem, tj. vydrží 2 měsíce při teplotě 150°C , aniž by došlo ke změnám jeho vlastností, bude prokázáno, že vydrží, alespoň jeden rok provozu, kde teploty mohou dosahovat až 130°C .

3.9.3 Další metody

Kromě metody teplotního stárnocího testu jsou i další. Metody pro zrychlené stárnutí, které nebylo možné v našich podmínkách realizovat, spolu s metodami, které nejsou pro naše účely zcela vhodné jsou popsány v následující části, jedná se o foto-oxidaci UV, metodu vstřebávání kapalin a metodu environmentálních stresových prasklin.

Foto-oxidace UV

Tato metoda by měla simulovat vystavení slunečnímu záření, bylo by tedy vhodné použití UVA záření o vlnové délce v rozmezí 400 nm - 320 nm [55]. Další důležitou vlastností je známá intenzita záření.

Máme-li zdefinované osvětlení je zapotřebí mít definovaný čas pro sledování změn optické hustoty. Za těchto podmínek jsme schopni určit definované dávky záření (standartně $M_{lux} \cdot hod$) jako intenzitu osvětlení \times doba po kterou je vzorek ozařován.

Optickou hustotu je možné měřit pomocí spektrometru nebo denzitometru. V případě, že by nebyla možnost použití tohoto zařízení, je možnost si sestavit vlastní měřící aparaturu. Princip spočívá v prosvícení zkoumaného materiálu a zjištění prostupnosti materiálu pomocí senzoru na druhé straně. Použitím bílého světla se zajistí, že měření obsáhne velkou část spektra. Pro naše potřeby je také možné použití vlnových délek užívaných v optické komunikaci.

Naměřené hodnoty se promítnou do grafu závislosti optické hustoty na osvitu. Optická hustota je znormována pomocí prvního měření před stárnocím testem. Z grafu se stanoví mezní hodnota ozáření určená změnou optické hustoty o 0,3 (30 %), ze které je potom nepřímou úměrou možné dopočítat dobu, po kterou může být materiál vystaven např. dennímu osvětlení 100 - 10 000 lx [56, 57].

Metoda vstřebávání kapalin

Testovaný vzorek se vnoří do kapaliny. Po určité časové periodě se vzorek vyndá, osuší a zváží. Výsledkem testu je absorpční křivka.

Metoda environmentálních stresových prasklin

Metoda ESC (Environmental stress cracking) se dělí do hlavních dvou skupin. Konstantní deformační test a konstantní zátěžový test. Využívá se zejména pro mechanicky namáhané materiály.

Kapitola 4

Měření

4.1 Teplotní stálost

V tomto testu byly vzorky vybraných materiálů (Tab. 2.4, 2.5 a 2.6) vystaveny teplotě 130° C, po dobu 24 hodin, aby byla ověřena jejich možnost použití za této teploty. Před a po testu byly změřeny indexy lomu a hmotnosti vzorků, pro zjištění působení takto vysoké teploty.

4.1.1 Měření hmotnosti

Měření začalo materiály Europlex F7, Europlex PPSU, Pleximid TT70, Pleximid TT50, Pleximid 8813, PMMA Zenit a Plexiglas 7N, kterých byl dostatečný počet, abychom v případě pochybení zbytečně nepřišli o vzorky, kterých bylo méně. Nejprve byly zváženy hmotnosti před testem m_0 , aby bylo možné dopočítat, jaké množství materiálu se odpařilo. Měření hmotností jednotlivých vzorků byla opakována vždy sedmkrát, aby bylo možné statistické zpracování dat.

Zkušební měření

Před vlastním testem došlo ještě ke kontrole hmotnosti použitých vzorků. Opětovně byly změřeny hmotnosti před testem m_k (Tab. A.2), pro zajištění správnosti měření a vyhodnocení dat.

Rozdíl obou měření $\delta_m = |\overline{m}_0 - \overline{m}_k|$ je porovnán v tabulce 4.1. Je zřejmé, že výsledná nejistota nedokáže zachytit chybu metody, nejistota měření musí být vyšší, odhadem:

$$u'_{mB} = 0,0005 \text{ g.} \quad (4.1)$$

Přenášením vah na různá měřicí pracoviště před jednotlivými měřeními byla pravděpodobně způsobena chyba metody, která zapříčinila vyšší nejistotu měření. Naměřené průměrné hodnoty hmotností budou mít odhadnutou nejistotu 0,0005 g. Nejistota typu A v tomto měření je příliš malá na to, aby se projevila, můžeme ji zanedbat.

Tabulka 4.1: Kontrola hmotnosti vzorků před testem.

Číslo vzorku	Označení	\overline{m}_0 [g]	u_{m_0A} [g]	\overline{m}_k [g]	u_{m_kA} [g]	δ_m [g]
8	PPSU	1,96140	0,00001	1,96107	0,00001	0,0003
11	8813	1,08811	0,00001	1,08854	0,00001	0,0004
12	PMMA	0,94060	0,00000	0,94076	0,00000	0,0002
13	7N	0,83343	0,00001	0,83357	0,00000	0,0001

Po vyndání z pece a zchladnutí, byly vzorky převáženy. Z naměřených hodnot v příloze A.1 a A.3 byla vypočtena procentuální změna hmotnosti, viz tabulka 4.2.

$$D_m = 100 \cdot \frac{m_0 - m}{m_0} \quad (4.2)$$

Tabulka 4.2: Změna hmotnosti (sada 2).

Číslo vzorku	Označení	\bar{m}_0 [g]	\bar{m} [g]	D_m [%]
7	F7	1,49223	1,4899	0,156
8	PPSU	1,96140	1,9515	0,505
9	TT70	0,88033	0,8752	0,579
10	TT50	0,82701	0,8190	0,966
11	8813	1,08811	1,0800	0,750
12	PMMA	0,94060	0,9348	0,620
13	7N	0,83343	0,8285	0,597

Z důvodu velké změny u vzorku 8 (PPSU), který by měl být jedním z tepelně nejodolnějších, bylo provedeno přeměření hmotností (Tab. A.4), jelikož se s vysokou pravděpodobností jednalo i o odpařenou vlhkost materiálu.

Vlastní měření

Za využití zjištěných informací byly proměřeny všechny vybrané vzorky a spočítán jejich procentuální odpar po 24 hodinovém testu při 130°C. Hodnoty odparu objemových vzorků vypočtených z přílohy A.1, A.4, A.5 a A.6 jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3: Změna hmotnosti objemových vzorků.

Číslo vzorku	Označení	\bar{m}_0 [g]	\bar{m} [g]	D_m [%]
1	Makrolon GP	1,7331	1,7328	0,020
2	Zeonex E48R	0,7449	0,7447	0,029
3	NAS 21	0,3841	0,3835	0,149
4	MR-8	0,5280	0,5250	0,582
5	CR39	0,8437	0,8344	1,097
6	TRIVEX	0,4940	0,4922	0,376
7	Europlex F7	1,4922	1,4916	0,040
8	Europlex PPSU	1,9614	1,9589	0,125
9	Pleximid TT70	0,8803	0,8774	0,336
10	Pleximid TT50	0,8270	0,8215	0,672
11	Pleximid 8813	1,0881	1,0820	0,561
12	PMMA Zenit	0,9406	0,9368	0,402
13	Plexiglas 7N	0,8334	0,8300	0,406

Vzorky optických silikonů se mohou lišit nejen složením, ale způsobem vytvrzení. Polymer je míchán ze dvou složek (10:1) a může být vytvrzován různými teplotami, tímto měřením se ověřuje nejen teplotní výdrž materiálu jako takového, ale i materiálu v závislosti na vytvrzovací teplotě. Z naměřených hodnot (Příloha A.7, A.8) byla vytvořena tabulka 4.4.

Tabulka 4.4: Změna hmotnosti vzorků optických silikonů.

Číslo vzorku	Vytvrzovací teplota	Označení	\bar{m}_0 [g]	\bar{m} [g]	D_m [%]
15	RT	LS6943	4,4135	4,4131	0,007
15	65°C		5,8475	5,8475	0,000
15	100°C		5,6857	5,6858	-0,002
15	150°C		4,9766	4,9769	-0,005
15	200°C		5,8083	5,8079	0,007
16	RT	Sylgard 184	1,2151	1,2106	0,375
16	65°C		1,5408	1,5353	0,358
16	80°C		1,6253	1,6193	0,367
16	100°C		1,7717	1,7657	0,339
16	150°C		1,2610	1,2565	0,355

Hmotnosti vlnovodných materiálů jsou váženy i společně s hmotností podložního skla. K porovnání hmotností dochází pouze u vzorků, které byly vytvořeny jako kapka na podkladní sklo, která byla později vytvrzena. Kromě vzorků v podobě kapky byly vytvořeny i vzorky v podobě vrstvy.

Vzorky pro optické vlnovody měly být měřeny na DSC, měření dle vyjádření VŠCHT nebylo možné, jelikož docházelo k příliš velké změně vlastností materiálu už při nízkých teplotách, což by značilo, že vzorky nebyly ustálené. Experimentálně byla určena doba vytvrzení 48 hodin při 130°C. Tato doba byla určena z dat naměřených v příloze A.9-A.13, jejichž přehled, včetně odparu standardně tvrzených vzorků po 24 hodinovém testu je zpracovaný v tabulce 4.5. Odpar je vždy počítán z hodnot hmotností před a po jednotlivých testech.

Tabulka 4.5: Stanovení doby vytvrzení.

Čas (hod.)	0			24		48		72		96	
Vzorek	m_0 [g]	m [g]	D_m [%]	m [g]	D_m [%]	m [g]	D_m [%]	m [g]	D_m [%]	m [g]	D_m [%]
Reference	4,7249	4,7252	-0,007	4,7259	-0,015	4,7253	0,013	4,7252	0,002		
EpoCore	5,0193	5,0172	0,043	5,0155	0,033	5,0149	0,013	5,0142	0,014		
EpoClad	5,1902	5,1789	0,218	5,1726	0,122	5,1677	0,094	5,1651	0,049		
NOA83H	5,0963	5,0886	0,150	5,0874	0,025	5,0858	0,030	5,0845	0,027		
NOA72	5,1821	5,1737	0,163	5,1723	0,027	5,1728	-0,010	5,1727	0,003		
NOA88	5,1665	5,1612	0,102	5,1601	0,021	5,1602	-0,002	5,1603	-0,002		

Kromě hodnoty hmotností a odparů jednotlivých materiálů je možné z tabulky 4.5 vyčíst z hodnot naměřených pro referenci (laboratorní sklo), že chyba měření hmotnosti zanáší chybu k hodnotě odparu o velikosti až $\pm 0,015$ %, pro hmotnost $m_0 = 4,7249$ g.

Výše uvedené vlnovodné materiály byly ještě doplněny o polymery OG 113 a Dymax OP4. Během vytváření těchto vzorků byl proveden pokus, jenž měl zjistit vliv delší expozice UV záření během vytvrzování na vlastnosti materiálů. V tabulce 4.6 je porovnání odparu těchto materiálů, jejichž naměřené hodnoty jsou v příloze A.14-A.16, s odparem materiálů D_R z 4.5.

Tabulka 4.6: Porovnání vytvrzování vlnovodných materiálů.

Čas (hod.)	0	24			48		
Vzorek	m_0 [g]	m [g]	D_m [%]	D_R [%]	m [g]	D_m [%]	D_R [%]
EpoCore UV30	5,7261	5,7027	0,408	0,043	5,6944	0,146	0,033
EpoCore UV60	5,5644	5,5418	0,406	0,043	5,5320	0,176	0,033
EpoClad UV30	5,5744	5,5638	0,190	0,218	5,5582	0,101	0,122
EpoClad UV60	5,5100	5,4942	0,287	0,218	5,4925	0,032	0,122
NOA83H	5,0189	5,0130	0,119	0,150	5,0125	0,009	0,025
NOA72	5,1778	5,1668	0,212	0,163	5,1650	0,035	0,027
NOA88	5,0365	5,0302	0,126	0,102	5,0296	0,011	0,021
OG113	5,1637	5,1478	0,308	—	5,30050	0,019	—
OP4	5,3089	5,3015	0,139	—	5,14779	0,027	—

Při vytvrzování pomocí delší expozice UV došlo k výraznému ztmavnutí a popraskání materiálu u vzorků EpoCore a EpoClad. Pro tyto vzorky je vhodné použít způsob vytvrzení uvedený výrobcem, i přestože po vytvrzení vzorku EpoClad pomocí delší expozice UV byla prokázána vyšší teplotní odolnost. Jediný materiál, který prokázal vyšší teplotní odolnost pomocí upraveného vytvrzování byl NOA83H. OG113 a OP4 ukázaly, že mají srovnatelnou teplotní odolnost s ostatními vlnovodnými materiály.

Z předchozích měření vlnovodných materiálů byly vybrány vzorky, jež mají vyšší teplotní odolnost (s výjimkou EpoCladu), byly opětovně vytvořeny a testovány, tentokrát i s měřením indexů lomu a absorpčních spekter. Rozdíl oproti ostatním měřením teplotní odolnosti materiálu je v tom, že vzorky jsou žihány 48 hodin, namísto 24. Hodnoty z přílohy A.17 a A.18 jsou zpracovány v tabulce 4.7.

Tabulka 4.7: Změna hmotnosti polymerních materiálů pro optické vlnovody.

Vzorek	\bar{m}_0 [g]	\bar{m} [g]	D_m [%]
EpoCore	5,1990	5,1981	0,017
EpoClad	5,2531	5,2503	0,054
NOA83H	5,0213	5,0158	0,110
NOA72	4,9962	4,9883	0,159
NOA88	5,1353	5,1273	0,156
OG113	5,1406	5,1251	0,302
OP4	5,2377	5,2287	0,171

Zhodnocení změny hmotnosti

Při měření hmotnosti po testu teplotní odolnosti bylo zjištěno, že výslednou hmotnost ovlivňuje vlhkost vzorků, je tedy potřeba, aby vzorky po vyndání z pece byly „odpočaté“, tj. aby obnovily svůj přirozený obsah vlhkosti. Pokud by se tak neučinilo, byla by hodnota procentuálního odparu vyšší, viz Tabulka 4.2.

Správně naměřené hodnoty po odpočínutí vzorků jsou v tabulkách 4.3, 4.4 a 4.7. Ideální by bylo pokud by odpařená hmotnost vzorků byla nula, ale pro naše potřeby by měly stačit vzorky s odparem kolem 0,1 %, v případě zachování optických vlastností i vyšším.

Po vyndání z pece, byl vzorky 12 (PMMA Zenit) a 13 (Plexiglas 7N) ztelně deformované, na materiálu se vytvořili bubliny, vzorek 12 byl dokonce prohnutý. Na vzorku 9 (Pleximid TT70) byly vidět nejspíš známky po tečení materiálu, podobnou, leč méně výraznou deformaci vykazoval vzorek 11 (Pleximid 8813). Přes to, že vzorek NAS 21 se prokázal vcelku nízkou hodnotou odparu, není možné o něm uvažovat, jelikož se na něm projevilo tečení a vzorek změnil tvar. Objemové vzorky s nejnižší změnou hmotnosti:

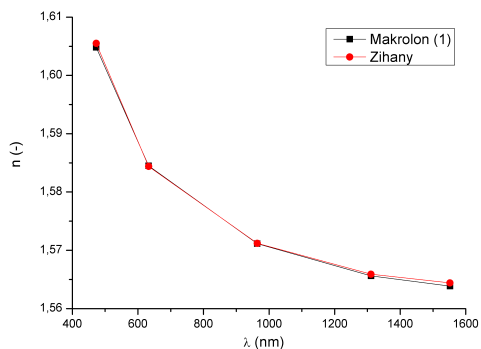
- 1 - Makrolon GP clear
- 2 - Zeonex E48R
- 7 - Europlex F7 clear
- 8 - Europlex PPSU-Natur

Vzorky silikonových polymerů byly měřeny dva, LS6943 a Sylgard 184. Z hodnot pro tyto vzorky (Tab. 4.4 není zřejmý vliv vytvrzovací teploty na odolnosti. Z dvojice těchto materiálů lépe dopadl LS6943, který svou hmotnost nezměnil, alespoň ne natolik, abychom to byli schopni pozorovat. Hodnoty odparu LS6943 jsou tak nízké, že se ztrácí v chybě měření a prokázal tak vyšší odolnost, než všechny objemové vzorky. Sylgard 184 měl poměrně vysokou hodnotu odparu, téměř 0,4 %.

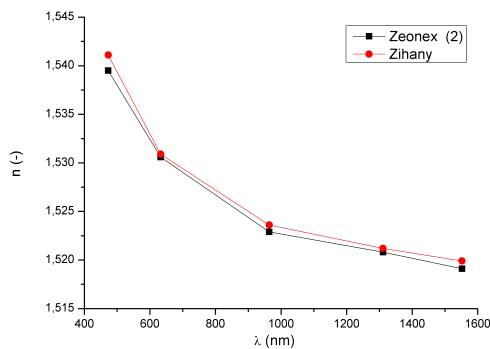
Ze skupiny materiálů pro vlnovody vyšel nejlépe EpoCore a těsně za ním EpoClad, oba tyto vzorky měly hodnotu odparu pod 0,1 %. Zbylé vzorky, kromě OG113 se udržely pod hranicí 0,2 %, což značí, že jsou dostatečně odolné pro teplotu 130°C. V případě krátkodobého vystavení vysokým teplotám, mají vlnovodné materiály výhodu, že nejsou v planárních vlnovodech vystaveny na přímo takto vysoké teplotě. Mají většinou ochrannou vrstvu v podobě podkladu a pláště, které po krátkou dobu dokáží teplo odstínit.

4.1.2 Index lomu

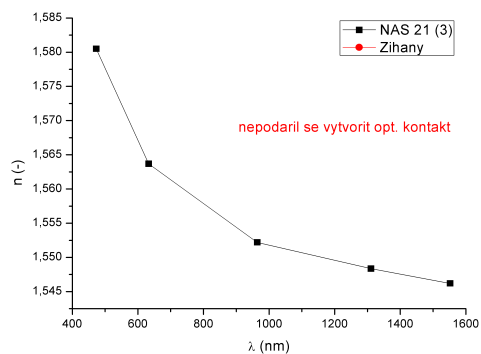
Index lomu je další z důležitých vlastností materiálů pro naše účely. Na obrázku 4.1 jsou grafy indexů lomu před testem teplotní odolnosti a po žíhání. U vzorků Makrolon GP clear (Obr. 4.1a) a MR-8 (Obr. 4.1d) lze z grafů vyčíst, že materiály neprodělaly žádnou podstatnou změnu. Grafy Zeonexu E48R (Obr. 4.1b) a TRIVEXu (Obr. 4.1f) se nepatrně změnily. Hůře dopadl graf CR39 (Obr. 4.1e), který je po žíhání celý posunutý. U vzorku NAS21 (Obr. 4.1c) se po žíhání vzorek změří, protože se nepodařilo vytvořit optický kontakt, zřejmě z důvodu tečení materiálu při žíhání.



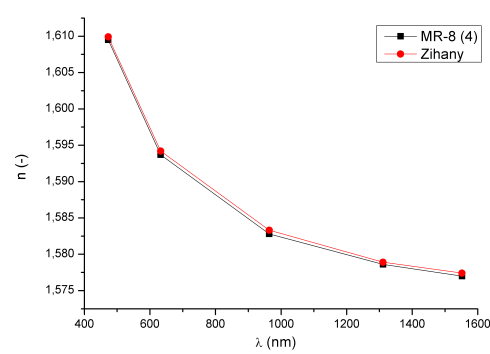
(a) Makrolon GP.



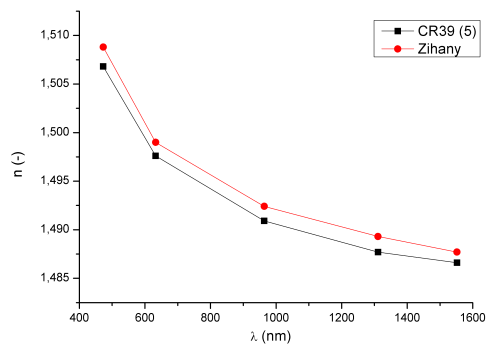
(b) Zeonex E48R.



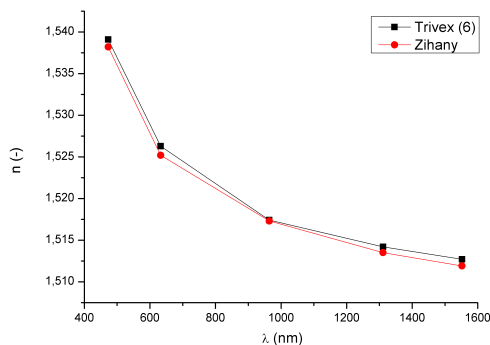
(c) NAS 21.



(d) MR-8.



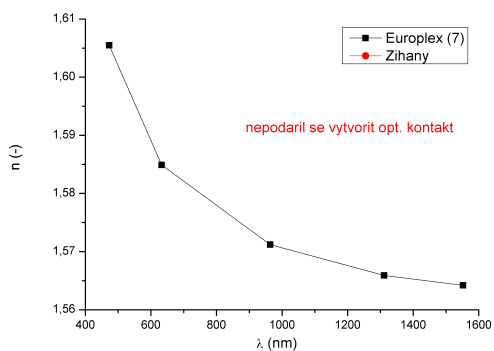
(e) CR39.



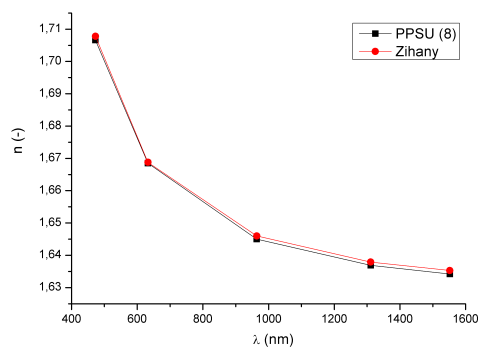
(f) TRIVEX.

Obrázek 4.1: Indexy lomu objemových vzorků.

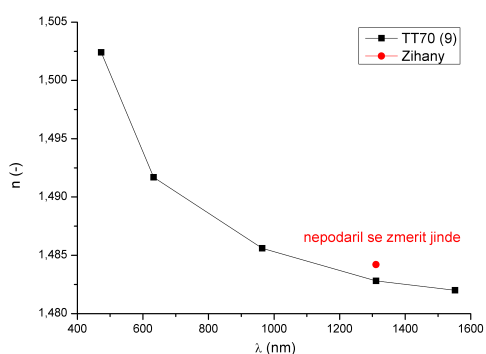
Nejvyšší odolnost na obrázku 4.2 prokázal materiál Europlex PPSU (Obr. 4.2b), u kterého je minimální rozdíl mezi grafem před testem a po něm, vcelku dobře i přes drobnou povrchovou deformaci ještě obstál Pleximid 8813 (Obr. 4.2e). Křivka Pleximidu TT50 se po žíhání zřetelně posunula. Zbylé materiály na obrázku 4.2 neobstály, u Pleximidu TT70 (Obr. 4.2c) a překvapivě u prohnutého PMMA Zenit (Obr. 4.2f) se podařilo navázat optický kontakt pouze na 1311 nm a u Europlexu F7 (Obr. 4.2a) se nepodařilo navázat optický kontakt.



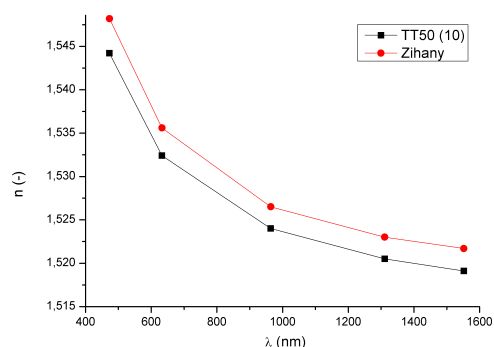
(a) Europlex F7.



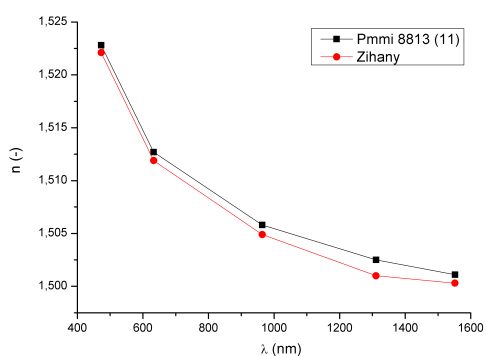
(b) Europlex PPSU.



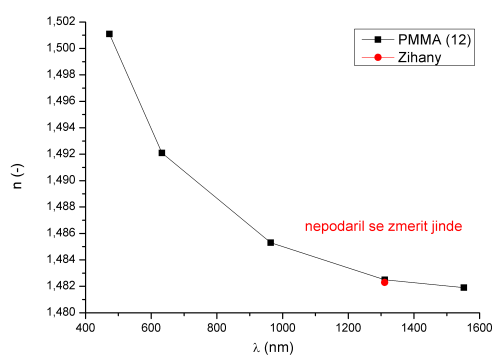
(c) Pleximid TT70.



(d) Pleximid TT50.



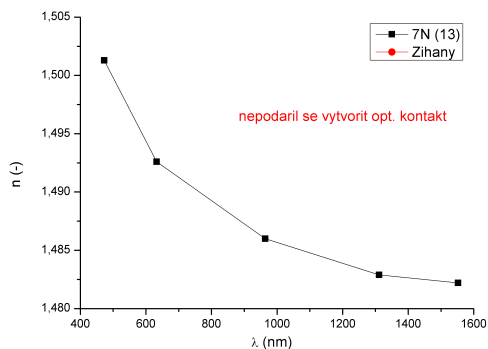
(e) Pleximid 8813.



(f) PMMA Zenit.

Obrázek 4.2: Indexy lomu objemových vzorků.

Na obrázku 4.3 je uvedena závislost indexu lomu na vlnové délce materiálu Plexiglas 7N. U tohoto materiálu se po žíhání nepodařilo navázat optický kontakt ani na jedné z proměřovaných délek. Pravděpodobně tomu tak bylo z důvodu deformace, kdy při žíhání vznikly uvnitř materiálu bubliny.



(a) Plexiglas 7N.

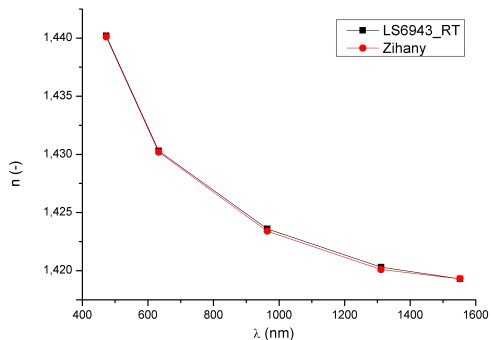
Obrázek 4.3: Indexy lomu objemových vzorků.

Z obrázků 4.1, 4.2 a 4.3 lze vyčíst, že některé materiály nejsou vhodné pro použití za teploty 130°C , jedná se o vzorky, jejichž vlastnosti se po žíhání 130°C změnily natolik, že nebylo možné změřit jejich index lomu, jedná se o NAS 21 (Obr. 4.1c), Europlex F7 (Obr. 4.2a), Pleximid TT70 (Obr. 4.2c), PMMA Zenit (Obr. 4.2f) a Plexiglas 7N (Obr. 4.3).

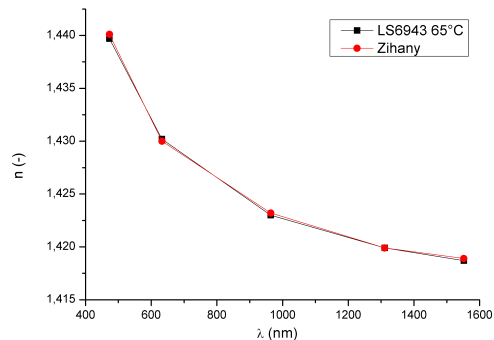
Zbylé vzorky by se daly považovat za vhodné, přičemž by bylo rozumné preferovat materiály u jejichž grafů je co možná nejmenší rozdíl mezi hodnotou naměřeného indexu lomu před testem a indexem lomu po žíhání. Nejvhodnějšími vzorky z tohoto pohledu jsou tyto:

- 1 - Makrolon GP clear (Obr. 4.1a)
- 2 - Zeonex E48R (Obr. 4.1b)
- 4 - MR-8 (Obr. 4.1d)
- 6 - Trivex (Obr. 4.1f)
- 8 - Europlex PPSU-Natur (Obr. 4.2b)

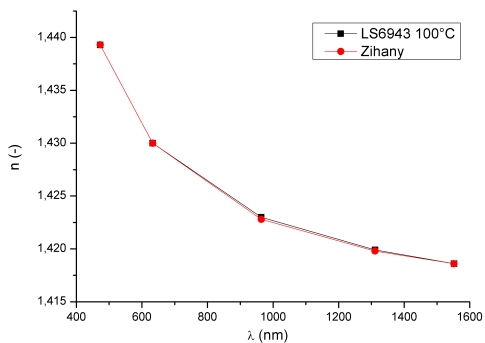
Materiál LS6943 potvrdil vysokou teplotní odolnost, na obrázku 4.4 jsou grafy indexů lomu tohoto materiálu. Vzorky byly vytvrzovány při různých teplotách, rozdíl mezi grafy vzorku vytvrzovaného při pokojové teplotě (Obr. 4.4a), 65°C (Obr. 4.4b), 100°C (Obr. 4.4c), 150°C (Obr. 4.4d) a 200°C (Obr. 4.4e) prakticky neexistuje. Všechny grafy na obrázku 4.4 mají naprosto minimální rozdíl křivek před žíháním a po něm.



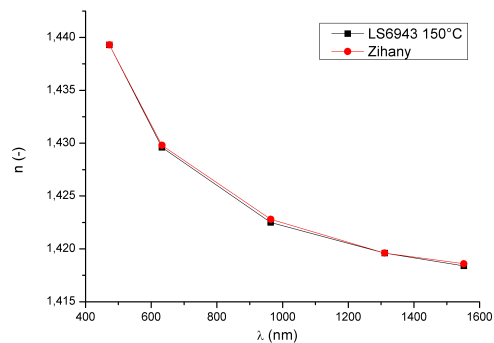
(a) LS6943 - RT.



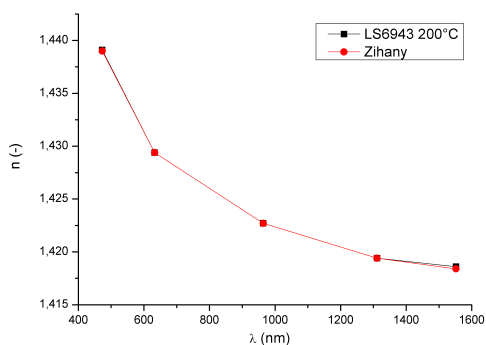
(b) LS6943 - 65°C.



(c) LS6943 - 100°C.



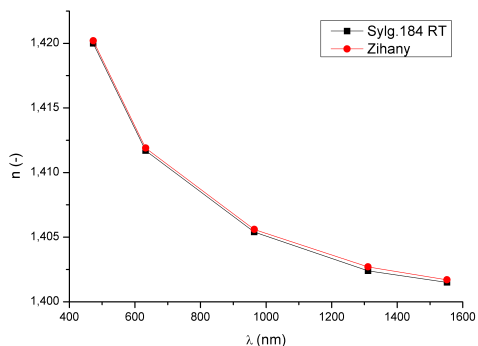
(d) LS6943 - 150°C.



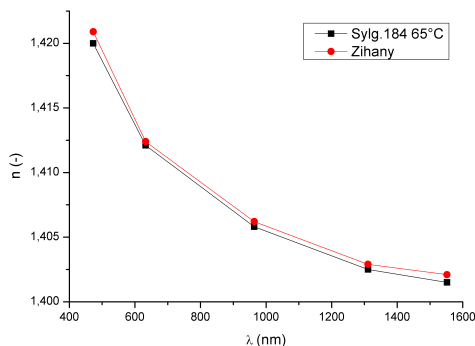
(e) LS6943 - 200°C.

Obrázek 4.4: Indexy lomu LS6943.

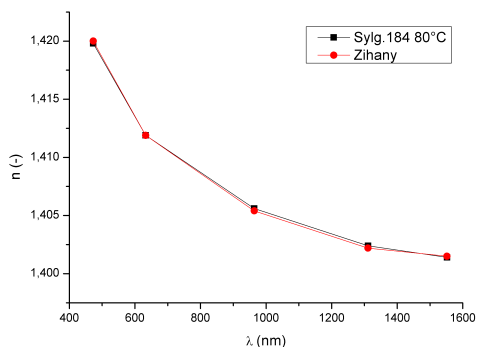
Sylgard 184 je stejně jako LS6943 vytvrzován při různých teplotách, z grafů na obrázku 4.5 lze vyčíst, že vzorky vytvrzované při pokojové teplotě (Obr. 4.5a), 65°C (Obr. 4.5b), 80°C (Obr. 4.5c) i 150°C (Obr. 4.5e) mají minimální rozdíl mezi hodnotami před testem a po žíhání, pouze vzorek vytvrzovaný 100°C (Obr. 4.5d) se po žíhání mírně odchýlil.



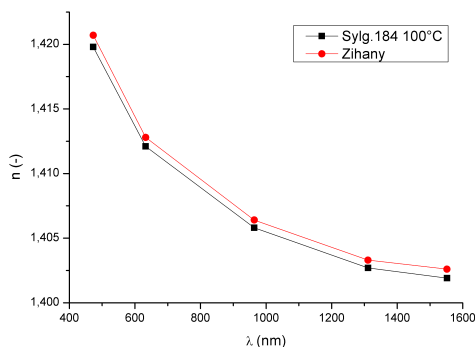
(a) Sylgard 184 - RT.



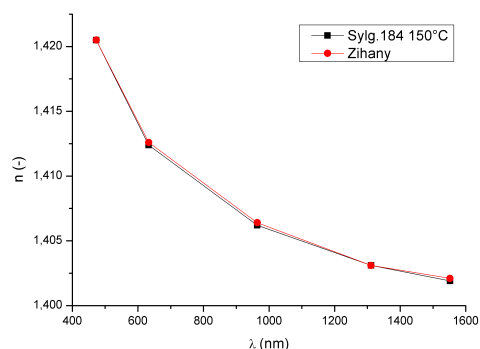
(b) Sylgard 184 - 65°C.



(c) Sylgard 184 - 80°C.



(d) Sylgard 184 - 100°C.

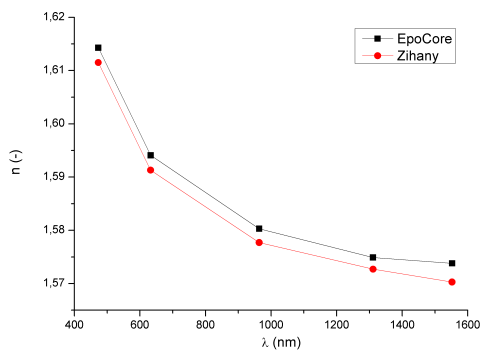


(e) Sylgard 184 - 150°C.

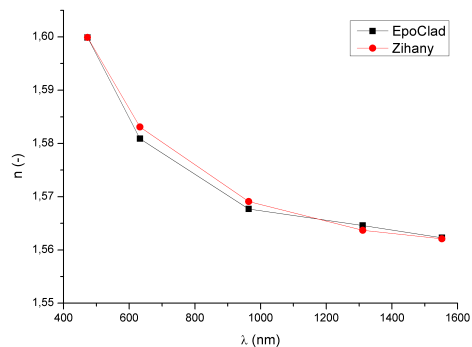
Obrázek 4.5: Indexy lomu Sylgard 184.

Ze vzorků optických silikonů je lepší LS6943 (Obr. 4.4), který má prakticky nulovou odchylku mezi hodnotami referenčními a po žíhání. Sylgard 184 (Obr. 4.5) má větší odchylky hodnot po žíhání než LS6943, ale i tak jsou tyto hodnoty dostatečně malé a dá se tedy z tohoto pohledu i Sylgard 184 považovat za vhodný materiál pro použití za teploty 130°C.

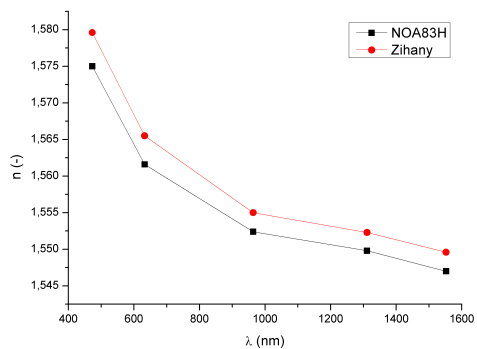
Na obrázku 4.6 jsou grafy indexů lomu vlnovodných materiálů. Téměř bez změny prošly žíháním pouze dva materiály, EpoClad (Obr. 4.6b) a EpoTek OG113 (Obr. 4.6f). Další vzorky už mají znatelně posunutě indexu lomu po žíhání, nejmenší rozdíl z těchto materiálů má EpoCore (Obr. 4.6a), poté NOA83H (Obr. 4.6c) a největší rozdíl byl zaznamenán u NOA 88 (Obr. 4.6e). U materiálu NOA72 (Obr. 4.6d) se nepodařil navázat optický kontakt.



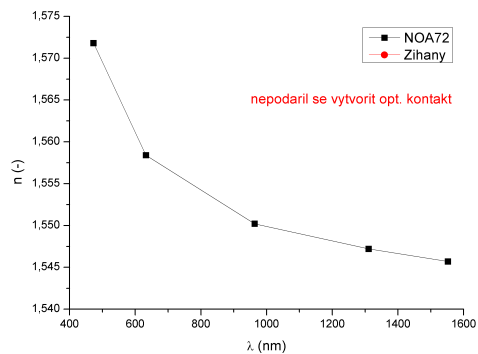
(a) EpoCore.



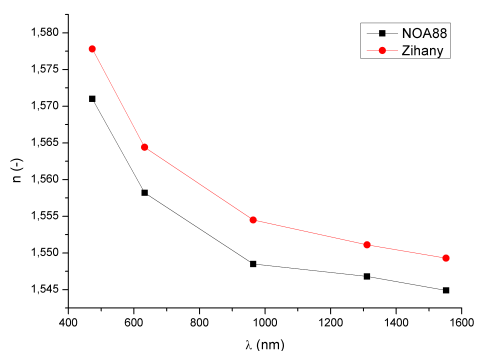
(b) EpoClad.



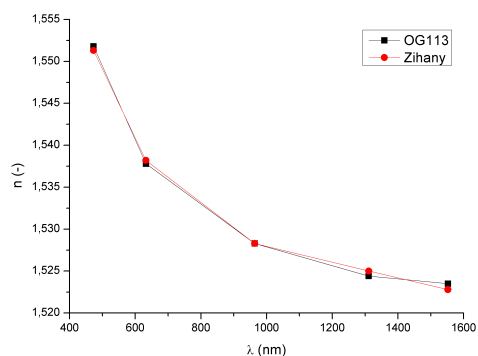
(c) NOA83H.



(d) NOA72.



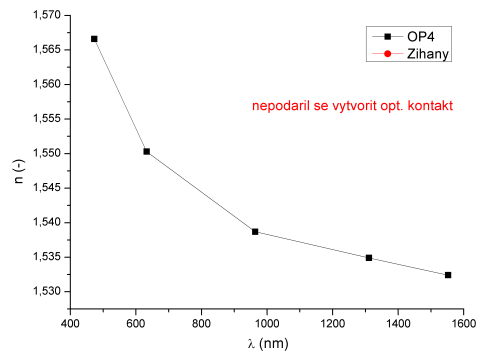
(e) NOA88.



(f) EpoTek OG113.

Obrázek 4.6: Indexy lomu vlnovodných materiálů.

Poslední z testovaných vlnovodných materiálů je Dymax OP4 (Obr. 4.7), kde se po žíhání nepovedl navázat optický kontakt, je možné že se kontakt nepovedl navázat z důvodu viditelné nerovnosti vzniklé při výrobě vzorku.

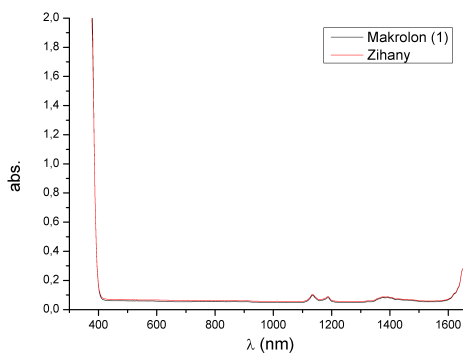


(a) Dymax OP4.

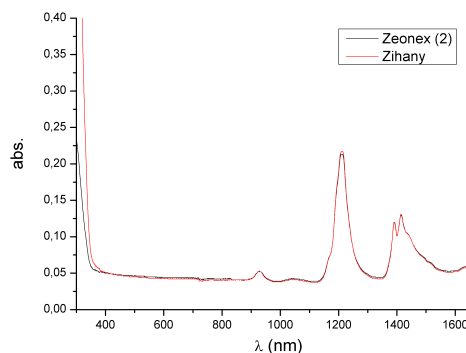
Obrázek 4.7: Indexy lomu vlnovodných materiálů.

4.1.3 Absorpce

Z naměřených grafů na obrázku 4.8 absorpce je možné usoudit, zda-li došlo ke strukturálnímu poškození, které by mohlo ovlivnit optické parametry materiálu. Makrolon (Obr. 4.8a) neprodělal žádné změny a u vzorku Zeonex E48R (Obr. 4.8b) došlo pouze k drobnému posunu absorpční hrany.



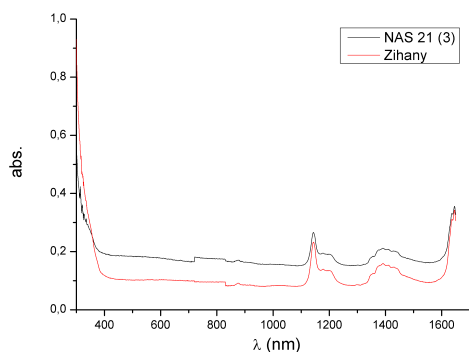
(a) Makrolon GP.



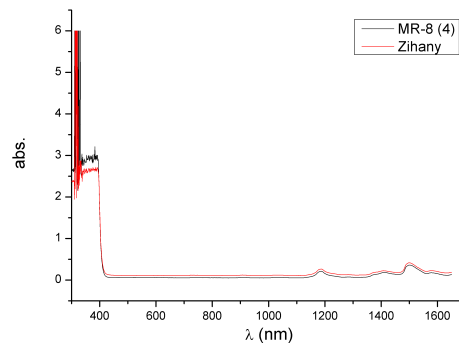
(b) Zeonex E48R.

Obrázek 4.8: Absorpce objemových vzorků.

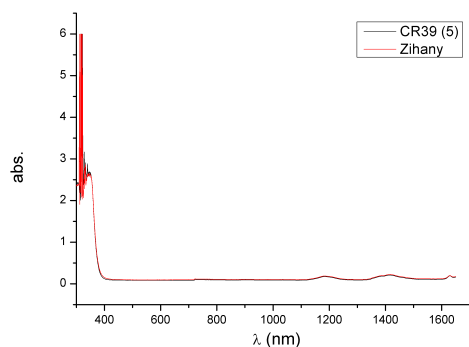
Z grafů na obrázku 4.9 lze vyčíst, že vzorky MR-8 (Obr. 4.9b), CR39 (Obr. 4.9c), TRIVEX (Obr. 4.9d) a Europlex PPSU (Obr. 4.9f) mají absorpční spektrum po žíhání téměř totožné jako před testem. U vzorku NAS 21 (Obr. 4.9a) a Europlex F7 (Obr. 4.9e) došlo ke změnám, ale nejsou příliš výrazné, navíc tvary křivek zůstaly zachovány.



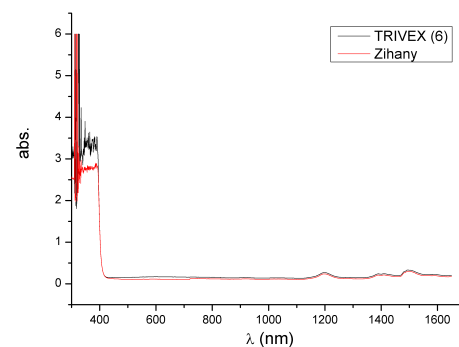
(a) NAS21.



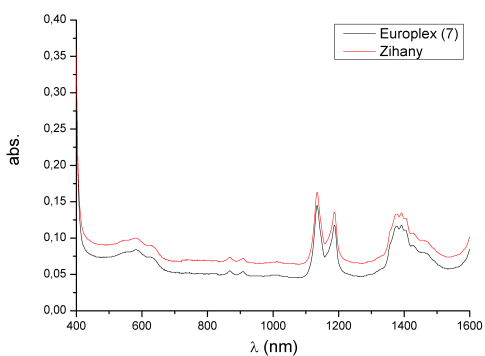
(b) MR-8.



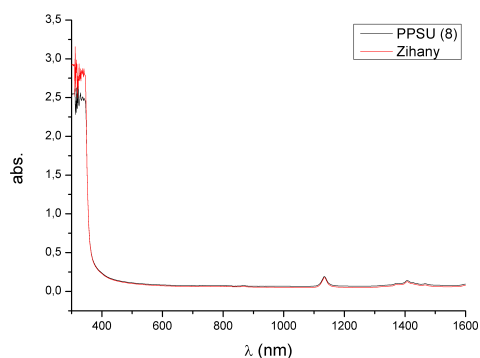
(c) CR39.



(d) TRIVEX.



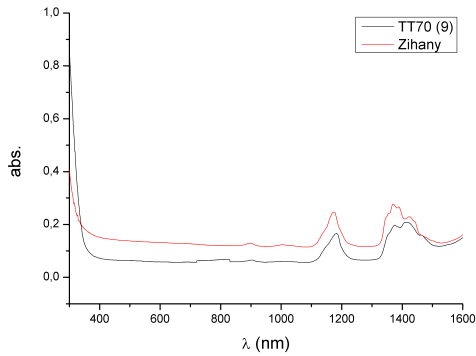
(e) Europlex F7.



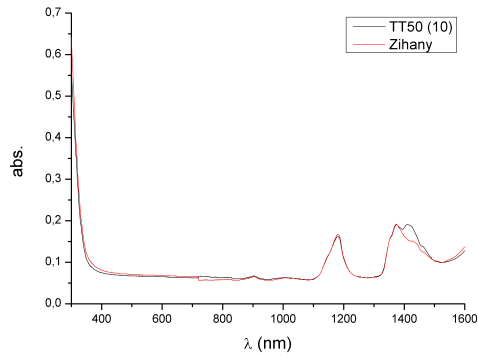
(f) Europlex PPSU.

Obrázek 4.9: Absorpce objemových vzorků.

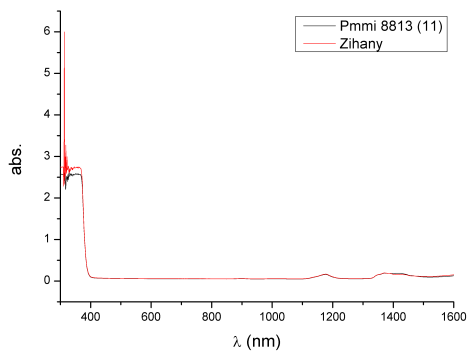
Grafy absorpcí na obrázku 4.10 mají na rozdíl od předchozích více změn v absorpcích. Z tohoto obrázku pouze Pleximid 8813 (Obr. 4.10c) neprodělal žádnou změnu, ještě dobře dopadl PMMA Zenit (Obr. 4.10d). U Pleximidu TT70 (Obr. 4.10a), Pleximidu TT50 (Obr. 4.10b) a Plexiglasu 7N je tvar křivky zachován, pouze na vlnové délce přibližně 1450 nm chybí vrchol u vzorku Pleximid TT50, Plexiglas 7N má velký rozdíl mezi hodnotami a tvarem křivky do vlnové délky 650 nm.



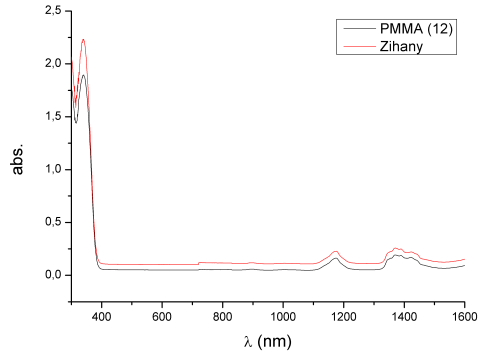
(a) Pleximid TT70.



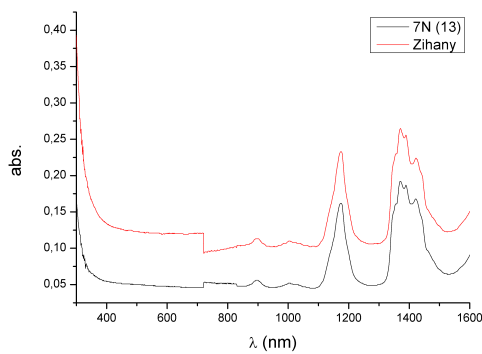
(b) Pleximid TT50.



(c) Pleximid 8813.



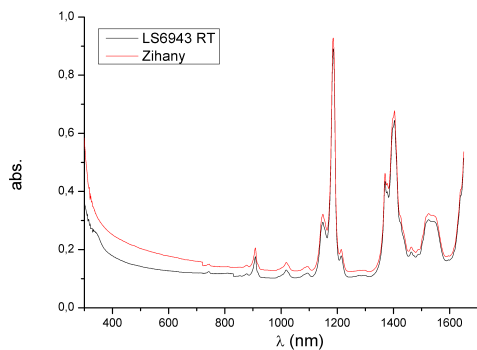
(d) PMMA Zenit.



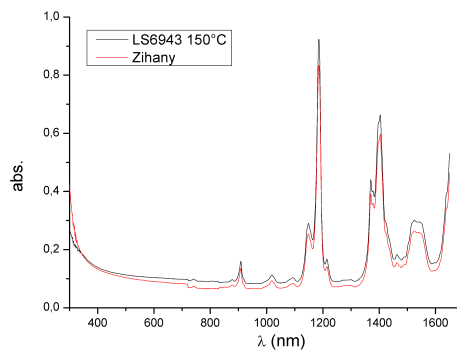
(e) Plexiglas 7N.

Obrázek 4.10: Absorpce objemových vzorků.

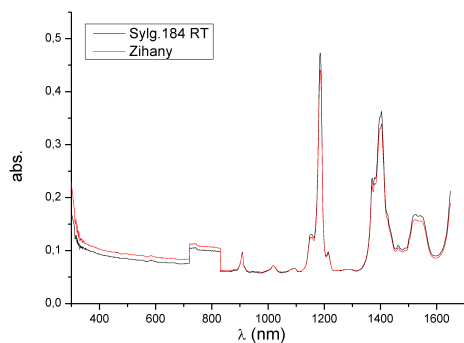
V grafech na obrázku 4.11 jsou optické silikonky. Vzorky LS6943, vytvrzovaný 150°C (Obr. 4.11b) a Sylgard 184 (Obr. 4.11c), vytvrzovaný při pokojové teplotě nemají výrazný rozdíl v absorpčních spektrech žíhaného a nežíhaného materiálu. Drobný rozdíl nastal u vzorku LS6943, vytvrzeného pokojovou teplotou (Obr. 4.11a), kde se levá strana křivky znatelně zvedá. Žíhanému Sylgardu 184, vytvrzenému 150°C (Obr. 4.11d) chybí pouze skok okolo 800 nm.



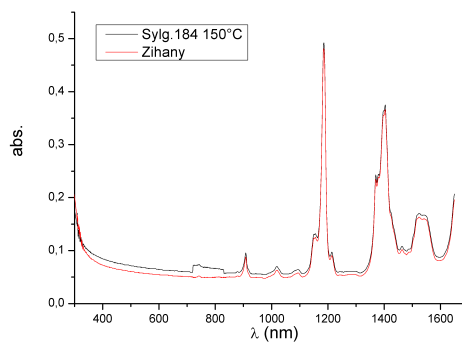
(a) LS6943 - RT.



(b) LS 6943 - 150°C.



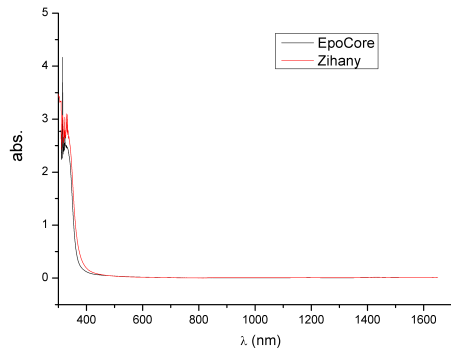
(c) Sylgard 184 - RT.



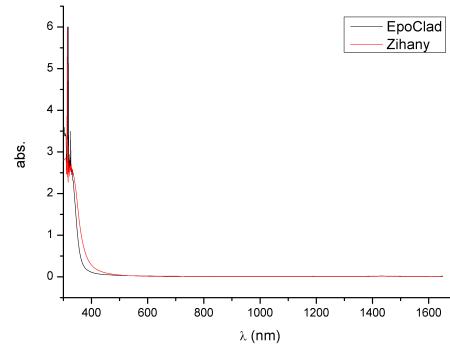
(d) Sylgard 184 - °C.

Obrázek 4.11: Absorpce vybraných optických silikonů.

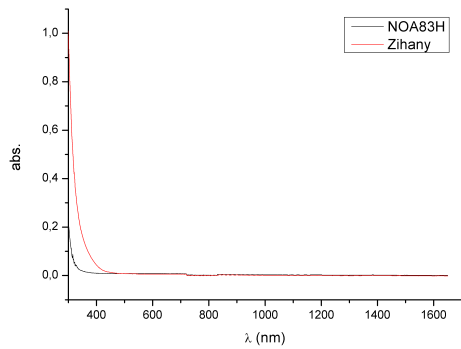
Na obrázku 4.12 jsou grafy absorpčních spekter vlnovodných materiálů. EpoCore (Obr. 4.12a), EpoClad (Obr. 4.12b), NOA72 (Obr. 4.12d), NOA88 (Obr. 4.12e), EpoTek OG113 (Obr. 4.12f) mají minimální změnu křivek žíhaných materiálů. Materiál NOA83H (Obr. 4.12c) se jediná výrazně liší, má posunutou absorpční hranu směrem k vyšším vlnovým délkám. Za povšimnutí stojí, že oproti objemovým vzorkům, mají tyto materiály absorpci blížící se k nule téměř přes celé měřené spektrum.



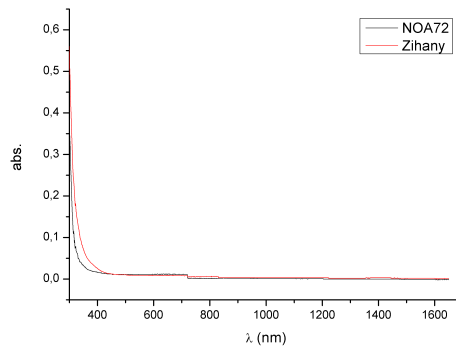
(a) EpoCore.



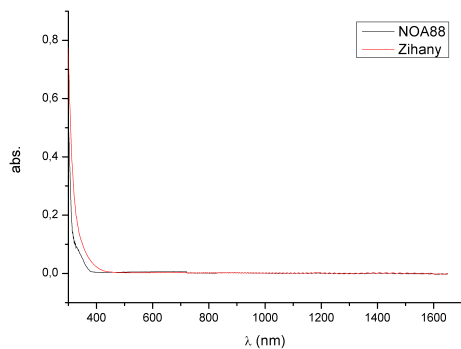
(b) EpoClad.



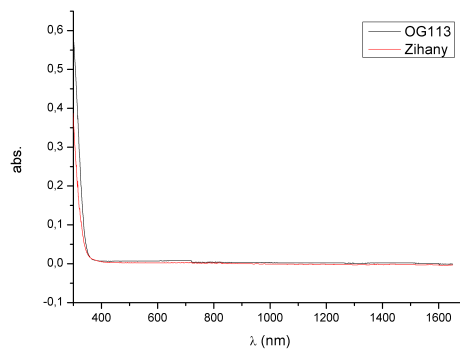
(c) NOA83H.



(d) NOA72.



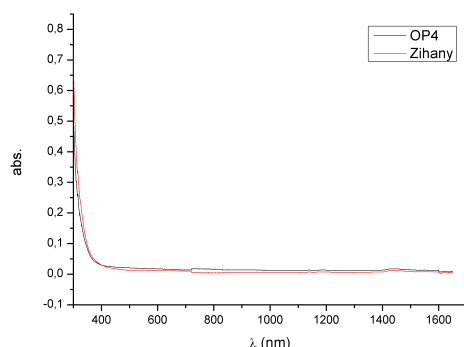
(e) NOA88.



(f) EpoTek OG113.

Obrázek 4.12: Absorpce vlnovodných materiálů.

Na obrázku 4.13 je vynesěn graf absorpčního spektra materiálu Dymax OP4, žíhání vzorku nijak neovlivnilo absorpční spektrum.



(a) Dymax OP4.

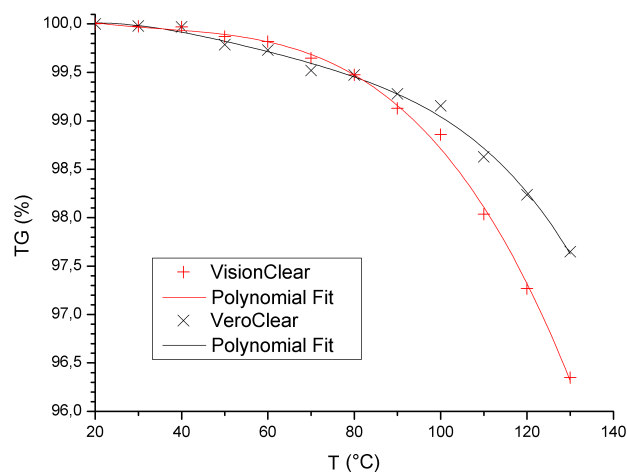
Obrázek 4.13: Absorpce vlnovodných materiálů.

4.1.4 Zjednodušená termogravimetrie

Materiály při této metodě byly vkládány do pece na 24 hodin, počínaje 30°C se teplota zvyšovala o 10°C až do teploty 130°C. Z naměřených hodnot byl vypočtena procentuální hmotnost vzorku vztahovaná k původní hmotnosti:

$$TG = 100 \cdot \frac{m}{m_0}, \quad (4.3)$$

kde TG je hmotnost vzorku v %, m hmotnost po testu a m_0 hmotnost před testem. Z těchto hodnot byl vytvořen graf závislosti TG na teplotě, viz obrázek 4.14.



Obrázek 4.14: Naměřené křivky VeroClear a VisionClear.

Z hodnot v grafu je patrné, že výrobci uvádějí provozní teplotu takovou, aby materiály vydržely s minimálním odparem. VeroClear i přes nižší provozní teplotu (45°C) prokázal na vyšších teplotách lepší odolnost než VisionClear s provozní teplotou (60°C), u kterého na teplotě 90°C došlo ke vzniku tenkých prasklin. U vzorku VeroClear je patrný pomalý sestup hodnoty TG do teploty 100°C, po kterém následuje prudký pokles.

4.1.5 Vyhodnocení teplotní stálosti

Měření teplotní stálosti bylo provedeno s ohledem na změnu hmotnosti a optických vlastností materiálů. V předchozích částech měření byly diskutovány výsledky jednotlivě. Důležité je vědět, jak jsou tyto výsledky propojeny a zda-li materiál s nízkou hodnotou odparu nezměnil své optické vlastnosti. Materiály budou porovnány od materiálů s nejnižší hodnotou odparu po nejvyšší a jsou u nich diskutovány změny optických parametrů.

Objemové materiály

První porovnávanou skupinou jsou vzorky objemové, v jejichž závěru budou porovnány optické silikony, včetně zohlednění jejich hodnot vůči hodnotám zbylých objemových materiálů.

Nejmenší hodnotu odparu byla pozorována u vzorku **Makrolon GP**, s hodnotou odparu 0,020 %. Optické vlastnosti se také nezměnily, je možné se přesvědčit v grafech na obrázcích 4.1a a 4.8a, kde u indexu lomu a absorpčních spekter materiálu nedošlo prakticky k žádné změně.

Druhým materiálem s nejnižší hodnotou odparu je **Zeonex E48R**. Odpar je 0,029 %. V grafu indexu lomu (Obr. 4.1b) je drobný rozdíl v posunu křivky po žíhání, nejedná se o nijak markantní změnu. Změna absorpčního spektra (Obr. 4.8b) je minimální.

Velice dobře také dopadl **Europlex F7** s hodnotou odparu 0,040 %. Bohužel se u tohoto materiálu nepodařil navázat optický kontakt (Obr. 4.2a). Absorpční spektrum (Obr. 4.9e) mělo zachovaný tvar křivky, ale došlo k posunu absorpční hrany.

Europlex PPSU je prvním ze vzorků s hodnotou odparu vyšší než 0,1 %. Odpar tohoto vzorku je 0,125 %, ale křivky indexu lomu (Obr. 4.2b) i absorpčního spektra (Obr. 4.9f) zůstaly zachovány.

Velkým překvapením je nízký odpar vzorku **NAS 21** (0,149 %), který byl během žíhání deformován, není tedy ideálním materiálem pro takto vysoké teploty. Žádným překvapením není to, že se při měření indexu lomu nepodařil navázat optický kontakt (Obr. 4.1c). Absorpční spektrum (Obr. 4.9a) vcelku zachovalo svůj tvar, ale došlo k posunu absorpční hrany.

Dalším vzorkem je již překonána hranice 0,2 %, dokonce i 0,3 %, **Pleximid TT70** má hodnotu odparu 0,336 %. Při měření indexu lomu se nejspíše z důvodu známek tečení na povrchu nepovedl navázat optický kontakt (Obr. 4.2c), absorpční spektrum (Obr. 4.10a) je vcelku zachované, došlo pouze k posunu absorpční hrany.

Následujícím materiálem je **TRIVEX**, který i přes hodnotu odparu 0,376 % má vcelku zachovanou křivku indexu lomu (Obr. 4.1f) a absorpční spektrum (Obr. 4.9d) je prakticky nezměněné.

Dvojice vzorků **PMMA** a **Plexiglas 7N** měla překvapivě podobné výsledky, hodnotu odparu přibližně 0,4 % a nepodařil se u nich navázat optický kontakt při měření indexu lomu (Obr. 4.2f, 4.3a). V obou vzorcích při žíhání vznikly bublinky, PMMA se dokonce prohnul. V absorpčních spektrech je drobný rozdíl, PMMA (Obr. 4.10d) a Plexiglas 7N (Obr. 4.10e) mají vůči sobě posunutou hranu, jinak mají společné vlnové délky s vyšší absorpcí.

Pleximid 8813 s hodnotou odparu 0,561 % měl překvapivě zachovanou křivku indexu lomu (Obr. 4.2e) i přes nepatrné známky po tečení se podařil navázat optický kontakt. Absorpční spektrum (Obr. 4.10c) se nezměnilo.

Materiál **MR-8** i přes poměrně vysokou hodnotu odparu, 0,582 %, nezměnil příliš svůj index lomu (Obr. 4.1d) a absorpční spektrum (Obr. 4.9b) bylo zachováno úplně.

Pleximid TT50 má naměřenou hodnotu odparu 0,672 %. Index lomu (Obr. 4.2d) po žíhání je celkem výrazně posunutý. Absorpční spektrum (Obr. 4.10b) je zachováno až na vrchol na 1450 nm.

Nejhůře z měřených vzorků dopadl **CR39** s odparem 1,097 %, velkým překvapením je to, že index lomu (Obr. 4.1e) je pouze trochu posunutý a absorpční spektrum (Obr. 4.9c) bez viditelné změny.

Z vybraných optických silikonů nejlépe dopadl **LS6943**, který s velkým přehledem předčí i ostatní objemové vzorky. Jeho hodnota odparu se dá prakticky pokládat za nulovou, viz tabulka 4.4. Grafy indexů lomu (Obr. 4.4) nejvíce žádný mezi hodnotami referenčními a hodnotami žíhaného materiálu, u absorpčních spekter (Obr. 4.11a, 4.11b) došlo pouze k drobné změně.

Sylgard 184 má hodnoty odparu pohybující se v okolí 0,35 % (Tab. 4.4), čímž by se zařadil mezi Pleximid TT70 a TRIVEX. Indexy lomu (Obr. 4.5) zůstaly téměř beze změny, stejně jako absorpční spektra (Obr. 4.11c, 4.11d) s výjimkou chybějícího okna v okolí 800 nm u vzorku vytvrzovaného 150°C (Obr. 4.11d).

Vlnovodné materiály

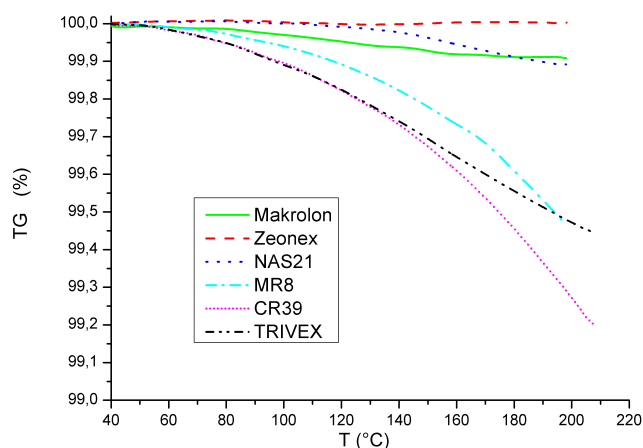
U vlnovodných materiálů není hlavním měřítkem odpar hmotnosti, což je možné vyčíst z tabulky 4.5, ze které vyplývá, že se hmotnost postupně stabilizuje. Přesto jsou hodnoty odparů vlnovodných materiálů uvedeny v tabulce 4.7. Z této tabulky lze vyčíst, že nejnižší hodnoty odparu dosahuje EpoCore, následovaný EpoCladem, NOA83H, NOA88, NOA72, Dymaxem OP4 a výrazně nejhůř dopadl EpoTek OG113. Přes to, že EpoCore s EpoCladem dosáhly nejnižších hodnot, došlo při jejich opakovaném testování (Tab. 4.5) ke zničení vzorků v podobě kapky.

OG113, který dopadl nejhůře s odparem ukázal nejmenší změnu indexu lomu (Obr. 4.6f). Index lomu pro EpoClad (Obr. 4.6b) se také změnil jen nepatrně. K posunu indexu lomu došlo u EpoCore (Obr. 4.6a), nepatrně většího u NOA83H (Obr. 4.6c) a největšího u NOA88 (Obr. 4.6e). Pro vzorky NOA72 a OP4 (Obr. 4.6d, 4.7) se nepovedl navázat optický kontakt.

Absorpční spektra (Obr. 4.12, 4.13) vlnovodných materiálů jsou víceméně totožná a beze změn s výjimkou NOA83H (Obr. 4.12c), kde po žíhání dochází k posunu hrany.

4.2 Termogravimetrická analýza

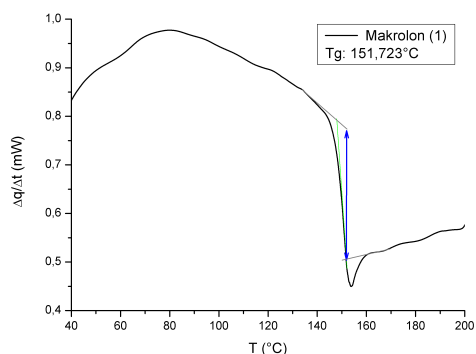
Metoda je popsána v kapitole 3.5 a je jednou z metod, které pomáhají určit teplotní odolnost polymerů. Analýza byla provedena v Centrálních laboratořích VŠCHT v Praze, změřená data jsou uvedena v grafu na obrázku 4.15. Z grafu lze vyčíst, že materiál Makrolon GP, Zeonex E48R a NAS21 jsou nejodolnější z testovaných vzorků, přičemž Zeonex E48R vyšel z tohoto měření nejlépe i přesto, že má nižší provozní teplotu než Makrolon a MR8.



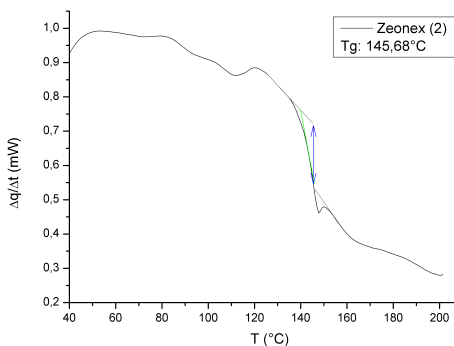
Obrázek 4.15: Naměřené křivky vybraných vzorků.

4.3 Diferenční kompenzační kalorimetrie

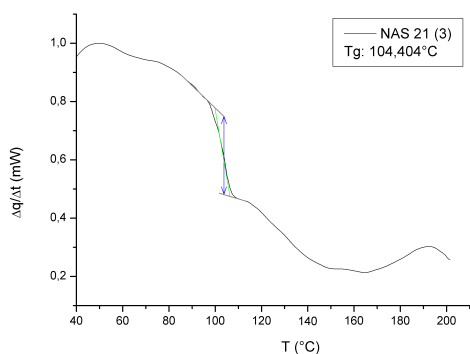
Metoda je popsána v kapitole 3.6, měření proběhlo v Centrálních laboratořích VŠCHT. Z dat získaných z měření byly vytvořeny grafy, viz obrázek 4.16, z grafů je možné odečíst hodnoty T_g .



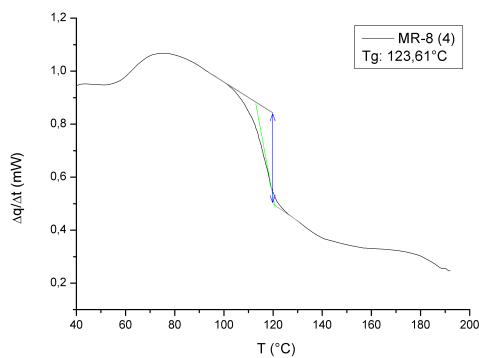
(a) Makrolon GP.



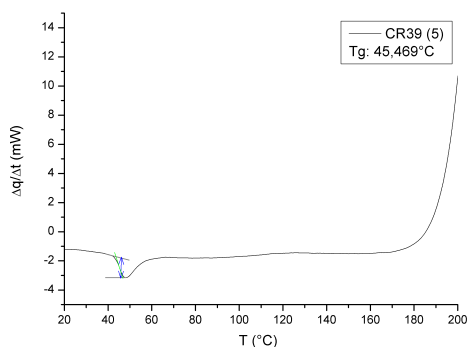
(b) Zeonex E48R.



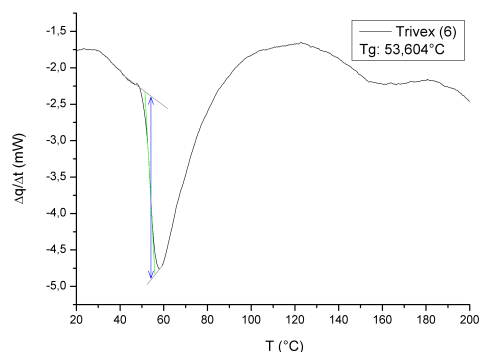
(c) NAS 21.



(d) MR-8.



(e) CR39.



(f) TRIVEX.

Obrázek 4.16: Závislost tepelného toku na teplotě vybraných objemových vzorků.

Nejvyšší hodnotu teploty skelného přechodu má Makrolon GP (Obr. 4.16a), v těsném závěsu za Makrolonem následuje Zeonex E48R (Obr. 4.16b). Posledním materiálem o kterém by se dalo uvažovat je MR-8 (Obr. 4.16d), s hodnotou skelného přechodu vyšší než 120°C. Další materiály mají tuto hodnotu příliš malou, ať už se jedná o NAS 21 (Obr. 4.16c) se 104°C, nebo o CR39 (Obr. 4.16e) a TRIVEX (Obr. 4.16f), jejichž hodnoty se pohybují okolo 50°C.

4.4 Teplota měknutí dle Vicata

Tento test proběhl ve firmě Polymer Institute Brno, metoda je popsána v kapitole 3.7. Výsledky testu jsou shrnuty v tabulce 4.8. Vzorky optických silikonů (LS6941, LS6943 a Sylgard 184) nebyly vhodné pro tento test, vzhledem k jejich měkkosti. U zbylých vzorků test proběhl.

Tabulka 4.8: Hodnoty z měření Vicat B50.

Číslo vzorku	Název materiálu	Hodnota Vicat [°C]	Tloušťka [mm]	Poznámka
1	Makrolon	145,9	1,481	
2	Zeonex	138,7	2,027	
3	NAS 21	97,5	2,448	
4	MR-8	111,9	3,147	Praskl
5	CR39	—	2,730	Rozpustil se
6	TRIVEX	154,3	2,431	
7	Europlex F7	147,0	3,030	
8	PPSU	> 190,0	3,013	
9	TT70	134,2	3,038	
10	TT50	148,4	3,017	
11	Pmmi 8813	116,9	3,040	
12	PMMA	99,8	3,022	
13	Plexiglas 7N	98,6	3,068	

Nejhůře dopadl vzorek CR39, který se rozpustil a nebyly z tohoto důvodu naměřeny žádné hodnoty.

Důležité jsou pro nás vzorky, které zvládli testem projít s teplotou alespoň 130 °C. Jsou to tyto vzorky, seřazené od nejlepšího po nejhorší:

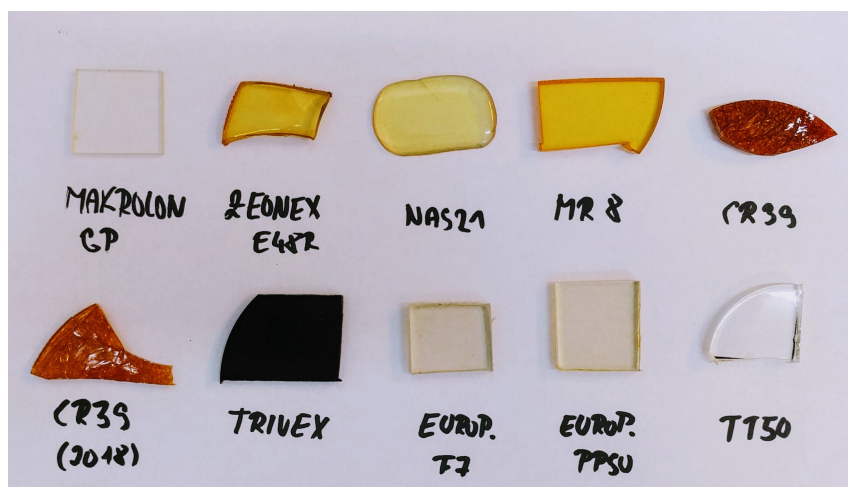
1. >190,0 °C PPSU (8)
2. 154,3 °C TRIVEX (6)
3. 148,4 °C TT50 (10)
4. 147,0 °C Europlex F7 (7)
5. 145,9 °C Makrolon (1)
6. 138,7 °C Zeonex (2)
7. 134,2 °C TT70 (9)

Kromě těchto materiálů byly ještě testovány materiály určené pro 3D tiskárny, VeroClear a VisionClear. Teplota měknutí materiálu VeroClear byla určena na 55 °C. Pro materiál VisionClear byla teplota měknutí 60,9 °C.

4.5 Zrychlené stárnocí testy

Vzhledem k časové náročnosti byl namísto 2 měsíčního testu proveden pouze 1000 hodinový, respektive 500 hodinový test, který zvládne testovací teplotou 150 °C vyřadit nevyhovující vzorky a ukázat rozdíl v odolnosti vzorků vyhovujících. Navíc za předpokladu, že se do vzorce pro výpočet 3.5 dosadí $K > 2,5$, přibližně 2,83 byl by výsledkem 1,5 měsíční test, což by odpovídalo cca 1000 hodinám. Vzhledem k tomu, že stárnocí koeficient může být při teplotách blízkých T_g až 10, tak je možné předpokládat, že vzorek který odolá tomuto testu je odolný dostatečně pro to, aby vydržel bez problému provoz cca 12 měsíců.

Pro pozdější porovnání byly testované vzorky převáženy a zaneseny do přílohy C.1-C.3. V půlce 1000 hodinového testu došlo k přerušení a kontrole vzorků. K přerušení došlo po 509 hodinách, 40 minutách (500 hodinový test). Došlo k vizuální kontrole vzorků (Obr. 4.17) a jejich zvážení (Příloha C.4-C.6). Tyto naměřené hodnoty jsou zpracované spolu s hodnotami 1000 hodinového (1006 hodin 16 minut) testu (Příloha C.7-C.9) zpracovány v tabulkách 4.9-4.11.



Obrázek 4.17: Měřené objemové vzorky po 500 hodinovém testu.

Při přerušení testu na 500 hodinách došlo k vyřazení vzorků s viditelnou změnou, jedná se o Zeonex E48R, který se zkroutil, NAS 21, který se roztekl, oba vzorky CR39 byly vyřazeny také, protože změnili barvu a vzniklo v nich velké množství prasklin, TRIVEX byl vyřazen z důvodu zčernání. MR-8 byl vyřazen, aby bylo předejito úplnému zničení s tím, že v případě dostatku času budou zjištěny jeho optické parametry.

Změřené hodnoty hmotností a odparů objemových vzorků jsou v tabulce 4.9 i s hodnotami odparů z testů tepelné stálosti D_{130} (Tab. 4.3), které slouží k porovnání.

Tabulka 4.9: Odpar objemových materiálů při zrychleném stárnutí.

Čas (hod.)	0	500		1000		24
Vzorek	m_0 [g]	m [g]	D_m [%]	m [g]	D_m [%]	D_{130} [%]
Makrolon GP	0,8626	0,8623	0,040	0,8620	0,073	0,020
Zeonex E48R	0,8454	0,8447	0,086	— ¹	—	0,029
NAS 21	1,2570	1,2514	0,443	— ¹	—	0,149
MR-8	2,1481	2,0534	4,410	— ¹	—	0,582
CR39	1,3529	0,9292	31,315	— ¹	—	1,097
CR39 (2018)	1,2475	0,9418	24,506	— ¹	—	1,097
TRIVEX	1,6066	1,5673	2,449	— ¹	—	0,376
Europlex F7	1,3626	1,3615	0,081	1,3611	0,110	0,040
Europlex PPSU	1,7635	1,7614	0,122	1,7611	0,137	0,125
Pleximid TT50	1,3853	1,3755	0,713	1,3756	0,699	0,672

Na první pohled je z tabulky zřejmé, že hodnoty odparů vyřazených materiálů jsou vyšší, než hodnoty materiálů, u kterých byl test dokončen. Jedinou výjimkou je Zeonex E48R, u kterého došlo k relativně nízkému odparu, 0,086 % i přesto, že vzorek byl evidentně zničený.

¹Vzorky zničeny po 500 hodinách.

Ze zbylých vzorků nejlépe dopadl Makrolon GP, který po 1000 hodinovém testu měl hodnotu odparu 0,073 %. Dalšími úspěšnými vzorky tohoto testu byly Europlex F7 a Europlex PPSU, s hodnotou odparu, o málo vyšší než 0,1 %, oba tyto vzorky navíc nepatrně ztmavly. Nejvyšší hodnotu odparu (0,699 %) ze zbylých vzorků měl Pleximid TTT50, zajímavé je, že hodnota je velice blízká hodnotě odparu z testu teplotní stálosti, dokonce naměřená hodnota hmotnosti po 500 a po 1000 hodinovém testu je v rámci chyby měření shodná.

Kromě výše zmíněných objemových vzorků byl testován i jeden z optických silikonů, jednalo se o materiál LS6943. Na tomto materiálu nebyla znát sebemenší známka ztmavnutí po testu, ale odpary hmotností v tabulce 4.10 ukazují, že došlo k poměrně velkému odparu, cca 0,7 %, tento odpor je srovnatelný s materiálem Pleximid TT50. Stejně jako v tabulce pro objemové vzorky jsou k dispozici data z testu teplotní stálosti D_{130} (Tab. 4.4) pro porovnání. Takto vysoký odpar nebyl očekáván vzhledem k provozní teplotě 260°C, přesto je možné předpokládat, že vzorek nebyl poškozen.

Tabulka 4.10: Odpar LS6943 při zrychleném stárnutí.

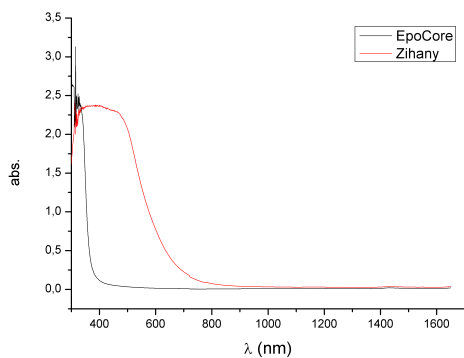
Čas (hod.)		0	500		1000		24
Vzorek	Vytvrzovací teplota	m_0 [g]	m [g]	D_m [%]	m [g]	D_m [%]	D_{130} [%]
LS6943	RT	10,0874	10,0397	0,473	10,0142	0,726	0,007
	65°C	4,6760	4,6466	0,628	4,6368	0,838	0,000
	100°C	7,4586	7,4229	0,479	7,4067	0,697	-0,002
	150°C	7,7319	7,6912	0,526	7,6758	0,725	-0,005

V tabulce 4.11 jsou data porovnána s daty z testu teplotní stálosti D_{130} (Tab. 4.7). Velký rozdíl je vidět u materiálů EpoCore, EpoClad a OG113. Zbylé materiály překvapily a potvrdily teorii o tom, že po určité době se hmotnost materiálů ustálí. Největším překvapením byl NOA88, který po testu 150°C na 1000 hodin má nižší hodnotu odparu než po testu 130°C na 24 hodin.

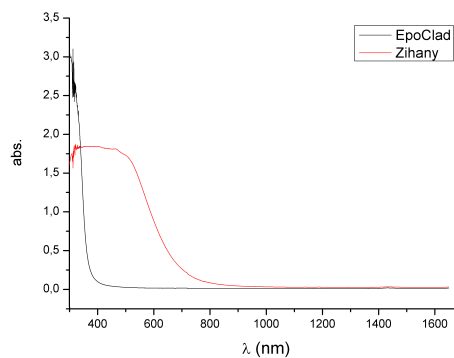
Tabulka 4.11: Odpar vlnovodných materiálů při zrychleném stárnutí.

Čas (hod.)	0	500		1000		24
Vzorek	m_0 [g]	m [g]	D_m [%]	m [g]	D_m [%]	D_{130} [%]
EpoCore	4,3133	4,2978	0,361	4,2928	0,476	0,017
EpoClad	4,2196	4,2013	0,434	4,1971	0,534	0,054
NOA83H	4,1860	4,1811	0,117	4,1814	0,108	0,110
NOA72	4,2721	4,2658	0,148	4,2628	0,218	0,159
NOA88	4,1673	4,1643	0,072	4,1633	0,096	0,156
OG113	4,2408	4,1767	1,513	4,1560	2,000	0,302
OP4	4,2930	4,2851	0,184	4,2836	0,219	0,171

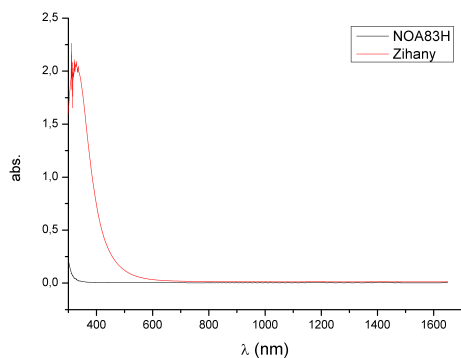
U vlnovodných vrstev došlo ke zbarvení všech vzorků. Nejvýraznější zbarvení bylo u vzorků EpoCore a EpoClad, tato vlastnost je zachycena v grafech na obrázku 4.18, kde je možné vidět vyšší hodnoty absorpce ve viditelném spektru. Vzorky EpoCore (Obr. 4.18a) a EpoClad (Obr. 4.18b) mají výrazně posunutou hranu směrem k vyšším vlnovým délkám, teoretickou funkčnost na vysokých vlnových délkách by to ohrozit nemělo. K posunu hrany došlo i u materiálu NOA83H (Obr. 4.18c), ale tento materiál tuto vlastnost projevil už při testu teplotní stálosti, kdy došlo k posunu zhruba polovičnímu (Obr. 4.12c). Opět překvapil NOA88, který nejen, že měl nízký odpar, ale jeho absorpční křivka (Obr. 4.18d) se téměř nepohnula.



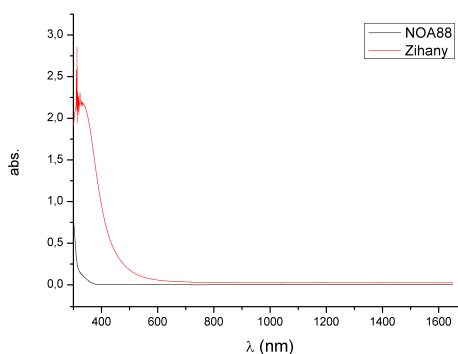
(a) EpoCore.



(b) EpoClad.



(c) NOA83H.



(d) NOA88.

Obrázek 4.18: Absorpce vlnovodných materiálů.

Kapitola 5

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo studium materiálů používaných pro fotonické aplikace se zaměřením na polymerní materiály, seznámení se s metodami pro charakterizaci polymerních materiálů a navržení postupu pro diagnostiku polymerních materiálů a určení maximální provozní teploty a stanovení životnosti.

V kapitole 2 Materiály pro fotoniku je zpracovaný přehled materiálů užívaných pro fotonické aplikace, z velké části se tato kapitola věnuje především akrylátovým polymerům, polykarbonátům, cyklo-olefin polymerům, allydiglikolkarbonátům, polyfenylsulfonům, polyuretanovým polymerům a optickým silikonům. Dále jsou zde zmíněny polyethylénové pryskyřice a epoxidové pryskyřice. Všechny tyto materiály je možné použít pro realizaci optických planárních vlnodů. U polymerních materiálů jsou popsány jejich vlastnosti a k čemu bývají používány. V přehledových tabulkách těchto materiálů (Tab 2.4-2.6) jsou uvedeny hodnoty indexu lomu, maximální provozní teploty a transmisie, které udává výrobce.

Kapitola 3 Měřicí metody obsahuje popis vybraných metod používaných pro charakterizaci polymerních materiálů společně s metodami pro určení maximální provozní teploty a stanovení životnosti. Zmíněnými metodami pro charakterizaci polymerních materiálů jsou v této práci metody k určení hmotnosti, indexu lomu, absorpčních spekter a geometrických rozměrů. Zbývající metody v této kapitole jsou zaměřeny na stanovení maximální provozní teploty, jedná se o navržený test na základě měřicí metody teplotní odolnosti, termogravimetrickou analýzu, diferenciální kompenzační kalorimetrii a stanovení teploty měknutí. Závěr kapitoly Měřicí metody je zaměřen na zrychlené stárnutí polymerů, jsou zde popsány příčiny stárnutí a metody pro testování doby životnosti doplněné návrhem pro zrychlený stárnující test proveditelný v našich podmínkách.

Výsledky získané v kapitole 4 Měření by měly posloužit k výběru ideálního materiálu pro optické planární vlnodů, které by měly být dostatečně teplotně odolné, aby vydržely teploty vyšší než 80°C. Jedná se o objemové materiály i materiály pro jádra optických planárních a kanálových vlnodů.

Z výsledků měření vyplynulo, že vhodné vlastnosti mají materiály Makrolon GP, Europlex F7, Europlex PPSU, Pleximid TT50 a LS6943, tyto materiály úspěšně prošly 1000 hodinovým testem při 150°C a vyhověly i při měření teploty měknutí. U vzorků u nichž proběhla termogravimetrická analýza a diferenční kompenzační kalorimetrie byla potvrzena možnost použití vzorků i při teplotě 130°C. U materiálů Makrolon GP a Pleximid TT50 bylo prokázáno, že je jejich použití možné i za vyšších teplot, než uvádí výrobce. V případě materiálu Makrolon GP je uvedená provozní teplota 120°C a v případě materiálu Pleximid TT50 je uvedená hodnota HDT 132°C a dá se tedy předpokládat, že provozní teplota bude nižší a přesto tyto vzorky odolaly i teplotě 150°C. Tyto materiály na rozdíl od ostatních objemových materiálů by měly být schopny odolat i dlouhodobému provozu (alespoň 12 měsíců) při teplotě 130°C.

Dalšími polymerními vzorky, které mohou být pokládány za vhodné jsou Zeonex E48R s provozní teplotou 110°C a TRIVEX, přestože tyto materiály 1000 hodinový test nevydržely, provedený test teplotní stálosti a všechny externí testy (Termogravimetrická analýza, DSC i stanovení teploty měknutí) potvrdily, že by mohly být používány za teploty 130°C.

Všechny tři materiály zastupující optické silikony LS6943, LS6941 a Sylgard 184 by měly být schopny vydržet teploty alespoň 200°C s ohledem na provozní teploty uvedené výrobcem. Optický silikon s nejnižší uvedenou provozní teplotou, 200°C, je Sylgard 184, který byl testován na teplotní odolnost. I přes vyšší hodnotu odparu, než byla očekávaná, nedošlo k žádným viditelným změnám, ani ke změnám optických vlastností.

Posledním z objemových materiálů, který by bylo možné použít je Pleximid TT70, výrobce uvádí pouze hodnotu HDT 149°C, ze které lze usoudit, že by materiál mohl být použitelný pro teploty do 130°C. Měření teplotní odolnosti vhodnost tohoto materiálu pro použití pro vyšší teploty neprokázal. Zbylé testované objemové materiály nejsou podle našich výsledků vhodné pro použití za vysokých teplot.

Kromě objemových materiálů byly zkoumány i vlastnosti polymerů pro jádra planárních optických vlnodů. Nejlepším ze zkoumaných vlnovodných materiálů je polymer NOA88, který předčil ostatní materiály v 1000 hodinovém testu ve všech ohledech. Tento výsledek je překvapivým, protože stejně jako materiál NOA72, který v tomto testu neuspěl tak dobře, má tento materiál výrobcem uvedenou provozní teplotu 90°C, respektive 125°C, ale pouze v případě, že je materiál překryt ochrannou vrstvou, čemuž tak během testu nebylo. Zbylé vlnovodné materiály byly také schopny vyhovět 1000 hodinovému testu. Celkem dobře dopadl i materiál NOA83H, u něhož ale došlo k výraznějšímu posunu absorpční hrany. Hodnota odparu polymeru EpoTek OG113 byla mnohem vyšší, než ostatních vlnovodných materiálů, vzhledem k výrobcem neuvedené provozní teplotě se dá předpokládat, že provozní teplota bude nižší, než u ostatních testovaných vzorků. Materiály EpoCore a EpoClad s uvedenou provozní teplotou 230°C nepotvrdily svou odolnost, když při opakovaném vystavení teplotě 130°C po dobu 24 hodin materiály ztmavly, stejně tak při 1000 hodinovém testu, kde je možné sledovat, že dochází k významnému posunu absorpční hrany.

Díky prokázané teplotní odolnosti jsou také NOA72 a Dymax OP4 potencionálně vhodné materiály pro optické vlnovody s provozní teplotou do 130°C.

Při řešení bakalářské práce byly nalezeny polymery, u kterých bylo prokázáno, že je možné použít pro realizaci fotonických struktur pro provozní teploty vyšší než 80°C až s maximální provozní teplotou do 130°C. V případě objemových polymerů se jedná o Makrolon GP, Zeonex E48R, TRIVEX, Europlex F7, Europlex PPSU, Pleximid TT50, LS6941, LS6943 a Sylgard 184, v případě polymerů pro jádra optických planárních vlnodů se jedná o NOA83H a NOA88.

Použitá literatura

- [1] QUIMBY, Richard S. a JOHN WILEY & SONS., 2006. *Photonics and lasers: an introduction* [online]. B.m.: Wiley-Interscience [vid. 2018-05-22]. ISBN 9780471791591. Dostupné z: <https://www.wiley.com/en-cz/Photonics+and+Lasers%3A+An+Introduction-p-9780471791591>
- [2] DECUSATIS, Casimer M., ENOCH, Jay M., LAKSHMINARAYANAN, Vasudevan, LI, Guifang, MACDONALD, Carolyn, MAHAJAN, Virendra N. a STRYLAND, Eric V., 2009. *Handbook of Optics, Volume II* [online]. B.m.: McGraw-Hill [vid. 2017-11-10]. ISBN: 9780071498906. Dostupné z: <https://www.accessengineeringlibrary.com/browse/handbook-of-optics-volume-ii-design-fabrication-and-testing-sources-and-detectors-radiometry-and-photometry-third-edition>
- [3] POLANSKYI, Mikhail N. *Refractive index database* [online]. [vid. 2018-03-14]. Dostupné z: <https://refractiveindex.info>
- [4] PEARTON, S.J., ABERNATHY, C.R., OVERBERG, M.E., THALER, G.T., ONSTINE, A.H., GILA, B.P., REN, F., LOU, B. a KIM, J., 2002. New applications advisable for gallium nitride. *Materials Today* [online]. B.m.: Elsevier, 5(6), 24–31 [vid. 2018-03-16]. ISSN 1369-7021. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702102006363>
- [5] THE CORNING MUSEUM OF GLASS, 2011. *Chemistry of Glass* [online]. Corning, USA: The Corning Museum of Glass [vid. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.cmog.org/article/chemistry-glass>
- [6] ASAI, T., SHIMOTSUMA, Y., KURITA, T., MURATA, A., KUBOTA, S., SAKAKURA, M., MIURA, K., BRISSET, F., POUHELLEC, B. a LANCRY, M., 2015. Systematic Control of Structural Changes in GeO₂ Glass Induced by Femtosecond Laser Direct Writing; *Journal of the American Ceramic Society* [online]. B.m.: Wiley/Blackwell (10.1111), 98(5), 1471–1477 [vid. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jace.13482>
- [7] A-STAR PHOTONICS. *Optical Crystal* [online]. B.m.: A-Star photonics, Inc. [vid. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.astarphotonics.com/product-showcase/crystal/>
- [8] BÄUMER, Stefan, 2011. *Handbook of plastic optics: Second edition* [online]. B.m.: Wiley [vid. 2017-11-10]. ISBN: 9783527409402. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527635443>
- [9] CARL HANSER VERLAG. Styrene Copolymers. *Kunststoffe international* [online]. Mnichov, DE: Carl Hanser Verlag, 2014(10), 28-33 [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.kunststoffe.de/en/journal/archive/article/rising-demand-for-specialty-polymers-908655.html>

- [10] SPECIALCHEM. *Styrene acrylic copolymer* [online]. B.m.: SpecialChem [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/centers/smna--styrene-acrylic-copolymer-center/performance-profile>
- [11] EVONIK. *Acrymid* [online]. B.m.: Evonik Industries AG [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.acrylite-polymers.com/product/acrylite-polymers/en/products/acrymid/pages/default.aspx>
- [12] VESELÝ, Petr, ŠIMOVIČ, Peter a PETROVÁ, Sylvie. *Konvenční a Free-Form technologie výroby brýlových čoček* [online]. Brno: Lékařská fakulta Masarykovy univerzity [vid. 2018-05-03]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js12/vyroba_cocek/web/pages/01-2-01_standard_lom.html
- [13] POLYMER PROPERTIES DATABASE. *Polyphenylsulphone* [online]. B.m.: Polymer Properties Database [vid. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PPSU.html>
- [14] AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. *Polyurethanes, Introduction to Polyurethanes: Polyurethane Applications* [online]. B.m.: American chemistry council, Inc. [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://polyurethane.americanchemistry.com/Applications/>
- [15] PPG INDUSTRIES, 2006; *The Technical Features of Trivex™ Lens Material* [online]; Pittsburgh, USA: PPG Industries, Inc. [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: http://www.x-celoptical.com/aris_trivex_pdf_files/TrivexUsersGuide2006TechFeatures.pdf
- [16] MITSUI CHEMICALS, 2017. *MR™ Series Product Lineup*, [online]. Tokyo, JP: Mitsui Chemicals [vid. 2017-11-11] Dostupné z: <https://www.mitsuichem.com/en/special/mr/products/index.htm>
- [17] BAYER, 2014. *Product Data Sheet - Makrolon GP* [online]. Darmstadt, DE: BAYER MaterialScience [2017-11-11]. Dostupné z: <http://www.lermonthplastics.es/pdfcatalogos/23-1421398928.pdf>
- [18] ZEON CORPORATION, 2016; *Cyclo Olefin Polymer (COP) ZEONEX* [online]; Tokyo, JP: Zeon corporation [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://www.zeon.co.jp/content/200181690.pdf>
- [19] INEOS STYROLUTION, 2016. *Technical Datasheet - NAS 21* [online]. B.m.: INEOS Styrolution [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: https://www.ineos-styrolution.com/Product/NAS_NAS-21_SKU401000260275.html
- [20] PPG INDUSTRIES, 2006; *CR-39™ Product Bulletin* [online]; Pittsburgh, USA: PPG Industries, Inc. [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: <https://refractiveindex.info/download/data/2006/CR39.pdf>
- [21] EVONIK INDUSTRIES AG, 2014. *EUROPLEX® F for aircraft applications* [online]. Darmstadt, DE: Evonik Industries AG [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://europlex-sheets.evonik.com/sites/lists/PM/DocumentsAP/EUROPLEX-F-aircraft.pdf>
- [22] EVONIK INDUSTRIES AG, 2011. *EUROPLEX® PPSU sheets for aircraft applications* [online]. Darmstadt, DE: Evonik Industries AG [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: https://www.daicel-evonik.com/assets/img/uploads/EUROPLEX%20PPSU%20aircraft_1.pdf

- [23] EVONIK INDUSTRIES AG, 2015. *PLEXIMID[®] TT70* [online]. Darmstadt, DE: Evonik Industries AG [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: http://www.plexiglas-polymers.com/sites/lists/PM/DocumentsAP/PLEXIMID-TT70_E.pdf
- [24] EVONIK INDUSTRIES AG, 2015. *PLEXIMID[®] TT50* [online]. Darmstadt, DE: Evonik Industries AG [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://www.plexiglas-polymers.com/sites/lists/PM/DocumentsAP/PLEXIMID-TT50-E.pdf>, 11.11.2017
- [25] EVONIK INDUSTRIES AG, 2011. *PLEXIMID[®] 8813* [online]. Darmstadt, DE: Evonik Industries AG [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: https://www.daicel-evonik.com/assets/img/uploads/PLEXIMID%208813_E.pdf
- [26] ZENIT. *Plexisklo* [online] Praha: Zenit, spol. s.r.o. [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: https://www.zenit.cz/public/media/Plasty/Zenit_Prospekt_Plasty_Plexiglas_CZ.pdf
- [27] EVONIK INDUSTRIES AG, 2015. *PLEXIGLAS[®] 7N* [online]. Darmstadt, DE: Evonik Industries AG [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: http://www.plexiglas-polymers.com/sites/lists/PM/DocumentsAP/PLEXIGLAS-7N_E.pdf
- [28] Sculpteo. *3D Printing Material: VeroClear Resin (Translucent PolyJet Resin)* [online]. Villejuif, F: Sculpteo [vid. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/materials/polyjet-resin-material/veroclear-polyjet-resin-material/>
- [29] STRATASYS, 2018. *VeroClear* [online]. Eden Prairie, USA: Stratasys [vid. 2018-05-18]. Dostupné z: http://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_pj_veroclear_0318a.pdf
- [30] LUXEXCEL, 2016. *Material properties ophthalmic applications* [online]. Turnhout, BE: Luxexcel [vid. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://info.luxexcel.com/download-ophthalmic-material-specifications>
- [31] CASQUILLAS, Guilhem V. a HOUSSIN, Timothée. *PDMS: A REVIEW* [online]. B.m.: ELVEFLOW [vid. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.elflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-reviews-and-tutorials/the-poly-di-methyl-siloxane-pdms-and-microfluidics/>
- [32] NUSIL TECHNOLOGY LLC, 2008. *LS-6941* [online]. B.m.: Nasil Technology LLC [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: <https://www.silicone-polymers.co.uk/pdfMaster/LS-6941P.pdf>
- [33] NUSIL TECHNOLOGY LLC, 2007. *LS-6943* [online]. B.m.: Nasil Technology LLC [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://www.silicone-polymers.co.uk/pdf2007/LS-6943P.pdf>
- [34] DOW CORNING. *Dow Corning[®] 184 Silicone Elastomer* [online]. Midland, USA: Dow Corning [vid. 2017-11-11]. Dostupné z: https://www.galco.com/techdoc/dowc/sylgard-184_pg.pdf
- [35] MICRO RESIST TECHNOLOGY. *EpoCore & EpoClad - Negative Tone Photoresist Series* [online]. Berlin, DE: micro resist technology GmbH [vid. 2018-03-06]. Dostupné z: http://microresist.de/sites/default/files/download/PI_EpoCore_Clad_2015.pdf

- [36] NORLAND PRODUCTS. *Norland Optical Adhesive 83H* [online]. Cranbury, USA: Norland Products, Inc. [vid. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.norlandprod.com/literature/83Htds.pdf>
- [37] NORLAND PRODUCTS. *Norland Optical Adhesive 72* [online]. Cranbury, USA: Norland Products, Inc. [vid. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.norlandprod.com/adhesives/noa%2072.html>
- [38] NORLAND PRODUCTS. *Norland Optical Adhesive 88* [online]. Cranbury, USA: Norland Products, Inc. [vid. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.norlandprod.com/literature/88tds.pdf>
- [39] EPOXY TECHNOLOGY. *Product Information Sheet* [online]. Billerica, USA: Epoxy Technology [vid. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://gentec-benelux.com/wp-content/uploads/2012/07/0G113.pdf>
- [40] DYMAX. *Ultra Light-Weld OP-4-20632* [online]. Torrington, USA: Dymax Corporation [vid. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://www.dymax.com/images/pdf/pds/op-4-20632.pdf>
- [41] MAXWELL, Antony S., BROUGHTON, W.R., DEAN, G. a SIMS, Graham D., 2005. A.S.Maxwell, W.R.Broughton, G.Dean and G.D.Sims; *Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials* [online]. Teddington, GB: National Physical Laboratory [vid. 2017-10-19] ISSN 1744-0270. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283345000_Review_of_Accelerated_Ageing_Methods_and_Lifetime_Prediction_Techniques_for_Polymeric_Materials
- [42] MEMMERT, 2017. *Universal Oven UF30plus* [online]. B.m.: Memmert [vid. 2017-12-05]. Dostupné z: <https://www.memmert.com/products/heating-drying-ovens/universal-oven/UF30plus/pdf/>
- [43] OHAUS. *Adventurer[®]* [online]. Parsippany, USA: Ohaus Corporation [vid. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://dmx.ohaus.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=4294968488>
- [44] ČERVENKA, Milan, 2013. *Zpracování fyzikálních měření* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze [vid. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://fyzika.feld.cvut.cz/~cervenka/vyuka/zprfm/zpracdat.pdf>
- [45] METRICON. *Model 2010/M Overview* [online]. Pennington, USA: Metricon corporation [vid. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://www.metricon.com/model-2010-m-overview/>
- [46] PRAJZLER, Václav, MIN, Kyungtaek, KIM, Sunghwan a NEKVINDOVÁ, Pavla, 2018. The Investigation of the Waveguiding Properties of Silk Fibroin from the Visible to Near-Infrared Spectrum. *Materials* [online]. Basel, CH: MDPI, 1(11), 112 [vid. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/1/112>
- [47] SHIMADZU. *UV-3600 Plus* [online]. Kjóto, JP: Shimadzu corporation [vid. 2018-02-17]. Dostupné z: https://www.shimadzu.com/an/molecular_spectro/uv/uv-3600plus.html
- [48] NERUDA, Miloš, 2016. *Optické planární vlnovody* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Diplomová práce [vid. 2017-11-10]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/65194>

- [49] KUČEŘÍK, Jiří, 2011. *Termická analýza – Termogravimetrie (TGA)* [online]. Brno: CHEMPOINT [vid. 2017-12-29]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kucerik-1>
- [50] KUČEŘÍK, Jiří, 2011. *Termická analýza – Diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC)* [online]. Brno: CHEMPOINT [vid. 2017-12-29]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kucerik-2>
- [51] MENZCEL, Joseph D. a PRIME R. Bruce (ed.), 2009. *Thermal analysis of Polymers: Fundamentals and applications* [online]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc. [vid. 2017-12-15]. ISBN: 9780471769170. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470423837>
- [52] EXTOL. *EXTOL PREMIUM, Měřítka posuvné digitální kovové* [online]. B.m.: EXTOL [vid. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.extol.cz/naradi/rucni-naradi/meridla-a-lasery/posuvna-meritka/8825225/>
- [53] DAREBNÝ, Tomáš, 2014. *Degradační testy polymerních materiálů vystavených klimatickým podmínkám* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Bakalářská práce [vid. 2017-10-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88453
- [54] SEPE, Michael, 2015. *The Challenge of Predicting Long-Term Behavior of Polymers Based On Accelerated Testing* [online]. B.m.: The Prospector [vid. 2017-10-26]. Dostupné z: <https://knowledge.ulprospector.com/3219/pe-challenge-predicting-long-term-behavior-polymers-accelerated-testing/>
- [55] ZEMAN, Gary. *Ultraviolet Radiation* [online]. McLean, USA: Health Physics Society [vid. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://hps.org/hpspublications/articles/uv.html#>
- [56] THE NATIONAL OPTICAL ASTRONOMY OBSERVATORY. *Recommended Light Levels* [online]. B.m.: The National Optical Astronomy Observatory [vid. 2017-11-05]. Dostupné z: https://www.noao.edu/education/QLTkit/ACTIVITY_Documents/Safety/LightLevels_outdoor+indoor.pdf
- [57] DZIK, Petr, 2011. *Urychlené stárnutí* [online]. Brno: CHEMPOINT [vid. 2017-11-01]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/urychlene-starnuti>

Příloha A

Hmotnosti vzorků pro zkoušku teplotní odolnosti

Tabulka A.1: Hmotnost vzorků před testem (sada 2).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0 [g]
č.vzorku	m [g]							
7	1,4921	1,4923	1,4921	1,4923	1,4923	1,4922	1,4923	1,49223
8	1,9613	1,9612	1,9615	1,9615	1,9613	1,9615	1,9615	1,96140
9	0,8801	0,8802	0,8802	0,8803	0,8805	0,8806	0,8804	0,88033
10	0,8267	0,8269	0,8268	0,8271	0,8272	0,8273	0,8271	0,82701
11	1,0878	1,0879	1,0882	1,0882	1,0884	1,0882	1,0881	1,08811
12	0,9407	0,9405	0,9407	0,9405	0,9406	0,9406	0,9406	0,94060
13	0,8336	0,8333	0,8334	0,8333	0,8335	0,8334	0,8335	0,83343

Tabulka A.2: Kontrolní vzorek (sada 2).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_k [g]
č.vzorku	m [g]							
8	1,9612	1,9609	1,9611	1,961	1,9608	1,9612	1,9613	1,96107
11	1,0885	1,0884	1,0886	1,0885	1,0889	1,0884	1,0885	1,08854
12	0,9408	0,9406	0,9407	0,9408	0,9408	0,9408	0,9408	0,94076
13	0,8335	0,8336	0,8335	0,8336	0,8337	0,8336	0,8335	0,83357

Tabulka A.3: Hmotnost vzorků po testu (sada 2).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
č.vzorku	m [g]							[g]
7	1,4900	1,4899	1,4897	1,4898	1,4901	1,4900	1,4898	1,48990
8	1,9514	1,9518	1,9514	1,9515	1,9512	1,9517	1,9514	1,95149
9	0,8751	0,8752	0,8754	0,8752	0,8753	0,8752	0,8752	0,87523
10	0,8189	0,8190	0,8193	0,8191	0,8190	0,8188	0,8191	0,81903
11	1,0796	1,0802	1,0799	1,0800	1,0799	1,0800	1,0801	1,07996
12	0,9344	0,9351	0,9348	0,9347	0,9348	0,9347	0,9349	0,93477
13	0,8286	0,8285	0,8287	0,8285	0,8282	0,8284	0,8283	0,82846

Tabulka A.4: Hmotnost odpočinitých vzorků po testu (sada 2).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
č.vzorku	m [g]							[g]
7	1,4916	1,4917	1,4919	1,4914	1,4917	1,4915	1,4916	1,49163
8	1,9588	1,9591	1,9589	1,9590	1,9588	1,9589	1,9591	1,95894
9	0,8773	0,8774	0,8771	0,8775	0,8774	0,8776	0,8773	0,87737
10	0,8214	0,8212	0,8216	0,8214	0,8213	0,8217	0,8216	0,82146
11	1,0821	1,0820	1,0821	1,0819	1,0821	1,0819	1,0820	1,08201
12	0,9369	0,9369	0,9368	0,9367	0,9368	0,9367	0,9369	0,93681
13	0,8300	0,8301	0,8299	0,8299	0,8300	0,8303	0,8301	0,83004

Tabulka A.5: Hmotnost vzorků před testem (sada 1).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
č.vzorku	m [g]							[g]
1	1,7332	1,7331	1,7329	1,7330	1,7332	1,7331	1,7333	1,73311
2	0,7449	0,7449	0,7448	0,7449	0,7447	0,7450	0,7449	0,74487
3	0,3841	0,3842	0,3842	0,3839	0,3840	0,3841	0,3840	0,38407
4	0,5280	0,5279	0,5281	0,5282	0,5280	0,5280	0,5281	0,52804
5	0,8436	0,8437	0,8436	0,8438	0,8439	0,8438	0,8435	0,84370
6	0,4939	0,4940	0,4941	0,4940	0,4942	0,4939	0,4940	0,49401

Tabulka A.6: Hmotnost vzorků po testu (sada 1).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
č.vzorku	m [g]							[g]
1	1,7326	1,7327	1,7329	1,7328	1,7327	1,7328	1,7329	1,73277
2	0,7448	0,7447	0,7445	0,7446	0,7447	0,7447	0,7446	0,74466
3	0,3838	0,3833	0,3837	0,3834	0,3835	0,3833	0,3835	0,38350
4	0,5247	0,5252	0,5248	0,5250	0,5252	0,5249	0,5250	0,52497
5	0,8345	0,8342	0,8343	0,8343	0,8345	0,8347	0,8346	0,83444
6	0,4917	0,4918	0,4924	0,4923	0,4922	0,4926	0,4921	0,49216

Tabulka A.7: Hmotnost vzorků před testem (sada 3).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
vzorek	m [g]							[g]
15 (RT)	4,4135	4,4134	4,4134	4,4136	4,4135	4,4134	4,4135	4,4135
15 (65°C)	5,8474	5,8475	5,8475	5,8474	5,8474	5,8476	5,8474	5,8475
15 (100°C)	5,6856	5,6858	5,6856	5,6857	5,6858	5,6857	5,6856	5,6857
15 (150°C)	4,9767	4,9766	4,9767	4,9767	4,9765	4,9765	4,9766	4,9766
15 (200°C)	5,8083	5,8083	5,8082	5,8083	5,8083	5,8084	5,8082	5,8083
16 (RT)	1,2151	1,2152	1,2151	1,2152	1,2150	1,2152	1,2151	1,2151
16 (65°C)	1,5407	1,5408	1,5409	1,5407	1,5409	1,5408	1,5408	1,5408
16 (80°C)	1,6253	1,6254	1,6253	1,6252	1,6253	1,6252	1,6252	1,6253
16 (100°C)	1,7717	1,7716	1,7717	1,7716	1,7718	1,7717	1,7716	1,7717
16 (150°C)	1,2610	1,2609	1,2609	1,2610	1,2609	1,2610	1,2610	1,2610

Tabulka A.8: Hmotnost vzorků po testu (sada 3).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
č.vzorku	m [g]							[g]
15 (RT)	4,4129	4,4132	4,4130	4,4133	4,4131	4,4132	4,4133	4,4131
15 (65°C)	5,8475	5,8476	5,8475	5,8474	5,8475	5,8475	5,8474	5,8475
15 (100°C)	5,6859	5,6858	5,6859	5,6857	5,6858	5,6857	5,6859	5,6858
15 (150°C)	4,9769	4,9768	4,9769	4,9770	4,9768	4,9769	4,9768	4,9769
15 (200°C)	5,8079	5,8079	5,8078	5,8080	5,8079	5,8078	5,8079	5,8079
16 (RT)	1,2106	1,2106	1,2105	1,2106	1,2107	1,2104	1,2106	1,2106
16 (65°C)	1,5351	1,5353	1,5354	1,5352	1,5353	1,5353	1,5354	1,5353
16 (80°C)	1,6192	1,6193	1,6193	1,6194	1,6193	1,6192	1,6194	1,6193
16 (100°C)	1,7657	1,7656	1,7657	1,7657	1,7658	1,7656	1,7656	1,7657
16 (150°C)	1,2565	1,2564	1,2565	1,2566	1,2565	1,2565	1,2564	1,2565

Tabulka A.9: Hmotnost vlnovodných materiálů před testem (vytvrzování).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
vzorek	m [g]							[g]
Refrence	4,7250	4,7248	4,7247	4,7248	4,7250	4,7249	4,7249	4,72487
EpoCore	5,0192	5,0194	5,0193	5,0194	5,0194	5,0193	5,0192	5,01931
EpoClad	5,1901	5,1902	5,1902	5,1901	5,1902	5,1903	5,1902	5,19019
NOA83H	5,0962	5,0963	5,0964	5,0963	5,0963	5,0962	5,0964	5,09630
NOA72	5,1820	5,1822	5,1820	5,1821	5,1821	5,1821	5,1822	5,18210
NOA88	5,1665	5,1665	5,1665	5,1664	5,1665	5,1664	5,1664	5,16646

Tabulka A.10: Hmotnost vlnovodných materiálů po 24 hodinách (vytvrzování).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
vzorek	m [g]							[g]
Reference	4,7254	4,7253	4,7250	4,7252	4,7251	4,7251	4,7252	4,72519
EpoCore	5,0172	5,0172	5,0171	5,0172	5,0171	5,0171	5,0172	5,01716
EpoClad	5,1789	5,1789	5,1790	5,1789	5,1788	5,1787	5,1788	5,17886
NOA83H	5,0887	5,0887	5,0885	5,0888	5,0887	5,0886	5,0885	5,08864
NOA72	5,1737	5,1736	5,1737	5,1735	5,1738	5,1736	5,1737	5,17366
NOA88	5,1612	5,1611	5,1612	5,1611	5,1613	5,1612	5,1611	5,16117

Tabulka A.11: Hmotnost vlnovodných materiálů po 48 hodinách (vytvrzování).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
vzorek	m [g]							[g]
Reference	4,7258	4,7259	4,7260	4,7260	4,7259	4,7258	4,7258	4,72589
EpoCore	5,0155	5,0154	5,0155	5,0157	5,0154	5,0156	5,0155	5,01551
EpoClad	5,1725	5,1726	5,1726	5,1727	5,1725	5,1724	5,1726	5,17256
NOA83H	5,0874	5,0873	5,0874	5,0875	5,0873	5,0873	5,0874	5,08737
NOA72	5,1724	5,1722	5,1723	5,1722	5,1724	5,1721	5,1723	5,17227
NOA88	5,1602	5,1600	5,1599	5,1601	5,1602	5,1600	5,1602	5,16009

Tabulka A.12: Hmotnost vlnovodných materiálů po 72 hodinách (vytvrzování).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
vzorek	m [g]							[g]
Reference	4,7253	4,7252	4,7254	4,7253	4,7253	4,7253	4,7251	4,72527
EpoCore	5,0150	5,0148	5,0150	5,0147	5,0149	5,0148	5,0150	5,01489
EpoClad	5,1676	5,1677	5,1676	5,1678	5,1676	5,1677	5,1677	5,16767
NOA83H	5,0860	5,0859	5,0859	5,0858	5,0857	5,0859	5,0856	5,08583
NOA72	5,1728	5,1729	5,1728	5,1727	5,1728	5,1728	5,1729	5,17281
NOA88	5,1602	5,1602	5,1601	5,1602	5,1602	5,1603	5,1602	5,16020

Tabulka A.13: Hmotnost vlnovodných materiálů po 96 hodinách (vytvrzování).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
vzorek	m [g]							[g]
Reference	4,7253	4,7252	4,7250	4,7253	4,7253	4,7250	4,7251	4,72517
EpoCore	5,0143	5,0142	5,0143	5,0142	5,0141	5,0141	5,0141	5,01419
EpoClad	5,1651	5,1653	5,1652	5,1650	5,1650	5,1652	5,1651	5,16513
NOA83H	5,0845	5,0846	5,0844	5,0845	5,0844	5,0844	5,0844	5,08446
NOA72	5,1728	5,1726	5,1725	5,1727	5,1726	5,1728	5,1727	5,17267
NOA88	5,1603	5,1602	5,1604	5,1603	5,1603	5,1603	5,1602	5,16029

Tabulka A.14: Hmotnost vlnovodných materiálů před testem (delší uv).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
EpoCore UV30	5,7260	5,7261	5,7261	5,7262	5,7260	5,7262	5,7261	5,72610
EpoCore UV60	5,5642	5,5643	5,5644	5,5645	5,5643	5,5644	5,5644	5,56436
EpoClad UV30	5,5745	5,5744	5,5744	5,5742	5,5743	5,5742	5,5746	5,57437
EpoClad UV60	5,5100	5,5101	5,5100	5,5100	5,5101	5,5102	5,5099	5,51004
NOA83H	5,0188	5,0190	5,0190	5,0189	5,0188	5,0191	5,0189	5,01893
NOA72	5,1779	5,1778	5,1776	5,1778	5,1777	5,1779	5,1778	5,17779
NOA88	5,0367	5,0365	5,0366	5,0364	5,0366	5,0365	5,0365	5,03654
OG113	5,1637	5,1637	5,1638	5,1636	5,1637	5,1636	5,1636	5,16367
OP4	5,3089	5,3089	5,3090	5,3088	5,3089	5,3090	5,3087	5,30889

Tabulka A.15: Hmotnost vlnovodných materiálů po 24 hodinách (delší uv).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
EpoCore UV30	5,7027	5,7026	5,7027	5,7027	5,7028	5,7028	5,7027	5,70271
EpoCore UV60	5,5419	5,5418	5,5417	5,5416	5,5418	5,5417	5,5418	5,54176
EpoClad UV30	5,5639	5,5638	5,5639	5,5637	5,5636	5,5638	5,5637	5,56377
EpoClad UV60	5,4942	5,4943	5,4941	5,4943	5,4942	5,4942	5,4943	5,49423
NOA83H	5,0129	5,0130	5,0130	5,0129	5,0128	5,0129	5,0132	5,01296
NOA72	5,1668	5,1669	5,1669	5,1667	5,1666	5,1668	5,1668	5,16679
NOA88	5,0303	5,0301	5,0301	5,0301	5,0302	5,0303	5,0302	5,03019
OG113	5,1493	5,1492	5,1492	5,1490	5,1492	5,1491	5,1493	5,14919
OP4	5,3014	5,3015	5,3016	5,3016	5,3015	5,3014	5,3015	5,30150

Tabulka A.16: Hmotnost vlnovodných materiálů po 48 hodinách (delší uv).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
EpoCore UV30	5,6945	5,6943	5,6943	5,6944	5,6944	5,6945	5,6944	5,69440
EpoCore UV60	5,5320	5,5320	5,5321	5,5319	5,5322	5,5320	5,5320	5,53203
EpoClad UV30	5,5582	5,5582	5,5582	5,5581	5,5580	5,5582	5,5583	5,55817
EpoClad UV60	5,4926	5,4924	5,4924	5,4925	5,4925	5,4924	5,4926	5,49249
NOA83H	5,0124	5,0127	5,0124	5,0126	5,0125	5,0125	5,0126	5,01253
NOA72	5,1651	5,1650	5,1649	5,1649	5,1648	5,1650	5,1651	5,16497
NOA88	5,0298	5,0296	5,0295	5,0297	5,0295	5,0296	5,0296	5,02961
OG113	5,1479	5,1477	5,1478	5,1478	5,1477	5,1477	5,1479	5,14779
OP4	5,3007	5,3006	5,3000	5,3005	5,3006	5,3007	5,3004	5,30050

Tabulka A.17: Hmotnost vlnovodných materiálů před testem.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
vzorek	m [g]							[g]
EpoCore	5,1989	5,1989	5,1990	5,1991	5,1989	5,1990	5,1990	5,19897
EpoClad	5,2532	5,2533	5,2533	5,2531	5,2529	5,2530	5,2530	5,25311
NOA83H	5,0212	5,0215	5,0214	5,0212	5,0213	5,0213	5,0215	5,02134
NOA72	4,9961	4,9962	4,9961	4,9963	4,9963	4,9962	4,9963	4,99621
NOA88	5,1352	5,1353	5,1353	5,1353	5,1353	5,1354	5,1354	5,13531
OG113	5,1405	5,1405	5,1407	5,1406	5,1407	5,1406	5,1406	5,14060
OP4	5,2377	5,2377	5,2378	5,2376	5,2376	5,2375	5,2377	5,23766

Tabulka A.18: Hmotnost vlnovodných materiálů po testu.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}
vzorek	m [g]							[g]
EpoCore	5,1982	5,1981	5,1981	5,1981	5,1980	5,1980	5,1982	5,19810
EpoClad	5,2503	5,2504	5,2503	5,2501	5,2502	5,2502	5,2503	5,25026
NOA83H	5,0160	5,0159	5,0156	5,0158	5,0158	5,0158	5,0157	5,01580
NOA72	4,9889	4,9882	4,9883	4,9882	4,9881	4,9881	4,9882	4,98829
NOA88	5,1273	5,1273	5,1272	5,1273	5,1274	5,1274	5,1273	5,12731
OG113	5,1250	5,1251	5,1250	5,1251	5,1249	5,1252	5,1251	5,12506
OP4	5,2286	5,2288	5,2286	5,2287	5,2288	5,2288	5,2286	5,22870

Příloha B

Tloušťky vzorků pro měření Vicat

Tabulka B.1: Měření tloušťky (sada 1).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{h}	u_{hA}
č.vzorku	h [mm]							[mm]	± [mm]
1	1,496	1,480	1,479	1,470	1,488	1,475	1,479	1,4810	0,0005
2	2,029	2,040	2,035	2,025	2,016	2,020	2,027	2,0274	0,0005
3	2,453	2,448	2,449	2,438	2,440	2,454	2,452	2,4477	0,0004
4	3,131	3,127	3,156	3,151	3,125	3,178	3,162	3,1471	0,0012
5	2,713	2,721	2,733	2,748	2,742	2,728	2,725	2,7300	0,0007
6	2,391	2,393	2,450	2,463	2,397	2,440	2,482	2,4309	0,0022

Tabulka B.2: Měření tloušťky (sada 2).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{h}	u_{hA}
č.vzorku	h [mm]							[mm]	± [mm]
7	3,019	3,025	3,035	3,038	3,034	3,026	3,030	3,0296	0,0004
8	3,016	3,025	3,019	2,996	3,010	3,015	3,008	3,0127	0,0005
9	3,038	3,041	3,037	3,035	3,039	3,051	3,026	3,0381	0,0004
10	3,018	3,017	3,013	3,023	3,030	3,002	3,013	3,0166	0,0005
11	3,024	3,059	3,052	3,040	3,032	3,028	3,045	3,0400	0,0008
12	3,026	3,029	3,024	3,013	3,024	3,016	3,020	3,0217	0,0003
13	3,102	3,071	3,051	3,063	3,071	3,061	3,059	3,0683	0,0010

Tabulka B.3: Měření tloušťky (sada 3).

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{h}	u_{hA}
č.vzorku	h [mm]							[mm]	± [mm]
14	1,82	1,80	1,84	1,80	1,83	1,81	1,80	1,8143	0,0009
15	1,90	1,89	1,88	1,89	1,89	1,90	1,90	1,8929	0,0004
16	1,83	1,84	1,83	1,81	1,82	1,83	1,82	1,8257	0,0006

Příloha C

Hmotnosti vzorků pro zrychlené stárnutí

Tabulka C.1: Hmotnost objemových vzorků před testem.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
č. vzorku	m [g]							[g]
1	0,8626	0,8627	0,8625	0,8626	0,8626	0,8627	0,8627	0,8626
2	0,8455	0,8455	0,8454	0,8455	0,8454	0,8454	0,8454	0,8454
3	1,2571	1,2569	1,2568	1,2569	1,2569	1,2571	1,2570	1,2570
4	2,1481	2,1481	2,1480	2,1481	2,1481	2,1482	2,1480	2,1481
5	1,3528	1,3528	1,3529	1,3528	1,3530	1,3530	1,3529	1,3529
5 (2018)	1,2476	1,2474	1,2475	1,2475	1,2476	1,2474	1,2474	1,2475
6	1,6067	1,6066	1,6065	1,6066	1,6066	1,6065	1,6067	1,6066
7	1,3626	1,3626	1,3626	1,3625	1,3625	1,3627	1,3626	1,3626
8	1,7634	1,7635	1,7635	1,7635	1,7637	1,7636	1,7636	1,7635
10	1,3853	1,3853	1,3852	1,3855	1,3854	1,3854	1,3852	1,3853

Tabulka C.2: Hmotnost vzorku LS6943 před testem.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
č. vzorku	m [g]							[g]
15 (RT)	10,0873	10,0874	10,0875	10,0874	10,0875	10,0873	10,0876	10,0874
15 (65°C)	4,6759	4,6759	4,6760	4,6761	4,6760	4,6758	4,6760	4,6760
15 (100°C)	7,4585	7,4586	7,4589	7,4586	7,4587	7,4587	7,4585	7,4586
15 (150°C)	7,7318	7,7319	7,7320	7,7319	7,7319	7,7318	7,7320	7,7319

Tabulka C.3: Hmotnost vlnovodných vzorků před testem.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
vzorek	m [g]							[g]
EpoCore	4,3132	4,3132	4,3136	4,3133	4,3134	4,3134	4,3133	4,3133
EpoClad	4,2196	4,2196	4,2195	4,2197	4,2197	4,2197	4,2196	4,2196
NOA83h	4,1860	4,1859	4,1860	4,1861	4,1860	4,1858	4,1859	4,1860
NOA72	4,2722	4,2720	4,2722	4,2722	4,2721	4,2720	4,2721	4,2721
NOA88	4,1674	4,1673	4,1674	4,1673	4,1673	4,1672	4,1672	4,1673
OG113	4,2408	4,2409	4,2408	4,2408	4,2409	4,2407	4,2407	4,2408
OP4	4,2929	4,2929	4,2931	4,2930	4,2930	4,2930	4,2931	4,2930

Tabulka C.4: Hmotnost objemových vzorků po 500 hodinovém testu.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
č.vzorku	m [g]							[g]
1	0,8624	0,8622	0,8622	0,8624	0,8623	0,8623	0,8622	0,8623
2	0,8449	0,8448	0,8445	0,8447	0,8447	0,8446	0,8448	0,8447
3	1,2516	1,2514	1,2515	1,2513	1,2514	1,2513	1,2512	1,2514
4	2,0534	2,0534	2,0534	2,0533	2,0534	2,0534	2,0532	2,0534
5	0,9294	0,9292	0,9293	0,9292	0,9291	0,9293	0,9291	0,9292
5 (2018)	0,9418	0,9417	0,9418	0,9418	0,9419	0,9417	0,9417	0,9418
6	1,5672	1,5673	1,5672	1,5671	1,5673	1,5673	1,5674	1,5673
7	1,3615	1,3615	1,3616	1,3615	1,3614	1,3615	1,3614	1,3615
8	1,7613	1,7613	1,7614	1,7615	1,7614	1,7614	1,7614	1,7614
10	1,3755	1,3753	1,3754	1,3755	1,3755	1,3756	1,3754	1,3755

Tabulka C.5: Hmotnost vzorku LS6943 po 500 hodinovém testu.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
č.vzorku	m [g]							[g]
15 (RT)	10,0396	10,0398	10,0397	10,0397	10,0398	10,0397	10,0397	10,0397
15 (65°C)	4,6467	4,6466	4,6468	4,6466	4,6465	4,6466	4,6465	4,6466
15 (100°C)	7,423	7,4229	7,4229	7,4229	7,4229	7,4228	7,4228	7,4229
15 (150°C)	7,6911	7,6913	7,6914	7,6912	7,6913	7,6912	7,6912	7,6912

Tabulka C.6: Hmotnost vlnovodných vzorků po 500 hodinovém testu.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
vzorek	m [g]							[g]
EpoCore	4,2977	4,2978	4,2979	4,2978	4,2978	4,2977	4,2978	4,2978
EpoClad	4,2013	4,2015	4,2013	4,2014	4,2012	4,2012	4,2013	4,2013
NOA83H	4,1811	4,1812	4,1811	4,1811	4,1810	4,1809	4,1811	4,1811
NOA72	4,2657	4,2658	4,2657	4,2659	4,2658	4,2658	4,2657	4,2658
NOA88	4,1642	4,1644	4,1643	4,1644	4,1644	4,1643	4,1642	4,1643
OG113	4,1766	4,1766	4,1768	4,1767	4,1767	4,1765	4,1767	4,1767
OP4	4,2850	4,2851	4,2851	4,2852	4,2852	4,2852	4,2850	4,2851

Tabulka C.7: Hmotnost objemových vzorků po 1000 hodinovém testu.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
č. vzorku	m [g]							[g]
1	0,8619	0,8620	0,8619	0,8621	0,8620	0,8620	0,8621	0,8620
7	1,3611	1,3612	1,3612	1,3611	1,3609	1,3611	1,3610	1,3611
8	1,7610	1,7611	1,7613	1,7612	1,7611	1,7611	1,7611	1,7611
10	1,3756	1,3756	1,3757	1,3755	1,3757	1,3757	1,3757	1,3756

Tabulka C.8: Hmotnost vzorku LS6943 po 1000 hodinovém testu.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
č. vzorku	m [g]							[g]
15 (RT)	10,0141	10,0143	10,0142	10,0143	10,0142	10,0142	10,0143	10,0142
15 (65°C)	4,6367	4,6368	4,6369	4,6368	4,6368	4,6367	4,6368	4,6368
15 (100°C)	7,4066	7,4066	7,4067	7,4067	7,4068	7,4067	7,4066	7,4067
15 (150°C)	7,6758	7,6759	7,6759	7,6758	7,6758	7,6758	7,6759	7,6758

Tabulka C.9: Hmotnost vlnovodných vzorků po 1000 hodinovém testu.

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	\bar{m}_0
vzorek	m [g]							[g]
EpoCore	4,2977	4,2978	4,2979	4,2978	4,2978	4,2977	4,2978	4,2978
EpoCore	4,2929	4,2928	4,2928	4,2928	4,2928	4,2929	4,2927	4,2928
EpoClad	4,1970	4,1970	4,1972	4,1972	4,1970	4,1971	4,1971	4,1971
NOA83H	4,1814	4,1815	4,1815	4,1815	4,1813	4,1814	4,1814	4,1814
NOA72	4,2629	4,2627	4,2627	4,2628	4,2629	4,2629	4,2627	4,2628
NOA88	4,1633	4,1633	4,1634	4,1632	4,1634	4,1634	4,1631	4,1633
OG113	4,1559	4,1559	4,1560	4,1561	4,1560	4,1560	4,1559	4,1560
OP4	4,2923	4,2821	4,2820	4,2822	4,2822	4,2822	4,2821	4,2836