



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH SOUČÁSTÍ PRO OPTICKÉ PŘÍSTROJE

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF COMPOSITE COMPONENTS FOR OPTICAL
DEVICES

TEZE

PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Radim Kupčák

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2024

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozitní materiál, uhlíková vlákna, přesné lepení, optický přístroj, dalekohled, teplota skelného přechodu, výpočetní tomografie

KEY WORDS

Composite material, carbon fibers, precision bonding, optical instrument, binoculars, glass transition temperature, computed tomography

OBSAH

ÚVOD.....	4
1 VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	5
2 TEORETICKÁ ČÁST A ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	6
2.1 Volba referenčního optického přístroje.....	6
2.1.1 Požadavky na rozměrovou přesnost	7
2.2 Přehled výrobních technologií kompozitu	7
2.2.1 Mokrý kladení	7
2.2.2 Kladení prepregů.....	8
2.2.3 Infuze – RTM.....	8
2.2.4 Navíjení.....	8
2.2.5 Ostatní výrobní technologie.....	9
2.3 Teorie kompozitů	9
2.3.1 Teplotní roztažnost kompozitů	9
2.3.2 Přesnost výroby kompozitů	10
2.4 Teorie lepení	11
2.4.1 Tloušťka lepeného spoje	11
2.4.2 Povrchová úprava	11
2.4.3 Lepení kompozitů	11
2.4.4 Přesné lepení	12
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	14
3.1 Volba výrobní technologie vzorku.....	14
3.1.1 Volba kompozitní technologie.....	14
3.1.2 Volba technologie spojování kompozitních dílů	14
3.2 Metodika zkoušení technologických vzorků.....	14
3.2.1 Kontrola rozměrů a geometrických tolerancí	14
3.2.2 Environmentální zkoušky	15
3.2.3 Výběr materiálů pro vzorky	15
3.3 Vzorky A (hliník-hliník)	16
3.3.1 Etapa 2 - Ověření přesnosti výroby	16
3.3.2 Etapa 3 – Ověření rozměrové stability lepeného spoje.....	17
3.4 Vzorky B (hliník-CFRP, 1. iterace)	18
3.4.1 Etapa 1 – návrh vzorků	18
3.4.2 Etapa 2 – Ověření přesnosti výroby.....	18

3.4.3	Etapa 3 – Ověření rozměrové stability lepeného spoje.....	19
3.5	Vzorky C (hliník-CFRP, 2. iterace)	24
3.5.1	Etapa 2 – ověření přesnosti výroby.....	24
3.5.2	Etapa 3 – Ověření rozměrové stability lepeného spoje.....	25
3.5.3	CT Scan.....	27
3.6	Měření napětí v lepeném spoji	30
3.6.1	Návrh a výroba vzorků	30
3.6.2	Měření.....	31
3.7	Měření skelného přechodu	32
	ZÁVĚR	34
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	11

Seznam použitých zdrojů

Publikace autora

Curriculum vitae

Abstrakty

ÚVOD

Popularita a míra využití kompozitních materiálů s výztuží ve formě dlouhých vláken v průmyslu rok od roku roste. Mezi roky 2010 a 2020 došlo ke ztrojnásobení poptávky po kompozitních materiálech. Aerospace, letectví a aplikace v energetice jsou dlouhodobě odvětvími s největším podílem vyrobeného objemu i prodeje kompozitních materiálů. Historicky byla jedním z průkopníků masového využití kompozitů firma Boeing, pro kterou se stal průlomovým model 787. U tohoto modelu dosáhl podíl kompozitních materiálů hranici přibližně 50 % hmotnosti celého letadla. Oproti předchozímu modelu pak celková hmotnost klesla až o 20 %, což se významnou mírou projeví na úspoře paliva [1].

Úspory hmotnosti u kompozitních materiálů jsou spojené právě s vysokým poměrem pevnosti ku hmotnosti. Další výhodou je odolnost proti korozi a únavovému namáhání. [2]. Naopak za nevýhody můžeme označit vysokou cenu jak materiálu, tak (výrobních) technologií spolu s obtížnou recyklací [3].

V současné době pak dochází k posilování odvětví, která měla historicky nižší podíly objemu i prodeje. Dlouhodobě pak roste využití kompozitů i v rámci spotřebního zboží a pro výrobu volnočasového vybavení, z nichž největší zastoupení dosahuje cyklistika, golf a rybaření [4].

Do sportovního vybavení lze zařadit i sportovní optiku, tedy puškokohledy, binokulární dalekohledy a jiné optické přístroje. U tohoto segmentu však doposud nedošlo k implementaci kompozitních materiálů. Podobně je tomu i u většiny ostatních typů optických přístrojů. Mezi překážky, které brání adopci kompozitních materiálů u optických přístrojů, patří především omezená výrobní přesnost kompozitních dílů [5]. V některých případech se aplikace mohou potýkat s omezenou odolností vůči nárazu a absencí plastické deformace [6]. V jiných případech může být nutností zohlednit i parametry outgassingu (uvolňování plynů), což se u kompozitů v současné době řadí mezi komplexní témata s omezeným stavem poznání [7].

Pokud by se povedlo tyto problémy eliminovat, mohly by kompozitní materiály přinést řadu výhod. Jmenovitě pak úsporu hmotnosti, lepší tlumení vibrací a lepší rozměrovou stabilitu. V některých případech pak i úsporu nákladů nebo umožnění výroby tvarově složitých dílů. V neposlední řadě pak kompozity znamenají jistou atraktivitu pro zákazníka, což především v případě spotřebního zboží sehrává důležitý faktor určující komerční úspěšnost produktu. Zejména uhlíkové kompozitní materiály (CFRP) jsou totiž vnímány jako prémiový a high-tech materiál využívaný v letectví a F1. Za určitých podmínek pak může použití CFRP přivést cenovou úsporu ve srovnání s technologiemi jako je tlakové lití.

Tato dizertační práce si klade za úkol prozkoumat možnosti aplikace CFRP v optických přístrojích a přímo navazuje na diplomovou práci autora. To vyžaduje zohlednit překážky a navrhnout řešení v rámci technologických zkoušek.

1 VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem této dizertační práce je komplexně posoudit využitelnost kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken pro konstrukci optických přístrojů. Primární motivací je redukce hmotnosti, zlepšení tlumících vlastností a dosažení lepší rozměrové stability v provozních teplotách. Klíčovým prostředkem pro posouzení vhodnosti kompozitů pro tuto aplikaci bude vzorek určený pro ověření technologie, dále jen technologický vzorek. Ten bude podroben sadě přesně definovaných zkoušek klimatické a mechanické odolnosti. Tento technologický vzorek reprezentuje zjednodušený optický přístroj.

Dizertační práce je rozdělena na dvě hlavní části, teoretickou a experimentální. K naplnění hlavního cíle bude nutné splnit tyto dílčí cíle:

- Teoretická část:
 - provést analýzu/rešerši jednotlivých optických přístrojů a následně vybrat referenční přístroj, který bude zvolen jako předloha pro návrh technologického vzorku;
 - provést analýzu výrobních technologií kompozitních materiálů a technologií spojování kompozitů, na základě analýzy zvolit technologii pro výrobu technologického vzorku;
 - analyzovat současný stav poznání problematiky přesného lepení a dalších odvětví, která souvisí s implementací kompozitních materiálů do optických přístrojů.
- Experimentální část:
 - na základě rešerše stanovit kritéria (přesnosti, environmentální odolnosti), podle kterých bude technologický vzorek hodnocen;
 - na základě norem, které specifikují podmínky pro testování optických přístrojů, navrhnout metodiku jednotlivých zkoušek a měření;
 - navrhnout a zkonstruovat technologický vzorek, provést výrobu technologického vzorku;
 - provést experimenty a vyhodnocení;
 - na základě výsledků zhodnotit vhodnost zvolené technologie, případně navrhnout vylepšení pro další postup.

2 TEORETICKÁ ČÁST A ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Teoretická část dizertační práce slouží k vytvoření teoretického základu, který poslouží jako podklad pro jednotlivá klíčová rozhodnutí:

- volba referenčního přístroje;
- volba výrobní technologie;
- stanovení požadavků, které musí technologický vzorek splnit.

Následuje analýza současného stavu poznání těch oblastí, které přímo souvisí s výrobou a testováním technologického vzorku.

2.1 Volba referenčního optického přístroje

Norma ISO 9022-1:2016 definuje optický přístroj jako zařízení, jehož funkce je založena na optických jevech [8]. Jedná se tedy o velmi široký pojem zahrnující specializovaná laboratorní zařízení i přístroje, se kterými běžný člověk přijde do kontaktu na denní bázi. Jedná se např. o optický kabel poskytující vysokorychlostní internet, fotoaparát skrytý v mobilním telefonu, senzory asistenčních systémů v automobilu, příruční dalekohled nebo jednoduchá lupa. Ačkoliv lze všechny tyto předměty označit jako optické přístroje, je zřejmé že, budou mít zcela jiné konstrukční požadavky s ohledem na jejich použití.



Obr. 1 Binokulár a spektiv značky Meopta, převzato z [9]

Nakonec bylo jako vhodný referenční přístroj vybráno zařízení sportovní optiky, primárně binokulár nebo spektiv (Obr. 1), na základě následujících skutečností:

- Ve srovnání se sofistikovanějšími optickými zařízeními jsou požadavky na přesnost výrazně nižší (ačkoliv jsou v kontextu běžného strojírenství stále poměrně vysoké), proto bude úspěšná výroba pravděpodobnější.
- podmínky testování jsou jednoznačně stanoveny:
 - požadavky na testování optických parametrů specifikují normy ISO 14490-6:2014 [10] a ISO 14490-7:2016 [11];
 - Požadavky na mechanické a klimatické odolnosti jsou jasně definované dle norem ISO 9022-1:2016 [8], ISO 9022-2:2015 [12], ISO 9022-3:2015 [13] a ISO 9022-8:2015 [14];

Volba konkrétního referenčního přístroje neomezuje budoucí adopci pouze na tuto poměrně úzkou množinu zařízení. Získané poznatky budou mít pravděpodobně přesah i pro ostatní typy optických přístrojů.

2.1.1 Požadavky na rozměrovou přesnost

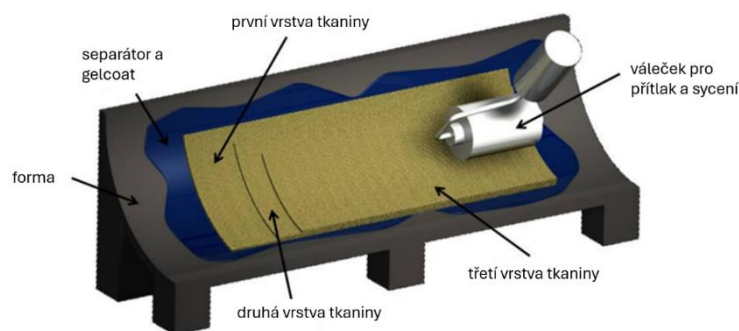
U přístrojů sportovní optiky je typicky dokončovací technologií většinou CNC obrábění. Proto bude cílem dosáhnout při výrobě technologického vzorku z kompozitního materiálu přesnosti srovnatelné s CNC obráběním. Tato podmínka je velmi obtížně kvantifikovatelná s ohledem na kondici stroje, volbu nástroje, schopnosti obsluhy, řezné podmínky, tuhost upnutí a kvalitu materiálu. Definice požadavků vycházejí z praktických zkušeností výrobce optických přístrojů Meopta s.r.o. Byla zvolena limitní hodnota výrobní přesnosti 0,05 mm.

2.2 Přehled výrobních technologií kompozitu

V rámci aplikace CFRP v optických přístrojích lze využít několik technologií výroby kompozitních součástí. Tato kapitola nabízí přehled těchto výrobních technologií. Některé z těchto technologií mohou na první pohled přinášet podobné výsledky, avšak liší se v kvalitě získaného laminátu. Jiné technologie jsou naopak zcela odlišné, například z hlediska kinematického principu, a výsledné výrobky jsou značně jedinečné.

2.2.1 Mokré kladení

Mokrý ruční kladení, označované také jako mokrá laminace, představuje jednu z nejstarších a nejjednodušších metod výroby kompozitních materiálů. Tato technika je charakterizována jednoduchostí a nízkými náklady, jelikož nevyžaduje složitou a drahou technologii. Díky tomu je možné vyrábět díly i velkých rozměrů. Výrobky jsou typické nízkým objemovým podílem vláken v hotovém kompozitu [15]. Jsou aplikovány vrstvy výztuže, které se prosytí pryskyřicí pomocí štětce, válečku, nebo stříkácí pistole (Obr. 2). Tím se laminát odvzdušňuje, je nutné vytlačit většinu bublin, které by po vytvrzení působily jako mikrovruby [16]. Tento postup se opakuje, dokud není dosaženo požadovaného složení vrstev.



Obr. 2 Schéma technologie mokrého kladení, upraveno dle [17]

2.2.2 Kladení prepregů

Tato výrobní technologie využívá polotovary známé jako prepregy. Prepregy jsou výztuže, většinou ve formě tkanin, které jsou nasycené pryskyřicí a vytvrzené do tzv. B-stavu. Prepregy jsou dnes klíčovým a osvědčeným materiálem pro výrobu vysoce kvalitních kompozitních konstrukcí [18].

Výroba kompozitu s využitím prepregů začíná přípravou formy, která zahrnuje očištění, leštění a aplikaci separačního prostředku. Následně se připraví jednotlivé přířezy prepregu, buď automatizovaně, nebo ručně. Tyto přířezy jsou po vrstvách pokládány do formy podle specifikace laminátu (Obr. 3). Po dokončení vrstvení se na vrchní část přidá separační fólie a netkaná textilie pro rovnoměrné odsávání vzduchu. Celý útvar je poté vložen do vakuového pytle a následně vytvrzen v autoklávu podle předepsaného cyklu [19].



Obr. 3 Kladení prepregů na formu, převzato z [20]

2.2.3 Infuze – RTM

Obdobně jako u mokrého kladení je u infuze prvním krokem výroby vložení suché tkaniny do formy. Pryskyřice je aplikována až po nalaminování vrstev buď vstříknutím pod tlakem (RTM – Resin Transfer Moulding) nebo nasátím pomocí podtlaku (VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding). Metoda RTM obvykle využívá pevnou dvoudílnou formu, kde těsnost formy je klíčová pro vstříkování pryskyřice. Pryskyřice proudí od vstupního k výstupnímu ventilu, přičemž vytlačuje vzduch z formy. Infuze končí, když z výstupního ventilu proudí čistá pryskyřice. Tento postup se často používá při výrobě karosářských dílů, jako jsou kapoty a nárazníky, přičemž dvoudílná forma umožňuje vytvoření pohledového povrchu z obou stran dílu [21].

2.2.4 Navíjení

Tato technologie se zaměřuje na navíjení pramenů (rovingů) uhlíkových nebo skelných vláken na trn. Vlákna jsou před navíjením máčena v pryskyřici a poté přes vodící mechanismus natahována a navíjena na trn. Otáčky vřetene a pohyb vodícího mechanismu určují úhel a směr navíjení, což umožňuje přesné nastavení mechanických

vlastností výrobku podle jeho budoucího zatížení. Vytvrzení může probíhat při pokojové teplotě, v peci nebo pomocí UV záření, v závislosti na použité matrici. Tato metoda vyniká přesností uložení vláken, rozměrovou přesností, rychlostí produkce a opakovatelností výsledků, a nabízí flexibilitu ve výrobě různých tvarů a rozměrů. I když je technologie ideální pro rotačně symetrické součásti, jako jsou trubky či hřídele, lze pomocí specializovaných nástrojů vyrábět i nerotační profily [21].

V podstatě jde o strojní mokrou laminaci, kde vlákna procházejí zařízením na impregnaci a následně jsou navíjena na trn pomocí kladecí trysky, která se pohybuje podél osy rotace. Výhodou této metody je možnost navíjení v celém rozsahu úhlů 0° až 90° . Moderní navíjecí stroje často využívají robotickou asistenci, což zvyšuje flexibilitu a efektivitu výroby [22], např. Advanced Winding Technology od sušické firmy Compo Tech PLUS, spol. s r.o. (Obr. 4). Mezi hlavní benefity patří možnost navíjet UHM vlákna ve všech směrech [23].



Obr. 4 Navíjení robotickým manipulatorem, řešení firmy Compo Tech PLUS, spol. s r.o., převzato z [24]

2.2.5 Ostatní výrobní technologie

Mezi další významné technologie patří Automated Fibre Placement (AFP), SMC (Sheet molding compound), BMC (Bulk molding compound), pultruze, nebo oplétání.

2.3 Teorie kompozitů

Následující kapitola představuje klíčové principy mechaniky kompozitních materiálů a poskytuje ucelený přehled výzkumných aktivit v oblastech, které úzce souvisejí s tematickým zaměřením této dizertační práce.

2.3.1 Teplotní roztažnost kompozitů

Vzhledem k tomu, že jsou kompozitní materiály v principu anizotropní, může při jejich výrobě docházet ke značným deformacím. Ty způsobuje rozdílný koeficient teplotní roztažnosti v jednotlivých směrech laminátu. Příčný součinitel teplotní roztažnosti jednosměrného laminátu α_T bývá větší, než ten podélný α_L . To vyplývá z nižšího koeficientu teplotní roztažnosti vláken α_f ve srovnání s koeficientem teplotní roztažnosti matrice α_m . Pro jednosměrný laminát jsou dva hlavní koeficienty α_L a α_T definovány následovně [25]:

$$\alpha_L = \frac{1}{E_L} \cdot (\alpha_f \cdot E_f \cdot v_f + \alpha_m \cdot E_m \cdot v_m), \quad (10)$$

$$\alpha_T = (1 + \mu_f) \cdot \alpha_f \cdot v_f + (1 + \mu_m) \cdot \alpha_m \cdot v_m - \alpha_L \cdot \mu_{LT}, \quad (11)$$

$$\mu_{LT} = \mu_f \cdot v_f + \mu_m \cdot v_m. \quad (12)$$

kde E_L je podélný modul pružnosti laminátu, E_f je modul pružnosti vláken, E_m je modul pružnosti matrice, v_f je objemový podíl vláken, v_m je objemový podíl matrice, μ_f je Poissonovo číslo vláken, μ_m je Poissonovo číslo matrice a μ_{LT} je Poissonovo číslo kompozitu, které také vychází ze směšovacího pravidla [25].

Vláknitá struktura kompozitních materiálů je příčinou jejich anizotropie. Při vhodně navrženém listu skladby je možné naladit mechanické vlastnosti v jednotlivých směrech laminátu, lze tak např. dosáhnout vyšší tuhost ve více namáhaném směru. Je možné docílit stavu, kdy bude mít laminát v určitém směru nulovou nebo dokonce zápornou teplotní roztažnost. To je předmětem zkoumání Kellyho [26] a Ita [27], kteří popisují jak analytický, tak experimentální přístup.

2.3.2 Přesnost výroby kompozitů

Většinu deformací lze eliminovat vhodným listem skladby. Ten je v optimálním případě symetrický a balancovaný (má stejný počet $\pm 45^\circ$ vrstev,) [21]. Nicméně vzhledem k anizotropnímu charakteru kompozitních materiálů dochází k nechtěným deformacím i při použití balancovaného a symetrického kladečního plánu. To potvrzují dílčí výsledky, které byly prezentovány v článku „Application of composite materials in sports optics“. V něm je hodnocena odchylka rotačně symetrické součásti vyrobené vytvrzením prepregů v autoklávu za použití prototypové formy [5].

Existuje několik strategií, které vedou k eliminaci deformací během výroby kompozitu: [28]

- Kompenzace změnou tvaru formy:
 - výhodou tohoto přístupu je, že nevyžaduje úpravu vytvrzovacího procesu ani listu skladby,
 - vyžaduje však výrobu nové formy, jedná totiž o metodu založenou na přístupu „pokus-omyl“,
 - alternativou je využití numerického modelu, který prezentuje Triforia [29].
- Optimalizace vytvrzovacího procesu:
 - řadou autorů [67,68,69] byla sledována závislost odpružení při výrobě na době výdrže na cílové teplotě v autoklávu s nejednoznačnými výsledky,
 - na čem se však vědecká komunita shoduje je nižší deformace laminátu při pomalejším ohřevu a chlazení [70,69] a nižší teplotě vytvrzení a s tím související delší době vytvrzení [67,71], což vede k vyšším nákladům.
- Optimalizace kontaktu mezi součástmi a formou:

- v důsledku rozdílných teplotních roztažností formy a laminátu vzniká v oblasti kontaktu mezi nimi smykové napětí, které způsobuje nežádoucí odpružení,
- aplikací kluzné vrstvy z materiálu FEP (Fluorinated ethylene propylene) lze snížit smykové tření a míru odpružení [30],
- optimalizace listu skladby,
- předeptnutí laminátu během výroby.

2.4 Teorie lepení

Lepení je spojovací technologie, která umožňuje spojit součásti z plastů, kovů, keramiky, dřeva, skla i kompozitů. To z ní činí nejuniverzálnější spojovací technologii, která při použití vhodného lepidla umožní spojení komponent v případě, kdy jsou mechanické nebo svarové spoje nevhodné [31]. Lepení spočívá v nanášení lepidla (adheziva) na povrch lepených součástí (adherendů). Lepidlem se rozumí nekovová substance, která je schopna spojovat materiály pomocí adhezní a kohezní interakce [32].

2.4.1 Tloušťka lepeného spoje

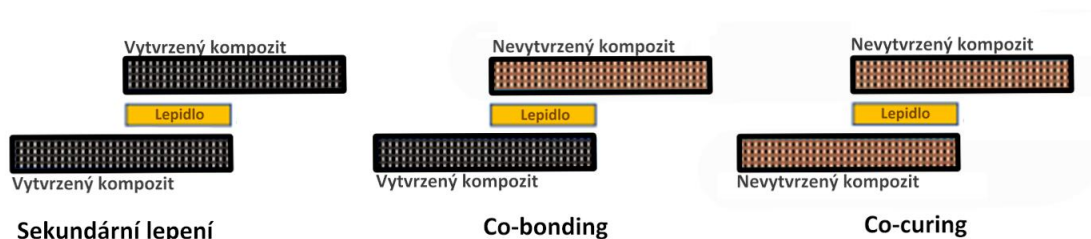
Názor na vliv tloušťky lepeného spoje na jeho pevnost se v průběhu historie vyvíjel a měnil. Klasické analytické modely dle Volkersena [33] nebo dle Golanda a Reissnera [34] předpokládaly vyšší pevnost s rostoucí tloušťkou lepené spáry. Z novějších výzkumů však vyplývá, že optimální pevnosti dosahuje lepený spoj při tloušťce 0,1 mm až 0,5 mm [35]. Tyto výsledky potvrzuje ve své experimentální studii epoxidových lepidel da Silva [36]. Podobných výsledků dosahují i Zhang [37] a Shokrian [38], kteří ve svých studiích zkoumají kromě vlivu tloušťky lepené vrstvy epoxidového lepidla i vliv drsnosti adherendů. V některých velmi přesných aplikacích dosahuje tloušťka lepené spáry výrazně nižší hodnoty. Guo [39] ve své práci došel k optimální tloušťce epoxidového lepidla 0,03 mm a uvádí, že k poklesu dochází, až když je tloušťka lepidla pod 0,01 mm.

2.4.2 Povrchová úprava

Významný vliv na pevnost lepeného spoje má drsnost povrchu adherendů. Obecně platí, že k silnější adhezi dochází na zdrsňeném povrchu. Nicméně tato zásada má své limity. S ohledem na viskozitu lepidla nedojde při určité limitní drsnosti ke správnému prosycení celého povrchu. Dle výsledků experimentů, které prezentuje Budhe [40] bylo dosaženo nejvyšší pevnosti při drsnosti povrchu adherendů $Ra = 2 \mu\text{m}$. Obdobných výsledků dosáhl i Kim [41], který studoval trubkový přeplátovaný spoj.

2.4.3 Lepení kompozitů

Kompozitní materiály na bázi termosetické pryskyřice umožňují využití třech poddruhů technologie lepení. Jedná se o tzv. sekundární lepení co-bonding a co-curing. Jak naznačuje (Obr. 5) tak při standardním lepení (tzv. sekundární lepení) dochází ke slepení dvou vytvrzených součástí. Co-curing je charakteristický tím, že dochází k současnému vytvrzení kompozitních součástí a lepidla. Při co-bondingu je jeden ze vstupujících adherendů již vytvrzený. [42]



Obr. 5: Tři typy lepení kompozitů, upraveno dle [42]

Dle výzkumu Hasana [43] a Morettiho [44] dosahuje z uvedených technologií lepení nejnižších výrobních deformací co-curing. V publikacích Dhilipkumara [45] a Kima [46] je srovnávána pevnost jednotlivých typů lepených spojů. Oba autoři došli ke zjištění, že nejvyšší pevnosti dosahují spoje vyrobené metodou co-curing. Na základě těchto zjištění lze co-curing označit jako nejvhodnější metodu spojování kompozitních součástí, pokud to konstrukce přístroje umožní.

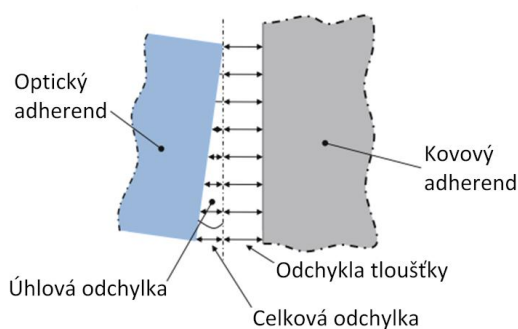
Leone [47] zkoumá zvýšení adhezních vlastností po aplikování laserové povrchové úpravy u vzorků spojovaných co-bondingem. Vzorky ošetřené laserovou povrchovou úpravou dosahují dvojnásobné smykové pevnosti ve srovnání s referenčním vzorkem. Povrchovou úpravu laserem zkoumá i Fisher [48] v rámci sekundárně lepených vzorků. Jeho výsledky naznačují, že v rámci sekundárního lepení dosahuje abrazivně ošetřený povrch stejných výsledků jako povrch ošetřený laserem.

2.4.4 Přesné lepení

Mnohé aplikace v optice a fotonice vyžadují vyšší přesnost pozicování jednotlivých komponent, než je možné dosáhnout běžnými výrobními technologiemi. Proto je u některých zařízení nezbytné přesné ustavení citlivých komponent. Tento proces se v praxi nazývá justáž. Po přesném ustavení se komponenty fixují pomocí fixačních prvků, jako jsou šrouby nebo kontramatice, případně se na dané místo přilepí.

Kritickým jevem souvisejícím s lepením optických elementů je smrštění lepidla při vytvrzení. V závislosti na geometrii komponent může smrštění způsobit náklon nebo posuv optických elementů [49] nebo pnutí, které degraduje zobrazovací kvalitu optického přístroje [50]. Často se používají lepidla vytvrzovaná UV zářením díky možnosti jejich téměř okamžitého vytvrzení. To platí zejména pro montáž mikrooptických systémů [51]. Broquin [52] prezentuje pájení jako možnou alternativu k lepení čoček s nižší hodnotou zbytkového napětí.

Komplexně řeší problematiku přesného lepení Müller [53]. Zabývá se postupem lepení pro sestavy vyžadující přesnost pod 1 μm . Jeho metoda spočívá v kompenzaci vlivu smrštění díky přesnému dávkování a měření smrštění dané dávky lepidla. Na smrštění má totiž vliv nejen daná šarže lepidla (kvůli odlišnostem surového materiálu), ale i stáří daného lepidla. Pro úspěšnou automatizaci je nezbytné, aby oba vlivy byly kvantifikované. Müller [53] popisuje, že z pohledu odchylky pozicování optického elementu je kritičtější než odchylka tloušťky lepidla úhlová odchylka tloušťky lepidla (Obr. 6):



Obr. 6: Model pro kompenzaci smrštění lepidla, upraveno dle [53]

Müller během experimentální fáze pozoruje rozdíly ve smrštění u jednoho z lepidel až 5 %. Pro automatizaci tohoto procesu je nutné přesné volumetrické dávkování a měřit smrštění vždy před danou lepicí dávkou [53]. Odlišný přístup k přesnému lepení prezentuje Niklaus [54]. Předmětem jeho zájmu je lepení křemíkových waferů. Navrhuje použití třecích prvků, které zamezí posuvu waferu při vytvrzení lepidla. Opakovaně dosahuje přesnosti 5 μm ve srovnání s přesností 15–50 μm , která byla dosažena při použití komerčně dostupných přípravků.

Pro velmi přesné optické čočkové systémy jsou nepostradatelné technologie centroskopická justáž a centrické stáčení. Nejvýznamnějším dodavatelem příslušenství pro tyto technologie je firma Trioptics [55].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimentální část práce byla realizována v souladu s cíli práce. Tato část zahrnuje volbu výrobní technologie, návrh metodiky zkoušení, design vzorků, výrobu vzorků a jejich následné testování. Hlavním cílem je prakticky navrhnout a ověřit technologii pro výrobu technologického vzorku, s ohledem na požadavky vyplývající z charakteru referenčního přístroje (spektiv, binokulár), který byl zvolen v kapitole 2.1

3.1 Volba výrobní technologie vzorku

Bylo nutné zvolit technologii pro výrobu technologického vzorku, zahrnující výrobu samotného kompozitního dílu a spojování s kovovými komponenty. Klíčovým kritériem byla vhodnost zvolené technologie v kontextu referenčního přístroje.

3.1.1 Volba kompozitní technologie

Pro technologické vzorky byla zvolena technologie navíjení, především kvůli široké nabídce komerčně navíjených válcových trubek. Tomu bude přizpůsoben návrh technologického vzorku. V případě úspěšné implementace CFRP do optických přístrojů lze počítat i s aplikací technologií ručního kladení, obzvláště při výrobě menších sérií a pro tvarově složitější komponenty.

3.1.2 Volba technologie spojování kompozitních dílů

Nejrozšířenější technologií pro spojování kompozitů je lepení. V mnohých případech se jedná o jedinou vodnou spojovací technologii. [56] Obecně lze pozorovat neustále rostoucí procentuální zastoupení lepených spojů ve strojírenství a díky pokrokům v makromolekulární chemii bude pravděpodobně míra užívání lepených spojů nadále růst [57].

3.2 Metodika zkoušení technologických vzorků

Aby byla zaručena logická struktura zkoušek/experimentů, bylo nutné stanovit metodiku, která bude v průběhu experimentů dodržována. Procesy jsou rozděleny na tři etapy:

- Etapa 1 = Návrh a příprava vzorků
- Etapa 2 = Ověření přesnosti výroby (přesného lepení)
- Etapa 3 = Ověření rozměrové stability lepeného spoje za provozních podmínek

3.2.1 Kontrola rozměrů a geometrických tolerancí

Rozměry a geometrické tolerance vzorků budou měřeny v souladu s ČSN EN ISO 1101. K měření bude docházet v rámci Etapy 2 pro ověření přesnosti a v Etapě 3, v případě potřeby opakovaně, pro ověření rozměrové stability lepeného spoje za provozních podmínek. K dispozici jsou následující metody měření:

- Měření pomocí CMM Zeiss Contura G2 [58]
- Měření pomocí Kruhoměru Formline Roundscan 555 [59]
- Měření pomocí OK/NOK kalibrů

3.2.2 Environmentální zkoušky

Byly zvoleny zkoušky, které jsou relevantní pro daný vzorek pro odzkoušení technologie (např. optické parametry a těsnost nemá vzhledem k charakteru vzorku význam testovat). Zvolené zkoušky klimatické odolnosti prezentuje Tab. 1 a zkoušky mechanické odolnosti prezentuje Tab. 2.

Tab. 1 Specifikace environmentálního testování – zkoušky klimatické odolnosti

1 Zkoušky klimatické odolnosti dle ISO 9022-2:2015	
1.1	Testování klimatické odolnosti – skladovací teploty, klimatická komora Vötsch VT3 7030 S2 <ul style="list-style-type: none"> • Technologický vzorek se vloží do teplotní komory, vytemperuje se na $+70 \pm 2$ °C a ponechá se v této teplotě 16 hodin • Technologický vzorek se vloží do teplotní komory, vytemperuje se na -40 ± 3 °C a ponechá se v této teplotě 16 hodin
1.2	Testování teplotními šoky, klimatická komora Vötsch VT3 7030 S2 <ul style="list-style-type: none"> • Technologický vzorek je vystaven teplotním šokům v teplotách -25 °C / $+40$ °C s prodlevou 1,5 hod. na teplotě v 6 cyklech. Doba změny max. 20 s.

Tab. 2 Specifikace environmentálního testování – zkoušky klimatické odolnosti

2 Zkoušky mechanické odolnosti dle ISO 9022-3:2015	
2.1	Zkouška jednotlivé rázy, zařízení pro zkoušku rázem TIRAshock 4110 <ul style="list-style-type: none"> • Rázy s amplitudou zrychlení 981 m/s² (= 100 g). Působení rázů postupně následuje ve 3 vzájemně kolmých směrech. V každém směru 3 rázy.
2.2	Zkouška manipulačními rázy, zařízení pro zkoušku rázem TIRAshock 4110 <ul style="list-style-type: none"> • Manipulační rázy se provádějí s amplitudou zrychlení 147 m/s² doba pulsu 6 ms ve třech vzájemně kolmých osách (oba směry optické osy objektivu, boční poloha, pracovní poloha). V každém směru se provede 1000 rázů.
2.3	Zkouška Sinusovými vibracemi, vibrační zařízení Derritron TW 6000 <ul style="list-style-type: none"> • Sinusové vibrace se zrychlením 19,6 m/s² (= 2 g) při amplitudě 0,15 mm, v rozsahu frekvence od 10 do 150 Hz, 10 frekvenčních cyklů, rychlost změny frekvence 1 oktáva/min.

3.2.3 Výběr materiálů pro vzorky

Vzhledem k anizotropním vlastnostem kompozitních materiálů a nedostatečně prozkoumané problematice přesného lepení s využitím epoxidů bylo rozhodnuto, že v

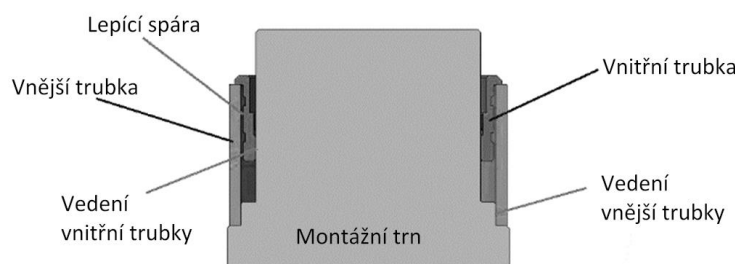
první fázi testování (Vzorky A) bude kompozitní materiál vyřazen. Tímto krokem bude možné izolovaně ověřit technologii přesného lepení, bez vlivu anizotropie kompozitu.

Pracovně byly technologické vzorky označeny jako:

- Vzorky A (hliník-hliník);
- Vzorky B (hliník-CFRP 1. iterace);
- Vzorky C (hliník-CFRP 2. iterace).

3.3 Vzorky A (hliník-hliník)

Hlavním účelem Vzorku A bylo prakticky vyzkoušet metodu přesného lepení a ověřit rozměrovou stabilitu lepeného spoje. Vzhledem k anizotropnímu chování kompozitu byla u Vzorku A nahrazena karbonová trubka objímkou z hliníkové slitiny EN_AW-6061-T651 (Obr. 7). Tím pádem lze předpokládat, že případné deformace jsou způsobené nestabilitou lepidla.



Obr. 7: Schéma Vzorku A, upraveno dle [60]

3.3.1 Etapa 2 - Ověření přesnosti výroby

Cílem Etapy 2 je ověření přesnosti výroby Vzorku A. Po slepení vzorků následovala kontrola souososti vnější a vnitřní objímky na CMM zařízení CMM Zeiss Contura G2 dle ČSN EN ISO 1101.

Tab. 3: Výsledky Vzorky A, Etapa 2 (Přesnost výroby), [60]

Označení vzorku	Specifikace vzorku		Souosost [mm]	
	použité lepidlo		po zalepení	po soustružení
Vzorek 1	Spabond 340 LV		0,109	0,011
Vzorek 2	Spabond 340 LV		0,218	0,010
Vzorek 3	DP 190		0,118	0,012
Vzorek 4	DP 190		0,023	0,017

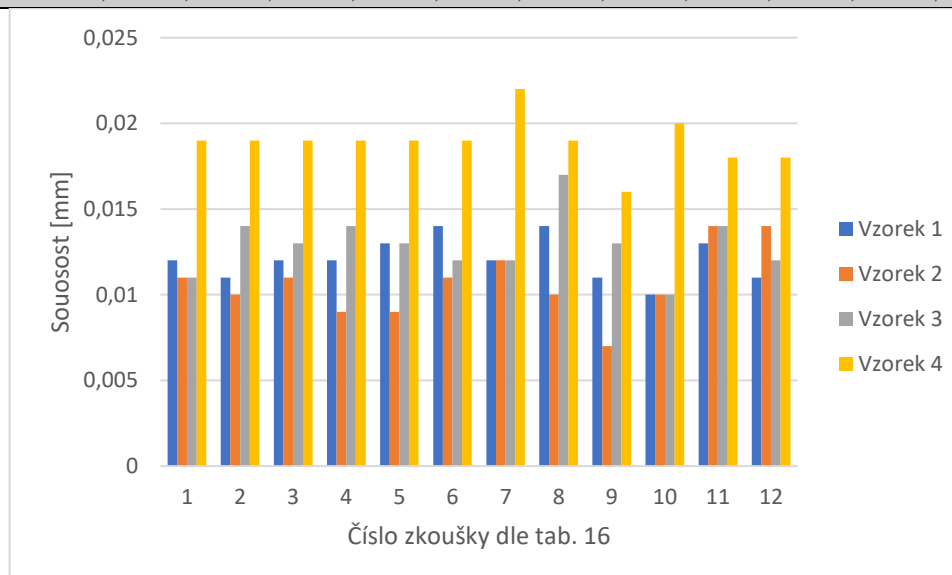
Měření vzorků po zalepení odhalilo výrazné překročení povolené hodnoty souososti 0,05 mm u 3 z 4 vzorků. Proto bylo nutné pro další postup provést opravné soustružení, které podstoupily všechny 4 vzorky. Výroba lepením nebyla dostatečně přesná, problém byl pravděpodobně s návrhem montážního trnu, konkrétně v nedostatku přítlaku během vytvrzování. Výsledky prezentuje Tab. 3.

3.3.2 Etapa 3 – Ověření rozměrové stability lepeného spoje

Cílem Etapy 3 bylo ověřit rozměrovou stabilitu lepidel na základě sady klimatických zkoušek dle ISO 9022-2:2015 [12]. Po každé zkoušce proběhlo přeměření souososti vnějšího a vnitřního průměru dle ČSN EN ISO 1101. Naměřené hodnoty souososti jsou prezentovány v Tab. 4 a grafu v Obr. 8.

Tab. 4: Vývoj souososti v průběhu klimatických zkoušek

Souosost (mm)												
Č. zkoušky	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vzorek 1	0,012	0,011	0,012	0,012	0,013	0,014	0,012	0,014	0,011	0,010	0,013	0,011
Vzorek 2	0,011	0,010	0,011	0,009	0,009	0,011	0,012	0,010	0,007	0,010	0,014	0,014
Vzorek 3	0,011	0,014	0,013	0,014	0,013	0,012	0,012	0,017	0,013	0,010	0,014	0,012
Vzorek 4	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,022	0,019	0,016	0,020	0,018	0,018



Obr. 8: Vzorek A: Graf vývoje souososti objímek v průběhu klimatických zkoušek

Pro snazší vyhodnocení rozměrové stability lepeného spoje byly dopočítány odchylky souososti oproti výchozího stavu.

Na základě provedených experimentů a měření lze učinit následující závěry/konstatování:

- 97,7 % výsledků dosahuje odchylky souososti od původního stavu pod 0,004 mm. To lze označit za kladný výsledek, neboť taková rozměrová stabilita by byla pro referenční přístroj dostačující.
- Na základě tohoto zjištění má význam s experimenty pokračovat s Vzorky B, které budou obsahovat CFRP.

Z výsledků vyplývají následní nejasnosti/nejednoznačné závěry:

- U vzorku č. 3 došlo v kroku č. 8 k odchylce 0,0057 mm, což se výrazně liší od sousedních hodnot, v úvahu připadají:

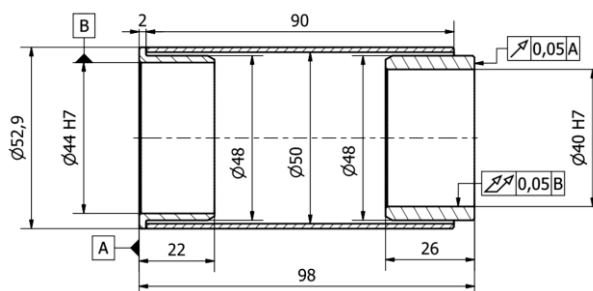
- Chyba měření vzniklá nedostatečnou kontrolou teploty (např. v důsledku ohřátí kusu při manipulaci) nebo chybným ustavením kusu při měření.
- Jak je patrné z ostatních výsledků, u vzorků dochází k mírné fluktuaci hodnoty sousosti. Nelze vyloučit, že je výchylka součástí této fluktuace.

3.4 Vzorky B (hliník-CFRP, 1. iterace)

S ohledem na pozitivní výsledky rozměrové stability lepeného spoje Vzorku A mělo význam navázat s Vzorkem B, který již bude obsahovat tubus z CFRP. Cílem je navrhnout Vzorek B tak, aby byl po konstrukční stránce dostatečně podobný referenčnímu přístroji a mohl být považován za jeho zjednodušenou verzi.

3.4.1 Etapa 1 – návrh vzorků

Základ vzorku B (Obr. 9) tvoří navíjené CFRP trubky tvořené vrstvami $[90^{\circ}/0^{\circ}/\pm 30^{\circ}]$ o délce 90 mm, vnitřním průměru 50 mm a tloušťce stěny 1,5 mm. Karbonová trubka je spojena lepením s objímkami z hliníkové slitiny EN_AW-6061-T651, které reprezentují rozhraní pro montáž optických sestav, např. objektivu a okuláru. 1 mm široká lepicí spára umožňuje kompenzaci výrobních nepřesností karbonových komponent a vzájemná přesná poloha obou objímek je zajištěna přesným slepením, případně soustružením po slepení.



Obr. 9: Geometrie vzorku B

3.4.2 Etapa 2 – Ověření přesnosti výroby

U 7 z 15 (46,6 %) vzorků bylo dosaženo požadované přesnosti 0,05 mm a koeficientu přesnosti nad 1,0. Vyhovující kusy jsou označeny zelenou barvou, nevyhovující kusy jsou označeny červeně. Z výsledků není patrná korelace mezi součtem vůlí a dosaženou sousostí. Další proměnou bylo zvolené lepidlo. Jak ukazuje Tab. 5, použití žádného z lepidel nepřineslo 100% úspěšnost vzorků:

Tab. 5: Úspěšnost vzorků dle použitých lepidel

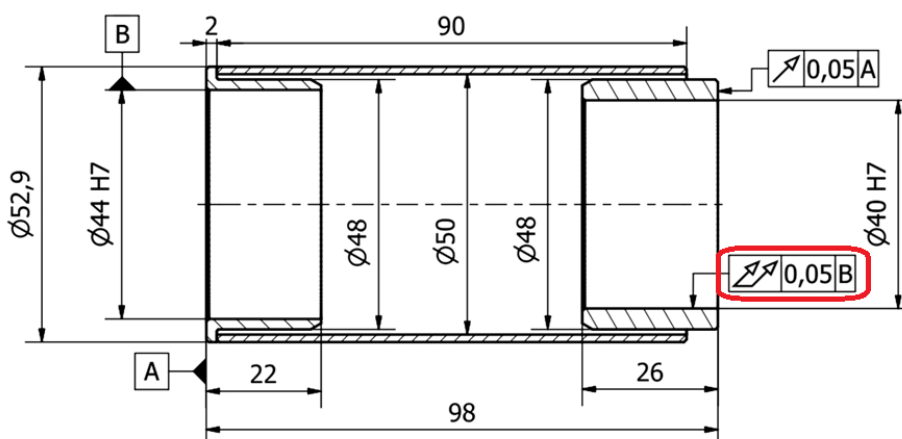
Lepidlo	Poměr vyhovujících vzorků	Průměrná hodnota obvodového házení vůči B
DP 110	2/3	0,041
DP 125	0/3	0,159
DP 190	1/3	0,074
Spabond	2/3	0,051
Eprosin	2/3	0,041

Na základě provedených experimentů a měření lze učinit následující závěry/konstatování:

- 46,6 % vzorků dosahuje odchylky souososti pod 0,05. Tyto vzorky byly s ohledem na teoretickou přesnost montážního přípravku vyhodnoceny jako vyhovující.
- Příznivé výsledky čelního házení naznačují, že odchylky nebyly způsobeny nedostatečně pevným utažením vzorků na přípravek.
- U nevyhovujících vzorků pravděpodobně došlo během vytvrzení ke generaci napětí, které po sejmutí z trnu způsobilo posun v radiálním směru. Možné příčiny napětí v lepidle:
 - přílišné smrštění některých lepidel;
 - nerovnoměrně vyplněná lepicí spára (přítomnost bublin), bude ověřeno pomocí CT scanu.
- Nejpříznivějších výsledků dosáhla lepidla DP 110, Eprosin a Spabond, a proto se na základě této etapy jeví jako vhodná lepidla.
- Zvýšením přesnosti montážního přípravku a kovových protikusů by bylo dosaženo vyšší přesnosti výsledných vzorků, čímž by došlo ke zvýšení geometricky zaručené přesnosti.

3.4.3 Etapa 3 – Ověření rozměrové stability lepeného spoje

Při hodnocení vhodnosti použití kompozitních materiálů pro optické přístroje je nutné sledovat dva parametry: výrobní přesnost a rozměrová stabilita za provozu přístroje. Cílem Etapy 3 je experimentálně ověřit rozměrovou stabilitu lepených spojů v průběhu environmentálních zkoušek dle metodiky specifikované v kapitole 3.2 . Jako hlavní parametr pro hodnocení rozměrové stability byla zvolena geometrická tolerance obvodového házení $\varnothing 40$ vůči základně B dle ČSN EN ISO 1101 (Obr. 10).



Obr. 10: geometrická tolerance obvodového házení $\varnothing 40$ vůči základně B

53,4 % vzorků vyrobených v předchozí etapě nebylo vyhovující. Následovalo soustružení nevyhovujících vzorků, aby na začátku 3. etapy byly všechny vzorky vyhovující, po soustružení byly vzorky změřeny. Výsledky měření prezentuje Tab. 6. Po soustružení je všech 15 vzorků vyhovujících.

Tab. 6: Rozměry po soustružení nevyhovujících kusů

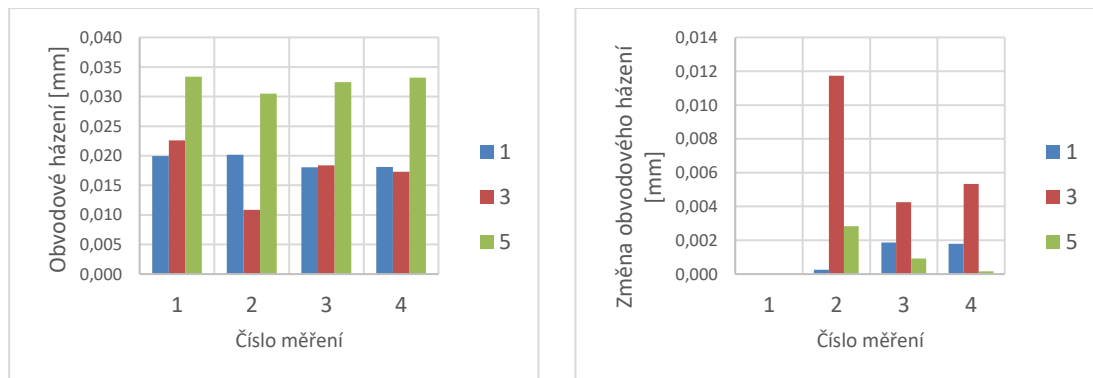
Číslo vzorku	Obvodové házení Ø40 vůči základně B [mm]	
	Po slepení	Po soustružení
1	0,082	0,020
2	0,107	0,014
3	0,040	-
4	0,266	0,005
5	0,101	0,033
6	0,102	0,014
7	0,012	-
8	0,075	0,014
9	0,037	-
10	0,062	0,018
11	0,049	-
12	0,042	-
13	0,024	-
14	0,063	0,017
15	0,035	-

Cílem Etapy 3 bylo ověřit teplotní rozměrovou stabilitu lepidel na základě sady klimatických zkoušek dle ISO 9022-2:2015 [12]. V průběhu zkoušek byly vzorky v horizontální poloze a nebyly osazeny optikou ani jiným závažím. Byly provedeny dva cykly zkoušek teplotní odolnosti a jeden cyklus zkoušek mechanické odolnosti.

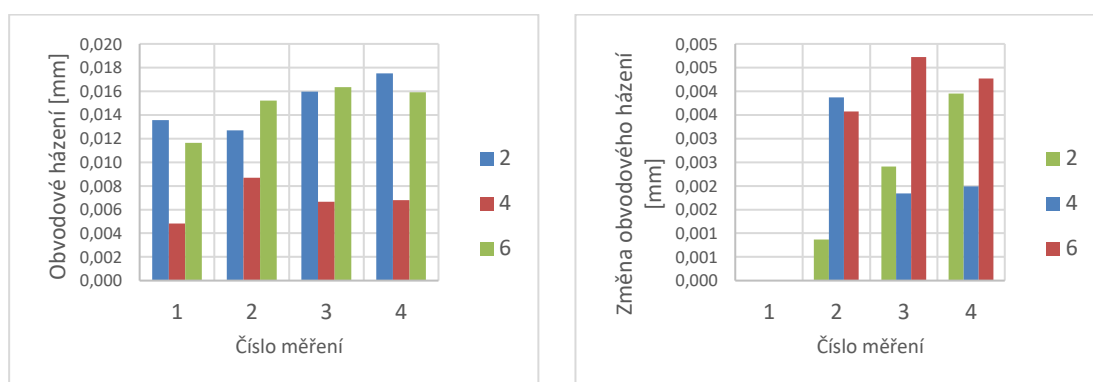
Tab. 7: Naměřené hodnoty obvodového házení Ø40 vůči základně B po jednotlivých zkouškách

Informace o vzorku		Měření 1.	Měření 2.			Měření 3.		Měření 4.	
		Po výrobě	Po 1. teplotních zkouškách			Po 2. teplotních zkouškách		Po Mechanických zkouškách	
Číslo	Druh lepidla	Soustruženo po slepení	Obvodové Házení [mm]	Obvodové Házení [mm]	Změna Obvodového Házení [mm]	Obvodové Házení [mm]	Změna Obvodového Házení [mm]	Obvodové Házení [mm]	Změna Obvodového Házení [mm]
1	DP190	ano	0,020	0,020	0,000	0,018	0,002	0,018	0,002
2	DP125	ano	0,014	0,013	0,001	0,016	-0,002	0,018	-0,004
3	DP190	ne	0,023	0,011	0,012	0,018	0,004	0,017	0,005
4	DP125	ano	0,005	0,009	-0,004	0,007	-0,002	0,007	-0,002
5	DP190	ano	0,033	0,031	0,003	0,032	0,001	0,033	0,000
6	DP125	ano	0,012	0,015	-0,004	0,016	-0,005	0,016	-0,004
7	DP110	ne	0,012	0,026	-0,013	0,020	-0,008	0,006	0,006
8	DP110	ano	0,014	0,006	0,008	0,014	0,000	0,024	-0,010
9	DP110	ne	0,028	0,023	0,005	0,028	0,000	0,027	0,000
10	Spabond	ano	0,017	0,021	-0,004	0,018	-0,002	0,020	-0,003
11	Spabond	ne	0,037	0,016	0,020	0,010	0,027	0,019	0,018
12	Spabond	ne	0,022	0,052	-0,030	0,052	-0,030	0,057	-0,036
13	Eprosin	ne	0,022	0,010	0,012	0,027	-0,005	0,019	0,004
14	Eprosin	ano	0,017	0,015	0,002	0,015	0,002	0,017	0,000
15	Eprosin	ne	0,035	0,034	0,001	0,025	0,011	0,034	0,002

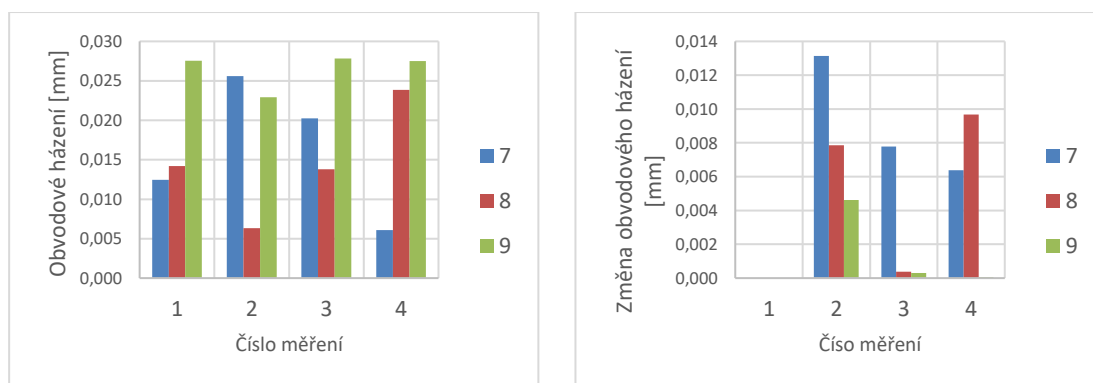
Následující grafy na Obr. 11 až Obr. 15 vykreslují vývoj obvodového házení $\varnothing 40$ vůči základně B a jeho změny po ukončení jednotlivých testovacích environmentálních zkoušek:



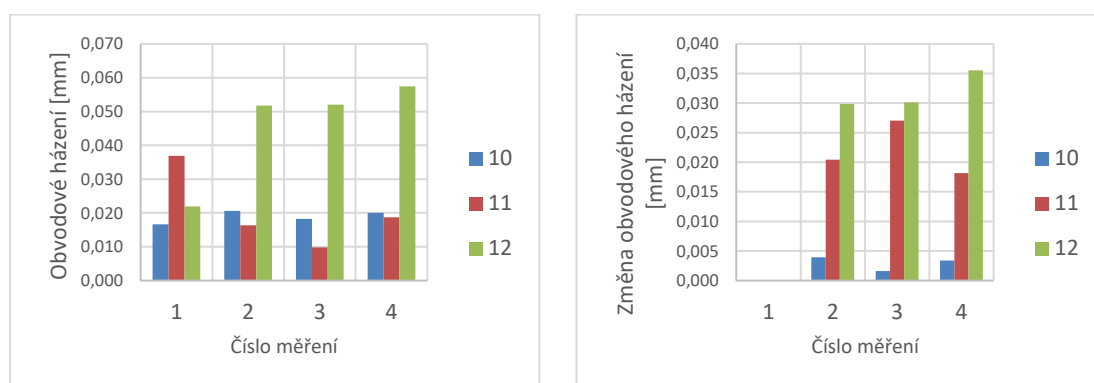
Obr. 11: Vzorky lepené DP 190 - Vývoj házení a odchylky házení v průběhu environmentálních zkoušek



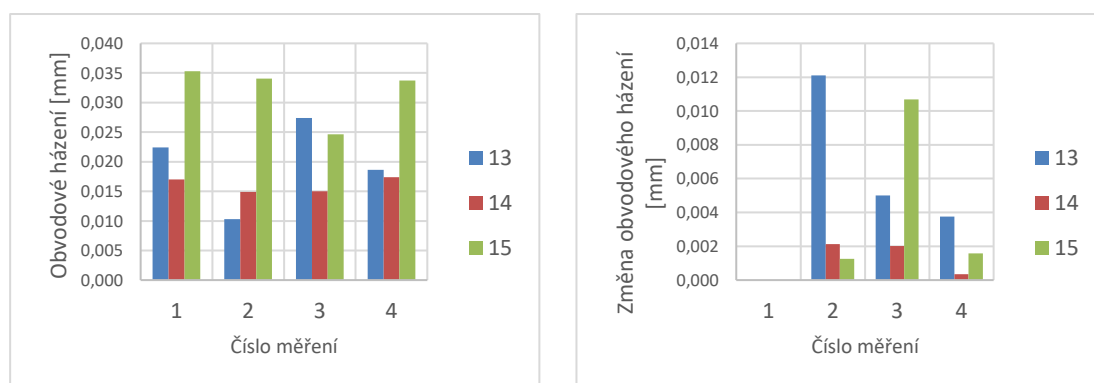
Obr. 12: Vzorky lepené DP 125 - Vývoj házení a odchylky házení v průběhu environmentálních zkoušek



Obr. 13: Vzorky lepené DP 110 - Vývoj házení a odchylky házení v průběhu environmentálních zkoušek



Obr. 14: Vzorky lepené Spabond - Vývoj házení a odchylky házení v průběhu environmentálních zkoušek



Obr. 15: Vzorky lepené Eprosin - Vývoj házení a odchylky házení v průběhu environmentálních zkoušek

Na základě prvotního zhodnocení dat lze konstatovat, že:

- 14 z 15 vzorků (93,3 %) splňuje požadovanou toleranci obvodového házení 0,05 po absolvování všech cyklů environmentálních zkoušek

Větší vypovídající hodnotu má však vývoj změny hodnoty obvodového házení, ke které došlo v průběhu zkoušek. Na základě podrobnějšího zkoumání vývoje změny sousosti lze konstatovat, že:

- 8 z 15 vzorků (53,3 %) v průběhu environmentálního cyklu nedosáhlo větší změny než 0,005 mm. Z toho lze usoudit, že za určitých podmínek vykazuje tento typ lepeného spoje dostatečnou rozměrovou stabilitu pro aplikaci ve sportovní optice
- 5 z 15 vzorků (33,3 % z celkového množství vzorků, 71 % nevyhovujících vzorků) v průběhu environmentálního cyklu alespoň jednou přesáhly změnu od výchozího stavu 0,01 mm (největší naměřená odchylka byla 0,036 mm u vzorku č. 12)

Z toho lze učinit závěr, že se sada vzorků chová nehomogenně. Část vzorků splňuje požadavky na rozměrovou stabilitu a část je překračuje značnou mírou.

Zjištění č. 1: Závislost mezi soustružením a nižší hodnotou obvodového házení

Soustružení vzorky

- Celkem 7 vzorků prošlo soustružením, protože po lepení nebyly vyhovující
- U žádného ze soustružených vzorků nepřekročila odchylka 0,01 mm
- U 7 z 8 soustružených vzorků (87,5 %) nepřekročila odchylka 0,005 mm

Nesoustružení vzorky

- Celkem 7 vzorků neprošly soustružením, protože byly vyhovující po lepení
- U 6 ze 7 (85 %) nesoustružených vzorků byla v průběhu environmentálních zkoušek alespoň jednou překročena odchylka 0,01 mm
- U 2 ze 7 (28,5 %) nesoustružených vzorků byla v průběhu environmentálních zkoušek alespoň jednou překročena odchylka 0,025 mm

Z výše uvedeného je patrná souvislost mezi neprovedeným soustružením a tendencí dosáhnout vyšší maximální hodnoty odchylky. Pro účely dalšího vyhodnocení byla označena maximální hodnota změny obvodového házení Δ_{max} a konečná hodnota, tedy hodnota po zkoušce číslo 4 jako Δ_{end} .

Závěry o vyšší rozměrové stabilitě soustružených vzorků pak lze kvantitativně zhodnotit srovnáním hodnoty průměru maximálních změn obvodového házení soustružených a nesoustružených vzorků $\bar{\Delta}_{max}$ a průměru konečných změn obvodového házení soustružených a nesoustružených vzorků $\bar{\Delta}_{end}$ (Tab. 8).

Tab. 8 Průměrná hodnota maximální odchylky

Typ vzorků	Průměr maximálních hodnot změn obvodového házení $\bar{\Delta}_{max}$ [mm]	Průměr konečných hodnot změn obvodového házení $\bar{\Delta}_{end}$ [mm]	$\frac{\bar{\Delta}_{end}}{\bar{\Delta}_{max}} \cdot 100$ [%]
Soustružené vzorky	0,0041	0,0032	21,9 %
Nesoustružené vzorky	0,0164	0,0101	38,4 %

Na základě těchto zjištění lze říci, že během soustružení dochází ke stabilizaci lepeného spoje v tom smyslu, že lepený spoj, který prošel soustružením vykazuje znatelně lepší rozměrové stability při dalším teplotním a mechanickém zatížení.

Zjištění č. 2: Významný vliv prvotního teplotního zatížení

Z naměřených dat lze vypožorovat, že u nesoustružených vzorků, které vykazují vyšší maximální odchylku, než 0,005 mm, dochází k většině deformace během prvním teplotním cyklu. Prakticky to znamená, že vzorky vykazují po prvotním teplotním zatížení výrazně vyšší rozměrovou stabilitu, což může být způsobeno např. tím, že některé ze vzorků nebyly zcela vytvrzeny. Pro budoucí experimenty se nabízí srovnat výsledky vzorků, které byly vytvrzeny běžným způsobem se vzorky, na který byl aplikovaný post-cure, tedy sekundární vytvrzovací cyklus.

Tab. 9: Srovnání míry odchylky obvodového házení v jednotlivých krocích

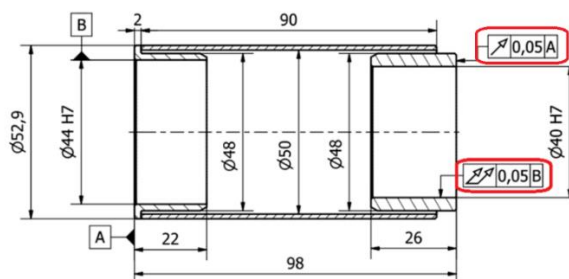
Číslo vzorku	Soustruže no	Poměrná hodnota obvodového házení po měření 2 [%]	Poměrná hodnota obvodového házení po měření 3 [%]	Poměrná hodnota obvodového házení po měření 4 [%]
1	ano	13,9	86,1	4,28
2	ano	22,03	38,99	38,99
3	ne	100	63,77	9,29
4	ano	100	52,46	3,88
5	ano	100	67,25	26,76
6	ano	75,64	24,36	9,53
7	ne	100	40,67	10,74
8	ano	81,2	77,38	96,18
9	ne	100	93,29	5,63
10	ano	100	58,63	44,16
11	ne	75,75	24,25	32,8
12	ne	84,11	0,79	15,1
13	ne	100	58,63	10,41
14	ano	100	5,63	78,4
15	ne	11,7	88,3	85,3
Průměr		77,62	52,03	31,43

3.5 Vzorky C (hliník-CFRP, 2. iterace)

V návaznosti na předchozí experimenty bylo záměrem autora ověřit výsledky zopakováním experimentům za implementace zkušeností získaných v průběhu práce a ověřit limity technologie. Cílem bylo vylepšit především dva aspekty – zvýšit přesnost použitého toolingu a ověřit předpoklad o stabilnějších výsledcích při vytvrzení lepidla za vyšší teploty, při tzv. post-cure. Vzorky, které figurují v dalším postupu byly označeny jako Vzorky C. Jejich geometrie i technologie výroby vychází z vzorků B.

3.5.1 Etapa 2 – ověření přesnosti výroby

U vyrobených vzorků bylo vyhodnocováno čelní házení vůči základně A a obvodové házení vůči základně B (Obr. 16). Naměřené hodnoty prezentuje Tab. 10. Povolené hodnoty obou geometrických tolerancí jsou 0,05 mm.



Obr. 16: Vzorek C – vyhodnocované geometrické tolerance

Tab. 10: Vzorky C - výsledky naměřených hodnot dle ČSN EN ISO 1101

Číslo vzorku	Naměřené čelní házení vůči A [mm]	Naměřené obvodové házení vůči B [mm]	Teplota vytvrzení
1	0,013	0,0251	70 °C
2	0,00737	0,029	70 °C
3	0,02089	0,04953	70 °C
4	0,00507	0,02554	70 °C
5	0,01651	0,03626	70 °C
6	0,00535	0,01345	70 °C
7	0,0075	0,02247	70 °C
8	0,00624	0,03373	70 °C
9	0,008	0,04587	70 °C
10	0,00334	0,05841	70 °C
11	0,00775	0,02216	20 °C
12	0,02024	0,03009	20 °C
13	0,00638	0,06492	20 °C
14	0,01785	0,06434	20 °C
15	0,0146	0,01522	20 °C

Vzorky B měly v kapitole 3.4.2 poměr splnění požadované tolerance 8/15 (53,4 %). Vzorky C dosahují úspěšnosti 12/15 (80 %) a ve srovnání s předchozím měřením jsou mimotoleranční hodnoty tentokrát výrazně nižší. Vyšší úspěšnost lze přisuzovat především vyšší přesnosti toolingu, lepší technologické kázni a celkově vyšším zkušenostem s technologií. I přes vyšší přesnost toolingu však nesoustružené vzorky nedosahují tak vysoké přesnosti, jako soustružené vzorky v předchozích experimentech.

3.5.2 Etapa 3 – Ověření rozměrové stability lepeného spoje

Následující etapa se zabývá prověřením rozměrové stability vzorků v rámci klimatických podmínek dle kapitole 3.2 . Vzorky jsou hodnoceny dle obvodové házení vůči základně B (Obr. 16) v Tab. 11.

Konkrétní posloupnost environmentálních zkoušek a měření je následující:

- Výroba vzorků
- 1. Kontrola obvodového házení vůči základně B dle dle ČSN EN ISO 1101
- 1. Environmentální testy

Tab. 11 Vzorky C – vývoj obvodového házení vůči základně B v průběhu environmentálních zkoušek

Číslo vzorku	Teplota vytvrzení	1. měření		2. měření		3. měření	
		Obvodové házení [mm]	Obvodové házení [mm]	Změna obvodového házení [mm]	Obvodové házení [mm]	Změna obvodového házení [mm]	
1	70 °C	0,0251	0,0206	0,0044	0,0295	0,0044	
2	70 °C	0,0290	0,0230	0,0059	0,0258	0,0031	
3	70 °C	0,0495	0,0515	0,0019	0,0507	0,0011	
4	70 °C	0,0255	0,0313	0,0057	0,0302	0,0046	
5	70 °C	0,0362	0,0607	0,0244	0,0741	0,0378	
6	70 °C	0,0134	0,0216	0,0082	0,0218	0,0084	
7	70 °C	0,0224	0,0307	0,0082	0,0314	0,0089	
8	70 °C	0,0337	0,0383	0,0046	0,0419	0,0081	
9	70 °C	0,0458	0,0248	0,0210	0,0263	0,0195	
10	70 °C	0,0584	0,0739	0,0155	0,0719	0,0135	
11	20 °C	0,0221	0,0805	0,0584	0,0803	0,0581	
12	20 °C	0,0300	0,0957	0,0656	0,1025	0,0724	
13	20 °C	0,0649	0,1291	0,0642	0,1395	0,0745	
14	20 °C	0,0643	0,1164	0,0521	0,1282	0,0638	
15	20 °C	0,0152	0,0378	0,0225	0,0389	0,0237	

Na základě experimentu lze vyvodit následující dílčí závěry:

- Nejlepších hodnot rozměrové stability dosahují soustružené vzorky B vytvrzené při teplotě 20 °C, jejich $\bar{\Delta}_{max}$ je 0,0041 mm
- Nesoustružené vzorky C dosahují $\bar{\Delta}_{max}$ 0,0110 mm, u 70% vzorků je hodnota změny obvodového házení pod 0,01 mm, u 90 % pod 0,02 mm
- V obou skupinách, jak mezi vzorky B, tak mezi vzorky C, dosahují nejhorší rozměrové stability vzorky, které nebyly soustruženy a které byly vytvrzeny při teplotě 20 °C, průměrná hodnota $\bar{\Delta}_{max}$ pro nesoustružené vzorky C je 0,0585 mm

Na základě současného stavu poznání není zjevné, jaký mechanismus způsobil u soustružených vzorků B vyšší rozměrovou stabilitu než u nesoustružených vzorků C.

3.5.3 CT Scan

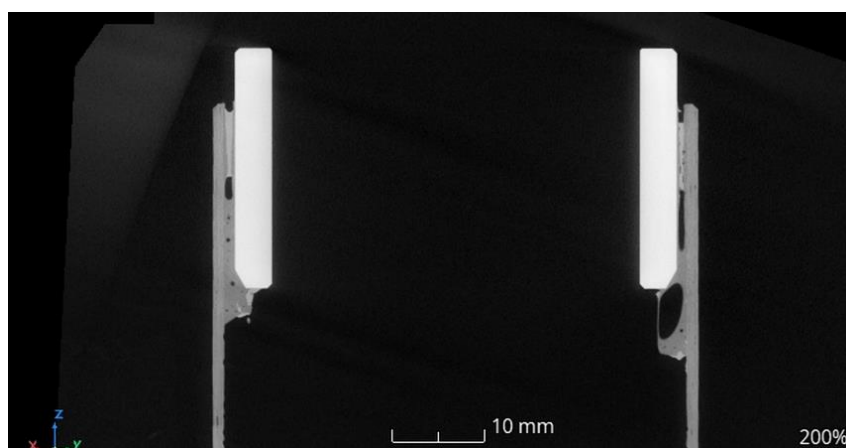
Cílem této experimentální části je vyhodnotit, zda existuje souvislost mezi výrobní tolerancí a kvalitou lepeného spoje, a také mezi rozměrovou stabilitou a kvalitou lepeného spoje. Pro měření byla zvolena výpočetní tomografie (CT Scan), která umožňuje detailní vizualizaci vnitřní struktury lepeného spoje, čímž poskytuje informace o jeho kvalitě.

Měření byla realizována na zařízení Phoenix V|tome|x M300 od výrobce Waygate Technologies, ve spolupráci s Laboratoří rentgenové mikro a nano tomografie CEITEC. Parametry měření byly pečlivě nastaveny tak, aby zajistily maximální přesnost a spolehlivost získaných dat. Konkrétní parametry měření byly následující:

- Rozlišení: 45 $\mu\text{m}/\text{voxel}$
- Urychlovací napětí: 200 kV
- Proud: 280 μA
- Expoziční čas: 100 ms
- Počet projekcí: 2600
- Filtrace: 1 mm Cu
- Délka skenování: 6 minut

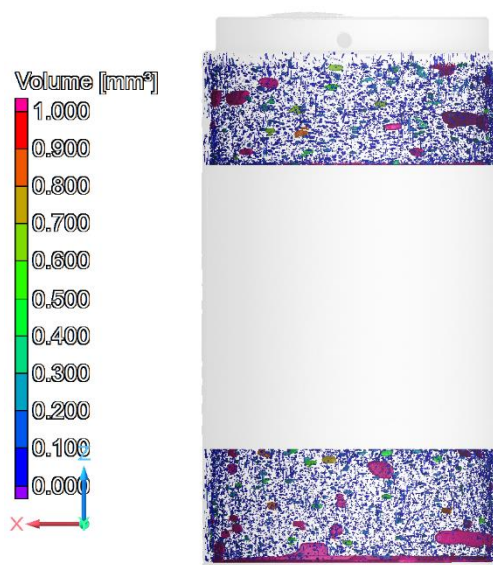
Výstupy z CT skenování odhalily celou řadu nedokonalostí v lepených spojkách napříč všemi vzorky. Mezi tyto nedokonalosti patří zejména absence lepidla u krajů lepeného spoje a přetoky lepidla mimo lepený spoj (Obr. 17). Tyto jevy jsou pravděpodobně způsobeny kombinací nízké viskozity lepidla při aplikaci a nevhodnou orientací lepeného vzorku během procesu lepení. Dále bylo zjištěno velké množství bublin, které byly do lepidla zapracovány během míchání.

Některé z těchto vad je možné částečně eliminovat zařazením procesu odvzdušnění pomocí vakuové vývěvy. Jiné nežádoucí jevy lze částečně eliminovat úpravou technologických postupů, například změnou orientace adherendu, použitím vhodnější trysky při aplikaci lepidla a podobně.



Obr. 17: Vzorek s přebytkem lepidla mimo lepený spoj

Pro kvantifikaci vad v lepených spoji byl využit software VGStudioMax, ve kterém byla provedena „porosity analysis“ (Obr. 18) a následně byla data exportována do formátu .CSV a dále zpracována v software Excel. Jako metrika pro hodnocení vad byl zvolen d_e „Equivalent diameter“, což je průměr teoretické kulové vady o stejném objemu jako reálná obecně tvarovaná vada.



Obr. 18 Ukázka výstupu porosity analysis

Na datech byla provedena korelační analýza za použití Pearsonova korelačního koeficientu r . Ten se spočítá [61]:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (18)$$

Kde x_i a y_i jsou jednotlivé hodnoty zkoumaných proměnných a \bar{x} a \bar{y} jsou hodnoty aritmetických průměrů. V závislosti na hodnotě r se pak míra korelace vyhodnocuje dle Tab. 12 [61].

Tab. 12 Míra korelace v závislosti na Pearsonově koeficientu

<i>Hodnota r</i>	<i>Míra korelace</i>
0,0 < 0,1	žádná korelace
0,1 < 0,3	nízká korelace
0,3 < 0,5	střední korelace
0,5 < 0,7	vysoká korelace
0,7 < 1	velmi vysoká korelace

K určení, zda je výsledek statisticky významný byl využit T-test [62]:

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (19)$$

Kde r je dříve zmíněný korelační koeficient a n je počet měřených hodnot. Pokud je t větší, než je hodnota kvantilu Studentova rozdělení, který přísluší významnosti $\alpha=0,05$ (což odpovídá hodnotě 2,20), pak lze výsledky označit za statisticky významné [62]. Výsledky statistické analýzy prezentují Tab. 13 a Tab. 14.

Tab. 13 Výsledky korelací s počáteční hodnotou obvodového házení

Korelace s počáteční hodnotou obvodového házení (mm)				
Proměnná	r	t	Síla korelace	Statistická významnost
d_e největší bubliny (mm)	-0,363	-1,232	střední negativní korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,3-0,4]$	0,472	1,694	střední pozitivní korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,4-0,5]$	0,38	1,301	střední pozitivní korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,5-0,6]$	0,047	0,15	žádná korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,6-0,7]$	-0,071	-0,226	žádná korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,7-0,8]$	-0,176	-0,564	nízká negativní korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,8-0,9]$	-0,113	-0,359	nízká negativní korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,9-1,0]$	-0,117	-0,372	nízká negativní korelace	není významná
počet bublin $d_e > 1$	-0,142	-0,453	nízká negativní korelace	není významná

Tab. 14 Výsledky korelací se změnou hodnoty obvodového házení

Korelace se změnou hodnoty obvodového házení (mm)				
Proměnná	r	t	Síla korelace	Statistická významnost
d_e největší bubliny (mm)	-0,412	-1,432	střední negativní korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,3-0,4]$	-0,063	-0,199	žádná korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,4-0,5]$	0,363	1,234	Střední pozitivní korelace	není významná
počet bublin $d_e(0,5-0,6]$	0,751	3,601	velmi vysoká pozitivní korelace	významná
počet bublin $d_e(0,6-0,7]$	0,758	3,679	velmi vysoká pozitivní korelace	významná
počet bublin $d_e(0,7-0,8]$	0,744	3,517	velmi vysoká pozitivní korelace	významná
počet bublin $d_e(0,8-0,9]$	0,73	3,374	velmi vysoká pozitivní korelace	významná
počet bublin $d_e(0,9-1,0]$	0,698	3,082	vysoká pozitivní korelace	významná
počet bublin $d_e > 1$	0,73	3,383	velmi vysoká pozitivní korelace	významná

Nejsilnější korelace s počáteční hodnotou obvodového házení je střední a žádná ze srovnávaných veličin nemá závislost statisticky nevýznamnou. Proto lze konstatovat, že nebyla nalezena závislost mezi počátečním obvodového házení a ostatními veličinami.

U změny hodnoty obvodového házení (tedy proměnná, která popisuje rozměrovou stabilitu vzorků v průběhu environmentálních zkoušek) byla vyhodnocen statisticky významná, velmi vysoká korelace u počtu bublin s $d_e 0,5$ a vyšší.

Tyto informace lze interpretovat tak, že přítomnost bublin v lepeném spoji zhoršuje rozměrovou stabilitu zkoumaných vzorků. Aby byl negativní vliv bublin v lepeném spoji na rozměrovou stabilitu potvrzen, bude potřeba udělat další testy s větším statistickým vzorkem. Pro další testování by také bylo vhodné nemíchat v jednom datasetu vzorky vytvrzené za pokojové teploty a vzorky vytvrzené s post-curem, neboť tato nehomogenita dat může generovat nevypovídající výsledky.

3.6 Měření napětí v lepeném spoji

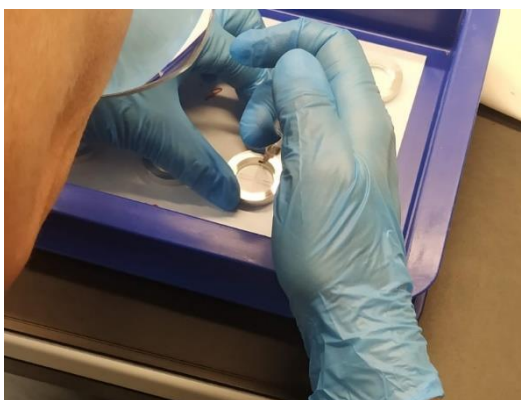
Měření proběhlo na měřícím zařízení, které bylo vyvinuto i vyrobeno firmou Meopta s.r.o. Následující kapitola se věnuje popisu principu měření a konstrukci samotného zařízení. Zařízení vyhodnocuje fázovou retardaci na základě polarizačních měření, která přímo souvisí s napětím v materiálu, které generuje anizotropní prostředí.

3.6.1 Návrh a výroba vzorků

Pro výrobu vzorku byly využity planparalelní optické prvky ze skla BK7 s vyleptanou záměrnou osnovou. K těmto optickým prvkům byly navrženy objímky z hliníkové slitiny 6061-T651. Optický prvek byl obvodově zalepen do objímky, přičemž byla navržena 1 mm široká lepicí spára, která byla vyplněna lepidlem Spabond 445 (Obr. 19). Na vzorku bylo následně provedeno měření napětí v několika fázích:

- Ve volném stavu.
- Po zalepení a vytvrzení při pokojové teplotě (21 °C po dobu 7 dní).
- Po zalepení a vytvrzení při pokojové teplotě a následném post-cure za zvýšené teploty (21 °C po dobu 7 dní, následně 70 °C po dobu 5 hodin).

Vzhledem k charakteru vzorku – který se značně liší od kompozitního výrobku zkoumaného v předchozích kapitolách je k výsledkům z měření nutno přistupovat srovnávacím způsobem. Kapacitní vytížení na měřícím zařízení neumožnilo širší rozsah měření. Jak je popsáno v předchozí kapitole, pro další výzkum a hlubší porozumění problematiky by však bylo vhodné provádět měření po vytvrzení při pokojové teplotě nikoliv po 7 dnech, ale po 28 dnech, což výrobce udává jako plné vytvrzení. Alternativně by bylo vhodné měření periodicky opakovat, aby bylo možné sledovat míru vytvrzení v průběhu času.



Obr. 19 Výroba vzorku - aplikace lepidla

3.6.2 Měření

Všechna měření (ve volném stavu, po vytvrzení za pokojové teploty i po post-cure) probíhala stejným způsobem. Nejprve bylo nutné najet do domové pozice zařízení zvolit expoziční čas kamery, provést odečet pozadí a následnou kalibraci. Před samotným měřením bylo nezbytné nechat vzorek dostatečně dlouho vytemperovat, minimálně po dobu 10 minut. Následující **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** prezentují výsledky měření ve formě snímků obrazovky, a Tab. 15 uvádí naměřené hodnoty. Data jsou prezentována jako minimální a maximální hodnota, ze kterých vypočítaná průměrná hodnota a rozsah hodnot okolo této průměrné hodnoty. Ze všech hodnot je pak spočítána průměrná hodnota fázové retardace, aby bylo možné sledovat trend vývoje mezi jednotlivými zkouškami.

Tab. 15 Změřené hodnoty fázové retardace

Měření volné optiky					Měření po vytvrzení 21 °C, 7 dní					Měření po vytvrzení 21 °C, 7 dní + 70 °C, 5 hodin				
Číslo vzorku	Fázová retardace (nm)				Číslo vzorku	Fázová retardace (nm)				Číslo vzorku	Fázová retardace (nm)			
	min	max	průměr	±		min	max	průměr	±		min	max	průměr	±
1	1,5	2	1,75	0,25	1	0,2	6,3	3,25	3,05	1	0,2	14,8	7,5	7,3
2	0,4	1,2	0,8	0,4	2	0,4	4,3	2,35	1,95	2	0,3	15,8	8,05	7,75
3	0,6	1,3	0,95	0,35	3	0,2	2,2	1,2	1	3	0,2	18,2	9,2	9
4	0,3	0,8	0,55	0,25	4	0,2	3	1,6	1,4	4	0,3	16,5	8,4	8,1
5	1,5	1,8	1,65	0,15	5	0,2	5,5	2,85	2,65	5	0,2	25	12,6	12,4
6	0,2	0,6	0,4	0,2	6	0,3	5	2,65	2,35	6	0,5	31	15,75	15,25
7	1,1	2	1,55	0,45	7	0,1	3,3	1,7	1,6	7	0,6	27,5	14,05	13,45
8	0,5	1,3	0,9	0,4	8	0,1	4,3	2,2	2,1	8	0,2	25	12,6	12,4
9	0,7	1,4	1,05	0,35	9	0,1	3,1	1,6	1,5	9	0,4	38	19,2	18,8
10	0,1	0,4	0,25	0,15	10	0,1	4,6	2,35	2,25	10	0,3	26	13,15	12,85
Průměr všech vzorků:				0,985	Průměr všech vzorků:				2,175	Průměr všech vzorků:				12,05

Z výsledků jsou patrné následující poznatky:

- Oblasti v bezprostřední blízkosti leptaného obrazce nejsou použitelné pro srovnávací měření, a je nutné s tímto napětím, které bylo do skel vneseno při výrobě, počítat.
- Zalepení vneslo do materiálu významné napětí – průměrně se napětí zvýšilo na 200 % oproti volnému stavu
- Vytvrzením za zvýšené teploty se napětí zvýšilo na 1200 % oproti předchozímu měření.

Při zapojení těchto výsledků do širšího kontextu je zřejmé, že napětí, které lepidlo po vytvrzení vnáší do lepeného spoje, nemá za následek rozměrovou nestabilitu spoje. Jak je uvedeno v kapitole 3.5.1, vzorky vytvrzené za zvýšené teploty jsou naopak stabilnější, přestože výsledky z této kapitoly ukazují, že takto vytvrzené lepidlo vnáší do spoje větší napětí. Z toho lze usuzovat, že rozměrová stabilita bude spíše souviset s jiným jevem, například s hodnotou skelného přechodu v závislosti na způsobu vytvrzení, čemuž se věnuje následující kapitola.

3.7 Měření skelného přechodu

Tato kapitola se věnuje měření teploty skelného přechodu (T_g) polymerních materiálů prostřednictvím dynamicko-mechanické analýzy (DMA) v souladu s normou ISO 6721, konkrétně ISO 6721-11 "Plasty — Stanovení dynamických mechanických vlastností — Část 11: Teplota skelného přechodu." Pro účely měření byly připraveny tři typy vzorků z lepidla Spabond 445, přičemž všechny vzorky měly rozměry 3x12x60 mm v souladu s normou ISO 6721.

- Vzorky 1, 2, 3 byly vytvrzeny při teplotě 21 °C po dobu 24 hodin, následně při 35 °C po dobu 12 hodin.
- Vzorky 4, 5, 6 byly vytvrzeny při teplotě 21 °C po dobu 24 hodin, následně při 35 °C po dobu 12 hodin, a poté byly obrobny.

- Vzorky 7, 8, 9 byly vytvrzeny při teplotě 21 °C po dobu 24 hodin a následně při 70 °C po dobu 5 hodin.

Odečtené hodnoty T_g dle maxima $\tan\delta$ prezentuje následující Tab. 18:

Tab. 16 Vyhodnocení skelného přechodu

<i>Číslo vzorku</i>	T_g (°C)
1	71,6
2	71,7
3	71,2
4	71,8
5	73,7
6	73,7
7	103,1
8	102,5
9	101,7

Z prezentovaných výsledků lze vyvodit několik závěrů:

- Hodnoty skelného přechodu nelze přímo srovnávat s hodnotami uvedenými v datasheetu, výrobcem měřené hodnoty byly zjištěny metodou DSC dle normy ISO 11357 [63], autorem změřené hodnoty byly zjištěny metodou DMA dle normy ISO 6721-11.
- Dle očekávání, vyšší teplota vytvrzování vedla k vyšší hodnotě teploty skelného přechodu u příslušných vzorků.
- U vzorků 4, 5, 6, které prošly obráběním, bylo zaznamenáno mírné zvýšení teploty skelného přechodu. Toto zvýšení je však v kontextu teplotní odolnosti zanedbatelné, což naznačuje, že při obrábění za daných podmínek nedochází k významnému zvýšení teploty skelného přechodu.

ZÁVĚR

Tato dizertační práce se zaměřuje na využití kompozitních materiálů v konstrukci optických přístrojů, přičemž motivace pro jejich použití vychází z praktických potřeb společnosti Meopta s.r.o. V optickém průmyslu jsou tyto materiály zvažovány zejména kvůli svým výhodám oproti tradičním kovovým konstrukčním materiálům, jako je lepší tlumení vibrací a vyšší rozměrová stabilita při provozních teplotách. Důležitou předností kompozitů je také možnost optimalizovat mechanické vlastnosti v jednotlivých směrech laminátu, což umožňuje dosáhnout vyšší tuhosti ve specifických směrech zatížení a zároveň výrazně snížit hmotnost ve srovnání s běžně používanými kovovými materiály.

Jedním z klíčových výstupů rešeršní části této práce byla volba spektivu a binokuláru jako referenčních přístrojů, které posloužily jako základ pro návrh technologického vzorku v experimentální části. Na základě specifických požadavků, které jsou na přístroje typu spektiv a binokulár kladeny, byla vypracována metodika pro environmentální testování tohoto vzorku dle ISO 9022-2:2015 a ISO 9022-3:2015. Požadovaná přesnost byla definována s ohledem na běžně dosažitelné tolerance při výrobě optických přístrojů konvenčními technologiemi.

V úvodních fázích experimentální části byla zkoumána závislost pevnosti lepeného spoje na tloušťce lepicí spáry. Zjištěný pokles pevnosti s rostoucí tloušťkou lepicí spáry je v souladu se závěry současných studií [41,42,43,44]. Hlavní náplní experimentální části pak byla výroba, testování přesnosti výroby a zkoumání rozměrové stability technologických vzorků. Celkem byly navrženy a vyrobeny tři typy vzorků, označené jako Vzorky A, Vzorky B a Vzorky C. Požadovaná výrobní přesnost byla definována obvodovým házením do hodnoty 0,05 mm klíčových rozměrů, maximální rozměrová stabilita v průběhu zkoušek pak byla stanovena na 0,02 mm (měřené hodnoty, např. obvodového házení, se v průběhu environmentálních zkoušek nesmí odchýlit od původní hodnoty o víc než 0,02 mm).

Vzorky A byly složeny ze dvou objímek z hliníkové slitiny, což umožnilo eliminovat vliv anizotropie kompozitu. Testování přesnosti výroby přineslo nové poznatky týkající se lepení pomocí montážního přípravku, avšak požadované přesnosti nebylo dosaženo. Poté bylo provedeno 12 klimatických zkoušek, během nichž v 97,7 % měření odchylka sousostí od výchozího stavu nepřesáhla hodnotu 0,004 mm. Na základě těchto výsledků byly zkoušky rozměrové stability lepeného spoje vyhodnoceny jako úspěšné, což umožnilo přistoupit k testování dalších vzorků.

V další fázi byly testovány Vzorky B, které již obsahovaly nosní díl z kompozitu. Jejich výroba probíhala na sofistikovanějším přípravku, což vedlo k tomu, že 46,6 % vzorků dosáhlo po lepení požadované přesnosti. U neúspěšných vzorků bylo, stejně jako u Vzorků A, provedeno dodatečné soustružení k dosažení potřebné přesnosti. Zkoušky rozměrové stability lepeného spoje zahrnovaly dvě zkoušky klimatické odolnosti a jednu zkoušku mechanické odolnosti. Během těchto testů byly pozorovány následující jevy:

- U 7 z 8 soustružených vzorků (87,5 %) nepřekročila odchylka hodnotu 0,005 mm, což potvrzuje výsledky zjištěné při testování Vzorků A.

- U 6 ze 7 nesoustružených vzorků (85 %) byla během environmentálních zkoušek alespoň jednou překročena odchylka 0,01 mm.
- Nejvýraznější deformace byla zaznamenána při prvotním teplotním zatížení, kdy nesoustružené vzorky dosáhly v průměru 77,6 % maximální odchylky již po prvním teplotním cyklu.

Třetí a poslední sada technologických vzorků, označená jako Vzorky C, byla navržena s cílem vylepšit výrobní proces a reagovat na poznatky získané ze zkoušek vzorků B. Pro výrobu těchto vzorků byl použit montážní trn s přesnějším uložením a u části vzorků bylo provedeno vytvrzování při zvýšené teplotě, tzv. post cure. Výrobní přesnost se výrazně zlepšila, přičemž 12 z 15 vzorků (80 %) dosáhlo požadované přesnosti. Toto zlepšení lze přičíst vyšší přesnosti uložení na trnu a pravděpodobně také eliminaci technologických chyb díky zkušenostem získaným z předchozích fází experimentu.

Vzorky C následně podstoupily zkoušku rozměrové stability lepeného spoje prostřednictvím environmentálních zkoušek podle norem ISO 9022-2:2015 a ISO 9022-3:2015. Hlavním cílem bylo porovnat rozměrovou stabilitu vzorků, které prošly procesem post-cure, s těmi, které tento proces neabsolvovaly. Pozorované výsledky byly následující:

- Vzorky po post-cure (sekundární vytvrzení při 70 °C po dobu 5 hodin) dosáhly průměrné odchylky obvodového házení 0,0110 mm; u 70 % vzorků byla hodnota změny obvodového házení pod 0,01 mm, a u 90 % vzorků pod 0,02 mm.
- průměrná hodnota změny obvodového házení u vzorků C best post-cure činila 0,0585 mm.

Z výsledků experimentů na Vzorcích A, Vzorcích B a Vzorcích C plynou následující technologické závěry:

- Při přesném lepení za použití montážního přípravku lze realisticky dosáhnout výrobní přesnosti do 0,05 mm, pro přesnější aplikace je nezbytné výrobek obrábět po lepení.
- Z důvodu vyšší rozměrové stability je žádoucí provádět post-cure, pokud to zvolené lepidlo umožňuje.
- V rámci aplikací sportovní optiky lze na základě typických environmentálních předpisů dosáhnout rozměrové stability v rozmezí 0,01 mm až 0,02 mm.

Závěrečná fáze experimentální části zahrnovala doplňkové testy, které přispěly k hlubšímu porozumění technologickým problémům a doplnily dosavadní závěry. CT scan Vzorků C odhalil řadu nedokonalostí v lepených spojích napříč všemi vzorky, například absenci lepidla na okrajích lepeného spoje, vytečení lepidla mimo lepený spoj a také přítomnost velkého množství bublin, které vznikly při mísení dvou složek lepidla. Korelační analýza pomocí Pearsonova korelačního koeficientu odhalila silnou pozitivní korelaci mezi vyšším počtem bublin s ekvivalentním průměrem nad 0,5 mm a horší rozměrovou stabilitou. Proto je doporučeno využít k odplynění např. vakuovou vývěvu. Bylo by však vhodné na tuto analýzu navázat rozšířením o větší statistický vzorek a do jednoho datasetu zahrnout pouze vzorky, které byly vytvrzeny stejným způsobem.

Pomocí fotoelastické metody byla provedena analýza zbytkového napětí, které lepidlo vnáší do adherendů. Výsledky jasně ukazují, že napětí generované lepidlem vytvrzeným při vyšší teplotě, tzv. post-cure, je podstatně vyšší než napětí vnesené lepidlem vytvrzeným při pokojové teplotě. Tento jev souvisí se smrštěním, ke kterému při post-cure dochází. Nicméně ostatní experimenty ukázaly, že toto zbytkové napětí nemá negativní vliv na rozměrovou stabilitu lepeného spoje ani na výrobní přesnost.

Měření teploty skelného přechodu dále ilustruje, proč je důležité využívat post-cure při vytvrzování lepidel. Vzorky lepidla Spabond 445 vytvrzené při 70 °C dosahují podle metody DMA (ISO 6721-11) teploty skelného přechodu přes 100 °C, zatímco lepidlo vytvrzené při pokojové teplotě dosahuje této teploty jen těsně nad 70 °C. U takto vytvrzeného lepidla pak během environmentálních zkoušek dochází k dalšímu vytvrzování, které je doprovázeno smrštěním a narušením přesnosti důležitých rozměrů. Obecně je vhodné volit lepidla s vyšší teplotou skelného přechodu, než jsou provozní podmínky přístroje, aby lepidlo nepřešlo do kaučukovitého stavu.

V rámci této dizertační práce nebylo možné plně obsáhnout veškeré aspekty zkoumané problematiky. Výsledky však poskytují solidní základ pro další teoretický i praktický výzkum v následujících oblastech:

- Pro implementaci v dalších odvětvích přesné mechaniky a optiky by bylo vhodné lépe prozkoumat parametry outgassingu, s ohledem na vysoké nároky na čistotu, například v oblasti bezmaskové litografie.
- Navázat na korelační analýzu vlivu počtu bublin na rozměrovou stabilitu rozšířením statistického vzorku
- Vyhodnotit faktory, které způsobily, že obráběné Vzorky B vykazovaly nejvyšší rozměrovou stabilitu se všech vzorků, a zjistit, jakých hodnot rozměrové stability je možné opakovaně dosáhnout.

Na základě výše uvedeného lze konstatovat, že cíle dizertační práce byly splněny. Získané výsledky poukazují na význam dalšího zkoumání této problematiky a naznačují, že závěry této práce mohou být reálně využitelné v praxi. Praktický přínos práce spočívá v navržené technologii přesného lepení, která zahrnuje identifikaci úskalí a jejich řešení. Přestože je k širšímu uplatnění této technologie nutný další výzkum, tato dizertační práce poskytuje kvalitní základ pro budoucí aplikace.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] L. ZHU, ; N. LI, a P.R.N. CHILDS, . Light-weighting in aerospace component and system design. *Propulsion and Power Research: Volume 7, Issue 2*. 2018.
- [2] HARRIS, Charles; STARNES, James a SHUART, Mark. Design and Manufacturing of Aerospace Composite Structures, State-of-the-Art Assessment. *Journal of Aircraft*. 2002, roč. 39, č. 4, s. 545-560. ISSN 0021-8669. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/2.2992>.
- [3] LIU, Tuan; ZHANG, Meng; GUO, Xiaolong; LIU, Chengyun; LIU, Tian et al. Mild chemical recycling of aerospace fiber/epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin. *Polymer Degradation and Stability*. 2017, roč. 139, s. 20-27. ISSN 01413910. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.017>.
- [4] ZHANG, J.; CHEVALI, V.; WANG, H. a WANG, Ch. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Composites Part B: Engineering*. 2020, roč. 193.
- [5] KUPČÁK, Radim a ZOUHAR, Jan. Application of composite materials in sports optics. *Manufacturing Technology*. 2020, roč. 20, č. 2, s. 200-209. ISSN 12132489. Dostupné z: <https://doi.org/10.21062/mft.2020.038>.
- [6] CAMANHO, P a HALLETT, Stephen (ed.). *Composite Joints and Connections: Principles, Modelling and Testing*. Woodhead Publishing, 2016. ISBN 9781845699901.
- [7] PASTORE, R.; DELFINI, A.; ALBANO, M.; VRICELLA, A.; MARCHETTI, M. et al. Outgassing effect in polymeric composites exposed to space environment thermal-vacuum conditions. *Acta Astronautica*. 2020, roč. 170, s. 466-471. ISSN 00945765. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.019>.
- [8] ISO 9022-1:2016. *Optics and photonics — Environmental test methods — Part 1: Definitions, extent of testing*. 2016.
- [9] *Sportovní Optika*. online. In: Meopta.com. Meopta – optika, s.r.o. [cit. 2022-08-28].
- [10] ISO 14490-6:2014. *Optics and photonics — Test methods for telescopic systems — Part 6: Test methods for veiling glare index*. 2014.
- [11] ISO 14490-7:2016. *Optics and photonics — Test methods for telescopic systems — Part 7: Test methods for limit of resolution*. 2016.
- [12] ISO 9022-2:2015. *Optics and photonics — Environmental test methods — Part 2: Cold, heat and humidity*. 2015.

- [13] ISO 9022-3:2015. *Optics and photonics — Environmental test methods — Part 3: Mechanical stress*. 2015.
- [14] ISO 9022-8:2015. *Optics and photonics — Environmental test methods — Part 8: High internal pressure, low internal pressure, immersion*. 2015.
- [15] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [16] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [17] CHARKY, Alan. *Vacuum Systems for Composite Manufacturing – Part 1*. online. In: LinkedIn. 2017. [cit. 2024-08-31].
- [18] HAVEL COMPOSITES, . *Technologie výroby kompozitů*. online. In: . Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20výroby%20kompozitů.pdf>. [cit. 2024-08-24].
- [19] *A Brief Look Inside the Prepreg Manufacturing Process*. online. In: . 2024. [cit. 2024-08-24].
- [20] DEXCRAFT, . *Prepreg carbon fiber parts / composites, autoclave composites*. online. In: . Dostupné z: <http://www.dexcraft.com/articles/carbon-fiber-composites/prepreg-autoclave/>. [cit. 2024-08-31].
- [21] CAMPBELL, F.C. *Structural Composite Materials*. Ohio: Materials Park, 2010.
- [22] ADDCOMPOSITES, . *What is Filament Winding Process?*. online. In: . 2023. [cit. 2024-08-25].
- [23] POŠVÁŘ, Zdeněk. *Výpočtové modely vlastností hybridních kompozitních struktur*. Dizertační práce. Praha: Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze, 2019.
- [24] COMPOTECH, . *Automated Manufacturing*. online. In: . [cit. 2024-08-31].
- [25] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. online. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340. [cit. 2022-08-28].
- [26] KELLY, A. Controlling thermal expansion to obtain negative expansivity using laminated composites. *Composites Science and Technology*. 2005, roč. 65, č. 1, s. 47-59. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.06.003>.

- [27] ITO, T.; SUGANUMA, T. a WAKASHIMA, K. A micromechanics-based analysis for tailoring glass-fiber-reinforced thermoplastic laminates with near-zero coefficients of thermal expansion. *Composites Science and Technology*. 2000, roč. 60, č. 9, s. 1851-1861. ISSN 02663538. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00073-7).
- [28] LIU, Zhendong; ZHENG, Xitao; FAN, Wenjing; WANG, Fei; AHMED, Sohail et al. An alternative method to reduce process-induced deformation of CFRP by introducing prestresses. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022, roč. 35, č. 8, s. 314-323. ISSN 10009361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.03.005>.
- [29] TRAIFOROS, Neoklis; TURNER, Thomas; RONEBERG, Patrik; FERNASS, Daoud; CHRONOPOULOS, Dimitrios et al. A simulation framework for predicting process-induced distortions for precise manufacturing of aerospace thermoset composites. *Composite Structures*. 2021, roč. 275. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114465>.
- [30] ALBERT, C. Spring-in and warpage of angled composite laminates. *Composites Science and Technology*. 2002, roč. 62, č. 14, s. 1895-1912. ISSN 02663538. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00105-7).
- [31] SHIGLEY, Joseph; MISCHKE, Charles a BUDYNAS, Richard. *Konstruování strojních součástí*. Překlady vysokoškolských učebnic. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. ISBN 9788021426290.
- [32] ČSN EN 923 (668501): *Lepidla - Termíny a definice*. Institut pro testování a certifikaci, 2016.
- [33] VELKERSEN, O. Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonquerschnitten. *Luftfahrtforschung*. 1938, č. 15, s. 41-47.
- [34] GOLAND, M. a REISSNER, E. The Stresses in Cemented Joints. *Journal of Applied Mechanics*. 1944, roč. 11, č. 1, s. 17-27. ISSN 0021-8936. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.4009336>.
- [35] GLEICH, D.; VAN TOOREN, M. a BEUKERS, A. Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2001, roč. 15, č. 9, s. 1091-1101. ISSN 0169-4243. Dostupné z: <https://doi.org/10.1163/156856101317035503>.
- [36] DA SILVA, Lucas; RODRIGUES, T.; FIGUEIREDO, M.; DE MOURA, M. a CHOUSAL, J. Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. *The Journal of Adhesion*. 2006, roč. 82, č. 11, s. 1091-1115. ISSN 0021-8464. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00218460600948511>.
- [37] ZHANG, Dawei a HUANG, Ying. Influence of surface roughness and bondline thickness on the bonding performance of epoxy adhesive joints on mild steel

- substrates. *Progress in Organic Coatings*. 2021, roč. 153. ISSN 03009440. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106135>.
- [38] SHOKRIAN, Mino; SHELESH-NEZHAD, Karim a NAJJAR, Reza. The effects of Al surface treatment, adhesive thickness and microcapsule inclusion on the shear strength of bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2019, roč. 89, s. 139-147. ISSN 01437496. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.01.001>.
- [39] GUO, Lei; LIU, Jianhua; XIA, Huanxiong; LI, Xiayu; ZHANG, Xiumin et al. Effects of loading rate, temperature, and thickness on the tensile strength of precision adhesive joints. *Polymer Testing*. 2022, roč. 109. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107528>.
- [40] GHUMATKAR, A.; BUDHE, S.; SEKHAR, R.; BANEJA, M.D. a BARROS, S. Influence of Adherend Surface Roughness on the Adhesive Bond Strength. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2016, roč. 13, č. 13, s. 2356-2370. ISSN 1679-7825. Dostupné z: <https://doi.org/10.1590/1679-78253066>.
- [41] KIM, Ki; KIM, Won; LEE, Dai a JUN, Eui. Optimal tubular adhesive-bonded lap joint of the carbon fiber epoxy composite shaft. *Composite Structures*. 1992, roč. 21, č. 3, s. 163-176. ISSN 02638223. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(92\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0263-8223(92)90016-6).
- [42] QUAN, Dong; ZHAO, Guoqun; SCARSELLI, Gennaro a ALDERLIESTEN, René. Co-curing bonding of carbon fibre/epoxy composite joints with excellent structure integrity using carbon fibre/PEEK tapes. *Composites Science and Technology*. 2022, roč. 227. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109567>.
- [43] HASAN, Zeaid; RADER, Jessica; OLSON, Alec; TURPIN, Delphine; ST ONGE, Ryan et al. Design, analysis and fabrication of thick co-cured wing structures. *Composites Part B: Engineering*. 2019, roč. 177. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107335>.
- [44] MORETTI, L.; OLIVIER, P.; CASTANIÉ, B. a BERNHART, G. Experimental study and in-situ FBG monitoring of process-induced strains during autoclave co-curing, co-bonding and secondary bonding of composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021, roč. 142. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106224>.
- [45] DHILIPKUMAR, Thulasidhas a RAJESH, Murugan. Enhancing strength and stiffness of composite joint through co-cure technique. *Composites Communications*. 2021, roč. 27. ISSN 24522139. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100878>.
- [46] KIM, Geon-Hui; CHOI, Jin-Ho a KWEON, Jin-Hwe. Manufacture and performance evaluation of the composite hat-stiffened panel. *Composite Structures*.

- 2010, roč. 92, č. 9, s. 2276-2284. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.07.019>.
- [47] LEONE, C. a GENNA, S. Effects of surface laser treatment on direct co-bonding strength of CFRP laminates. *Composite Structures*. 2018, roč. 194, s. 240-251. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.096>.
- [48] FISCHER, F.; KRELING, S.; JÄSCHKE, P.; FRAUENHOFER, M.; KRACHT, D. et al. Laser Surface Pre-Treatment of CFRP for Adhesive Bonding in Consideration of the Absorption Behaviour. *The Journal of Adhesion*. 2012, roč. 88, č. 4-6, s. 350-363. ISSN 0021-8464. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00218464.2012.660042>.
- [49] YACOBI, B.; MARTIN, S.; DAVIS, K.; HUDSON, A. a HUBERT, M. Adhesive bonding in microelectronics and photonics. *Journal of Applied Physics*. 2002, roč. 91, č. 10. ISSN 00218979. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.1467950>.
- [50] XIONG, Jian; ZHANG, Zhijing; JIN, Xin a ZHANG, Weimin. Theoretical modeling and calculation of stress fields in precision optical lens subjected to multi-point adhesive bonding assembly. *Precision Engineering*. 2022, roč. 73, s. 257-269.
- [51] GLEBOV, Alexei; LEISHER, Paul; MÜLLER, Tobias; KOTNUR VENU, Vyshak; HAAG, Sebastian et al. Strategies for precision adhesive bonding of micro-optical systems. *SPIE LASE (PW15)*. 2015, s. 93460-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2079149>.
- [52] BROQUIN, Jean-Emmanuel; NUNZI CONTI, Gualtiero; RIBES, P.; KOECHLIN, C.; BURKHARDT, T. et al. High-precision opto-mechanical lens system for space applications assembled by innovative local soldering technique. s. 97501-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2208123>.
- [53] MÜLLER, Tobias; HAAG, Sebastian; BASTUCK, Thomas; GISLER, Thomas; MOSER, Hansruedi et al. Robust adhesive precision bonding in automated assembly cells. s. 89650-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2040681>.
- [54] NIKLAUS, Frank; ENOKSSON, Peter; KÄLVESTEN, Edvard a STEMME, Göran. A method to maintain wafer alignment precision during adhesive wafer bonding. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2003, roč. 107, č. 3, s. 273-278. ISSN 09244247. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(03\)00356-X](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(03)00356-X).
- [55] LANGEHANENBERG, Patrik; HEINISCH, Josef; BUß, Christian a WILDE, Christian. High-Precision Mounted Lens Production: Directional adhesive bonding versus alignment turning. *Optik&Photonik*. č. 22014.
- [56] RENART, J.; COSTA, J.; SARRADO, C.; BUDHE, S.; TURON, A. et al. Mode I fatigue behaviour and fracture of adhesively-bonded fibre-reinforced polymer (FRP) composite joints for structural repairs. *Fatigue and Fracture of Adhesively-*

Bonded Composite Joints. 2015, s. 121-147. ISBN 9780857098061. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-806-1.00005-7>.

- [57] WEGNER, Jürgen. *Strategic Solutions: The Future of Adhesives and Sealants: The 21st century will be characterized by chemical joining and bonding*. 2015.
- [58] *CONTURA® G2 Specifications*. online. Carl Zeiss India Pvt. Ltd. Industrial Metrology Business Group, 2016. Dostupné z: <https://5.imimg.com/data5/SELLER/Doc/2020/10/IO/QE/OS/50240193/7-zeiss-contura-g2-coordinate-measuring-machine.pdf>. [cit. 2022-08-28].
- [59] *Jenoptik Formline - Roundness Measurment*. online. Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH, 2016. Dostupné z: https://www.jenoptik.cz/files/products-en/roundness-measurement/roundness-measurement_10064360_12_2016_en.pdf. [cit. 2022-08-28].
- [60] KUPČÁK, Radim; ZOUHAR, Jan a GREGOR, Lukáš. Precision Bonding of CFRP Parts with Application in Sport Optics. *Polymer Composites*. roč. 2021.
- [61] INSTITUT BIostatistiky a analýz Lékařské fakulty Masarykovy univerzity, . *Výpočet Pearsonova korelačního koeficientu*. online. In: . [cit. 2024-09-01].
- [62] INSTITUT BIostatistiky a analýz Lékařské fakulty Masarykovy univerzity, . *Test hypotézy o nulové korelaci dvou náhodných veličin*. online. In: . [cit. 2024-09-01].
- [63] GURIT, . *Spabond™ 445 datasheet*. online. In: . 2022. [cit. 2024-08-28].

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno a příjmení	Radim Kupčák
Datum narození	22.7.1994
Email:	Radim.Kupcak@vutbr.cz

Vzdělání

Gymnázium Olomouc Hejčín

2007 – 2014

Vysoké učení technické

Fakulta strojního inženýrství – Základy strojního inženýrství

Bakalářský studijní program

Téma bakalářské práce: Modifikace uložení klik na jízdním kole

2014 – 2017

Vysoké učení technické

Fakulta strojního inženýrství – Strojírenská technologie

Magisterský studijní program

Téma diplomové práce: Využití kompozitních materiálů pro konstrukci sportovní optiky

2017-2019

Vysoké učení technické

Fakulta strojního inženýrství – Strojírenská technologie

Doktorský studijní program

2019-současnost

PUBLIKACE AUTORA

Články ve vědeckém časopise indexovaném v databázi Scopus

KUPČÁK, R.; ZOUHAR, J.; VILIŠ, J.; GREGOR, L.; HRUŠECKÁ, D. Precision and Dimensional Stability of Bonded Joints of Carbon-Fibre-Reinforced Polymers Parts. *Applied Sciences - Basel*, 2023, vol. 13, no. 18, ISSN: 2076-3417.

KUPČÁK, R.; ZOUHAR, J. Application of composite materials in sports optics. *Manufacturing TECHNOLOGY*, 2020, roč. 20, č. 2, s. 200-209. ISSN: 1213-2489.

Příspěvky na konferencích v databázi WoS:

GREGOR, L.; ZOUHAR, J.; KUPČÁK, R.; VARHANÍK, M.; SEDLÁK, J. Design and stiffness Distribution analysis of motorcycle swingarm made of carbon fiber composites. In *ENGINEERING MECHANICS 2020*. 2020. Brno: Brno University of Technology, 2020. s. 162-165. ISBN: 978-80-214-5896-3.

Příspěvky na mezinárodních konferencích:

KUPČÁK, R.; ZOUHAR, J.; GREGOR, L. Precision and Dimensional Stability of Bonded Joints of CFRP Parts. *Polymer Composites 2023 - proceedings*. First. Prague: Czech Technical University in Prague, 2023. p. 28-33. ISBN: 978-80-01-07151-9.

KUPČÁK, R.; ZOUHAR, J.; GREGOR, L. Precision Bonding of CFRP Parts With Application In Sport Optics. *Polymer Composites 2021 - Proceedings*. First. Prague: Czech Technical University in Prague, 2021. s. 29-34. ISBN: 978-80-01-06897-7.

GREGOR, L.; ZOUHAR, J.; MÍŠA, J.; KUPČÁK, R.; SEDLÁK, J. Design and validation of motorcycle single side swingarm made of CFRP using photogrammetry. *Polymer Composites 2021 - Proceedings*. First. Prague: Czech technical University in Prague, 2021. s. 12-17. ISBN: 978-80-01-06897-7.

KUPČÁK, R.; ZOUHAR, J.; JANDA, J. Application of composite materials in sports optics. In *TRANSFER 2019*. 2019. Trenčín: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíně, 2019. s. 105-116. ISBN: 978-80-8075-889-9.

ABSTRAKT

Tato dizertační práce se zabývá zkoumáním využití kompozitních materiálů v konstrukci optických přístrojů. Rešeršní část se zaměřuje na výběr vhodného referenčního optického přístroje jako vzoru pro technologický vzorek, včetně specifikace zkušebních parametrů a volby technologie výroby kompozitů s ohledem na specifické požadavky optických přístrojů. Analýza vědeckého poznání zahrnuje témata jako přesnost výroby, rozměrová stabilita, procesy lepení kompozitů a jejich využití v čistém prostředí. Experimentální část práce obsahuje návrh metodiky klimatických a mechanických zkoušek, kterým byly podrobeny tři typy technologických vzorků (Vzorů A, B a C). Hlavním cílem bylo zkoumat výrobní přesnost a rozměrovou stabilitu lepených spojů během těchto zkoušek, přičemž ve finálních fázích bylo použito epoxidové lepidlo Spabond 445. Výsledky ukazují, že technologií přesného lepení lze dosáhnout přesnosti do 0,05 mm, pro vyšší přesnost je nezbytné výrobky obrábět po lepení. V environmentálních podmínkách, jak jsou definovány pro sportovní optiku lze dosáhnout rozměrové stability v rozmezí 0,01 mm až 0,02 mm. Na základě doplňkových měření teploty skelného přechodu, analýzy zbytkového napětí a vnitřní struktury lepeného spoje bylo potvrzeno, že je klíčové vybírat lepidlo s vyšší teplotou skelného přechodu, než jsou provozní teploty, provádět post-cure a před aplikací lepidlo odplynit.

ABSTRACT

This doctoral thesis investigates the use of composite materials in the construction of optical instruments. The literature review focuses on selecting a reference optical device as a model for the technological prototype, specifying testing parameters, and choosing manufacturing technologies suitable for optical applications. Key topics include manufacturing precision, dimensional stability, bonding processes, and the use of composites in clean environments. The experimental section outlines the methodology for climate and mechanical testing on three types of samples (Samples A, B, and C), aiming to assess the manufacturing precision and dimensional stability of bonded joints, with epoxy adhesive Spabond 445 used in the final stages. Results show that precision bonding can achieve accuracy within 0.05 mm, with higher precision requiring post-bonding machining. In sports optics, dimensional stability within 0.01 mm to 0.02 mm can be achieved. Supplementary measurements of glass transition temperature, residual stress analysis, and internal joint structure confirm the importance of selecting adhesives with higher glass transition temperatures than operating conditions, conducting post-cure, and degassing adhesives prior to application.