



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI SPORTOVNÍ OPTIKY

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS FOR SPORT OPTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Kupčák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Radim Kupčák
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití kompozitních materiálů pro konstrukci sportovní optiky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na konstrukci optických přístrojů jsou kladeny stále větší nároky z hlediska přesnosti, trvanlivosti a estetických vlastností. Z tohoto důvodu jsou vyvíjeny stále nové postupy a materiály výrobků, jednou z cest je i využití kompozitů zejména s uhlíkovými vlákny, které jsou vhodné pro tyto aplikace.

Cíle diplomové práce:

1. Přehled kompozitních materiálů a jejich parametrů.
2. Technologie výroby a dalšího zpracování kompozitních materiálů.
3. Použití kompozitních materiálů pro konstrukci dané součásti.
4. Návrh technologie výroby a zpracování na dané součásti.

Seznam doporučené literatury:

CAMPBELL, F. C. ASM INTERNATIONAL. Structural Composite Materials. Materials Park: A S M International, 2010. ISBN 9781615030378.

Composite materials handbook. Volume 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. USA: SAE International on behalf of CMH-17, a division of Wichita State University, 2012. 700 s. ISBN 978-0-7680-7811-4.

BOGOLJUBOV, N. N. Composite Manufacturing Technology. London: Chapman & Hall, 1995. 433 s.

MALLICK, P. K. Composites engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 1997. 1249 s. ISBN 0-8247-9304-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

První část této diplomové práce se věnuje rešerši kompozitních materiálů se zaměřením na kompozitní materiály s uhlíkovými vlákny. V návaznosti na tuto část poskytuje přehled jednotlivých výrobních technologií kompozitních materiálů. Zaměřuje se na technologii využívající prepregy. Praktická část se věnuje aplikaci kompozitních materiálů na poli sportovní optiky. Součástí diplomové práce je návrh a výroba technologického vzorku optického přístroje pomocí technologie ručního kladení prepregu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozitní materiál, uhlíková vlákna, karbon, prepreg, sportovní optika

ABSTRACT

In Its first half this master's thesis describes composite materials with carbon fiber reinforced plastics being the main focus point. An overview of production technologies follows. The major objective of the second part of this master's thesis is to design and manufacture a simplified model of an optical device using prepregs.

KEY WORDS

Composite material, carbon fiber, prepreg, sports optics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUPČÁK, Radim. Využití kompozitních materiálů pro konstrukci sportovní optiky. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 59 stran, 5 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Zouhar, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Využití kompozitních materiálů pro konstrukci sportovní optiky vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu použité literatury.

Datum

Radim Kupčák

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji všem, kteří mi byli při zpracování této diplomové práce nápomocní.

Především děkuji vedoucímu práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji zaměstnancům společnosti Meopta - optika, s.r.o., kteří se podíleli na této diplomové práci. Především Ing. Jiřímu Vlkovi, který byl konzultantem a vedoucím práce ze strany Meopty a Ing. Liboru Dočkalovi za pomoc, ochotu a odborné rady.

V neposlední řadě patří díky mé rodině a blízkým za psychickou podporu.

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 PŘEHLED KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	9
1.1 Složení kompozitních materiálů	9
1.2 Mechanika kompozitů	10
1.2.1 Paradoxy kompozitních materiálů	10
1.2.2 Mechanické vlastnosti kompozitů.....	11
1.2.3 Mechanika kompozitů.....	15
1.3 Používaná vlákna.....	16
1.3.1 Skelná vlákna.....	17
1.3.2 Uhlíková a grafitová vlákna	18
1.4 Používané matrice.....	20
1.4.1 Epoxidové pryskyřice.....	20
1.5 Porovnání kompozitních materiálů s kovy	22
1.6 Technologie výroby kompozitních materiálů.....	23
1.6.1 Mokré kladení	23
1.6.2 Kladení prepregů.....	24
1.6.3 Infuze.....	25
1.6.4 Navíjení.....	27
2 SOUČASNÁ SITUACE PROPOJENÍ KARBONU A SPORTOVNÍ STŘELBY/OPTIKY	28
3 MOTIVACE PRO POUŽITÍ KARBONU VE SPORTOVNÍ OPTICE	31
4 APLIKACE KOMPOZITU VE SPORTOVNÍ OPTICE	33
4.1 Konstrukce binokuláru	33
4.2 Technologický vzorek	34
4.3 Volba technologie výroby vzorku	35
4.4 Laminace 0 – zkušební díl.....	36
4.4.1 První díl – stator – negativní forma.....	36
4.4.2 Druhý díl – pozitivní forma.....	38
4.5 Návrh a výroba formy.....	38
4.6 Návrh a výroba vložek	40
4.7 Laminace 1 – do formy.....	41
4.7.1 Laminace	41
4.7.2 Vytvrzení a vyjmutí z formy.....	42
4.7.3 Začištění tubusu	44
4.7.4 Vlepení vložek	44

4.8	Laminace 2 – na jádro	45
4.9	Laminace 3 – nové jádro	46
4.10	Laminace 4 – silikonové jádro	46
4.11	Testování vzorku	46
4.12	Model binokuláru	47
5	DISKUSE.....	48
5.1	Ekonomické zhodnocení	48
5.2	Další postup s technologickým vzorkem	48
5.3	Další postup v karbonizaci binokuláru	49
	ZÁVĚR	51
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	52

ÚVOD

Kompozitní materiály se stávají čím dál dostupnější. Je to způsobeno novými technologiemi, které mají potenciál výrobu výrazně zlevnit a zpřístupnit. Na špičce využití kompozitů byly vždy kosmický a letecký průmysl. Postupně pak technologie pronikly do automobilového průmyslu, lodářského průmyslu nebo do výroby sportovních potřeb.

Tato hierarchie je zachována i dnes, daleko více však nalézají kompozity využití u produktů určených pro běžné spotřebitele. Tuto situaci lze pozorovat např. v automobilovém průmyslu. Už dávno neplatí, že karbonovými díly jsou osazeny jen ty nejluxusnější supersporty. Kromě BMW, které se řadí k luxusnějším značkám automobilů, plánuje ve velkém využívat karbon např. Renault u své dceřiné společnosti Dacia. Od technologie QSP[®] založené na automatizaci lisování za tepla si Dacie slibuje významné snížení hmotnosti, což by umožnilo používat menší motory s nižší spotřebou. I díky implementaci podobných technologií roste každoročně produkce uhlíkových vláken o 10 %. [1]

Impulzem pro volbu tématu bylo kromě atraktivity tohoto moderního materiálu autorovo působení ve firmě Meopta - optika, s.r.o., ve které se stal součástí týmu konstruktérů vyvíjející produkty sportovní optiky. Spolupráce se společností na diplomové práci se jevila jako optimální spojení studijního a profesního života, a to i díky tomu, že je Meopta nakloněna spolupráci se studenty, ať už strojírenských nebo optických oborů.

Téma zaměřené na aplikaci kompozitů ve sportovní optice bylo podpořené zájmem ředitele vývoje Meopty Ing. Jiřího Vlka o tento technologický směr a jeho využití ve sportovní optice. V Meoptě totiž byly kompozity úspěšně aplikovány při výrobě produktů industriální optiky, jejich propojení se sportovní optikou však ještě neproběhlo. V posledních letech navíc probíhala úzká spolupráce mezi Meoptou a sušickou firmou specializující se na navíjení uhlíkových vláken Compotech Plus spol. s r.o. V počátcích diplomové práce tedy bylo na čem stavět.

Díky vedoucímu této diplomové práce Ing. Janu Zouharovi Ph.D. se naskytlá příležitost využít odlišnou technologii výroby karbonu. Doktor Zouhar je odborný asistent na VUT FSI, a zároveň působí ve firmě MSR Engines s.r.o. Ta se zabývá výrobou kompozitních dílů technologií ručního kladení prepregů. Tato technologie byla zvolena i pro výrobu technologického vzorku v rámci praktické části této diplomové práce.

Hlavním cílem této diplomové práce je prozkoumat možnosti propojení sportovní optiky s technologiemi kompozitních materiálů. To je provedeno návrhem a výrobou technologického vzorku s ohledem na hlavní konstrukční uzly optického přístroje. Výstupem by mělo být připravení půdy pro budoucí implementaci kompozitů, především karbonu.

Použití tohoto materiálu ve sportovní optice by mohlo mimo jiné přinést:

- redukci hmotnosti
- vyšší atraktivitu pro zákazníky
- teplotní stálost rozměrnějších přístrojů

1 PŘEHLED KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

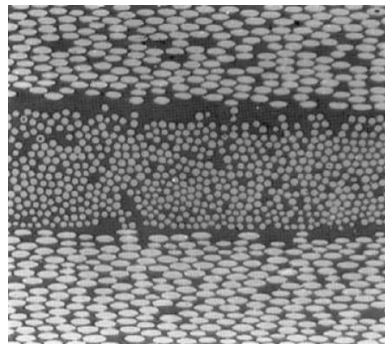
Hlavním cílem této části rešerše je seznámit čtenáře s přehledem kompozitních materiálů se zaměřením na materiály a technologie, které by byly vhodné pro aplikaci na sportovní optiku.

Kompozitní materiály, zkráceně kompozity, jsou tvořeny dvěma složkami, které lze rozeznat pouhým okem. Většinou jsou kompozity tvořeny výztuží a matricí. Podle tvaru výztuže se kompozity dělí na částicové a vláknové. Vícevrstvé vláknové kompozity se označují jako lamináty. Tato práce se zaměřuje především na uhlíko-vláknové kompozity (CFRP), neboli karbon. [2]

Hlavní rozdíl laminátů oproti klasickým materiálům (kovy, polymery) je jejich anizotropní chování. Jejich mechanické vlastnosti jsou určeny orientací vláken a lamináty se chovají odlišně při zatěžování ve směru vláken nebo kolmo na ně. Při vhodném použití laminátu jako konstrukčního materiálu lze díky těmto vlastnostem v některých případech docílit snížení hmotnosti při zachování, nebo i zvýšení pevnosti dílu.

1.1 Složení kompozitních materiálů

Samotná vlákna, neboli výztuž, mají výborné mechanické vlastnosti v tahu. Tkanina nebo roving vláken nelze použít jako konstrukční materiál, protože nepřenáší tlakové napětí a nedrží stálý tvar. Proto je vlákna nutné zkombinovat s matricí – výplní. U laminátů se nejčastěji používají polymerní matrice. Obr. 1 zobrazuje řez uhlíko-polymerním laminátem. Je patrný rozdíl ve tvaru řezu vláknů kolmo a pod úhlem.



Obr. 1: Řez laminátem [3].

Funkce vláken/výztuže

- nesou zatížení
- zajišťují vysokou pevnost a tuhost kompozitu – mají vyztužující účinek
- dlouhá vlákna mají významnější vyztužující účinek než krátká vlákna [4]

Funkce matrice/výplně

- drží vlákna pohromadě, zajišťuje tvarovou stálost výrobku
- přenáší vnější namáhání na vlákna
- chrání vlákna před vnějšími vlivy – abrazivní poškození, vlivy prostředí, vlhkost
- také má vliv na vlastnosti kompozitu (teplotní a chemická odolnost, odolnost proti stárnutí, elektrické vlastnosti, smrštění při vytvrzování) [4]

1.2 Mechanika kompozitů

Nejčastěji používané konstrukční materiály ve strojírenství jsou kovy. Kompozity vykazují velmi odlišné mechanické vlastnosti a podstatu výhodnosti laminátů shrnují tzv. paradoxy kompozitních materiálů.

1.2.1 Paradoxy kompozitních materiálů

Paradox vláknité struktury

Vlákno je mnohonásobně pevnější než kompaktní hmota. Je to způsobeno tím, že vlákno o malém průřezu obsahuje méně materiálových vad než kompaktní hmota. Další faktor je, že vlákna s menším průřezem mají při stejném celkovém objemu vláken větší povrch a tím větší plochu pro kontakt s matricí. Je tedy výhodné mít vlákna o co nejmenším průměru. [2] [4]

Paradox délky zatížení

Principiálně je podobný, jako předchozí paradox. Uvádí, že kratší vlákna mají vyšší pevnost než vlákna dlouhá. V dlouhých vláknech je vyšší pravděpodobnost výskytu materiálových vad. Rozhodující však není celková délka vlákna, ale zatěžovaná délka. V případě, že jsou vlákna rovnoměrně smáčena matricí, je zatěžovaná délka velmi malá – modelově to lze zjednodušit na vlákno upnuté na mnoha místech své délky, v ideálním případě na nekonečně mnoho místech. [2]

Paradox kompozitního materiálu

Konstatuje, že kompozitní materiál snese větší tahové zatížení, než by snesly jeho složky odděleně. Jeho platnost je důsledkem předešlých dvou paradoxů a toho, že matrice napětí rovnoměrně distribuuje mezi vlákny. [2]

Podmínky vyztužujícího účinku

Nelze zkombinovat vlákna a matrice o libovolných mechanických vlastnostech. Pro správnou funkci kompozitu musejí být dodrženy tyto podmínky [2].

- vlákna výtzuže mají vyšší mez pevnosti, než matrice

$$\sigma_{fiberP} > \sigma_{matrixP} \quad (1)$$

- vlákna výtzuže mají vyšší Youngův modul pružnosti v tahu, než matrice

$$E_{fiber} > E_{matrix} \quad (2)$$

- matrice má větší mezní prodloužení, než vlákno

$$\varepsilon_{matrixP} > \varepsilon_{fiberP} \quad (3)$$

1.2.2 Mechanické vlastnosti kompozitů

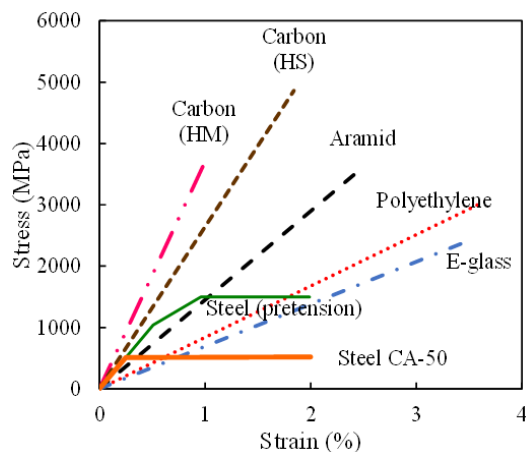
Anizotropie

Důvodem anizotropního chování je, že kompozitní materiály jsou tvořeny dvěma složkami. Hlavní faktor ovlivňující mechanické vlastnosti je orientace vyztužujících vláken. Podobně jako u dřeva jsou kompozity ve směru vláken mnohem silnější než kolmo na ně.

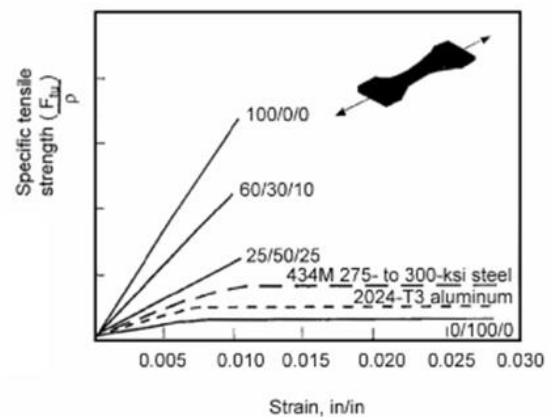
Pro využití plného potenciálu kompozitního materiálu je tedy nutné konstruovat součásti tak, aby směr vláken souhlasil se směrem zatížení. Jak se kompozit chová při tahovém zatížení ve směru vláken dokládá tahová zkouška jednosměrného kompozitu.

Tahová zkouška ve směru vláken

Jednosměrně vyztužený uhlíkový kompozit vykazuje elastickou deformaci až do bodu selhání. Plastická oblast zcela chybí. Při selhání dojde k náhlé delaminaci – oddělení jednotlivých vrstev a křehkému lomu vláken. [4]

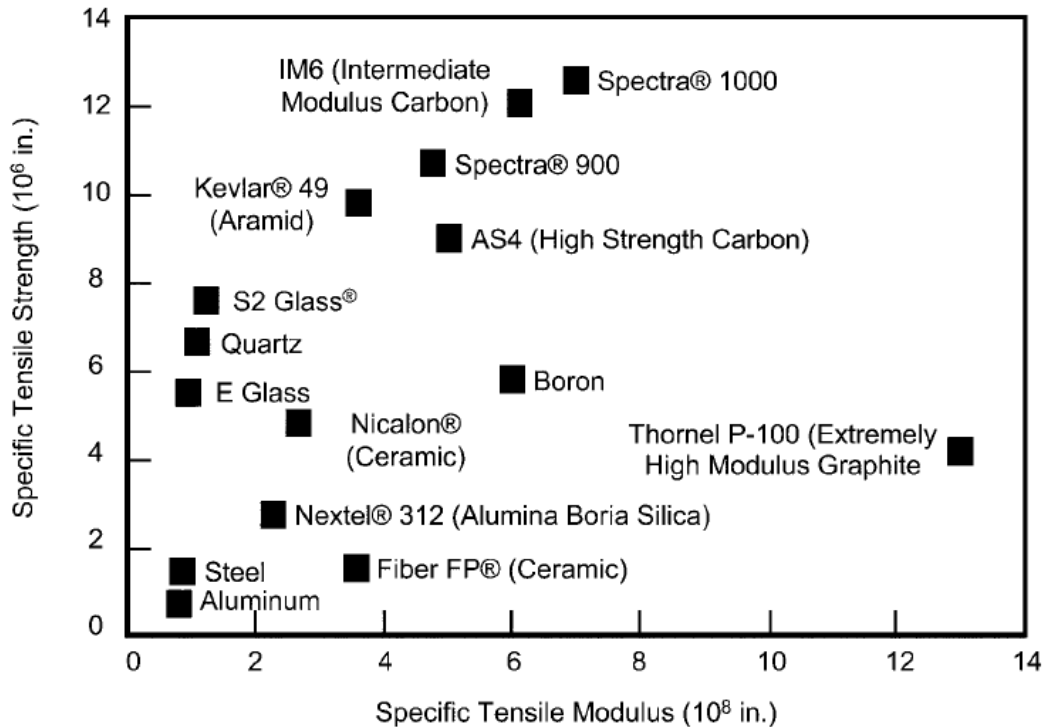


Obr. 2: Srovnání napětově deformačních charakteristik. [5]



Obr. 3: Poměrná tuhost v závislosti na deformaci. [4]

Při tahové zkoušce platí Hookův zákon, avšak získaná hodnota Youngova modulu pružnosti platí pouze pro tento směr zatěžování. Je však nutné připomenout, že mez pevnosti i Youngův modul pružnosti uhlíkového kompozitu závisí na mnoha faktorech (konkrétní typ vláken, pryskyřice, procento prosycení). Vyobrazené grafy slouží pouze pro uvedení čtenáře do obrazu. Obecně však lze říct, že uhlíkové kompozity nedosahují takového Youngova modulu jako oceli (Obr. 2), mají však o něco vyšší modul než slitiny hliníku. Z těchto parametrů se CFRP může zdát jako nijak zvlášť výhodný konstrukční materiál, ale z pohledu poměrných pevností (Obr. 3) a tuhostí dosahují mnohonásobně vyšších hodnot než kovové konstrukční materiály (Obr. 4). [2] [4]



Obr. 4: Srovnání poměrných tuhostí a poměrných pevností v tahu vybraných materiálů. [3]

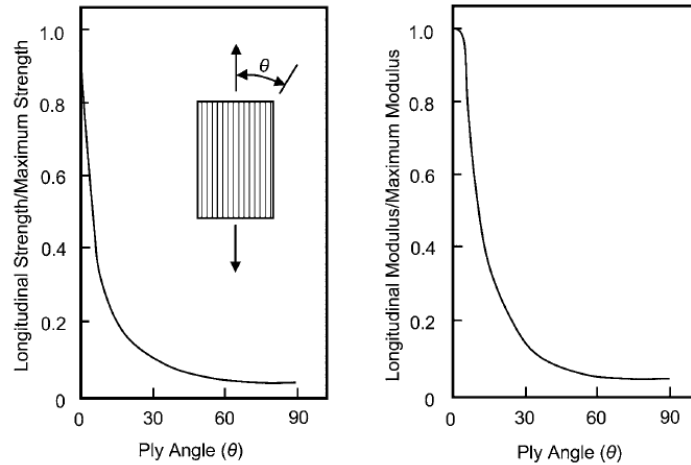
Velmi nevýhodný stav pro jednosměrně vyztužené kompozity je zatěžování kolmo na vlákna. Při tomto zatěžování totiž veškerá pevnost materiálu závisí na pevnosti matrice a vlákna se chovají jako strukturální vruby. Proto má kompozit kolmo na vlákna nižší pevnost, než by měla samotná matrice.

V reálných podmínkách však tyto dva extrémů zřídka kdy nastávají. Většinou je potřeba, aby součásti byly schopné přenášet napětí ve více směrech. Proto se jednosměrné lamináty vrství pod různými úhly, nebo se používají tkaniny.

Závislost Youngova modulu na úhlu vlákna

Jak závisí modul pružnosti na úhlu vláken jednosměrně vyztuženého kompozitu popisuje následující grafy (Obr. 5). Na nich je vidět, že kompozit má cca 13x vyšší tuhost ve směru vláken než kolmo na vlákna. Při odchýlení o 10° od směru vláken klesne tuhost cca o třetinu. Pod úhlem 45° už je tuhost jen o 50 % vyšší než kolmo na vlákna. Co se týče pevnosti, tak ta s odchylkou úhlu roste ještě rychleji. [3] [4]

Z toho plyne, že u výkonnostních aplikací je přesnost orientace vláken naprosto kritická. Takové podmínky mnohdy nelze spolehlivě dodržet při ručních metodách výroby kompozitních materiálů. V takovýchto případech jsou vhodné automatizované technologie, např. navíjení. [6]

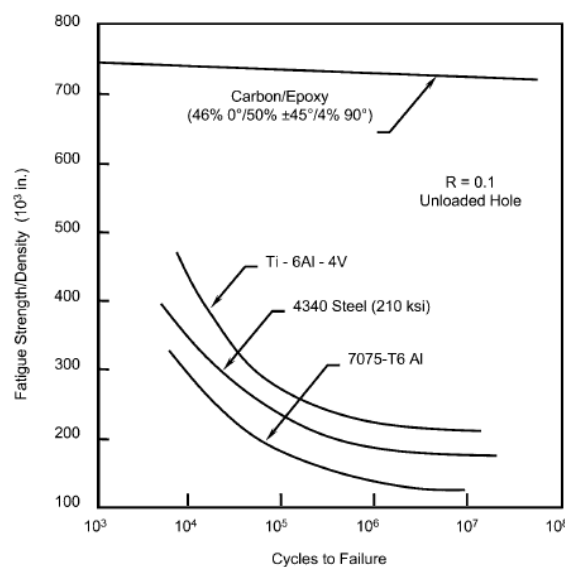


Obr. 5: Závislost tuhosti a mezi pevnosti na úhlu zatížení. [3]

Únavové chování laminátu

Kompozitní materiály vykazují nadprůměrné vlastnosti i při únavovém namáhání. Hliníkové slitiny jsou náchylné k šíření únavových trhlin, proto je jejich mez únavy jen 20 % hodnoty meze pevnosti. Uhlíkový kompozit má při cyklickém tahovém namáhání mez únavy 95 % mezi pevnosti (Obr. 6). Tato vysoká odolnost je dána tím, že při porušení vlákna vznikne trhlinka v pryskyřici, která se nešíří dále na ostatní vlákna. Výše popsaná charakteristika však platí pouze pro míjivé nebo tepavé cykly. U střídavých zatěžovacích cyklů (střídání tahu a tlaku) je mez únavy cca jen 50 % meze pevnosti. [4]

Obecně je výhodné kompozitní součástky konstruovat tak, aby byla vlákna zatěžována na tah, protože při tlakovém namáhání mají vlákna tendenci selhat v režimu ztráty vzpěrné stability a tím pádem pevnost kompozitu závisí víc na pevnosti matrice než při tahovém zatížení.

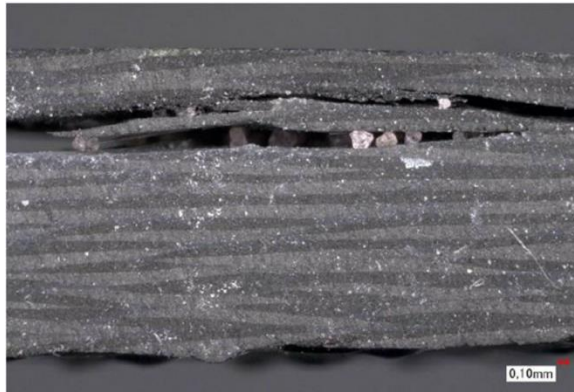


Obr. 6: Porovnání meze únavy karbonu a kovových materiálů. [3]

Delaminace

Tímto termínem je označováno oddělení jednotlivých vrstev laminátu (Obr. 7). Jedná se o nejčastější způsob porušení kompozitu, především proto, že matrice má cca 100x menší pevnost než vlákna, takže je slabým místem laminátu. Proto je při konstrukci vždy nutné dbát na to, aby součást nebyla s ohledem na zatížení náchylná k delaminaci viz.

Delaminace je hlavní důvod selhání materiálu i při tahové zkoušce, torzní zkoušce, impaktu, únavovém selhání atd. Delaminace vznikne spojením mnoha malých trhlin v pryskyřici.



Obr. 7: Delaminace. [7]

Reakce kompozitu na okolní prostředí

Teplota

Jednotlivé složky kompozitního materiálu mají rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti (uhlíková vlákna mají koeficient délkové roztažnosti téměř nulový), tím pádem vzniká zbytkové napětí a laminát se deformuje. [4]

Na zkroucení jsou citlivé především lamináty, které nejsou jednosměrné, protože různě směřované vrstvy působí proti sobě. Proto je potřeba navrhovat lamináty tak, aby jejich list skladby byl symetrický a balancovaný (měl stejný počet $\pm 45^\circ$ vrstev). [4]

UV záření

Pryskyřice používané jako matrice u kompozitů jsou náchylné na poškození UV zářením. Jejich odolnost lze zvýšit např. UV odolnými laky.

Galvanická koroze

Kompozitní materiály nepodléhají korozi, ale při kontaktu s hliníkovými slitinami, hořčíkovými slitinami nebo ocelmi může dojít ke galvanické korozi, obzvláště ve slaném prostředí. Součásti se chovají jako galvanický článek. [8]

Galvanické korozi lze zabránit eloxováním hliníkových součástí nebo použitím vložky ze skelných vláken jako izolace. [9]

Vlhkost

Uhlíková vlákna jsou hydrofilní, proto je důležité, aby byla vlákna od okolního prostředí ochráněna vrstvou epoxidu.

1.2.3 Mechanika kompozitů

Kompozitní materiály jsou velmi náročné na tvorbu výpočtových modelů. Podle toho, jaká je elementární jednotka výpočtu, se mechanika kompozitů dělí na:

- mikromechanika (základní jednotka je vlákno)
- mezomechanika (základní jednotka je roving - pramenec)
- makromechanika (základní jednotka je vrstva laminátu)

Při navrhování tvarově komplexnějších součástí mají analytické výpočty jen omezený význam, a to především kvůli obtížnosti nadefinovat okrajové podmínky a všechny materiálové konstanty. V této kapitole jsou zmíněny základní výpočty mikromechaniky. V této kapitole čerpal autor ze

Pro vlákno v matici platí, že poměrná deformace ve směru vlákna ε_{fiber} je stejná jako poměrná deformace matrice ε_{matrix} .

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon_{matrix} = \varepsilon_{fiber} \quad (4)$$

Z této podmínky a Hookova zákona pak vychází, že poměr napětí v matici a ve vláknu odpovídá poměru jejich tuhostí, tedy Youngových modulů pružnosti (za předpokladu shodných Poissonových čísel):

$$\frac{\sigma_{fiber}}{\sigma_{matrix}} = \frac{E_{fiber}}{E_{matrix}} \quad (5)$$

Pro pevnostní výpočty se používá poměrný objemový obsah vláken φ_{fiber} , protože napětí a modul pružnosti jsou veličiny vztažené k ploše, která je v případě vláken přímo úměrná objemu:

$$\varphi_{fiber} = \frac{V_{fiber}}{V_{composite}} \quad (6)$$

Při výrobě se používá hmotnostní podíl vláken ψ_{fiber} , protože se komponenty hodnotí zvážením s pryskyřicí a bez ní.

$$\psi_{fiber} = \frac{m_{fiber}}{m_{composite}} \quad (7)$$

Vztah mezi objemovým podílem φ_{fiber} a hmotnostním podílem ψ_{fiber} je pak:

$$\varphi_{fiber} = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi_{fiber}}{\psi_{fiber}} \cdot \frac{\rho_{fiber}}{\rho_{matrix}}} \quad (8)$$

Pomocí objemového podílu φ_{fiber} lze vyjádřit modul pružnosti $E_{composite}$ ve směru vláken celého elementu kompozitu (vlákno v matici) a mez pevnosti $\sigma_{Pcomposite}$ ve směru vláken, tento vztah se nazývá pravidlo směsí:

$$E_{composite} = E_{fiber} \cdot \varphi_{fiber} + E_{matrix} \cdot (1 - \varphi_{fiber}) = E_{fiber} \cdot \varphi_{fiber} + E_{matrix} \cdot \varphi_{matrix} \quad (9)$$

$$\sigma_{Pcomposite} = \sigma_{Pfiber} \cdot \varphi_{fiber} + \sigma_{Pmatrix} \cdot (1 - \varphi_{fiber}) = \sigma_{Pfiber} \cdot \varphi_{fiber} + \sigma_{Pmatrix} \cdot \varphi_{matrix} \quad (10)$$

Celková pevnost a tuhost je však určována především vlákny (hodnoty koeficientů matrice jsou velmi malé), proto lze při výpočtu zanedbat členy popisující matici a zjednodušeně psát:

$$E_{composite} = E_{fiber} \cdot \varphi_{fiber} \quad (11)$$

$$\sigma_{Pcomposite} = \sigma_{Pfiber} \cdot \varphi_{fiber} \quad (12)$$

1.3 Používaná vlákna

Ačkoliv hlavním zaměřením této diplomové práce jsou kompozity s uhlíkovými vlákny - CFRP, byla by chyba opomenout ostatní kompozitní materiály. Nedá se totiž říci, že by ze všech kompozitních materiálů byly CFRP vždy ta jediná/nejllepší volba.

Mezi vlákna používaná, jako výztuž kompozitů patří [2] [10]:

- vlákna na bázi uhlíku
 - uhlíková vlákna
 - vysoká tuhost a pevnost
 - poměrně dobře se s nimi pracuje
 - vlákna jsou anizotropní, hydrofilní
 - skelná vlákna
 - vysoká pevnost, nižší tuhost
 - pracuje se s nimi hůř, než s uhlíkovými
 - vlákna jsou izotropní
 - aramidová vlákna
 - dobré tlumící vlastnosti
 - nejnižší hustota z vyztužujících vláken
 - anizotropní, silně hydrofilní
 - nízká pevnost v tlaku
 - Dyneema® vlákna [11]
 - polyethylenová vlákna
 - vysoká pevnost, houževnatost a odolnost proti impaktu abrazi
 - používá se pro tkaniny v kombinaci s karbonem
 - další použití je výroba vysokopevnostních lan
 - Innegra™ vlákna [12]
 - polypropylenové vlákno
 - podobné mechanické vlastnosti jako Dyneema®: odolnost proti nárazu, pevnost a houževnatost
 - využívá se pro zvýšení odolnosti karbonu
 - bazaltová vlákna (čedičová vlákna)
 - nehořlavé a chemicky odolné
 - používá se ve stavebnictví
 - ve strojírenství je lze najít v brzdových destičkách, používá se jako tepelná izolace
 - přírodní vlákna na základě celulózy
 - lněná vlákna
 - konopná vlákna
 - jutová vlákna

Kromě toho, že vyztužující vlákna mohou být z různých materiálů popsaných v této kapitole, mohou být i různě uspořádána. Téměř nikdy se při výrobě kompozitů nepoužívají jednotlivá vlákna.

Nejčastější typy výztuží jsou [2]:

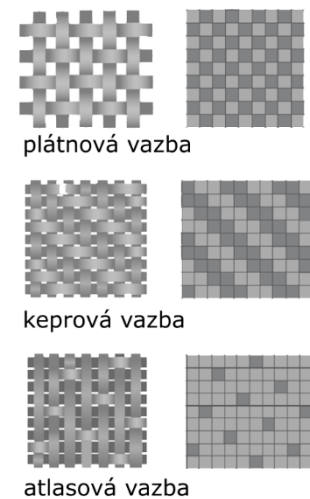
- rovingy (pramence) (Obr. 8)
- towy (pletence)
- netkané rohože (Obr. 9)
- jednosměrné pásy
- tkaniny (Obr. 10)
 - plátnová vazba
 - keprová vazba
 - atlasová vazba
- trojrozměrné tkaniny



Obr. 8: Uhlíkový roving. [13]



Obr. 9: Skelná netkaná rohož. [14]



Obr. 10: Typy tkanin: upraveno dle [15]

1.3.1 Skelná vlákna

Mezi nepoužívanější vyztužující vlákna patří skelná vlákna. Ty se vyrábějí tažením roztavené skloviny, jejich hlavní složkou je SiO_2 . Dva nejrozšířenější typy skelných vláken jsou [2] [4]:

- E-Glass (Electrical glass)
 - Nejčastěji používané
 - Dobré mechanické vlastnosti
 - Dobré elektrické vlastnosti
 - Nižší koeficient roztažnosti než většina konstrukčních materiálů
- S-Glass (High strength glass)
 - Dražší než E-Glass
 - Vyšší modul pružnosti, více odolné proti teplotním vlivům
 - Lepší vlastnosti než E-Glass, protože má více SiO_2
 - Nižší tuhost než uhlíková vlákna, ale srovnatelná pevnost

1.3.2 Uhlíková a grafitová vlákna

Ve většině výkonnostních aplikací kompozitních materiálů narazíme na uhlíková vlákna, mnohdy ve formě tkaniny (Obr. 11). Jako první našly využití v kosmickém a leteckém průmyslu, následoval motorsport a další odvětví. Dnes jsou uhlíková vlákna běžně používána v automotive, cyklistice, jachtařském průmyslu, výrobě lyžařských hůlek a jiných sportovních potřeb. Celosvětová produkce uhlíkových vláken roste každoročně o 10 %. [1]



Obr. 11: Uhlíková tkanina. [16]

Rozměry jednotlivých uhlíkových vláken se běžně pohybují okolo 5 až 10 mikrometrů. Je pro ně charakteristická nízká hustota (cca 60 % hustoty hliníku), vysoká pevnost, malá tažnost a progresivní deformační chování. To znamená, že s rostoucím zatížením zpevňují – roste jejich Youngův modul pružnosti. [2] [4]

Vysoká pevnost vláken je dána kovalentními vazbami, které drží atomy uhlíku pohromadě. Vlákna však nejsou izotropní. Kovalentní vazby působí v axiálním směru vláken, kolmo na ně působí slabé Van der Waalsovy síly. Anizotropie se projevuje i u hodnot délkové teplotní roztažnosti, v axiálním směru je mírně záporná, ve směru kolmém je kladná. Vlákna jsou hydrofilní a silně abrazivní. [2]

Existuje několik typů uhlíkových/grafitových vláken. Ty se liší mechanickými vlastnostmi, které jsou dány způsobem výroby a polotovarem. Podobně jako v jiných odvětvích průmyslu, i zde jsou rozšířena různá marketingová označení, která mnohdy vnášejí do terminologie více nejasností než užitku. Ne všechna vlákna, jejichž hlavní složkou je uhlík, se totiž nazývají uhlíková. [17]

Uhlíková vlákna (PAN)

Drtivá většina CFRP využívá PAN uhlíková vlákna. To jsou vlákna, která jsou vyráběna několikastupňovým tepelným zpracováním (oxidací, karbonizací a případnou grafitizací) polyakrylnitrilových vláken – zkráceně PAN. [3]

PAN vlákna se dělí dle mechanických vlastností [2]:

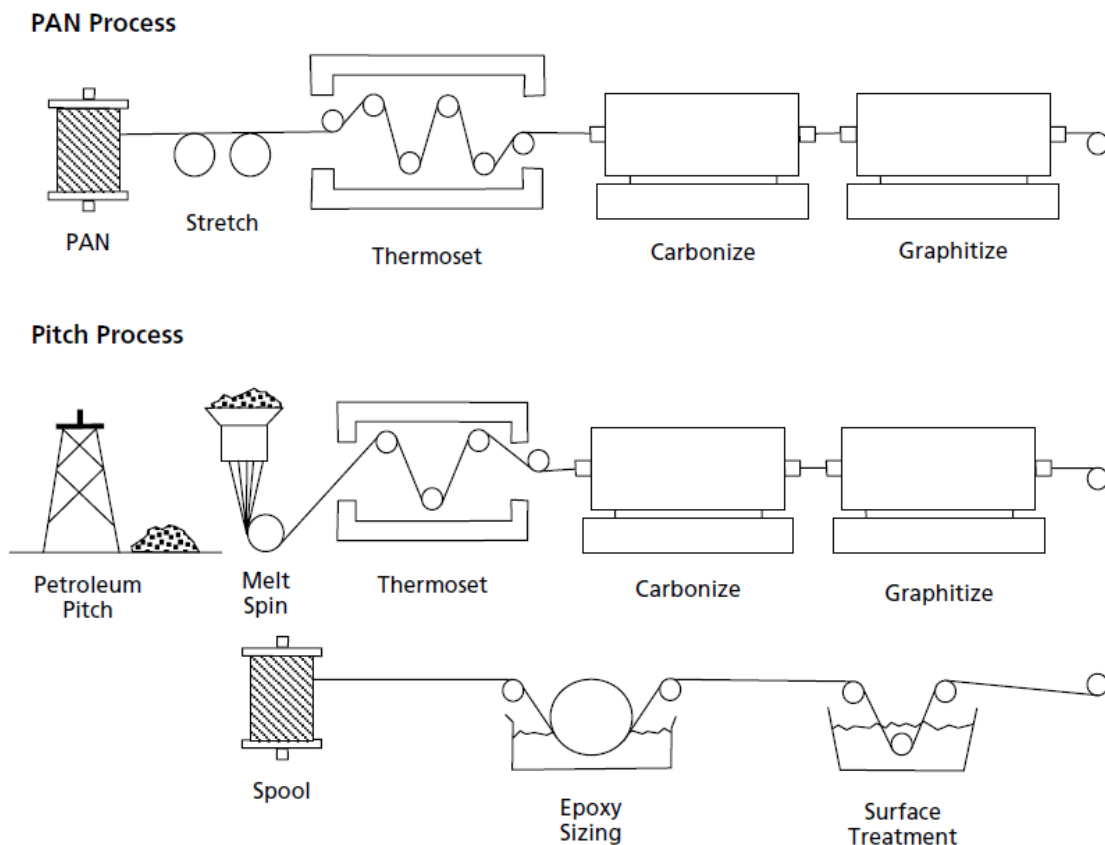
- HT (High tensile)
- IM (Intermediete modulus)
- HM (High modulus)

Prvním krokem je dlužení PAN vláken a stabilizace zahřátím na teplotu 200 až 300 °C. Přitom jsou vlákna udržována pod napětím systémem kladek a jsou za přístupu vzduchu dehydrována. Dalším krokem je karbonizace neboli pyrolýza, tedy termický rozklad organické látky za nepřístupu vzduchu. Pyrolýza probíhá při teplotách do 1600 °C a žebříčková struktura molekul se přemění na grafitovou hexagonální strukturu. Karbonizací končí výroba HT a IM vláken, následuje pouze povrchová úprava, při které se na vlákna nanese tenký povlak chránící před vzájemnou abrazí vláken [2] [4].

HM vlákna, která jsou z uhlíkových PAN vláken nejužší, podstoupí při výrobě jeden stupeň tepelného zpracování navíc – grafitizaci. Ta probíhá při teplotách do 3000 °C. [2]

Grafitová vlákna (Pitchová vlákna)

Pitchová vlákna jsou tužší – běžně dosahují modulu 600 GPa a více. Existují však i vlákna s modulem 960 GPa blížící se tuhosti diamantu, jehož hodnota tuhosti odpovídá 1000 GPa. Od PAN vláken se liší prekurzorem při výrobě, tím je dehet (anglicky "Coal tar pitch"/"Petroleum pitch"). Proces výroby je podobný jako u PAN vláken, jak ukazuje Obr. 12. Pitchová vlákna se označují jako UHM (ultra high modulus) a jsou oblíbeným marketingovým lákadlem např. v cyklistice. UHM vlákna jsou však velice křehká, a proto z nich není možné vyrábět např. prepregy, které musejí být ohebné. [1] [17]



Obr. 12: Srovnání výroby uhlíkových a pitchových vláken. [18]

1.4 Používané matrice

Jak již bylo zmíněno, nejčastěji se používají polymerní matrice. Existují i aplikace keramických a kovových matric. Těm však není v této práci věnována pozornost, vzhledem k jejich nepravděpodobné aplikaci ve sportovní optice.

Základní rozdělení matric dle typu polymeru [2]:

- termosetické (reaktivní)
 - Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)
 - levné, mají široké využití
 - Vinylesterové (VE-R)
 - dražší
 - vyšší odolnost proti teplotám
 - tuhé, křehké
 - Epoxidové pryskyřice (EP-R)
 - nejlepší mechanické vlastnosti, nejvyšší cena
 - Fenolické pryskyřice
 - křehké
 - málo hořlavé, chemicky odolné
- termoplastické

Konkrétních typů polymerů je nepřehledné množství, proto tato práce věnuje především epoxidovým pryskyřicím, které jsou standardem pro CFRP.

1.4.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice (EP-R) jsou nepoužívanější matricí uhlíkových kompozitů. Jedná se však o velmi široký pojem, existuje mnoho druhů. Jejich hlavní výhody jsou dobré mechanické vlastnosti, rozměrová stálost a dobrá přilnavost. Epoxidy patří k nevhodnějším pryskyřicím pro použití na dynamicky namáhané díly. Jen 10 % epoxidů je využito na kompozitní materiály. Dále se využívají jako vícesložková lepidla, povlaky, při výrobě forem nebo se nimi zalévají elektrické komponenty. [2] [4]

Většinou jsou epoxidové pryskyřice za pokojové teploty v tekutém stavu a po přidání tvrdidla započne polyadiciční reakce (síťování), která způsobí vytvrzení. Je potřeba dodržet přesný stechiometrický poměr tvrdidla a pryskyřice. Vytvrzování může probíhat za tepla i za studena, podle konkrétního typu pryskyřice a tvrdidla. Toho se s výhodou využívá u domácích aplikací, kdy při použití pryskyřice vytvrzované za studena není potřeba pece. Rychlost vytvrzovací reakce lze ovlivnit přidáním inhibitoru nebo katalyzátoru. [2]

Oproti jiným termosetickým pryskyřicím mají EP-R vyšší viskozitu, tím pádem obtížněji smáčejí tkaninu. Jsou také výrazně dražší, vynahrazují to ale lepšími mechanickými vlastnostmi – nižší vnitřní pnutí po vytvrzení, vyšší pevnost a rozměrová stálost. [2]

Při srovnání epoxidových pryskyřic, které byly k dispozici v polovině minulého století a dnes, existují velké rozdíly. Dnešní pryskyřice jsou houževnaté a mnohdy tvrditelné za pokojové teploty. Existují i pryskyřice s přidáními nanočásticemi, nanotrubičkami nebo termoplastickými částicemi (hardened epoxy) pro vyšší pevnost a houževnatost. Obecně pak houževnatější pryskyřice přispívají tomu, že je kompozit méně citlivý na delaminaci. [1]

Velký pokrok v oblasti pryskyřic by mohl způsobit tzv „Epoxy termoplast“. To je speciální polymer, který kombinuje vlastnosti termoplastu (svařitelnost a houževnatost) a pevnost epoxidových pryskyřic. [17]

Vytvrzování EP-R

Vytvrzování je exotermická reakce, při které dochází ke změně viskozity a objemu pryskyřice. Při tvorbě nových chemických vazeb se uvolňuje energie ve formě tepla. Při měření teploty reakce (především za studena) lze pozorovat, jak reakce probíhá a kdy byla ukončena. Hlavní parametry ovlivňující vytvrzovací reakci jsou teplota a čas. [2]

Pro správné vytvrzení je kritické porozumění vývoji viskozity. Obzvláště je to důležité při vytvrzování za tepla – např. u vytvrzování prepregů v autoklávu nebo lisování za tepla. Jako první dojde při zahřátí pryskyřice k poklesu její viskozity na základě známých fyzikálních principů. Tato fáze je důležitá, protože pryskyřice může volně téci a prosytit tkaninu. Rovněž dochází k eliminaci vzduchových bublin. Působení tepla má však za důsledek také polyadiční reakci – tedy síťování, což viskozitu zvyšuje. Interval, kdy viskozita dosáhla takové hodnoty, že pryskyřice nemůže téci (už není tekutou hmotou), se nazývá doba gelace. Může tak nastat situace, kdy při použití pryskyřice s příliš krátkou dobou vytvrzení nestihne matrice prosytit všechna vlákna a gelace už proběhla, což je samozřejmě nežádoucí. [2] [4]

Během tuhnutí také dochází ke smrštění a tím pádem zvýšení hustoty. S tím je potřeba při konstrukci počítat i s ohledem na použité vrstvy laminátu, aby nedošlo k nežádoucímu pokroucení či deformaci. Obzvláště nebezpečné z hlediska vnitřního pnutí je smrštění, které nastane po době gelace. Proto je důležité dodržovat pravidla symetrického a balancovaného kladecího plánu. [4]

Nedostatečné vytvrzení má negativní vliv na zrychlené stárnutí pryskyřice, odolnost proti chemickým vlivům a samozřejmě na mechanické vlastnosti. Při vytvrzení za studena téměř vždy dojde k neúplnému zasíťování. Vytvrzení za studena se však mnohdy nelze vyhnout, obzvláště u velkoobjemových dílů (lodě, velkopřůměrová potrubí). Někdy může být neúplné vytvrzení žádoucí – např. u zmiňovaných lodí zajišťuje neúplné vytvrzení nižší křehkost a lepší tlumení. [2]

Jak již bylo zmíněno, tak doba vytvrzení závisí na teplotě a tlaku. Zvýšením teploty lze vytvrzovací reakci urychlit, ale jen do určité meze. U epoxidových pryskyřic je hranice cca 200 °C, nad kterou dochází k degradaci materiálu v důsledku příliš vysoké teploty. [2]

1.5 Porovnání kompozitních materiálů s kovy

Tahová zkouška homogenních materiálů poskytne dobrý obrázek o všeobecných mechanických vlastnostech materiálu. U laminátů je situace složitější, neboť jsou anizotropní, v případě některých tkanin kvaziizotropní. Tím pádem mají největší vypovídající hodnotu praktické experimenty na konkrétních součástech. Příložená

Tabulka 1 poskytuje přehled mechanických vlastností prepregů a jejich srovnání s vybranými kovovými materiály.

Tabulka 1: Srovnání mechanických vlastností prepregů a kovů. [19] [20]

název materiálu	popis	R _m [MPa]	R _m /ρ [MPa·m ³ ·kg ⁻¹]	E [GPa]	R _m /ρ [GPa·m ³ ·kg ⁻¹]	α [μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	ρ [kg·m ⁻³]
E-Glass	UD	1100	647	43	25	11	1,7
	tkanina	600	353	20	12	14	1,7
Aramid	UD	1100	611	60	33	-0,4	1,8
	tkanina	500	278	30	17	-5,2	1,8
HS karbon	UD	2000	1176	130	76	0,5	1,7
	tkanina	800	471	70	41	3	1,7
IM karbon	UD	2400	1412	170	100	0,5	1,7
	tkanina	900	529	90	53	3	1,7
EN AW-6061-T651	slitina hliníku	320	119	69	26	24	2,7
EN AW-7075-T6	slitina hliníku	480	160	70	23	23	3
EN AC-46000	slitina hliníku pro tlakové lití	270	96	73	26	21	2,8
ASTM-AZ91D	slitina hořčíku	220	122	46	25	25,2	1,81
1.7218	ocel CrMo	760	97	190	24	13	7,8
1.4305	austenitická nerez	610	78	200	26	16	7,8

1.6 Technologie výroby kompozitních materiálů

Existuje nepřehledné množství technologií výroby kompozitních materiálů. Některými technologiemi lze dosáhnout zdánlivě podobných výsledků, mechanické vlastnosti se však mohou výrazně lišit.

Přehled technologií výroby laminátů:

- mokré kladení
- kladení prepregů
- infuze
 - RTM
 - LRTM
 - HP-RTM
 - VARTM
- lisování
 - lisování prepregů
 - mokré lisování
- navíjení
- pultruze
- automatické kladení vláken

Technologie, které připadaly v úvahu pro výrobu technologického vzorku v praktické části, jsou rozepsány v této kapitole.

1.6.1 Mokrý kladení

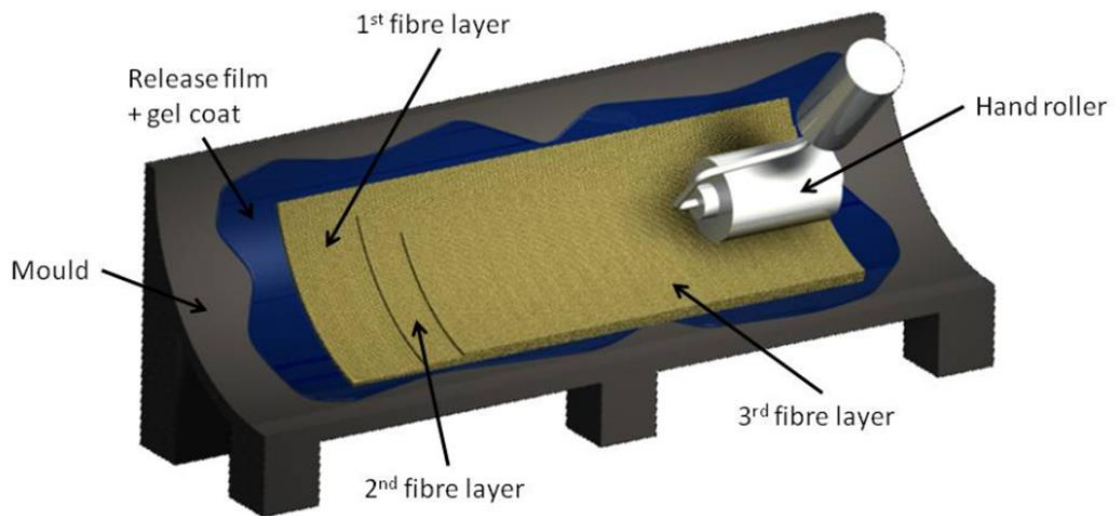
Jedná se o nejjednodušší technologii, které vyžaduje minimální technické vybavení. Na druhou stranu je mokré kladení náročně na zručnost obsluhy a je téměř nemožné vyvarovat se vzniku bublin v pryskyřici a je obtížné dosáhnout přesně definovaného prosycení. [4]

Pro výrobu je potřeba jednodílná forma. Kvalita jejího povrchu ovlivňuje kvalitu vyrobeného dílu. Používá se suchá tkanina, která se ručně prosycuje dvousložkovou pryskyřicí. [2]

Před kladením je formu nutné ošetřit separátorem, což umožní oddělení vytvrzeného dílu od formy. Následuje první vrstva pryskyřice, tzv. gelcoat s tloušťkou 0,3 až 0,6 mm. Ta slouží jako ochrana tkaniny. Zároveň je možné gelcoat obarvit, a tak dostat barevný povrch. [2]

Následuje kladení tkanin nebo rohoží, které se postupně prosycují pryskyřicí pomocí válečku, štětce nebo stříkácí pistole (Obr. 13). Je nutné co nejpečlivěji vytlačit většinu bublinek, které by po vytvrzení působily jako mikrovruby. [2]

Odstranění bublin lze podpořit vložením celé formy do vakuového pytle. Z toho se odsaje vzduch, což zapříčiní přitisknutí pytle k dílu a vytlačení dalších bublin. Úplné odvzdušnění je však při ručním kladení téměř nemožné. Vytvrzení probíhá za pokojové teploty nebo v peci podle konkrétní použité pryskyřice. [4]



Obr. 13: Technologie mokrého kladení. [19]

1.6.2 Kladení prepregů

Tato technologie využívá tzv. prepregů. Tak se označuje již předimpregnovaná/předsycená tkanina nebo rohož. Nejčastěji se jedná o prepregy s termosetickou pryskyřicí. Při výrobě prepregu je tkanina strojově prosycena, avšak vytvrzovací reakce je zastavena zmražením. S tím souvisí jedna z hlavních výhod výrobků z prepregů – nízká porozita. Trpí však stejnými nevýhodami jako ostatní ruční metody – tedy nepřesná orientace vláken, špatná opakovatelnost a časová náročnost. [4] [17]

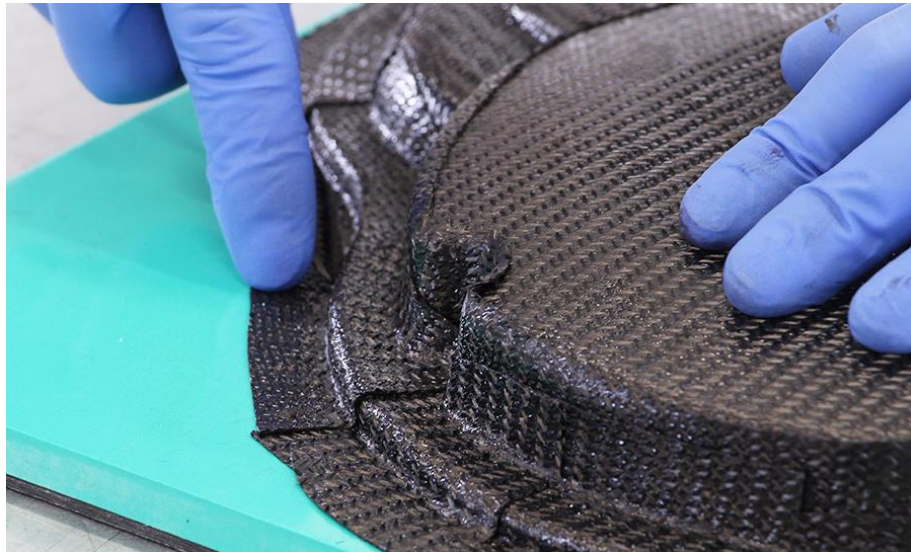
Prepregy jsou v B-fázi, tedy ne zcela vytvrzené a je nutné je skladovat v mrazáku, aby nedošlo k úplnému vytvrzení. I tak mají prepregy relativně krátkou dobu spotřeby („shelf life“), která se pohybuje v řádu týdnů až měsíců. Prepregy se dodávají s oboustrannou ochrannou fólií. [4]

Forma pro výrobu dílů za pomoci prepregů se příliš neliší od formy pro VARTM. Většinou se jedná o jednodílnou formu, buď kovovou nebo při prototypové výrobě lze využít 3D tisku. Materiál formy však musí mít dostatečně vysoký skelný přechod, aby se při tvrzení v peci nebo v autoklávu nezdeformoval. Před laminací je potřeba formu naseparovat.

Jak bylo zmíněno v kapitole rozebírající pryskyřice, moderní epoxidy vykazují vysokou houževnatost. Dříve tomu tak nebylo a s tím souvisí i samotný vynález prepregu. Ten byl vynalezen v 60. letech minulého století právě proto, že se s tehdejšími pryskyřicemi špatně pracovalo. Nebyly dostatečně smáčivé, a tak výrobci uvítali možnost použití již předimpregnovaných tkanin. Ke kompozitním dílům má i dnes mnoho lidí nedůvěru, která je zakořeněná mimo jiné v údajné křehkosti materiálu. Křehkost byla závažný problém na začátku vývoje uhlíkových kompozitů, kdy vytvrzování neprobíhalo za vysokých tlaků a teplot, a tak nedocházelo k dokonalému vytvrzení a součásti měly velké množství bublin a kazů. [17]

Prepregy se však neomezují pouze na uhlíková vlákna, mohou být také ze skelných nebo hybridních tkanin (např. aramid-karbon). Prepregy se dále rozdělují dle použité vazby, použité pryskyřice, hmotnosti na m² prepregu a procenta prosycení.

Zvolené prepregy jsou kladeny (Obr. 14) dle listu skladby, který je navržen na základě požadovaných mechanických podmínek. Z estetického hlediska je také důležitá orientace světelných linií. Podobně jako u RTM je důležité vrstvy prepregu uhladit, obzvlášť v rozích a malých rádiusech, kterým je však vhodné se při konstrukci formy vyvarovat. [4]



Obr. 14: Ruční kladení prepregů. [20]

Po vrstvách prepregu následuje separační fólie a netkaná textilie pro usnadnění proudění vzduchu. Finálním krokem je zavakuování formy do pytle a vytvrzení. Většina prepregů je určena pro vytvrzení v autoklávu tj. za působení vysokého tlaku a teploty. Existují však i prepregy, které se tvrdí v peci a pod tlakem vakua. Širokou nabídku prepregů pro domácí použití bez nutnosti tvrzení v autoklávu nabízí např. firma XPREG®. [21]

Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba, která slouží k vytvrzování kompozitních dílů. Pro správné vytvrzení jsou důležité přesně kontrolované cykly. Ty bývají většinou dvoustupňové, izometrické. Teploty vytvrzování různých pryskyřic se mohou značně lišit. Většinou bývají v rozsahu 120 °C až 200 °C. Typický přetlak v komoře leží v rozsahu 2 a 25 bar, může být zkombinovaný s pod tlakem. [2]

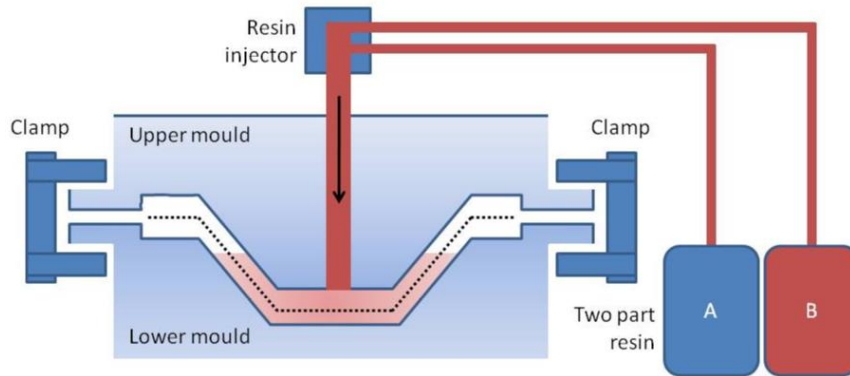
1.6.3 Infuze

U této skupiny technologií se stejně jako při kladení za mokra používá suchá tkanina, způsob sycení je však odlišný. Pryskyřice, která je v tekutém stavu, nasávána do dvoudílné formy nebo do jednodílné formy překryté vakuovým pytlím. Podle způsobu sycení rozlišujeme různé varianty infuzních technologií. [4]

RTM Resin Transfer Moulding (LRTM, HP-RTM)

Jde o technologie, které nalézají využití při výrobě přesných dílů ve středních a větších sériích. Základem je dvoudílná forma, do které se umístí suchá tkanina. Forma musí být dobře utěsněná, protože se do ní pryskyřice vstříkuje pod tlakem. V závislosti na velikosti tlaku vstříkované pryskyřice se rozlišují varianty LRTM (Light RTM) a HP-RTM (High Pressure RTM). [4] [22]

RTM má velký význam v automobilovém průmyslu, kde se využívá v kombinaci s preformy. Lisování dílů karoserie touto technologií má pracovní cyklus do 10 minut. Princip RTM je vyobrazen na Obr. 15 [1]



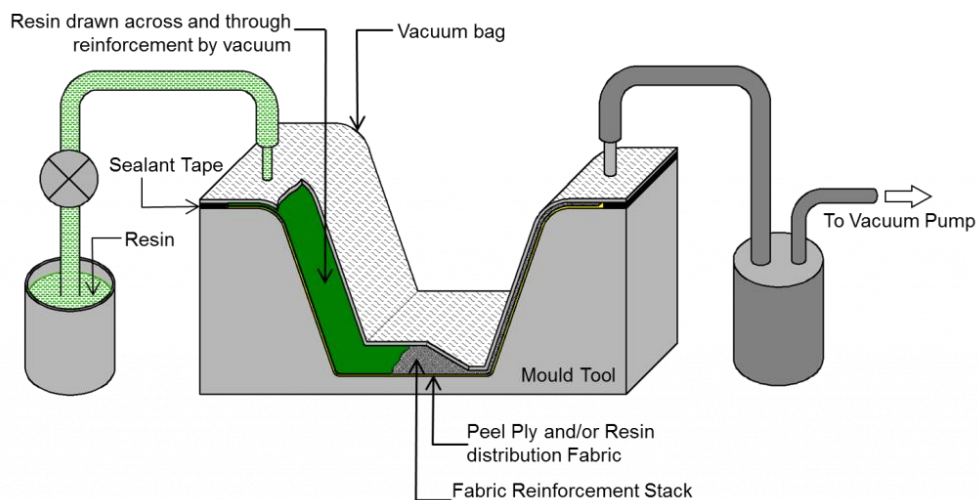
Obr. 15: Technologie RTM. [23]

VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding)

Z názvu je patrné, že se jedná o podobnou technologii jako RTM s tím rozdílem, že důležitou roli hraje podtlak. Místo toho, aby byla pryskyřice vstřikována pod vysokým tlakem je součást umístěna do vakuového pytle, ze kterého je odsán vzduch. To má za následek vznik podtlaku, který pryskyřici nasává. Vzhledem k její jednoduchosti se jedná o rozšířenou technologii u domácích kutilů a pro kusovou výrobu. [4] [24]

Pro VARTM se používá jednodílná forma. Kvalita jejího povrchu určuje kvalitu jedné strany kompozitního dílu. Stejně jako u ostatních technologií je nutné formu před laminací ošetřit separátorem pro snazší vyjmutí vytvrzeného dílu. Pracovní postup kladení je obdobný jako u ostatních ručních metod popsaných výše. [4]

Schéma technologie zobrazuje Obr. 16. Po naskládání všech vrstev tkaniny se umístí perforovaná strhávací fólie („peel ply“), RDM (Resin Distribution Medium – vrstva usnadňující tok pryskyřice) a součást se vloží do vakuového pytle. Z vakuového pytle jsou vyvedeny dvě ústí hadic. Jedním je přívod pryskyřice z rezervoáru, která se v přesném stechiometrickém poměru smíchá s tvrdidlem, aby započala polyadiční reakce. Druhá hadice je napojená na čerpadlo, které odsává z vakuového pytle vzduch. Před čerpadlem je nádobka pro zachycení přebytečné pryskyřice, tzv „catch pot“. [2] [4] [24]



Obr. 16: Technologie VARTM. [25]

1.6.4 Navíjení

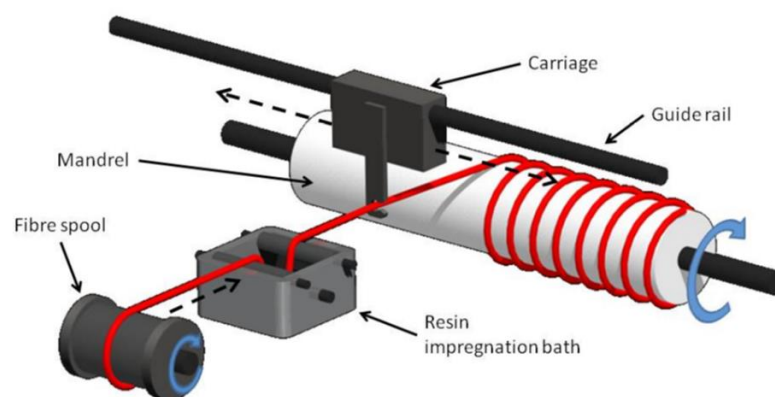
Navíjení je automatická metoda určená především pro výrobu rotačně symetrických součástek, nejčastěji válcových. Technologie navíjení je známá od období po 2. sv. válce. Tehdy byla vyvinuta paralelně na dvou místech: v Norsku, kde navíjeli hřídele pro vodní elektrárny a v USA, kde se navíjením vyráběly jaderné rakety. Tuhé palivo raket přitom bylo použito jako navíjecí trn, který v návínu zůstal. [1]

Kontinuální rovingy jsou smáčeny v pryskyřici a přes systém kladek vedeny k navíjecí hlavě. Ta svým pohybem v kombinaci s rotací jádra určuje úhel, pod kterým se vlákna na jádro navíjejí (Obr. 17). Navinutá trubka se poté vytvrzuje např. pod UV lampou. Existuje však i varianta navíjení suchých vláken s následnou infuzí pryskyřice. Hlavní výhodou technologie navíjení je vysoká přesnost kladení vláken, což zajišťuje předvídatelné a opakovatelné mechanické vlastnosti. [1]

Jedna z významných světových firem zabývající se navíjením sídlí na Plzeňsku v Sušicích - Compotech Plus spol. s r.o. Compotech má vlastní variaci technologie navíjení, kterou vyvinuli v roce 1995 a nazývají ji AFL. Technologie je specifická tím, že umožňuje axiální navíjení díky jehlicím, které jsou umístěny na obou koncích navíjecího jádra. Je tak možné dosáhnout daleko větší ohybové tuhosti než při navíjení bez jehlic. [1] [17]

Firma Compotech dodává své trubky pro motorsport, kde se využívají jako hnací hřídele, pro sportovní vybavení jako jsou žerdě, pádla, stěžně nebo stožáry pro radary vyráběné firmou ERA Pardubice. Významnou aplikací jsou i těžební stroje, konkrétně jejich hnací hřídele, kde je potřeba extrémní tuhost pro přenos momentu. Hřídele z oceli o ekvivalentní tuhosti by byly tak hmotné, že by se bortily pod vlastní vahou. [1]

Zajímavá je i jejich spolupráce s českým výrobcem silničních kol Festka. Firma Festka zvolila odlišný přístup od většiny výrobců karbonových rámu kol. Drtivá většina karbonových rámu se vyrábí jako monokoky z prepregu ručním kladením. Festka spojuje trubky od Compotechu do mufní, což kromě přesně známých úhlů jednotlivých vláken umožňuje ušít geometrie rámu na míru dle fyziologie zákazníka. [6]



Obr. 17: Princip technologie navíjení. [26]

Automatické kladení prepregů

Jako obdoba navíjení se dá označit i metoda výroby využívaná v leteckém průmyslu pro výrobu trupů letadel. CNC kladecká hlava navíjí pásku prepregu okolo jádra, následně je pryskyřice vytvrzována laserem. Finální vytvrzení probíhá v autoklávu. [4] [27]

2 SOUČASNÁ SITUACE PROPOJENÍ KARBONU A SPORTOVNÍ STŘELBY/OPTIKY

Tato kapitola nabídne čtenáři stručný přehled o aplikacích kompozitních materiálu v oblasti sportovní optiky, sportovní střelby a jiných příbuzných odvětví. Přímo v oblasti sportovní optiky lze nalézt pouhé náznaky využití CFRP.

Ferrari a William Optics

Spolupráce luxusní automobilky Ferrari s William Optics z roku 2007 přinesla nevšední výsledek. Tím je malý binokulární dalekohled v konfiguraci 8x25 v zářivě červené barvě typické pro Ferrari s krytem prostředního segmentu z karbonu, který je vyobrazen na Obr. 18. Jedná se tedy o čistě kosmetický prvek. Cena produktu byla v době prodeje 199 USD. [28]



Obr. 18: Binokulární dalekohled Ferrari VISIO 8x25. [29]

Zároveň byl v roce 2007 uveden do prodeje spektiv ZenithStar 70 Ferrari Anniversary Edition s výměnným okulárem a zvětšením 25–50x (Obr. 19). Jeho konstrukce je o něco zajímavější z hlediska aplikace kompozitu, neboť využívá karbon jako materiál tubusů hlavního tělesa spektivu. Oba přístroje byly ještě v roce 2007 staženy z prodeje. [28]



Obr. 19: Spektiv ZenithStar 70 Ferrari Anniversary Edition. [30]

Kruger Optical – KC6/KC8

Tato firma sídlící v Oregonu jako první představila volně dostupný produkt využívající karbon jako konstrukční materiál puškohledu (Obr. 20). Konstrukční řešení má firma patentované. Pro výrobu tubusu využívají formy s vícedílným jádrem. V patentu je zmíněna varianta využívající prepregy i alternativa se suchou tkaninou a následnou infuzí. [31]

Na webových stránkách však nejsou k vidění žádné uživatelské recenze a při poptání u firmy Kruger Optical bylo řečeno, že je produkt vyprodán na rok dopředu.



Obr. 20: Karbonový puškohled firmy Kruger. [32]



Obr. 21: Karbonový puškohled firmy GGP. [33]

Ve spolupráci s Kruger Optical představila karbonový puškohled s označením CF-5 i firma Grey Ghost Precision (Obr. 21). Na první pohled se jedná o obdobné produkty jen s jiným provedením točitek a rektifikační kostky. [34] Ani u puškohledu firmy GGP však nejsou k nalezení žádné uživatelské postřehy ani recenze. Je tedy otázka, jaká byla výrobní dávka a zda se puškohledy opravdu dostaly mezi veřejnost.

Nikon 10X25 Travelite VI

Firma Nikon uvádí u popisu tohoto kompaktního binokuláru (Obr. 22) využití uhlíkových vláken pro konstrukci tělesa binokuláru. Na povrchu přístroje se nachází gumové armování a výrobce žádné další informace neuvádí. Je tedy obtížné posoudit, na kterou část byl karbon použit. [35]

Při porovnání hmotností obdobných kompaktních binokulárů v konfiguraci 10x25 s porro hranoly patří NIKON - 10x25 Travelite VI s hmotností 269 g k těm lehčím [35]. Avšak oproti high-end dalekohledům zaostává. Pokud Nikon karbon opravdu používá, nemá razantní vliv na redukci hmotnosti.



Obr. 22: Binokulární dalekohled Nikon 10X25 Travelite VI. [36]

Stativy

U high end stativů jsou dnes karbonové trubky standardem. Stativy jsou s jejich dlouhými stavěcími nohama ideální produkt pro aplikaci CFRP trubek, které zajišťují nízkou hmotnost a vysokou tuhost. U většiny stativů převažují navíjené trubky.

Hvězdářské teleskopy

Poměrně rozšířené je využití karbonu pro konstrukci hvězdářských teleskopů (Obr. 23). Ty se většinou skládají z trubkových segmentů, proto je aplikace karbonu snadná. Hlavní výhody jsou redukce hmotnosti a teplotní stálost teleskopu. To může být důležité při focení noční oblohy na dlouhou expozici, kdy by teplotní dilatace tubusu mohla mít důsledek v rozostření obrazu. [37]



Obr. 23: Karbonový teleskop Newtonova typu Altair Astro. [38]

Pažby zbraní

Na veletrhu IWA OutdoorClassics 2019 v Norimberku byly karbonové pažby zbraní jedinou viditelnou aplikací CFRP v této sféře outdoorového vybavení. Možná největší kvalitu zpracování předvedla firma Blaser s jejich zalamovací kulovnicí Blaser K95 ULTIMATE Carbon zachycená na Obr. 24. Firma Browning prezentovala na svém stánku karbonovou verzi své pušky X-Bolt, která byla zajímavá svou texturou na pažbě pro snadnější úchop (Obr. 25).



Obr. 24: Kulovnice Blaser K95 ULTIMATE Carbon.



Obr. 25: Detail pušky Browning X-Bolt.

3 MOTIVACE PRO POUŽITÍ KARBONU VE SPORTOVNÍ OPTICE

Žádná inovace ani vylepšení by neměla přicházet samoučelně, ale měla by řešit existující problém nebo vylepšovat jeden či více aspektů daného produktu. Tato kapitola popisuje hlavní důvody a motivace pro snahu o použití CFRP pro sportovní optiku, konkrétně binokulární dalekohled.

Nižší hmotnost

Velké procento aplikací karbonu přináší redukci hmotnosti. Ne jinak by tomu mohlo být u binokuláru. Vzhledem k obtížnosti dimenzování karbonových součástí však není možné v této fázi vývoje říct, zda by redukce hmotnosti byla možná a jak výrazná by byla.

Tabulku 1 srovnávající mechanické vlastnosti kompozitních prepregů s kovy. Jak bylo zmíněno v Kapitole 1.5, je u kompozitních materiálů obtížné hodnotit jejich vlastnosti na základě tabulkových hodnot, lze si díky nim ale udělat představu o možných výhodách kompozitů.

Kompozity z uhlíkových vláken mají srovnatelnou hustotu s hořčikovými slitinami. Ty jsou v současné době na poli oblíbený konstrukční materiál. Karbon má však řádově vyšší mez pevnosti i poměrnou pevnost. Dá se tedy předpokládat, že co se pevnosti týče, mohla by být stěna karbonového binokuláru tenčí, než toho vyrobeného z hořčikové slitiny.

Slabina karbonu jsou však impakty. Proto jsou pro vznesení jakéhokoliv závěru nutné experimentální zkoušky. Případná nízká odolnost proti impaktu by se dala kompenzovat použitím hybridní tkaniny např.: karbon - Dyneema® nebo karbon - Innegra™.

Atraktivita pro zákazníka

Zákazníci se při nákupu často rozhodují na základě emocí. Ať už se jedná o automobily, elektroniku nebo každodenní nákupy, jsou mnohá rozhodování iracionální a založena na emocích. Uhlíková vlákna jsou vnímána jako prémiový materiál používaný v F1, letectví a hi-tech průmyslech. Ve spojení s tím, že karbonový binokulár momentálně na trhu není a jednalo by se tedy o novinku, která by mohla představovat lákadlo pro některé zákazníky.

Důležitým faktorem je i nasycenost a vyrovnanost trhu se sportovní optikou. Např. u high-end binokulárních dalekohledů jsou optické zobrazovací schopnosti na tak vysoké úrovni, že další zdokonalení naráží na fyziologické limity lidského oka. Dalekohledy konkurentů se liší především designem, kvalitou zpracování a např. různými mechanismy dioptrické korekce. Pro mnohé zákazníky je tak rozhodujícím faktorem renomanost prodejce a jeho pověst na trhu sportovní optiky, která však nemusí nutně přímo korespondovat s kvalitou jeho výrobků.

Designové možnosti

Tento bod je úzce spjatý s bodem předchozím. V aplikacích uhlíkových vláken v motorsportu, cyklistice nebo i zbraňovém průmyslu výrobci využívají snadné formovatelnosti karbonu k dosažení aerodynamických, ergonomických nebo designově zajímavých tvarů. Tato svoboda v konstrukci kompozitních součástí by jistě mohla být ku prospěchu i při designování binokuláru.

Teplotní stálost

Tato vlastnost CFRP by teoreticky mohla řešit konstrukční problém, který může nastat u všech produktů sportovní optiky. Vlivem rozdílných teplotních roztažností optiky a mechaniky přístroje může vzniknout tlak na čočku, které ovlivní chod paprsků, v některých případech může dojít k prasknutí čočky.

Tlumení

U karbonových rámců kol se s výhodou využívá proměnlivé tloušťky a tvaru trubek. Lze tak rám nadimenzovat v některých místech na vysokou tuhost, jiné části mohou být více poddajné a v kombinaci s dobrými tlumícími vlastnostmi karbonu zajišťují hladkou a pohodlnou jízdu.

Dobrého tlumení by se dalo využít např. u spektívů. Vzhledem k rozměrům tubusu spektivu může při vibracích dojít ke zdatelnému rozkmitání objektivu a jiných částí spektivu. Lepší tlumení by tak mohlo mít za efekt lepší ochranu optiky a přesných mechanických komponent před poškozením.

Výroba menších sérií

Tento argument je uváděn v kontextu ručního kladení prepregu. Na jednu stranu může být v dnešní době technologie založená částečně na ruční práci brána jako krok zpět. V určitých ohledech však může být výhodou. Při výrobě tělesa binokuláru tlakovým litím je z hlediska rentability žádoucí co největší výrobní série. I vzhledem k již zmíněné nasycenosti trhu sportovní optiky a faktu, že high-end binokulár není produkt, který zákazníci nakupují periodicky, by necitlivost na velikost série mohla být výhodou. Další faktor by mohla být cena samotné formy, která by v případě formy pro laminaci nemusela být tak vysoká jako u formy pro tlakové lití.

4 APLIKACE KOMPOZITU VE SPORTOVNÍ OPTICE

Cílem praktické části je vytvořit technologický modelový vzorek, jehož návrh, výroba a následné zhodnocení bude indikátorem, zda je použití karbonu ve sportovní optice vhodné, či vůbec proveditelné. Zaměření práce bude na využití karbonu pro binokulární dalekohled

4.1 Konstrukce binokuláru



Obr. 26: Řez dalekohledem MeoStar B1 12x50: upraveno dle [39]

Binokulární dalekohled (Obr. 26) je zařízení, které umožňuje uživateli vidět zvětšený obraz oběma očima. Typově se jedná o Keplerův dalekohled. Skládá se ze dvou větví spojených pomocí pantu, které jsou v zásadě symetrické dle roviny procházející svisle osou pantu. Většina dnešních binokulárů je vybavena povrchovým pryžovým armováním.

Optická větev se skládá z několika částí. Objektiv je soustava čoček, na kterou světlo nesoucí informaci o pozorovaném objektu narazí jako první. Objektiv bývá většinou usazený v objímce, která se šroubuje do tělesa binokuláru. Následuje ostřicí člen, což je pohyblivá čočka, která mění ohniskovou vzdálenost přístroje v závislosti na vzdálenosti pozorovaného cíle. Ostřicí člen je ovládán točítkem centrálního ostření. To bývá z pravidla v ose hlavního pantu a pomocí vícechodého pohybového šroubu (ten se používá kvůli většímu stoupání) a táhel pohybuje s ostřicím členem.

Aby obraz vytvořený binokulárem nebyl převrácený, obsahuje dalekohled optické hranoly. Dříve se používaly Porro hranoly, dnes jsou u high-end binokulárů rozšířeny střechové hranoly, např. Schmidt-Pechanův nebo Abbe-Koenigův. Díky tomu, že optická cesta svazku je hranolem „zabrzdnuta“ může být binokulár kratší.

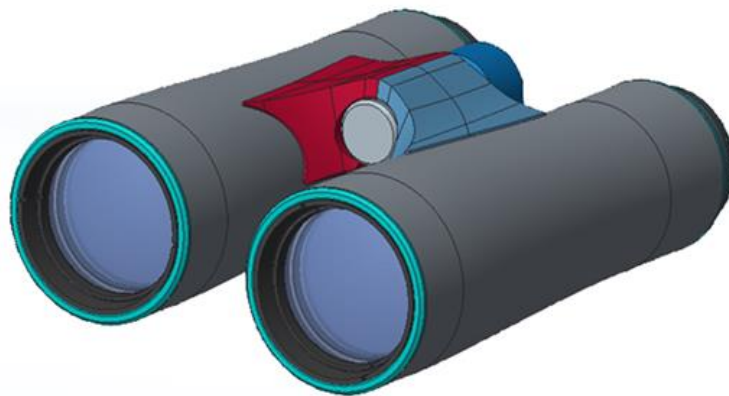
Dosud popsaná část binokuláru vytváří obraz, který uživatel pozoruje pomocí okuláru, který funguje jako lupa. Okuláry jsou osazeny výsuvnými očníci, ty slouží pro vymezení optimální pozorovací vzdálenosti uživatele bez brýlí. V binokuláru se nachází ještě mechanismus dioptrické korekce. Ten slouží pro uživatele, kteří nemají stejný počet dioptrií na obou očích a chtějí mít možnost dalekohledem pozorovat bez brýlí.

Kvalita zobrazování binokuláru nezávisí jen na návrhu optické sestavy a kvalitě výroby jednotlivých optických členů, ale i na přesnosti mechaniky. Přesnost uložení čoček může ovlivňovat optické vady jako otvorová vada, koma nebo astigmatismus, které se všechny promítají do rozlišovací schopnosti binokuláru.

Ohýbáním hlavního pantu binokuláru uživatel nastavuje pupilovou vzdálenost okulárů. Aby optické osy zůstávaly rovnoběžné bez ohledu na úhel zalomení binokuláru, měly by být rovnoběžné s mechanickou osou pantu. K justáži optických os se využívá jeden pohyblivý element, kterým lze optickou osu korigovat. Většinou se používají justážní šroubky, které umožňují pohybovat s optickým členem ve dvou osách kolmo na optickou osu.

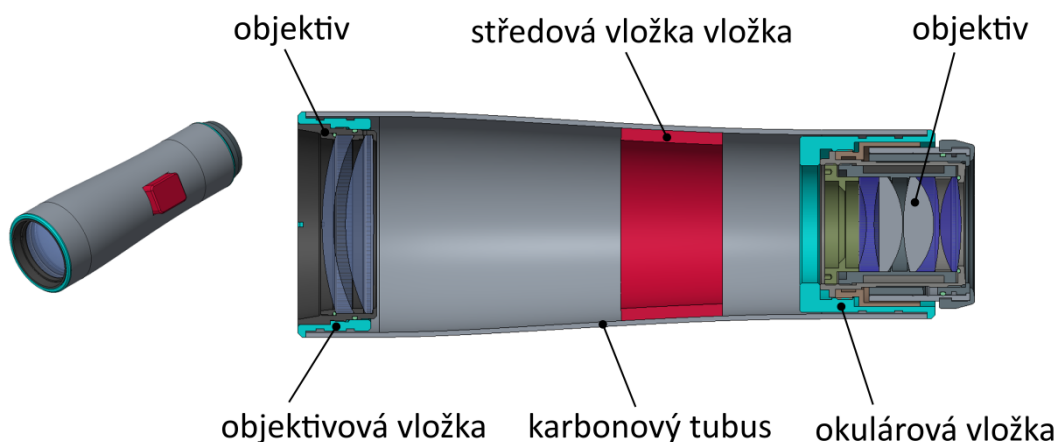
4.2 Technologický vzorek

Jako technologický vzorek byl zvolen zjednodušený model binokuláru o konfiguraci 10x42, který bude dodržovat hlavní konstrukční uzly dalekohledu (Obr. 27).



Obr. 27: Návrh technologického vzorku.

Po mnoha iteracích byl navrhnout rotačně symetrický tubus s plastovou vložkou z 3D tisku uprostřed, ze které vyčnívá obdélníkový výstupek (Obr. 28). Na obou koncích tubusu jsou vlepené hliníkové vložky. Jedná se o model „single bridge“ binokuláru, jehož pant bude vyřešený formou „protéz“ přilepených k tubusu.



Obr. 28: Tubus (větev) technologického vzorku.

Rotační tubus byl zvolen z několika důvodů. Tím hlavním je, že při kompletaci modelu binokuláru se v tomto případě pravá a levá větev nijak neliší. To by bylo vhodné pro technologii navíjení, ale i pro technologii kladení do formy, protože lze použít stejná forma pro pravou i levou větev.

Střední plastová vložka byla navržena s vizí vyřešení dvou konstrukčních problémů. Prvním je spojení s druhou větví dalekohledu. Obdélníkový výstupek může být chápán jako model pantu dalekohledu nebo jej lze použít jako interface pro napojení detailnějšího modelu pantu dalekohledu. Druhou funkcí, která je v současné době pouze eventuality do budoucna, je uchycení optického hranolu. Přidání nálitků s dírami na vnitřní část vložky by umožnilo uchycení hranolu. Pozice hranolu je definována optickou sestavou, proto je při tomto řešení nutné, aby byl pant na vhodném místě, které tuto kombinaci umožňuje.

Vlepené vložky na obou koncích tubusu slouží k upevnění objektivu a okuláru. Vložky byly zvoleny z existujících přístrojů z portfolia Meopty. Objektiv je použit z MeoRange 10x42 HD a okulár z MeoStar B1 10x42 HD.

4.3 Volba technologie výroby vzorku

Pro výrobu tubusu připadá v úvahu několik technologií:

- mokré ruční kladení
- infuze
- kladení prepregu
- navíjení

Protože se jedná o válcovou součást, může navíjení vypadat jako jasná volba. Hlavní výhoda navíjení tkví v jeho automatizaci a tím pádem přesně definovanému kladení vláken pod specifickými úhly. To by však nutně nebyla velká výhoda u binokuláru, který není při používání specificky namáhán.

Navíjení má i několik nevýhod. Tou nejzjevnější je finanční náročnost. Na rozdíl od ostatních zmíněných metod, které se zakládají na manuální práci, tak navíjení vyžaduje drahý navíjecí stroj. Dalším omezením je, že nejlépe funguje navíjení na válcových součástech. Přestože je navíjení složitějších rotačních nebo i nerotačních součástí možné, je technologicky o dost náročnější, může totiž docházet ke sklouzávání vláken.

S tím kontrastují ostatní zmiňované metody, které využívají kladení do formy. Tím pádem jsou omezení tvaru výrobku výrazně menší a žádný problém nejsou ani nerotační součásti. Také je pro kusovou výrobu technologického vzorku tohoto typu vhodnější metoda založená na ruční práci.

Na první pohled jsou produkty vyrobené technologií mokrého kladení, RTM a kladení prepregu zdánlivě podobné. Hlavní rozdíly jsou v kvalitě prosycení tkaniny pryskyřicí, množství vad v pryskyřici a ceně. Při rozhodování jsou tedy hlavním kritériem finance, respektive dostupnost zařízení nutných pro jednotlivé technologie.

Finální volba technologie probíhala mezi dvěma možnostmi: navíjení a kladení prepregu. Navíjení bylo možné realizovat ve spolupráci s firmou Compotech Plus spol. s r.o. Tento přední český výrobce kompozitních trubek totiž v době psaní této práce spolupracoval s firmou Meopta - optika, s.r.o.

Využití kladení prepregů připadá v úvahu, díky vedoucími této diplomové práce Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. působícímu ve firmě MSR Engines s.r.o. Tato firma ve výrobě svých produktů používá právě technologii prepregů a disponuje autoklávem, který je pro tuto technologii nutný.

Zvolena byla technologie kladení prepregu vzhledem k tomu, že byla shledána jako nejvhodnější a doktor Zouhar nabídl autorovi této práce možnost využití technologií MSR Engines s.r.o.

4.4 Laminace 0 – zkušební díl

Před návrhem formy proběhla ve firmě MSR Engines s.r.o. laminace dvou typologicky podobných dílů v rámci seznámení se s technologií.

4.4.1 První díl – stator – negativní forma

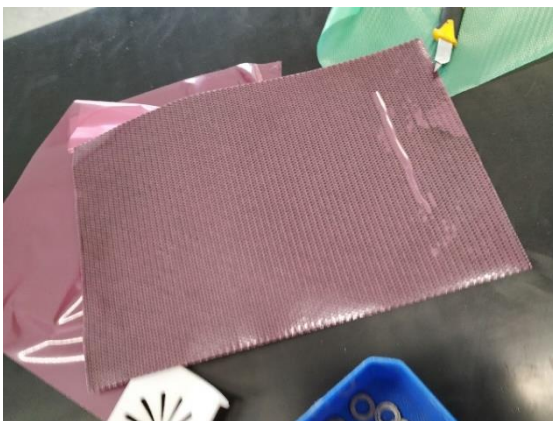
Prvním dílem byla rotačně symetrická tenkostěnná součástka vyráběna v negativní formě.

Při použití negativní formy (Obr. 30) je preferovaný způsob kladení na montážní jádro. Oproti kladení přímo do formy tak můžeme použít menší počet přístřihů karbonu a práce je rychlejší a jednodušší. V tomto případě je jádro silikonové s plastovou vložkou, která zajišťuje vyšší tuhost a po vyjmutí umožňuje silikonové jádro snáze odstranit.

Před samotným kladením bylo provedeno naseparování povrchu formy umožňující snazší vyjmutí dílu po jeho vytvrzení.

List skladby pro tuto součást tvoří dvě vrstvy prepregu 245 g/m^2 , který vzhledem k ose součásti orientujeme ve směru $\pm 45^\circ$, tedy tak, aby optické linie prepregu byly rovnoběžné s osou tělesa.

Prepregy (Obr. 29) je potřeba pár desítek minut před laminací vyjmout z mrazicího boxu, ne však z ochranného pytle, aby nedošlo k orosení prepregů a zbytečné absorpci vlhkosti. Po ohřátí je nutné prepregy nastříhat dle stříhacího plánu. To se provádí ručně nebo na plotru v případě opakované výroby a přichystaného stříhacího plánu.



Obr. 29: Prepreg.

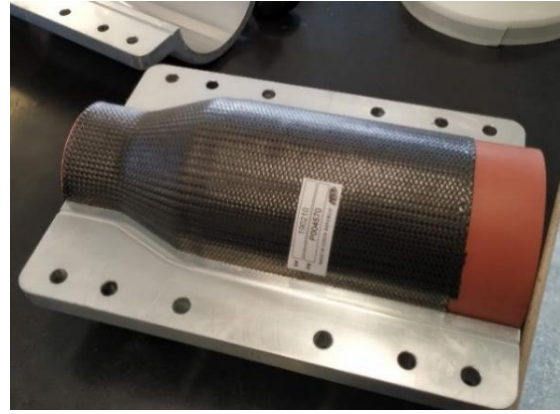


Obr. 30: Forma a jádro.

Před kladením prepregu je nutné odstranit ochrannou fólii. To může být usnadněno pomocí chladicího spreje. Při kladení tohoto prepregu je třeba neovíjet s příliš velkým napětím, neboť tkanina $\pm 45^\circ$ je náchylná k deformaci (smrštění v axiálním směru a protažení ve směru kolmém). Naproti tomu ve směru tkaniny 0° a 90° tato deformace nehrozí.



Obr. 31: Kladení prepregu na silikonové jádro.



Obr. 32: Vložení do jádra do hliníkové formy.

Deformaci v axiálním směru lze využít v horní zužující se části. Taháním za tkaninu v horní části způsobíme zúžení tubusu tkaniny, a proto není potřeba v prepregu vytvářet zástřihy (Obr. 31). Před položením druhé vrstvy je nutné tkaninu uhladit a opticky zkontrolovat vrásky či jiné nedokonalosti. Následuje stejný postup s druhou vrstvou. Po dokončení kladení dojde k ostřížení případných roztřepených kousků tkaniny nůžkami.

V dalším kroku je karbonem omotané jádro vloženo do hliníkové formy (Obr. 32). Lícované kolíky zajistí přesné uložení a šrouby formu pevně stáhnou.

Následuje vyjmutí silikonového jádra (Obr. 33), k čemuž je nejprve nutné vyjmout plastovou vložku. Ve výjimečných případech může dojít při vytažování jádra k poškození tkaniny.



Obr. 33: Vyjmutí silikonového jádra.



Obr. 34: Příprava pro vložení do vakuového pytle.

V dalších krocích se výrobek připraví na odsátí vzduchu a vytvrzení v autoklávu. Jako první se použije strhávací vrstva. Jedná se u umělohmotnou tkaninu, která se obtiskne do vnitřní strany dílu a zdrsňuje tak povrch. Tato vrstva je volitelná a aplikuje se v případě, že se jedná o kontaktní plochu k lepení.

Následuje separační fólie, ta chrání následující vrstvy od kontaktu s epoxidem. Následuje vrstva netkané textilie (Obr. 34), která má několik funkcí:

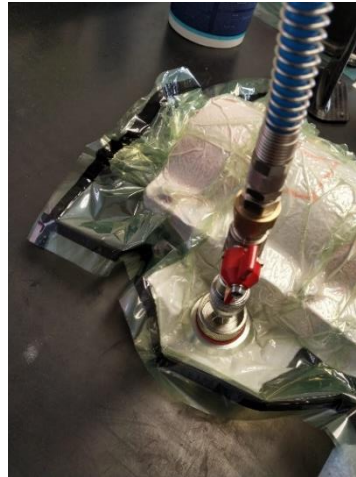
- chrání vakuový pytel před proražením od ostrých hran formy
- pomáhá lepší distribuci odsávaného vzduchu
- zabraňuje tvoření mýstků (např. u hlaviček šroubků nebo u jiných dutinek), kde hrozí nasátí a protržení vakuového pytle

Následuje výroba vakuového pytle. Ten má v tomto případě podobu dvou rukávů, které se pomocí butylové pásky spojí a utěsní (Obr. 35). Před utěsněním je do pytle umístěn ventil, který je podložen přeloženým kouskem netkané textilie, napomáhající vyvedení vzduchu z vakuového pytle.

Při odsávání je nutné s vakuovým pytlek manipulovat a řasit ho v kritických místech, aby nedošlo k vytvoření nežádoucích můstků (Obr. 36). Zavakuovaný díl je připravený na vytvrzení v autoklávu.



Obr. 35: Vakuový pytel



Obr. 36: Odsání vzduchu.



Obr. 37: Pozitivní forma.

4.4.2 Druhý díl – pozitivní forma

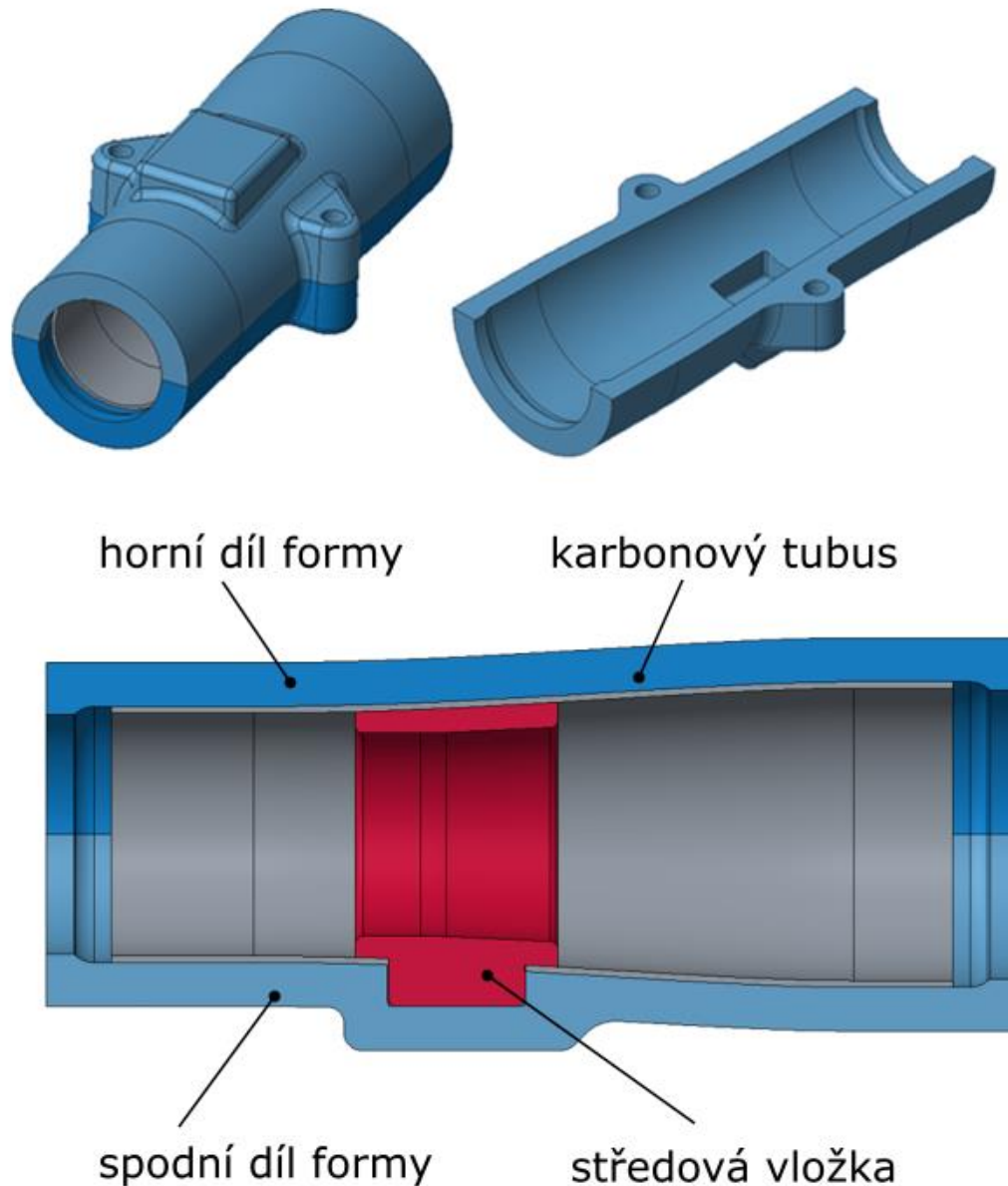
Druhý typologicky podobný díl byl také rotační, ale vyráběl se na pozitivní hliníkové formě. Postup byl obdobný s tím rozdílem, že strhávací vrstva, separační vrstva, netkaná textilie a vakuový pytel byly pouze z vnější strany (Obr. 37). To dělá tento způsob výroby mnohem jednodušší. Nevýhoda je však ta, že vnější strana není po vytvrzení hladká, tak jako u negativní formy.

4.5 Návrh a výroba formy

Na základě zkušenosti s laminací typologicky podobných dílů byla zvolena koncepce negativní formy. Ta zajistí hladkou pohledovou vnější stranu, avšak za cenu obtížnější laminace. V této konfiguraci také není problém do tubusu zalaminovat vložku.

Forma kopíruje tvar modelu tubusu a v jedné polovině má kapsu pro „bridge insert“. Model formy byl opatřen dírami pro uložení kolíků, které zabezpečí přesnou vzájemnou pozici obou polovin formy (Obr. 38).

V rámci prototypové výroby formy byla zvolena technologie 3D tisku, konkrétně FDM (Obr. 39). Je nutné použít materiál, který snese vysoký tlak a teplotu autoklávu. Proto nepřipadají v úvahu nejběžnější materiály jako ABS, PLA nebo PET. S ohledem na dané podmínky byl jako materiál tisku zvolen polykarbonát (PC).



Obr. 38: Návrh formy.

Technologie FDM je charakteristická tím, že v kolmém směru na roviny tisku (osa Z) mají tvarově složitější díly poměrně velkou drsnost. Proto bylo nutné povrch formy vybrousit. Největší nerovnosti byly zbruseny ocelovým plískem, následoval brusný papír se zrnitostí 300, 600, 800 a 1200. Vzhledem k tvaru formy nebylo možné dosáhnout zcela rovnoměrného vybroušení. V hladkých částech byla naměřena drsnost $R_a 0,24 \mu\text{m}$ oproti původním $R_a 16,48 \mu\text{m}$ (viz Příloha 3 a Příloha 4). Bohužel byla obtížnost broušení způsobena také zbytečným osazením na okrajích formy, které měly původně ohraničovat místa kladení tkaniny, ve finále však neměly žádnou funkci.

Nutno podotknout, že polykarbonát je velmi odolný termoplast, s čímž souvisí jeho poměrně vysoká tvrdost oproti jiným materiálům používaných pro FDM tisk. Broušení je proto velmi časově náročné. Navíc bylo nutné dbát na zvýšenou opatrnost při broušení v blízkosti dělicí

roviny, aby nedošlo k zaoblení již existujícího rádiusu. To by mělo za následek výraznější přetok a vtažení tkaniny u dělicí roviny.



Obr. 39: Polykarbonátová forma.

4.6 Návrh a výroba vložek

Vložky byly navrženy tak, aby byly kompatibilní s komponentami již existujících binokulárů firmy Meopta - optika, s.r.o. Vůle pro vlepění do tubusu byla zvolena 0,6 mm na poloměru i s ohledem na to, aby bylo eventuálně možné experimentovat s tloušťkou laminovaného tubusu. Samozřejmě při takovémto vlepění není zajištěna sousost objektivové a okulárové vložky. To by v budoucnu mohlo být vyřešeno např. obráběním již vlepěných vložek s přídatkem na obrábění. Současný postup (vlepění již obrobené vložky) byl zvolen s ohledem na jednoduchost obrábění vložek oproti obrábění tubusu v celku. Vložky (Obr. 40) byly vyrobeny na prototypové dílně firmy Meopta - optika, s.r.o. z materiálu EN AW-6082 T6.



Obr. 40: Vyrobená okulárová a objektivová vložka

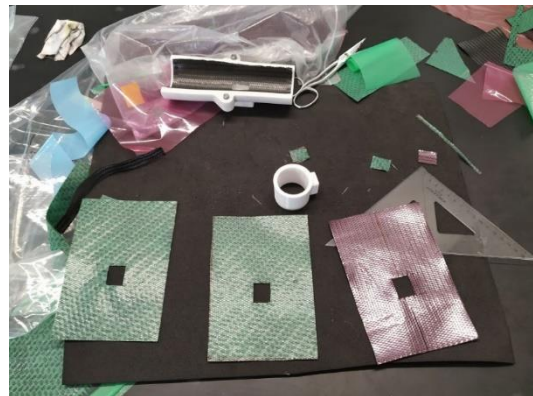
4.7 Laminace 1 – do formy

4.7.1 Laminace

Před laminací je nutné na formu opět aplikovat separátor. V tomto případě byl použit Chemlease® PMR-90 EZ. Při práci s ním je nutná dýchací maska, rukavice a dobře větrané prostory. Na mikrovláknový hadřík bylo nanášeno malé množství separátoru, následovala aplikace na formu. Forma byla přetřena mikrovláknovým hadříkem a nechána uschnout.

Pro laminaci byly použity prepregy od italské firmy Delta-Preg S.p.a., konkrétně: GG380 DT121 a GG245 DT121. List skladby byl zvolen následující (Obr. 41):

Forma	
245 g/m ²	±45°
380 g/m ²	0°, 90°
380 g/m ²	0°, 90°
245 g/m ²	±45°
Strhávací vrstva	
Separační vrstva	
Netkaná textilie (Fleece)	
Vakuový pytel	



Obr. 41: List skladby.

Obr. 42: Průběh kladení prepregů.

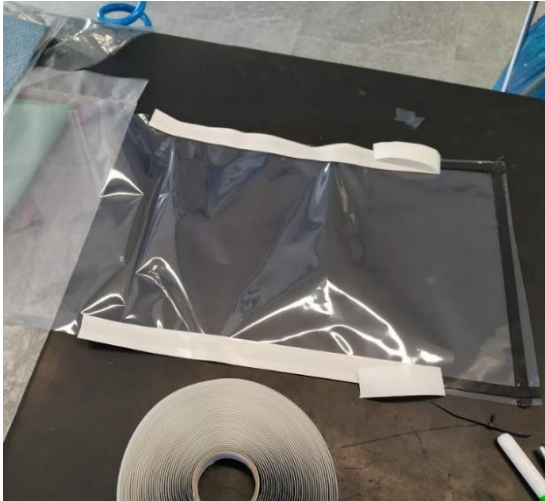
V prvních pokusech byl nástřih prováděn ručně nůžkami. Přístřihy byly obdélníkové, přičemž polovina z nich měla obdélníkový otvor pro „středovou vložku“ (Obr. 42). V jedné polovině formy bylo provedeno zaříznutí prepregu u dělicí roviny a ve druhé byl ponechán přírůstek cca 10 mm pro zajištění dostatečného přeplátování (Obr. 43). Po vložení „bridge insert“ byla forma složena a stlačena svorkami. Přeplátovaný spoj byl uhlazen přítlačným hladítkem a pro jistotu byl překryt proužkem prepregu v axiálním směru (Obr. 44).



Obr. 43: Průběh laminace.

Obr. 44: Složená forma.

Ruční nástřih měl za následek velké a nerovnoměrné přírůstky na koncích tubusu. Z toho důvodu byl pro následujících laminací vytvořen nástřihový plán v softwaru Creo 3.0 pomocí rozvinu modelu tubusu. Ten přinesl výrazné zlepšení v podobě zmenšení přírůstku na koncích tubusu.



Obr. 45: Výroba vakuového pytle.



Obr. 46: Odsání vzduchu z vakuového pytle.

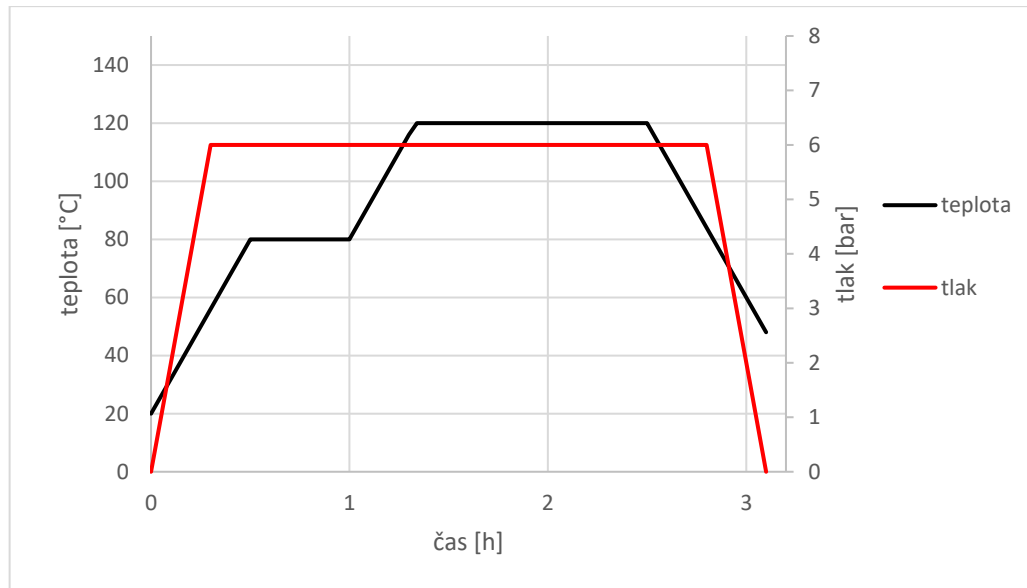
Výroba (Obr. 45) a odsátí (Obr. 46) vakuového pytle proběhly obdobně, jak je popsáno v Laminace 0 – zkušební díl.

4.7.2 Vytvrzení a vyjmutí z formy

Vytvrzení bylo provedeno v autoklávu společnosti Maroso (Obr. 47) dle standartního vytvrzovacího cyklu (Obr. 48).



Obr. 47: Autokláv Maroso.



Obr. 48: Vytvrzovací cyklus v autoklávu.

Vyjmutí vytvrzeného dílu (Obr. 49) je teoreticky jednoduchá záležitost. U tohoto dílu bylo vyjmutí komplikovanější z důvodu velkého tření mezi „středovou vložkou“ a kapsou formy. Z technologických důvodů totiž neměla „středová vložka“ žádné úkosy. Řešením bylo prostrčit tubusem dlouhý předmět, v místech děr na kolíky formu podepřít a silně zatlačit. Další díly šly oddělovat snáze, nejspíš i proto, že se forma postupně mírně opotřebovala a vůle mezi ní a „bridge insert“ se zvětšila.



Obr. 49: Vytvrzený tubus.



Obr. 50: Detail místa s vyšší drsností.

Po vyjmutí z formy následovala vizuální kontrola dílu, na jejímž základě lze o „Laminaci 1“ vyvodit následující závěry:

- Kvalita povrchu formy přímo úměrně ovlivňuje kvalitu vytvrzené součásti. Místa na formě s vyšší drsností se promítla do hotového dílu (Obr. 50). Kdyby forma byla vyrobena obráběním a následným broušením z hliníkové slitiny, byla by dosažena výrazně vyšší kvalita.
- Forma z 3D tisku (následně ručně broušená) nemá dostatečně ostré rádiusy. Přetok u dělicí roviny je tak poměrně velký.
- S předchozím bodem souvisí fakt, že na tubusu je viditelné, že byl vyroben z dvou polovin – tkaniny na sebe u dělicí roviny dokonale nenasazují.

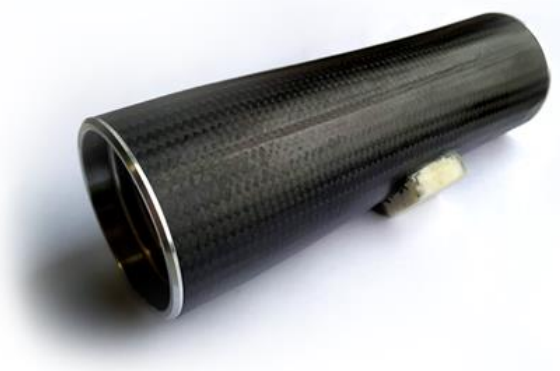
4.7.3 Začištění tubusu

Hrubý výlisek bylo potřeba zbavit přetoků v oblasti dělicí roviny. To bylo provedeno nejdříve za pomoci jemného pilníku a brusného papíru. U dalších pokusů pak s větší efektivitou použitím Dremelu s malým brousícím kotoučkem.

Pro korektní vlepění vložek bylo potřeba srazit čela, což se ukázalo jako nelehký úkol. Jako první bylo odzkoušeno frézování na konvenční frézce. Tubus byl upnut za „středovou vložku“. Docházelo však ke značným vibracím a rychlému otupení nástroje (nebyly k dispozici VBD určené pro kompozitní materiály). Proto byla čela ručně zabroušena (Obr. 51).



Obr. 51: Začištěný vs nezačištěný tubus.



Obr. 52: Vlepené vložky.

4.7.4 Vlepení vložek

Vložky byly do tubusu vlepny (Obr. 52) lepidlem Spabond 340 LV HT, což je pevnostní dvousložkové epoxidové lepidlo na bázi epoxidu.



Obr. 53: Zamontovaný okulár.



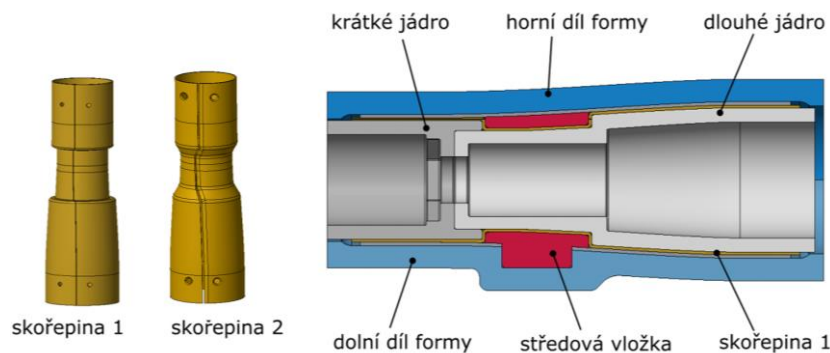
Obr. 54: Zamontovaný objektiv

Po vlepění bylo možné zamontovat do přístroje okulár (Obr. 53) i objektiv (Obr. 54).

4.8 Laminace 2 – na jádro

„Laminace 2“ měla za úkol opravit některé nedostatky, které byly shledány u „Laminace 1“. Především měla laminace probíhat na jádro, podobně jako u vzorové „Laminace 0“, aby na plášť tubusu mohl být použit jeden plát tkaniny v několika vrstvách. Tím pádem by byl na povrchu viditelný pouze jeden přechod mezi tkaninami. Ten by se nemusel nacházet v místě dělicí roviny.

Proto bylo navrženo několikadílné jádro, to bylo vytištěno na 3D tiskárně. Kvůli mírnému osazení na obou koncích formy bylo nutné navrhnout vyjímatelnou tenkostěnnou skořepinu (o tloušťce stěny 0,9 mm). Skořepina je dělená, aby ji bylo po dokončení laminace možné zdeformovat a vyjmout (Obr. 55).



Obr. 55: Návrh jádra.

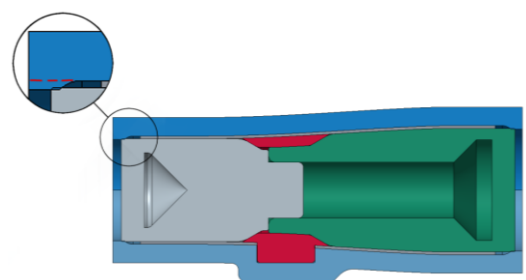
Obě jádra i dělená skořepina byly vytištěny z PLA, což se ukázalo jako nevhodný materiál kvůli přílišné tuhosti a křehkosti. Pro snížení tuhosti byl návrh skořepiny upraven na druhou verzi. I tak bylo vyjmutí skořepiny obtížné, protože se k ní silně lepil prepreg. Skořepina byla navíc příliš Při snaze o její vyjmutí rozlámala na mnoho kusů. S velkými obtížemi se vložku nakonec povedlo odstranit a výrobu tubusu dokončit

Zbytek výroby probíhal stejně jako u „Laminace 1“. Výsledný produkt však nesplnil očekávání. V místě dělicí roviny vznikl výrazný přetok pryskyřice a vtažení karbonové tkaniny (Obr. 56). Tím pádem se po obroušení přetoku výsledek vizuálně neliší od „Laminace 1“.

Z toho důvodu byla pro výrobu dalších pokusů použita „Laminace 1“, jakožto méně pracná varianta. Byla by však chyba laminaci na jádro zcela zavrhnout. Aby měla nějaký smysl, bylo by nutné použít hliníkovou broušenou formu s ostrými rádiusy u dělicí roviny nebo se pokusit stávající formu opravit tmelem. Zároveň by bylo nutné odstranit nefunkční osazení u čela formy, které bylo důvodem použití skořepinové vložky, která se neosvědčila.



Obr. 56: Přetok po "Laminaci 2".



Obr. 57: Nutná úprava jádra pro "Laminaci 3".

4.9 Laminace 3 – nové jádro

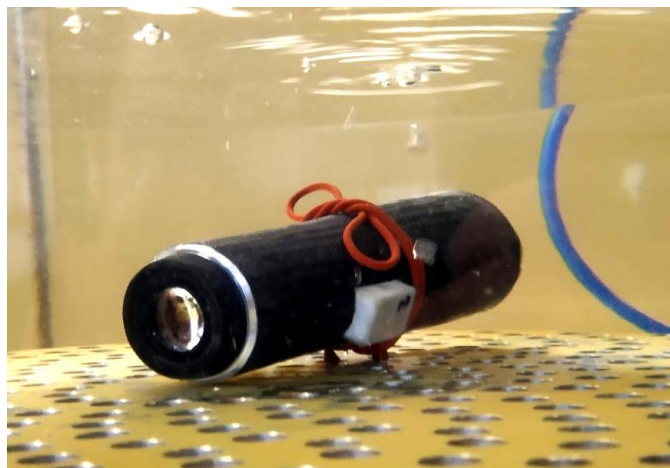
Jak bylo zmíněno v předchozím kroku, podmínka pro „Laminaci 3“ je úprava formy (zatemnění rádiusu dělicí roviny a odstranění osazení viz Obr. 57). Tím pádem není nutné používat skořepinu, ale stačí dvoudílné jádro. V době psaní DP „Laminace 3“ ještě neproběhla, jen bylo vyrobeno montážní jádro. Pro snazší vyjmutí jádra by bylo vhodné jeho povrch zbrousit a před použitím naseparovat.

4.10 Laminace 4 – silikonové jádro

Jako nejlepší volba se jeví obdobné řešení, jako u laminace zkušební dílu – tedy silikonové jádro. To by v tomto případě také muselo být dvoudílné. Výrobu by bylo možné provést odlitím silikonu do negativní formy včetně plastového jádra, které by silikon při laminaci vyztužovalo a po jeho vysunutí by umožnilo snazší vyjmutí silikonu

4.11 Testování vzorku

Vzhledem k omezeným časovým možnostem byla provedena pouze zkouška hermetické těsnosti. Ta probíhala v zařízení s vývěvou, které vytvoří nad vodní hladinou podtlak 40 kPa.



Obr. 58: Zkouška těsnosti.

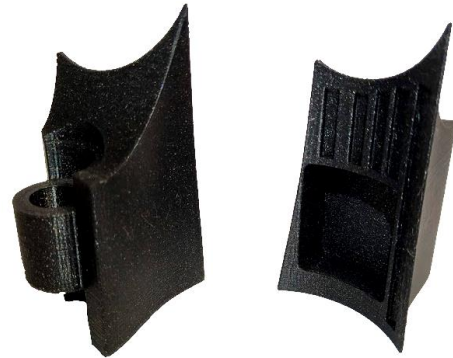
Výsledkem zkoušky bylo pozorování unikajících bublin ze střední části tubusu. To bylo způsobeno nedokonalým zatečením pryskyřice při procesu laminace. Důležitým zjištěním je, že jak objektiv, tak okulár těsnili.

4.12 Model binokuláru

Posledním krokem praktické části bylo kompletování modelu binokuláru. Za tímto účelem byla použita osa pantu z dalekohledu MeoStar B1 10x42 a okolo ní byly zkonstruovány protězy pantů dalekohledu (Obr. 59). Také byla vyrobena maketa točítka. Pro výrobu všech tištěných součástí byl použit materiál PLA, konkrétně „Prusament PLA Prusa Galaxy Black“ (Obr. 60). Jelikož bude model sloužit pro předváděcí účely, je tento materiál dostačující. Kompletní technologický vzorek je na Obr. 61.



Obr. 59: Model protězy pantu technologického vzorku.



Obr. 60: Vytiskněné protězy pantu.



Obr. 61: Technologický vzorek binokuláru.

5 DISKUSE

V rámci této diplomové práce nebylo možné implementovat všechna možná vylepšení technologického vzorku, která vzešla z praktických zkušeností při jeho výrobě. Také nebylo provedeno dostatečné množství mechanických či klimatických zkoušek. Všechny kroky, které by bylo vhodné provést nad rámec této DP, jsou shrnuty v této kapitole.

5.1 Ekonomické zhodnocení

Výpočet ceny materiálu (karbonu) na výrobu jednoho kusu tubusu:

$$\text{Cena prepregu} = 28\text{€/m}^2$$

$$\text{Současný kurz Eura: } 1 \text{ €} = 25,8 \text{ Kč}$$

$$\text{Rozměry jednoho přístřihu: } 120 \times 160 \text{ mm}$$

$$\text{Plocha jednoho přístřihu} = \frac{120 \cdot 160}{1000^2} = 0,0192 \text{ m}^2$$

$$\text{Počet přístřihů na 1 tubus: } 8$$

$$\text{Celková plocha} = 8 \cdot 0,0192 = 0,1536 \text{ m}^2$$

$$\text{Cena materiálu na 1 tubus} = 0,1536 \cdot 28 = 4,3 \text{ €} = \mathbf{110,9 \text{ Kč}}$$

Orientační výpočet ceny práce a provozu autoklávu na základě praktických zkušeností firmy MSR Engines s.r.o.:

$$\text{Hodinová superhrubá mzda: } 500 \text{ Kč}$$

$$\text{Časová náročnost skládání prepregu: } 0,5 \text{ hod}$$

$$\text{Náklady na pracovníka} = 500 \cdot 0,5 = \mathbf{250 \text{ Kč}}$$

$$\text{Ostatní náklady (provoz autoklávu)} \approx \text{náklady na pracovníka} = \mathbf{250 \text{ Kč}}$$

Celkové náklady

$$\text{Celkové náklady} = \text{cena materiálu na 1 tubus} + \text{náklady na pracovníka} + \text{ostatní náklady}$$

$$\text{Celkové náklady} = 110,9 + 250 + 250 = \mathbf{610,9 \text{ Kč}}$$

Z výpočtů je zřejmé, že samotný materiál tvoří poměrně malou část ceny výrobku.

5.2 Další postup s technologickým vzorkem

Zkoušky

Binokuláry schválené pro produkci se testují na základě technických podmínek. Jako vzor byly použity technické podmínky binokuláru MeoStar B1 10x42, který slouží pro civilní využití [40]. Byly vybrány ty zkoušky, jejichž provedení na technologickém vzorku z karbonu by mělo vypovídající hodnotu. Pro zkoušky by byla použita pouze jedna větev modelu binokuláru se zamontovaným objektivem a okulárem.

Mechanické zkoušky

- 3x jednotlivé rázy o zrychlení 100 g ve 3 směrech
- Sinusové vibrace se zrychlením 2 g při amplitudě 0,15 mm, v rozsahu frekvence od 10 do 150 Hz, 10 frekvenčních cyklů
- 1000 manipulačních rázů ve 3 směrech s amplitudou zrychlení 147 m/s²
- Nad rámec technických podmínek by byly provedeny zkoušky impaktu padajícího tělesa s ostrou špičkou pro zjištění odolnosti kompozitní konstrukce proti nárazu

Zkoušky klimatické odolnosti

- teploty pro skladování +70 °C a -40 °C
- teplotní šoky o délce max 20 s z teploty -25 °C do teploty +40 °C, prodleva mezi šoky je 1,5 hod prodlevou 1,5 hod. na teplotě v 6-ti cyklech (při zkrácené zkoušce ve třech cyklech)
- těsnost při přetlaku 20 kPa
- nad rámec technických podmínek by byly provedeny dlouhodobé zkoušky UV záření

V případě, že by vzorek zkouškami prošel, byly by provedeny obdobné testy o vyšší intenzitě a na základě zjištěných parametrů selhání by bylo možné přistupovat k optimalizaci laminátu.

Experimentování s tloušťkami laminátu

Hodnotit hmotnost současného technologického vzorku je obtížné, neboť jeho tloušťka nebyla nijak optimalizována. Až experimenty s tělesy s různými tloušťkami vrstev a různými tkaninami by ukázaly, jaká redukce hmotnosti by se při použití karbonu dala dosáhnout.

Hliníková forma

Výrazné zlepšení kvality povrchu by přinesla forma z hliníkové slitiny s broušeným povrchem. Díly z broušených forem mají takovou kvalitu povrchu, že již není nutné je dál brousit nebo lakovat. To je výhodné i z toho ohledu, že epoxid je tvrdší než většina laků. Geometrie hliníkové formy by byla obdobná jako geometrie polykarbonátové formy.

5.3 Další postup v karbonizaci binokuláru

Tato diplomová práce pouze vytváří půdu pro možné budoucí využití karbonu jako konstrukčního materiálu optického přístroje. Je mnoho problémů, jejichž řešení pouze nastiňuje, nebo k jejichž řešení nebyl prostor vůbec.

Přesnost výroby

Jak již dříve bylo zmíněno, mechanika binokuláru musí být vyrobena velmi přesně, tolerance se většinou pohybují v jednotkách setin milimetru. Kompozitní binokulár bude nevyhnutelně tvořen kombinací kompozitních a kovových materiálů. To jistě přinese plno výzev pro konstruktéry, neboť s dodržением přesností lepených dílů bývají mnohdy problémy. Proto by nejspíš bylo vhodné do tubusu lepit kovové komponenty s přídavkem na obrábění, aby se pak celé těleso obrábělo podobně, jako odlitek.

Design a konstrukce přístroje

Při konstrukci binokuláru by jistě bylo žádoucí využít formovatelnost kompozitu a navrhnout tvarově a ergonomicky zajímavý přístroj. Nabízí se také otázka, zda by byl karbon schovaný pod

vrstvou neprůhledného armování nebo by bylo těleso „holé“. Vzhledem k tomu, že samotná tkanina je vizuálně zajímavá by se toto řešení nabízelo. Takový binokulár by však musel být odolný proti nárazům a škrábancům. Gumové armování totiž poskytuje přístroji ochranu před nárazy, je příjemná na dotyk i působí jako teplotní izolant. Bylo by tedy na zvážení, zda by byl binokulár bez armování v těchto oblastech konkurenceschopný.

Čistota vnitřní části tubusu

Vzhledem k tomu, že karbonový technologický vzorek nemá kompletní optickou sestavu a nelze skrze něj pozorovat, byla tato problematika během řešení DP utlumena. Při aplikaci na skutečný přístroj by to však zcela jistě byla jedna z hlavních věcí na zvážení. Jednak jsou totiž nepřípustné jakékoliv částičky uvnitř tubusu – např nitky strhávací vrstvy nebo drolící se částice epoxidu. Také použitá lepidla a pryskyřice se nesmějí vypařovat a narušovat napařované vrstvy na čočkách nebo na nich zanechávat film.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce přináší přehled kompozitních materiálů. Především se zaměřuje na uhlíko-vláknové kompozity. Část rešerše se věnuje výrobním metodám, např. navíjení nebo kladení prepregů s následným vytvrzením v autoklávu. Vzhledem k tomu, že se diplomová práce zmiňuje i o technologiích vhodných pro amatérské použití (ruční kladení, VARTM), může sloužit jako inspirace pro začínající lamináře.

Praktická část měla za cíl návrh a výrobu technologického vzorku. Ten měl být indikátorem, zda lze uvažovat o aplikaci kompozitních materiálů jakožto konstrukčním materiálu pro produkty sportovní optiky. Jako technologický vzorek byl zvolen zjednodušený model binokuláru. Byly vytypovány nejdůležitější konstrukční prvky, které byly v technologickém vzorku použity. Mezi hlavní motivace pro použití karbonu jakožto konstrukčního materiálu binokuláru je potenciální redukce hmotnosti a zvýšení atraktivity pro zákazníka.

Navržený technologický vzorek má podobu karbonového tubusu s vlepenými vložkami z hliníkové slitiny. Součástí tubusu je plastová vložka s výčnělkem ve tvaru kvádrů, která slouží k napojení protězy pantu. Praktická část diplomové práce obsahuje návrh technologického vzorku a popis jeho výroby. Pro výrobu tubusu byla zvolena technologie ruční kladení prepregu a negativová forma byla vyrobena z polykarbonátu na FDM tiskárně.

Výsledkem je model binokuláru, který slouží jako důkaz toho, že použití kompozitního materiálu ve sportovní optice není nemožné. Tato diplomová práce je však pouhým prvním krokem pro karbonizaci binokuláru. Nad rámec této diplomové práce budou následovat mechanické a klimatické zkoušky technologického vzorku. Výsledky zkoušek budou indikátorem, jaké konstrukční změny je nutné provést. Také bude provedena optimalizace tloušťky laminátu a budou vyzkoušeny hybridní tkaniny (Dyneema®, Innegra™). Výrazné zvýšení kvality technologického vzorku by přineslo použití hliníkové formy.

Při pohledu do ještě vzdálenější budoucnosti bude nutné zvážit výrobu s ohledem na sériovost a přesnost výroby kvůli kvalitě zobrazování. Jako možné řešení se jeví obrábění tubusu s vlepenými vložkami. V úvahu by připadala jedna vložka vlepená „na hotovo“, která by byla použita k upnutí za pomoci soustružnického trnu. Tubus by tak mohl být obráběn na jedno upnutí, což by mohlo být výraznou výhodou oproti obrábění tvarově složitější odlitku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] UHER, Ondřej. *Přednáška ředitele vývoje firmy Compo Tech PLUS, spol. s r.o. na půdě společnosti Meopta - optika, s.r.o.* 2018.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] CAMPBELL, F. *Structural composite materials*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 16-150-3037-9.
- [4] Y. LIN, Kuen. *Composite Materials Overview for Engineers* [online]. In: . William E. Boeing Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington, b.r. [cit. 2019-05-20].
- [5] PINHEIRO, Daisy. *Use of Composite Materials in Carbon Fiber for the Recovery of Small Slab – Calculation by Analytical and Computational Methods* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. ISSN 2166-479X. Dostupné z: <http://article.sapub.org/10.5923.j.cmaterials.20170701.01.html>
- [6] TION, Pavel. *Vlastnosti karbonu - FESTKA-ŠTĚRBA - 2. díl*. In: *YouTube* [online]. Štěrba kola, b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=dsz6n3zD9GE>
- [7] MARCOS-BÁRCENA, Mariano. *Detail of embedded particles in fiber delamination*. In: *ResearchGate* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Detail-of-embedded-particles-in-fiber-delamination_fig3_288446023
- [8] LUBIN, George. *Handbook of Composites*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1982. ISBN 978-1-4615-7171-4.
- [9] CHAVARRÍA, Andrés. *How to prevent galvanic corrosion in carbon composites* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DPbToNbtubg>
- [10] BASALTEX, . *Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků*. *Basaltex.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm
- [11] DYNEEMA, . *The benefits and properties of carbon with Dyneema®*. In: *YouTube* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=2r_gyYEXrKE
- [12] ALLIED CYCLE WORKS, . *How INNEGRA is Used in ALLIED CYCLE WORKS Bikes*. In: *YouTube* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=FZld8gRhUJQ>

- [13] TOHO TENAX, . Kohlefaseroving TENAX HTS 1600 tex 24K. *Compositeshop.de* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.compositeshop.de/xoshop/fasern/carbonfaser/kohlefaseroving-tenax-hts-1600-tex-24k.html>
- [14] INDIAMART, . White Glass Fiber Mat. *Indiamart.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/glass-fiber-mat-18530653791.html>
- [15] R&G FASERVERBUNDWERKSTOFFE GMBH, . *Composite Material Handbook*. 2007.
- [16] ŠTĚPÁNEK, Jan. Casemodding: Kompozitní zázrak - laminát. *Pctuning.tyden.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://pctuning.tyden.cz/index2.php?option=com_content&task=view&id=12243&Itemid=60&pop=1&page=99
- [17] NOVÁK, Jaroslav. Rozhovor s Ondřejem Uhrem: Karbon rozhodně není na limitu!. *Velo*. b.r., 2017(11).
- [18] RUDOLFO MORALES, Ibarra. PAN and pitch fiber manufacturing processes. *ResearchGate* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/121-PAN-and-pitch-fiber-manufacturing-processes_fig2_328065074
- [19] HEXCEL, . *HexPly® Prepreg Technology* [online]. In: . 2013 [cit. 2019-05-23].
- [20] *MakeItFrom.com* [online]. Iron Boar Labs Ltd., b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/terms>
- [21] CORE-MATERIALS COLLABORATIVE OPEN RESOURCE ENVIRONMENT – FOR MATERIALS, . Wet lay-up. *Flickr.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/core-materials/5905060068/>
- [22] EASY COMPOSITES, . *Laminating a mould using XPREG® XT 135 tooling prepreg*. [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/#!/prepreg/tooling-prepregs/xpreg-xt135-carbon-fibre-tooling-prepreg-backing.html>
- [23] LIBEERT, Matthieu. Tutorial: Out Of Autoclave PREPREG Carbon Fiber/Fibre Part 1-7 (Introduction). In: *YouTube* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Ef2nEStH_8E
- [24] MOORE, John. RTM, LRTM, HP-RTM - What's the Difference?!. In: *YouTube* [online]. JHM Technologies, Inc., b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=hTNRgEZ7J8g&list=PLpIR9PqEUUbZZkjDrJ9k9wQhQ5297Yq4T&index=21&t=473s>
- [25] CORE-MATERIALS COLLABORATIVE OPEN RESOURCE ENVIRONMENT – FOR MATERIALS, . Resin transfer moulding. *Flickr.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/core-materials/5905060290>

- [26] EASY COMPOSITES LTD, . How To Do Perfect Vacuum Resin Infusion of a Carbon Fibre (Fiber) Part - Basic Tutorial. In: *YouTube* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=VodfQcrXpxc>
- [27] CSIR - NATIONAL AEROSPACE LABORATORIES, . *RESIN TRANSFER MOULDING PROCESSES* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.nal.res.in/en/techniques/resin-transfer-moulding-processes>
- [28] CORE-MATERIALS COLLABORATIVE OPEN RESOURCE ENVIRONMENT – FOR MATERIALS, . Filament Winding. *Flickr.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/core-materials/5904500223/>
- [29] REAL ENGINEERING, . Carbon Fiber - The Material Of The Future?. In: *YouTube* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=aKpDyfJnxQQ&t=503s>
- [30] MCKEEGAN, Noel. Ferrari Visio sports-binoculars. *New Atlas* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://newatlas.com/go/7538/>
- [31] William Optics Fernglas Ferrari Visio 8x25 Sondermodell. *Astroshop.eu* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.astroshop.eu/william-optics-fernglas-ferrari-visio-8x25-sondermodell/p,8743>
- [32] William Optics Apochromatic refractor AP 70/430 ZenithStar 70 Ferrari Anniversary Edition OTA. *Astroshop.eu* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.astroshop.eu/william-optics-apochromatic-refractor-ap-70-430-zenithstar-70-ferrari-anniversary-edition-ota/p,8742>
- [33] *Rifle scope having a housing made in part of composite material and in part of metal*. b.r. USA. US9766039B2. Uděleno 19.9. 2017.
- [34] KRUGER OPTICAL, . *KCM6™ Carbon Fiber Riflescope Series* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.krugeroptical.com/kc6.htm>
- [35] ZERO7ONE, . SHOT SHOW 2017 – GREY GHOST PRECISION. *Zero7one.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://zero7one.com/shot-show-2017-grey-ghost-precision/>
- [36] RECOIL MAGAZINE, . New: GGP CF-5 Carbon Fiber 1-5 Optic. *Recoilweb.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.recoilweb.com/new-ggp-cf-5-carbon-fiber-1-5-optic-120410.html>
- [37] JOHNSON, Paul. The Travelite VI from Nikon: Does it Uphold the Travelite Tradition?. *Optics Reviewer* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.opticsreviewer.com/travelite-vi.html>
- [38] OPTICS CENTRAL, . Nikon Travelite VI 10x25 Binoculars. *Optics Central* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.opticscentral.com.au/nikon-travelite-vi-10x25-binoculars.html?__SID=U#.XOPuP8gzaUk

- [39] RURODA, Frank. Large Carbon Fiber Tubes up to 24" Diameter... *Carbon Scope Tubes* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://carbonscopetubes.com/>
- [40] GUMTREE, . Altair Astro (GSO) 8" F4 Newtonian - Carbon fibre - telescope. *Gumtree* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.gumtree.com/p/telescopes/altair-astro-gso-8-f4-newtonian-carbon-fibre-telescope/1283778793>
- [41] OPTICKÝ SVĚT, . *Dalekohled Meopta MeoStar B1 10x42 HD* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.optickysvet.cz/dalekohledy/dalekohled-meopta-meostar-b1-10x42-hd/>
- [42] MEOPTA - OPTIKA, s.r.o.,. *Technické podmínky binokulárního dalekohledu MeoStar B1 10x42: Interní dokument*. b.r.

Seznam použitých veličin

značka	Popis	jednotka
σ_{Pfiber}	mez pevnosti vlákna	[MPa]
$\sigma_{Pmatrix}$	mez pevnosti matrice	[MPa]
E_{fiber}	Youngův modul pružnosti v tahu vlákna	[GPa]
E_{matrix}	Youngův modul pružnosti v tahu matrice	[GPa]
$\varepsilon_{matrixP}$	mezní prodloužení matrice	[-]
ε_{fiberP}	mezní prodloužení matrice	[-]
Δl	změna délky	[mm]
l_0	původní délka	[mm]
ε_{matrix}	poměrná deformace matrice	[-]
ε_{fiber}	poměrná deformace vlákna	[-]
σ_{fiber}	napětí ve vláknu	[MPa]
σ_{matrix}	napětí v matrici	[MPa]
φ_{fiber}	objemový poměr vláken	[-]
V_{fiber}	objem vláken	[mm ³]
$V_{composite}$	objem kompozitu	[mm ³]
ψ_{fiber}	hmotnostní poměr vláken	[-]
m_{fiber}	hmotnost vláken	[g]
$m_{composite}$	hmotnost kompozitu	[g]
$E_{composite}$	Youngův modul pružnosti v tahu kompozitu	[GPa]
$\sigma_{Pcomposite}$	mez pevnosti kompozitu	[MPa]

Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Řez laminátem [3].	9
Obr. 2 Srovnání napěťově deformačních charakteristik. [5]	11
Obr. 3 Poměrná tuhost v závislosti na deformaci. [4]	11
Obr. 4 Srovnání poměrných tuhostí a poměrných pevností v tahu vybraných materiálů. [3] ...	12
Obr. 5 Závislost tuhosti a mezi pevnosti na úhlu zatížení. [3]	13
Obr. 6 Porovnání meze únavy karbonu a kovových materiálů. [3]	13
Obr. 7 Delaminace. [7]	14
Obr. 8 Uhlíkový roving. [13]	17
Obr. 9 Skelná netkaná rohož. [14]	17
Obr. 10 Typy tkanin: upraveno dle [15]	17
Obr. 11 Uhlíková tkanina. [16]	18
Obr. 12 Srovnání výroby uhlíkových a pitchových vláken. [18]	19
Obr. 13 Technologie mokrého kladení. [19]	24
Obr. 14 Ruční kladení prepregů. [20]	25
Obr. 15 Technologie RTM. [23]	26
Obr. 16 Technologie VARTM. [25]	26
Obr. 17 Princip technologie navíjení. [26]	27
Obr. 18 Binokulární dalekohled Ferrari VISIO 8x25. [29]	28
Obr. 19 Spektiv ZenithStar 70 Ferrari Anniversary Edition. [30]	28
Obr. 20 Karbonový puškohled firmy Kruger. [32]	29
Obr. 21 Karbonový puškohled firmy GGP. [33]	29
Obr. 22 Binokulární dalekohled Nikon 10X25 Travelite VI. [36]	29
Obr. 23 Karbonový teleskop Newtonova typu Altair Astro. [38]	30
Obr. 24 Kulovnice Blaser K95 ULTIMATE Carbon.	30
Obr. 25 Detail pušky Browning X-Bolt.	30
Obr. 26 Řez dalekohledem MeoStar B1 12x50: upraveno dle [39]	33
Obr. 27 Návrh technologického vzorku.	34
Obr. 28 Tubus (větev) technologického vzorku.	34
Obr. 29 Prepreg.	36
Obr. 30 Forma a jádro.	36
Obr. 31 Kladení prepregu na silikonové jádro.	37
Obr. 32 Vložení do jádra do hliníkové formy.	37
Obr. 33 Vyjmutí silikonového jádra.	37

Obr. 34 Příprava pro vložení do vakuového pytle.....	37
Obr. 35 Vakuový pytel.....	38
Obr. 36 Odsání vzduchu.	38
Obr. 37 Pozitivní forma.	38
Obr. 38 Návrh formy.	39
Obr. 39 Polykarbonátová forma.....	40
Obr. 40 Vyrobená okulárová a objektivová vložka	40
Obr. 41 List skladby.	41
Obr. 42 Průběh kladení prepregů.	41
Obr. 43 Průběh laminace.	41
Obr. 44 Složená forma.	41
Obr. 45 Výroba vakuového pytle.	42
Obr. 46 Odsání vzduchu z vakuového pytle.	42
Obr. 47 Autokláv Maroso.	42
Obr. 48 Vytvrzovací cyklus v autoklávu.....	43
Obr. 49 Vytvrzený tubus.	43
Obr. 50 Detail místa s vyšší drsností.	43
Obr. 51 Začištěný vs nezačištěný tubus.	44
Obr. 52 Vlepené vložky.	44
Obr. 53 Zamontovaný okulár.	44
Obr. 54 Zamontovaný objektiv	44
Obr. 55 Návrh jádra.....	45
Obr. 56 Přetok po "Laminaci 2".	45
Obr. 57 Nutná úprava jádra pro "Laminaci 3".....	45
Obr. 58 Zkouška těsnosti.....	46
Obr. 59 Model protézy pantu technologického vzorku.	47
Obr. 60 Vytištěné protézy pantu.....	47
Obr. 61 Technologický vzorek binokuláru.....	47

Seznam Příloh

PŘÍLOHA 1: VÝROBNÍ VÝKRES OBJEKTIVOVÉ VLOŽKY

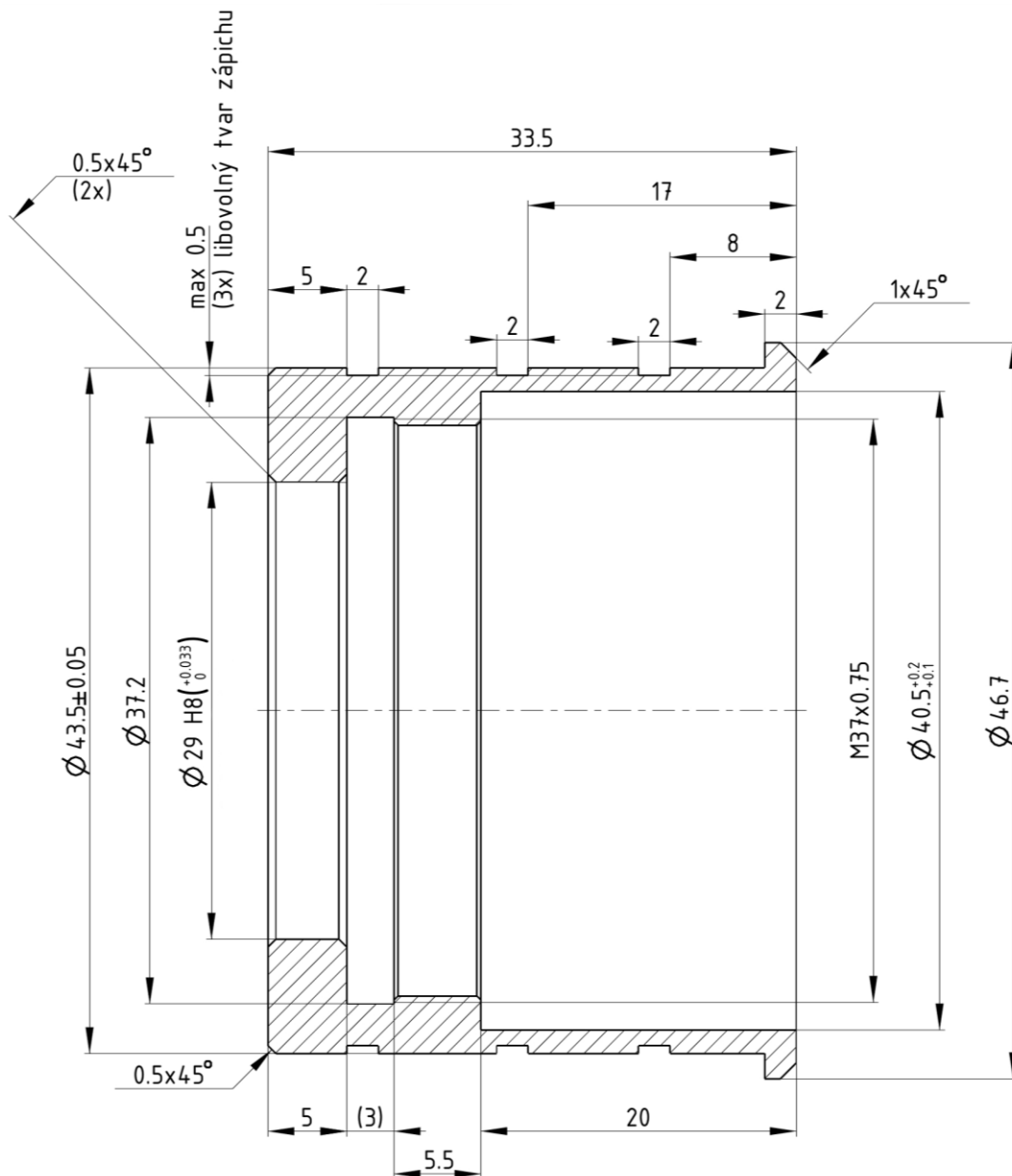
PŘÍLOHA 2: VÝROBNÍ VÝKRES OKULÁROVÉ VLOŽKY

PŘÍLOHA 3: PROTOKOL MĚŘENÍ DRSNOSTI FORMY PŘED BROUŠENÍ

PŘÍLOHA 4: PROTOKOL MĚŘENÍ DRSNOSTI FORMY PO BROUŠENÍ

PŘÍLOHA 5: NÁKRES PRO ZAČIŠTĚNÍ TUBUSU

Příloha 2: Výrobní výkres okulárové vložky



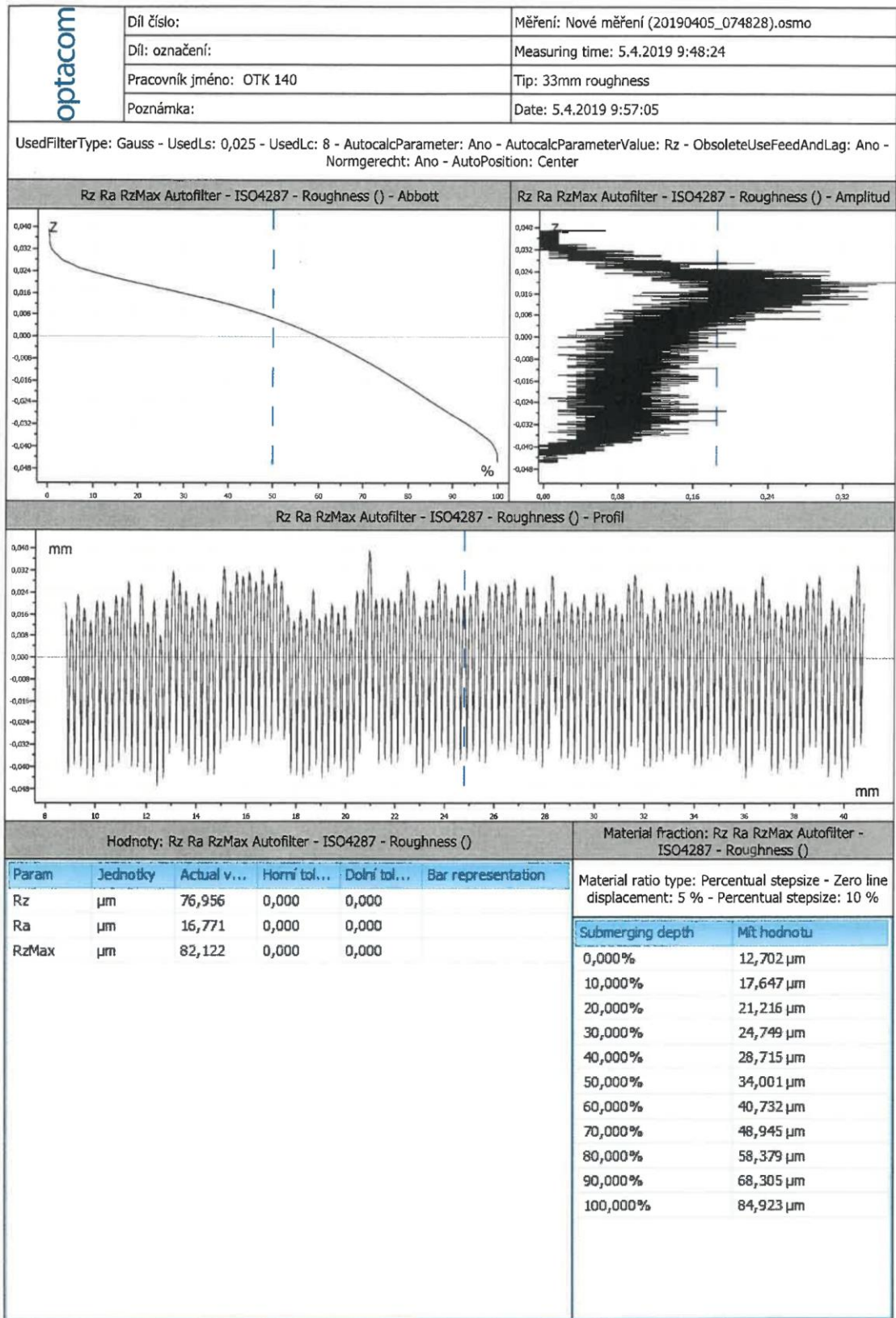
POZNAMKY:

1. SRAZIT HRANY $0.1 \times 45^\circ$
2. PU: AN.OX.- MIL-A-8625 TYPE II, CLASS II-CERNA, HLUBOCE MAT.

Název: Okulárová vložka
 Číslo výkresu: VLOZKA_008
 Poznámka: Osobní domluva
 Jméno: Radim Kupčák
 Datum vydání: 11.4.2019
 Počet kusů: 10
 Materiál: EN AW-6082-T651



Příloha 3: Protokol měření drsnosti formy před broušením



Příloha 4: Protokol měření drsnosti formy po broušení

optacom	Díl číslo:	Měření: Nové měření (20190405_080137)					
	Díl: označení:	Measuring time: 5.4.2019 10:01:34					
	Pracovník jméno: OTK 140	Tip: 33mm roughness					
	Poznámka:	Date: 5.4.2019 10:05:21					
UsedFilterType: Gauss - UsedLs: 0,0025 - UsedLc: 0,8 - AutocalcParameter: Ano - AutocalcParameterValue: Rz - ObsoleteUseFeedAndLag: Ano - Normgerecht: Ano - AutoPosition: Custom							
Rz Ra RzMax Autofilter - ISO4287 - Roughness () - Abbott		Rz Ra RzMax Autofilter - ISO4287 - Roughness () - Amplitud					
Rz Ra RzMax Autofilter - ISO4287 - Roughness () - Profil							
Hodnoty: Rz Ra RzMax Autofilter - ISO4287 - Roughness ()		Material fraction: Rz Ra RzMax Autofilter - ISO4287 - Roughness ()					
Param	Jednotky	Actual v...	Horní tol...	Dolní tol...	Bar representation	Material ratio type: Percentual stepsize - Zero line displacement: 5 % - Percentual stepsize: 10 %	
Rz	µm	1,910	0,000	0,000			
Ra	µm	0,242	0,000	0,000			
RzMax	µm	2,204	0,000	0,000			
						Submerging depth	Mít hodnotu
						0,000%	0,489 µm
						10,000%	0,640 µm
						20,000%	0,725 µm
						30,000%	0,792 µm
						40,000%	0,855 µm
						50,000%	0,914 µm
						60,000%	0,978 µm
						70,000%	1,055 µm
						80,000%	1,160 µm
						90,000%	1,342 µm
						100,000%	2,328 µm

Příloha 5: Nákres pro začištění tubusu

