

Návrh materiálové skladby a procesu výroby kompozitní součásti

Jakub Kostron

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jakub Kostron
Osobní číslo:	T19208
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh materiálové skladby a procesu výroby kompozitní součásti

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše s pomocí odborných zdrojů.
2. Návrh materiálové skladby a procesu výroby kompozitní součásti.
3. Vyhodnocení dosažených výsledků.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. HARPER, Charles A. Handbook of plastics, elastomers, and composites. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2002, xii, 884 p. ISBN 00-713-8476-6.
2. WANBERG, John. Composite materials: step by step projects. Stillwater, MN: Wolfgang Publications, [2014]. ISBN 978-1-929133-36-9.
3. WANBERG, John. Composite materials: Fabrication handbook 3. Stillwater, MN: Wolfgang Pub, 2012. ISBN 978-1-935828-66-2.
4. WANBERG, John. Composite materials. Stillwater, MN: Wolfgang Pub., c2009. Fabrication handbook, #1. ISBN 19-291-3376-6.
5. SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. a VLK M. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Mañas, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 24. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem materiálové skladby a procesem výroby kompozitní součásti.

Teoretická část práce je zaměřena na bližší popis vybraných technologií, materiálové skladby kompozitních materiálů a problematiky zvolené součásti.

Praktická část bakalářské práce popisuje návrh zvolené součásti, materiálové skladby a její výroby. Správnost návrhu součásti je potvrzena její výrobou a testováním zkušebních těles. Poslední část práce se zabývá vyhodnocením dosažených výsledků.

Klíčová slova: Kompozitní materiál, dron, kostra, uhlík, model, optimalizace, ověření

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design of material composition and the production process of a composite part.

The theoretical part is focused on a more detailed description of selected technologies, material composition of composite materials, and the issue of the chosen part.

The practical part of the bachelor's thesis describes the design of the selected component, material composition, and its production. The rightness of the design is confirmed by its production and testing of test specimens. The last part deals with the evaluation of the achieved results.

Keywords: Composite material, drone, frame, carbon, model, optimization, verification

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D. za jeho čas a úsilí při odborném vedení bakalářské práce, za trpělivost a poskytnutí prostředků k vypracování obzvláště praktické části. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při provádění mechanických zkoušek.

Velké díky také patří mé rodině za veškerou podporu za celou dobu studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
1.1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	11
1.2 VÝHODY A NEVÝHODY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.3 VÝZTUŽE.....	13
1.3.1 Typy	13
1.3.2 Typy polotovarů	18
1.3.3 Uspořádání tkanin	19
1.4 MATRICE.....	20
2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ	23
2.1 RUČNÍ LAMINACE POD VAKUOVOU FÓLIÍ.....	23
2.2 VAKUOVÉ LISOVÁNÍ PREPREGŮ	24
2.3 SMART TOOLING TECHNOLOGIE.....	29
2.4 NAVÍJENÍ.....	31
3 VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V KONSTRUKCÍCH BEZPILOTNÍCH LETADEL	32
3.1 DEFINICE DRONU	32
3.2 PŘÍKLADY VYUŽITÍ DRONŮ	32
3.3 MATERIÁLY PRO DRONY	35
3.3.1 Konvenční materiály	35
3.3.2 Kompozitní materiály.....	37
4 ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE	39
4.1 ROZDĚLENÍ DRONŮ PODLE KONSTRUKCE	39
4.1.1 Multikoptéry.....	40
4.1.2 Drony s pevnými křídly	40
4.1.3 Drony s jedním rotorem (helikoptéry)	41
4.1.4 Hybridní drony s pevnými křídly VTOL	41
4.2 NAMÁHÁNÍ KOSTRY DRONU	42
4.3 MATERIÁLOVÁ SKLADBA KONSTRUKCE	44
5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	46
6 POPIS SOUČÁSTÍ A NÁVRH MODELU	47
6.1 TĚLO	48
6.1.1 Distanční sloupky.....	49
6.1.2 FPV kamera.....	50
6.1.3 Upevnění FPV kamery	50
6.1.4 Baterie	51

6.1.5	Řídící jednotka	52
6.1.6	Elektronický regulátor rychlosti.....	52
6.1.7	Rádiový přijímač	53
6.2	RAMENA.....	54
6.2.1	Elektromotor	54
6.2.2	Vrtule.....	55
6.2.3	Upevnění elektromotoru.....	56
6.3	PŘÍSTÁVACÍ NOHY	56
6.3.1	Dosedací plochy	57
7	NÁVRH MATERIÁLOVÉ SKLADBY A PROCESU VÝROBY SOUČÁSTÍ KOMPOZITNÍ STRUKTURY.....	60
7.1	TĚLO	60
7.1.1	Návrh skladby	60
7.1.2	Návrh procesu výroby	61
7.1.3	Ověření výroby.....	61
7.1.4	Testování	64
7.2	RAMENA.....	65
7.2.1	Návrh skladby	65
7.2.2	Návrh procesu výroby	66
7.2.3	Návrh přípravku	67
7.2.4	Ověření výroby a optimalizace	67
7.2.5	Testování	69
7.3	PŘÍSTÁVACÍ NOHY	71
7.3.1	Návrh skladby	71
7.3.2	Návrh procesu výroby	71
7.3.3	Návrh formy	72
7.3.4	Ověření výroby.....	73
8	METODY DOKONČENÍ.....	74
8.1	TĚLO	74
8.2	RAMENA.....	74
8.3	PŘÍSTÁVACÍ NOHY	75
8.4	SESTAVENÍ MODELU Z VYBRANÝCH KOMPONENT	76
9	CENOVÁ KALKULACE VÝROBY.....	78
	ZÁVĚR	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	84
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	89
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
	SEZNAM TABULEK.....	93
	SEZNAM PŘÍLOH.....	94

ÚVOD

Popularita kompozitních materiálů každým rokem stále více roste v celé šířce odvětví průmyslu. Častější uplatnění kompozitních materiálů je spjato s jejich unikátními vlastnostmi, mezi které patří zejména vysoká pevnost a tuhost vztažená na jednotku hmotnosti a odolnost vůči korozi. Příklady využití můžeme najít například v konstrukcích budov, energetice, automobilovém průmyslu, letectví, ve výrobě trupů lodí nebo karoserií moderních vlaků. Nejpokročilejší uplatnění nachází kompozity v kosmickém průmyslu. Užití kompozitních materiálů zejména uhlíkového kompozitu je aktuálním standardem ve výrobě rámu FPV dronů. Volbou takového rámu je možné dosáhnout lepší manévrovatelnosti a také delší doby letu.

V teoretické části jsou obecně popsány kompozitní materiály a následně podrobněji zformulovány vybrané technologie výroby kompozitních materiálů, z kterých bylo vycházeno a byly aplikovány v praktické části bakalářské práce. V teoretické části je také vyjádřena typologie dronů, jejich využití, možnosti materiálové skladby rámu dronů a zatížení působící na konstrukci.

Praktická část je zaměřena na návrh modelu kostry dronu v závislosti na kompatibilitě zvolených komponentů, na návrh materiálové skladby součástí, z kterých je kostra dronu složena a na návrh procesů výroby součástí. Podstatná je také aplikace navržených procesů výroby a optimalizace výroby. Mechanické testování zkušebních vzorků je také neméně důležité pro ověření kvality a předpokladů navržené skladby.

V závěru bakalářské práce jsou zhodnoceny jednotlivé řešení práce a je pojednáváno o dosažených výsledcích.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

1.1 Definice kompozitních materiálů

Pod pojmem kompozitní materiál nebo také kompozit se rozumí spojení dvou a více materiálů o zcela odlišných mechanických, chemických a fyzikálních vlastnostech. Kompozit se skládá z matrice a plniva. Úlohou matrice je rovnoměrné vyplnění výrobku za účelem ochrany plniva před vnějšími vlivy, zajištění polohy vláken, tvarové stálosti výrobku, přenosu namáhání na vlákna a současnému vzájemnému působení sil mezi nimi. Výztuž plní nosnou funkci kompozitu, tj. zaručuje mechanické vlastnosti, zejména pevnost a tuhost. Žádoucí podmínkou u kompozitních materiálů je takzvaný vyztužující účinek, který vznikne vkladem výztuže do matrice a musí být splněny tyto požadavky:

- Vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice.
- Vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice.
- Matrice se nesmí porušit dříve než vlákno.

U kompozitních materiálů je využito tzv. synergického efektu, to znamená, že vlastnosti výsledného kompozitu neodpovídají součtu vlastností daných jednotlivých složek (matrice a plniva), ba dokonce je získáno lepších a kvalitativně nových vlastností. [1, 2]



Obrázek 1 Příklad využití kompozitu v automotive – Nárazník McLaren P1 [3]

1.2 Výhody a nevýhody kompozitních materiálů

U vyztužených polymerů se v mnoha případech záměrně požaduje vyztužení ve směru namáhání, takže výsledkem je na rozdíl od kovů nebo polymerů nevyztužených vlákný anizotropní materiál. Anizotropní materiál je takový materiál, který vykazuje v různých směrech jiné mechanické vlastnosti. Pro výrobu kompozitních součástí bývá nejčastěji využito výtuzí ve formě dlouhých skleněných vláken a maticí z polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic, kde je využito anizotropie. Z aplikačního hlediska bývá nejčastěji využito laminátů neboli vícevrstevných vyztužených polymerů.

Kompozitní materiály oproti konvenčním kovovým materiálům mají celou řadu výhod, ale i nevýhod, které ovlivňují aplikaci na trhu.

Výhody kompozitních materiálů:

- Vysoká pevnost a tuhost při zachování výrazně nižší hmotnosti,
- dobré tlumicími vlastnosti a velká pružnost při deformaci,
- možnost výroby různě složitých tvarů,
- dobrá odolnost proti korozi,
- značná odolnost vůči dynamickému namáhání,
- minimální tepelná a elektrická vodivost,
- možnost spojení více součástí v celkovou konstrukci.

Naopak nevýhody kompozitních materiálů jsou:

- Výrazně nižší sériovost výroby součástí,
- náročnost výroby spjatá s technologiemi výroby,
- nízká pevnost v tahu ve směru kolmo ke směru uložení vláken,
- mnohem menší tepelná odolnost,
- riziko katastrofálních následků po poškození nebo selhání materiálu,
- vysoké náklady při dimenzování náročných součástí,
- vyšší cena v závislosti na malé sériovosti. [1, 2, 4]

1.3 Výztuže

Každá výztuž může být klasifikována podle druhu materiálu a typu polotovaru. Nejčastějšími materiály výztuží jsou skelná, uhlíková nebo aramidová vlákna. Každý samotný druh vykazuje unikátní vlastnosti, na které si nahlíží při volbě materiálové skladby výrobku. Daný typ polotovaru neboli forma výztuže má své charakteristické uplatnění pro danou technologii výroby kompozitů a taktéž své specifické vlastnosti, se kterými se liší od ostatních forem výztuže.

1.3.1 Typy

a) Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou využívána v celé šířce odvětví, od automobilového průmyslu, vesmírného průmyslu, zbrojního průmyslu, zdravotního průmyslu, na výrobu větrných elektráren a dalších použití, zejména také v leteckém průmyslu, kde v momentální době uhlíková vlákna dosahují více než 30% materiálové skladby moderních letadel. Tohoto využití nabývají uhlíková vlákna proto, že je v letectví kladen důraz na poměr úspory hmotnosti při zachování značné pevnosti a tuhosti konstrukce. Na tento významný aspekt je dále nahlíženo při vypracování praktické části bakalářské práce – návrhu materiálové skladby kostry dronu. [2]

Kromě svých výborných mechanických vlastností se uhlíková vlákna také vyznačují dobrou zpracovatelností, zdravotní nezávadností a jedinečným estetickým vzhledem. Tkaniny z uhlíkových vláken se stejnou hmotností jako tkaniny ze skelných umožňují běžně vyplnit formu s menším úsilím, také se dají lépe stříhat, krátit a brousit.

Při výrobě uhlíkových vláken dochází k procesu zvaným karbonizace, to je proces, při kterém se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou roste stupeň grafitizace a tím se také zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800 °C je tvorba grafitové struktury dokončena. [2]

Materiály pro výrobu uhlíkových vláken mohou být tvořeny celulozou, polyakrylonitrilem anebo smolou. [1]

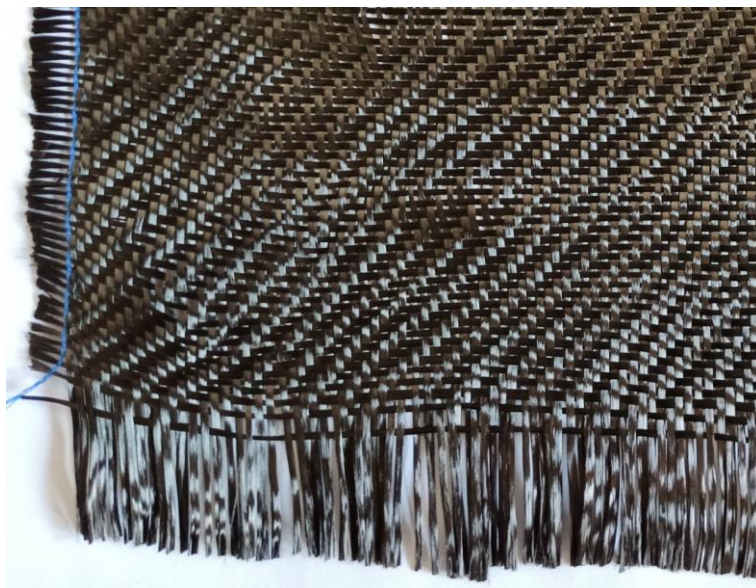
Vlákna vyráběná se surovinou celulózy mají méně ideální strukturu, proto se využívají jako izolační materiál při působení vysokých teplot.

Polyakrylonitril je nejvíce rozšířenou surovinou pro výrobu uhlíkových vláken, a tudíž vlákna vyrobená z něj jsou považována jako standartní vlákna. [1]

Technologie výroby vláken pomocí smoly je finančně nákladná, ale samotná cena suroviny je nízká, proto je konečnou výsledná cena příznivá. Tato vlákna se projevují vysokým modulem pružnosti v tahu, dobrými tepelnými a elektrickými vlastnostmi. Naopak ve srovnání se standartními vlákny je jejich pevnost v tlaku výrazně nižší. Tato vlákna mají na trhu menší zastoupení, používají se pro speciální účely a dělí se na vlákna s vysokým modulem pružnosti (HM) a vlákna s vysokým modulem pevnosti (HT). [1]

Uhlíková vlákna se skládají až z 90 % z uhlíku, 7 % dusíku, 1 % kyslíku a přibližně 0,3 % vodíku. Průměr vláken činí 5 až 10 μm . U uhlíkových vláken mez pružnosti v tahu a mez pevnosti prudce závisí na namáhání ve směru orientace vrstev a na výskytu vadných míst vzniklých při výrobě. Při namáhání v rovnoběžném směru s orientací vláken mohou působící síly v tahu, aniž by došlo k trvalým deformacím, být až několikanásobně vyšší než při namáhání kolmo k orientaci vláken. [1]

Hmotnost tkanin z uhlíkových vláken bývá často měřena podle toho, kolik tisíců vláken se nachází v jednom celém svazku. Například 1K znamená, že se v jednom svazku nachází tisíc vláken, 3K tři tisíce. Běžné počty vláken ve svazku jsou 1K, 3K, 6K, 12K a 24K. 3K tkaniny se využívají při výrobě běžných laminátů. 6K se aplikuje při rychlé laminaci a 12K a 24K se uplatňuje pro výrobu kompozitních forem. Tkaniny z uhlíkových vláken, stejně tak jako ostatní druhy tkanin jsou dále specifikovány dle hmotnosti na metr čtvereční či jiné délkové veličiny (cm, yard...) a podle tloušťky. [5]

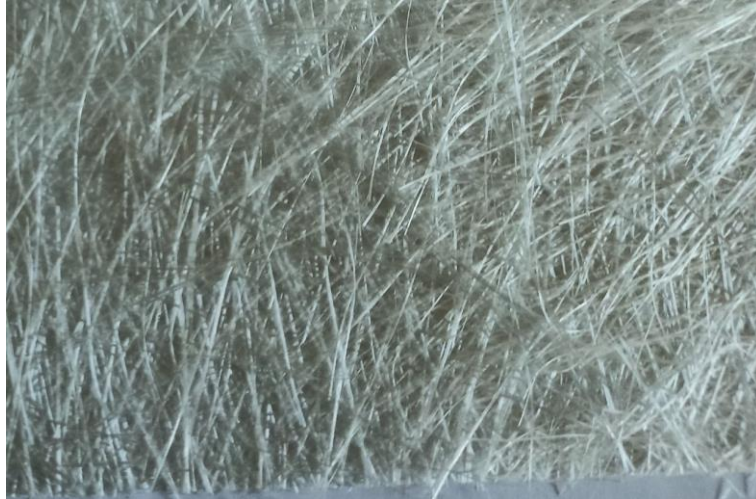


Obrázek 2 Uhlíková vlákna – Uhlíková tkanina

b) Skelná vlákna

Vzhledem ke své nízké ceně a dobré dostupnosti patří mezi nejvíce používaná vlákna v kompozitních součástech. Uplatnění nachází skelná vlákna například ve výrobě rekreačních plavidel pro výrobu trupů lodí, dopravním průmyslu na celé konstrukce vlaků, autobusů a kabin kamionů. V leteckém průmyslu jsou skelná vlákna využívána na různé konstrukční prvky a v modelářství na celé modely letadel.

Skelná vlákna se vyrábějí tažením taveniny směsi oxidů křemíku s příměsí oxidů hliníku, vápníku, hořčíku, olova a boru. Průměr vláken činí 3,5 až 24 μm . Skelná vlákna se nejčastěji dělí dva druhy značené jako E-vlákna a S-vlákna. E-vlákna se řadí mezi nejvíce užívanými vlákny na trhu, vyznačují se vysokou propustností světla a jsou vynikajícím elektrickým izolantem. S-vlákna jsou vysokovýkonná vlákna a disponují znatelně vyšší pevností jak E-vlákna. [1, 5, 7]



Obrázek 3 Skelná vlákna – Skelná rohož

c) Aramidová vlákna

Název aramid vychází z chemického názvu aromatický polyamid. Aramidová vlákna jsou charakterizována velice nízkou hmotností, pevností, houževnatostí, odolností vůči otěru a působení vyšších teplot. Nevýhodou vláken je, že se tkaniny z nich obtížně stříhají a třepí se. Stejně tak vytvrzený kompozit je náročné krájet, proto někteří výrobci k řezání využívají technologii řezání abrazivním vodním paprskem. Díky svým unikátním vlastnostem jsou aramidová vlákna využívána na ochranné protipožární obleky, balistické vesty, výztuže pneumatik, náhrady azbestu v třecích a brzdových obloženích.

Průměr vláken činí standardně 12 μm a barva vláken je žlutá. Obchodní název aramidových vláken je Kevlar a je dostupný ve třech variantách, a to jako Kevlar, Kevlar-29 a Kevlar-49. [1, 5]



Obrázek 4 Aramidová vlákna – Aramid-diolenová tkanina

d) Přírodní vlákna

Vhodnou volbou pro vyztužení plastů přírodními vlákny jsou pouze vlákna rostlinná, které jsou tvořeny celulózovým základem. Mezi ně patří konopí, len, juta, bavlna atd. Vlákna disponují vysokou pevností v tahu, nízkou měrnou hmotností, odolností proti stárnutí, čichovou nezávadností při měnících se klimatických podmínkách a dobrou možností recyklace. [1]



Obrázek 5 Přírodní vlákna – Lněná tkanina [8]

Nevýhody vláken jsou, že jsou citlivé na působení vlhkosti, je omezená délka vláken, volba výběru matrice je omezena z důvodu nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování. Rostlinná vlákna jsou vhodnou volbou pro použití u lehkých konstrukcí vzhledem ke své nízké měrné hmotnosti. [1]

1.3.2 Typy polotovarů

a) Tkaniny

Tkaniny nebo také tkané textilie bývají vyráběny na tkacích strojích. Mohou se lišit podle různých druhů vazeb, materiálů a podle rozdílných délek, šířek a hmotností. Tkaniny poskytují dobrou pevnost ve směru příze nebo rovingu. Pevnost tkaných textilií je do určité míry pomyslná, jelikož při tkaní v místech prošíty vrstev textilií dochází k zvlnění vláken. U kompozitu zatíženém napětím v tahu mají tato vlákna tendenci se narovnávat, což způsobuje napětí v matrici. [9]

b) Rovingy

Je silný svazek vláken navinutý na cívce. Uhlíková vlákna a aramidová vlákna jsou typicky dodávána ve formě rovingů a zpevňují kompozit v místech, kde je intenzivně namáhán. Tímto způsobem mohou být skladována i skelná vlákna s tím rozdílem, že se vlákna dále využívají v laminaci, kdy se pomocí sekací pistole automaticky nanáší na formu nebo kompozitní díl vrstva nasekaného skelného vlákna. Tato metoda se využívá pro nanášení vrstev skelného vlákna na velké plochy. [5, 9]



Obrázek 6 Rovingy – Uhlíkový roving

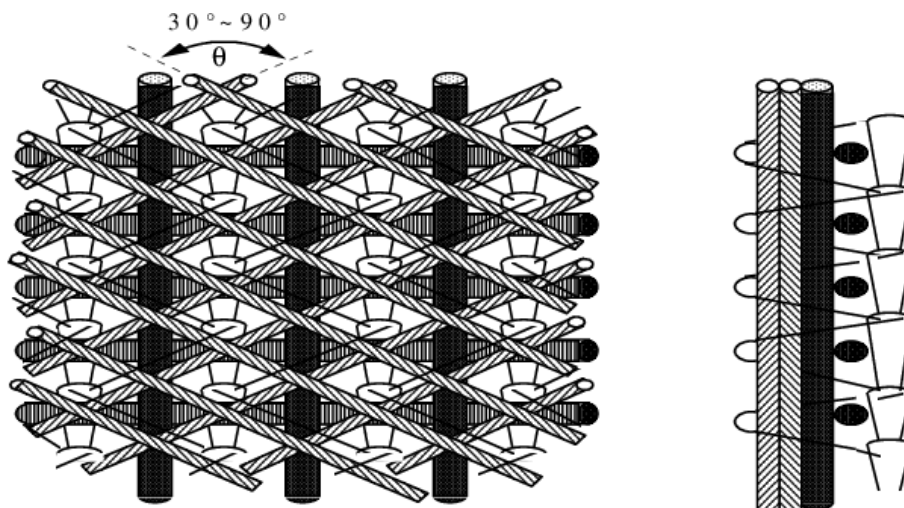
c) Rohože

Jsou to netkané textilie s náhodnou orientací a jsou spojeny pohromadě pomocí chemického pojiva. Jejich cena je nízká a dodávají se v rolích. Rohože se využívají u kompozitních součástí v místech, kde je vyžadována odolnost vůči víceosému namáhání. Také se často využívají na opravy lodí a automobilů. Nevýhodou rohoží je, že struktura s náhodnou

orientací vláken obsahuje místy velké mezery, tudíž k vytvoření kompozitu je třeba větší množství pryskyřice, a to má za následek větší hmotnost a zvýšenou křehkost kompozitní součásti. [5, 9]

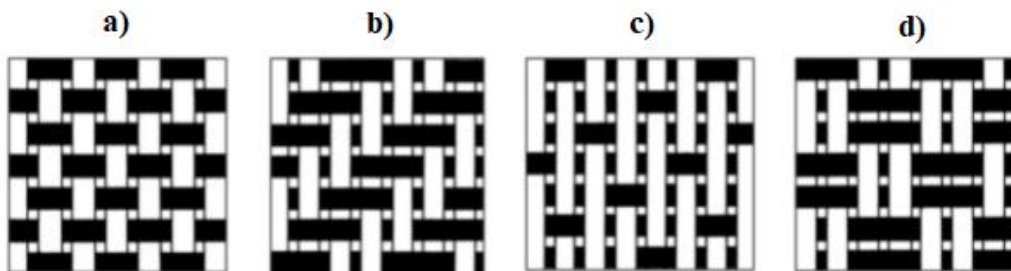
d) Multiaxiální tkaniny

Vyznačují se tím, že příze splétají více vrstev tkanin, které jsou vzájemně orientované pod daným preferenčním úhlem a dohromady jsou sestaveny do pletenin. Tyto tkaniny se vyrábí na speciálních osnovních pletacích strojích. Multiaxiální tkaniny jsou nejvíce využívány pro vyztužování kompozitních součástí. [9]



Obrázek 7 Struktura multiaxiálních tkanin [10]

1.3.3 Uspořádání tkanin



Obrázek 8 Vazby tkanin: a) plátňová, b) keprová, c) saténová, d) košíková [11]

a) Plátňová vazba

Tahle metoda pletení je nejvíce rozšířená u výztuží tvořenými vlákny. Způsob, jakým je tkanina spletena spočívá v tom, že svazek vláken v jednom směru se proplétá prostým způsobem přes a pod se svazky vláken na sebe kolmém. [5]

Díky symetričnosti téhle vazby napětí působí na vlákna rovnoměrně. Tuto vazbu je možné použít pouze když matrice je tvořena pryskyřicí. [5]

b) Keprová vazba

Tato vazba má tendenci mít nejlepší vlastnosti v kombinaci pevnosti a schopnosti vyplnit požadovaný tvar. Zásadou toho se tato vazba využívá u tvarově složitějších výrobků, které jsou zároveň namáhané. Je to obdobný způsob jak u plátňové vazby, s tím rozdílem, že každá příze jde prvně přes dvě příze na sebe kolmé a poté pod další dvě příze. [5]

c) Saténová vazba

Saténová vazba nabízí tkanině výjimečnou tvarovatelnost, ale s tím si nese za následek nízkou pevnost. U tohoto uspořádání tkanin daná příze jde prvně přes jednu přízi a potom pod více dalšími přízemi najednou. Kvůli tomuto vzoru se nastříhané tkaniny při zpracování mokrou laminací třepí, takže je nutné s nimi zacházet se zvýšenou opatrností. [5]

d) Košíková vazba

Tato metoda uspořádání svazků vláken v tkanině je velice podobná plátňové vazbě, s tím rozdílem že dva a více svazků se současně proplete se dvěma a více svazky na sebe kolmých. Tkanina s tímto vzorem se méně krabatí než plátňová vazba, ale zároveň se více třepí. [5]

1.4 Matrice

Existuje celá řada polymerních matric, které se zpravidla dělí na termoplastické a reaktoplastické. Mezi nejpoužívanější matrice pro výrobu kompozitních součástí patří polyesterové, vinylesterové, epoxidové a polyamidové pryskyřice. [5]

a) Epoxidové pryskyřice

Uplatňují se v oblastech, kde je vyžadována odolnost vůči dynamickému namáhání a jsou vhodné jako matrice s kombinací s vysokopevnostními vlákny, například s uhlíkovými vlákny. Volbou vhodného tvrdidla je ovlivněna chemická odolnost. Aminová tvrdidla zaručují odolnost vůči alkáliím a anhydridová tvrdidla proti kyselinám a horké vodě. Rozsah tepelné odolnosti je vyšší než u vinylesterových a polyesterových pryskyřic. Epoxidové pryskyřice také vynikají dobrou adhezí vůči různým druhům podkladů. Oproti reakci s katalyzátorem u vinylesterových a polyesterových pryskyřic, epoxidové pryskyřice tvrdnou vlivem přidání tvrdidla, která vyústí v chemickou reakci, při které se vytvoří nebo propojí pryskyřice s tvrdidlem. Epoxidové pryskyřice oproti vinylesterovým a polyesterovým pryskyřicím netvrdnou rychleji přidáním nadměry katalyzátoru, ale vyžadují vhodný a přesný poměr tvrdidla a pryskyřice. Fyzikální vlastnosti epoxidové pryskyřice prudce závisí na jejím chemickém vzorci a mohou být zlepšeny speciálním procesem dodatečného vytvrzení. Mezi vlastnosti, které můžeme ovlivnit procesem dodatečného vytvrzení, patří pevnost, pružnost, chemická a tepelná odolnost. [1, 5]

Mezi nevýhody těchto pryskyřic patří, že mohou degradovat před přímým dopadem UV záření, proto je na ně nutné aplikovat speciální vrstvy bránící před touto degradací. Při práci s epoxidovými pryskyřicemi je doporučeno využití ochrany dýchacích cest, jelikož částičky z nich mohou způsobovat alergické reakce. Stykem kapalné pryskyřice s kůží může také dojít k podráždění. Cena oproti ostatním pryskyřicím je také výrazně vyšší. [1, 5]

b) Polyesterové pryskyřice

Díky své nízké ceně a ovlivnitelného času vytvrzení je to nejvíce používaná pryskyřice pro výrobu kompozitních součástí ve větších sériích ale i pro malé obchody specializované kompozity. Polyesterové pryskyřice jsou bezbarvé až slabě nažloutlé roztoky. Jsou velice odolné proti UV záření a mohou být využívány u kompozitních součástí vystavovaných dlouhodobému působení slunečního světla. Pryskyřice se vytvrzují s aditivem katalyzátoru z Methylethylketonperoxidu. Přidáním většího množství katalyzátoru je možné zkrátit dobu vytvrzování. Avšak přidáním příliš velkého množství katalyzátoru může dojít až k předčasnému vytvrzení, a to je nepřijatelné. Výhodou těchto pryskyřic je, že mají nízkou viskozitu, takže plnivo je rychleji lépe a pojme. [1, 5]

Nevýhody polyesterových pryskyřic jsou, že patří k pryskyřicím s nejnižší pevností. Proto není vhodné je použít v kombinaci s vysokovýkonnými vlákny, jako jsou uhlíková vlákna. Zdrojem zápachu u polyesterových pryskyřic je právě styren, který má negativní vliv na lidský organismus. [1, 5]

c) Vinylesterové pryskyřice

Vinylesterové pryskyřice mají lehce lepší vlastnosti jak pryskyřice polyesterové, v některých případech dosahují až kvalit pryskyřic epoxidových. Mezi tyto vlastnosti patří například vynikající chemická odolnost, jednoduchost použití, méně pohlcují vodu jak pryskyřice polyesterové a vynikají schopností vzájemné slučitelnosti s nimi. Z těchto důvodů se na rozdíl od polyesterových pryskyřic používají pro výrobu trupů luxusních menších lodí s vysokovýkonnými motory a také na výrobu velkých chemických nádrží. Jejich velkou výhodou je, že se dají využít ve spojení se všemi typy výztuží. Vinylesterové pryskyřice stejně tak jako polyesterové se během vytvrzování scvrkávají a uvolňují monomer styrenu, což je bráno za nežádoucí vliv. [1, 5]

2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ

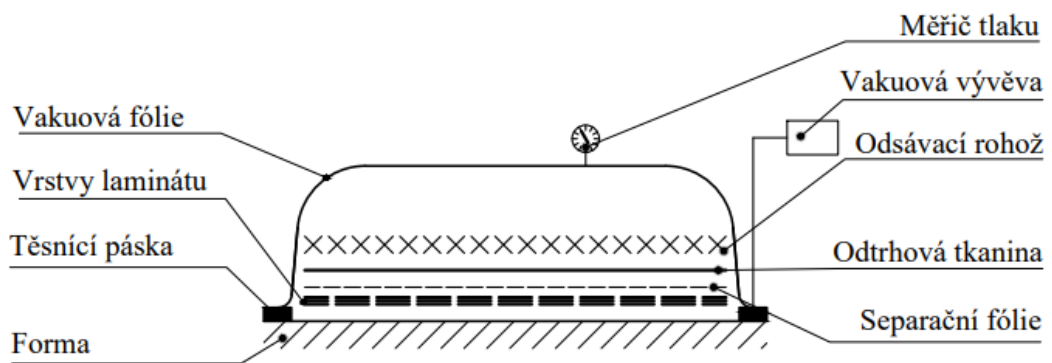
Existuje nespočet druhů technologií pro výrobu kompozitních součástí. Některé typy technologií umožňují pouze výrobu určitého typu výrobku, zatímco jinými technologiemi je možné vyrábět kompozity s širokou škálou rozmanitostí, jako například tvarovou nebo materiálovou. Základní rozdělení všech technologií spočívá v provedení formy. Forma může být jednodílná – otevřená nebo uzavřená, kdy je složena z minimálně dvou částí. [5, 6]

2.1 Ruční laminace pod vakuovou fólií

Tato technologie patří mezi metody využívajících nízkého tlaku a injektážního prosycování výztuže. Podobně jako u standartního ručního laminování nebo stříkání se využívá jednodílná forma. U ruční laminace pod vakuovou fólií se aplikuje podtlak na laminát během vytvrzovacího cyklu. Působení podtlaku slouží k odstranění zbylého vzduchu pod vakuovou fólií a k efektivní přepravě pryskyřice mezi svazky vláken v tkanině. Další funkcí podtlaku je, že zabraňuje změně orientace vláken, snižuje vlhkost vzduchu během procesu a to nejpodstatnější, že optimalizuje poměr pryskyřice a výztuže kompozitu. Díky těmto aspektům, je možné maximalizovat fyzikální vlastnosti kompozitních výrobků z pokročilých kompozitních materiálů, jako jsou uhlíková vlákna, aramidová vlákna a epoxidové pryskyřice.

Pro dosažení správné funkčnosti technologie (Obrázek 9) musí systém obsahovat tyto prvky:

- Vakuová fólie
- Vakuová pumpa
- Měřič tlaku
- Odsávací rohož
- Odtrhová tkanina
- Separální fólie
- Těsnící páska
- Vakuový ventil, trubice a spojky [1, 5, 13]



Obrázek 9 Schéma ruční laminace pod vakuovou fólií [14, 18]

2.2 Vakuové lisování prepregů

Mezi nejčastější technologie zpracování prepregů patří metoda pomocí autoklávu a metoda pomocí vytvrzovací pece. Volba technologie pro daný výrobek závisí na nákladech výroby, na typu a požadované kvalitě výrobku.

Slovem prepreg se označuje předimpregnovaná neboli předem nasycená vyztuž pryskyřicí, je to polotovár, který bude dále zvolenou technologií vytvrzen. Nejnáročnější hlediskem při výrobě prepregů představuje preciznost na důkladné zaplnění volného prostoru v tkanině pryskyřicí. K nedostatečnému zaplnění může docházet vlivem rostoucí viskozity pryskyřice, a to má za důsledek vzniku dutin se zachyceným vzduchem v prepregu. Tento defekt značně ovlivní mechanické vlastnosti prepregu. K dosažení specifických vlastností a vyšší kvality produktu se využívají kombinace více druhů vyztuží a pojiv. Prepregy tvořené jednosměrnou vyztuží se využívají častěji než ve formě tkanin. [13, 14]

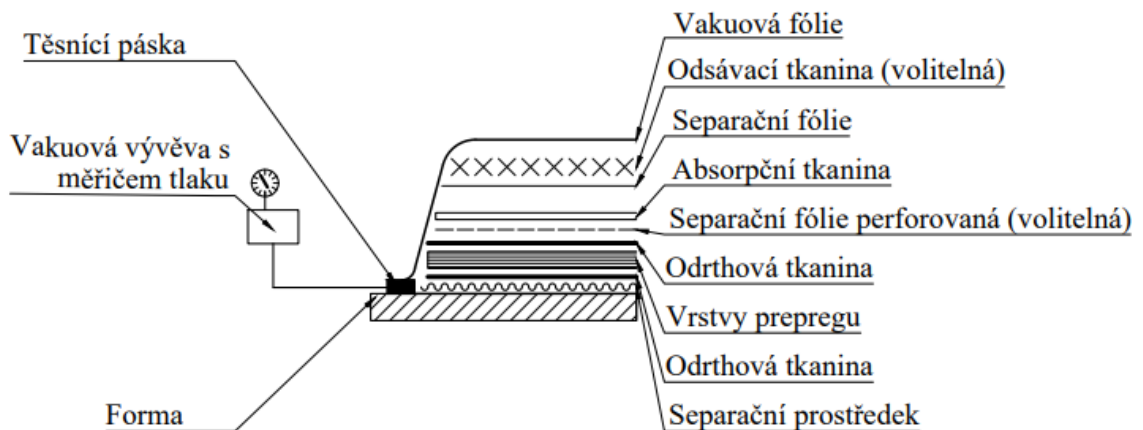
a) Zpracování prepregů pomocí vytvrzovací pece

Tato metoda je vhodná pro výrobu součástí o měnící se tloušťce a pro rozměrné sendvičové struktury. Na rozdíl od autoklávového zpracování se metoda pomocí vytvrzovací pece upřednostňuje v případech, kdy není kladen důraz na dosažení mimořádně nízké pórovitosti a kdy nejsou k dispozici tak vysoké finanční prostředky spojené s pořizovacími a provozními náklady. [6, 16, 17]

Základem výrobního procesu je navržení dostatečného rozměru vakuové fólie a správné utěsnění. Vakuová vývěva umožňuje odsátí vzduchu z prostoru pod vakuovou fólií. K odsávání vzduchu dochází, dokud tlak pod fólií nepřekročí atmosférický tlak 101,3 kPa (1 bar) a dokud fólie tečně nepokryje prepreg s pomocnými materiály ve formě. Dále je forma se zavakuovaným prepregem vložena do vytvrzovací pece. Schematicky je tato technologie zobrazena na obrázku 10. Doba vytvrzování je u této metody relativně krátká. [6, 16, 17]

Vhodné pomocné materiály pro zpracování prepregů pomocí vytvrzovací pece:

- Vrstva separátu
- Odrthová tkanina (volitelná)
- Absorpční tkanina (volitelná)
- Separáční fólie
- Absorpční tkanina
- Odsávací tkanina
- Těsnící páska [6, 16, 18]



Obrázek 10 Schéma zpracování prepregů pomocí vytvrzovací pece [16, 18]

b) Zpracování prepregů pomocí autoklávu

Autoklávové zpracování bývá aplikováno v případě kdy je dbáno na prvotřídní kvalitu výrobku o nízké pórovitosti a vysokém objemovém zastoupení výztuže. Autokláv je tlaková nádoba zajišťující podmínky vytvrzování kompozitu. Vytvrzování je uskutečněno působením vakua, tlaku a teploty v autoklávu. Tlak v autoklávu umožňuje výrobu tvarově složitějších výrobků. Jsou zde nutné dlouhé vytvrzovací cykly, jelikož pracovní prostor uvnitř autoklávu je rozměrný a trvá delší dobu jej ohřát nebo zchladit. Pomocné materiály pod vakuovou fólií zmíněné u zpracování pomocí vytvrzovací pece jsou společné i pro metodu vytvrzování pomocí autoklávu. [16, 19]

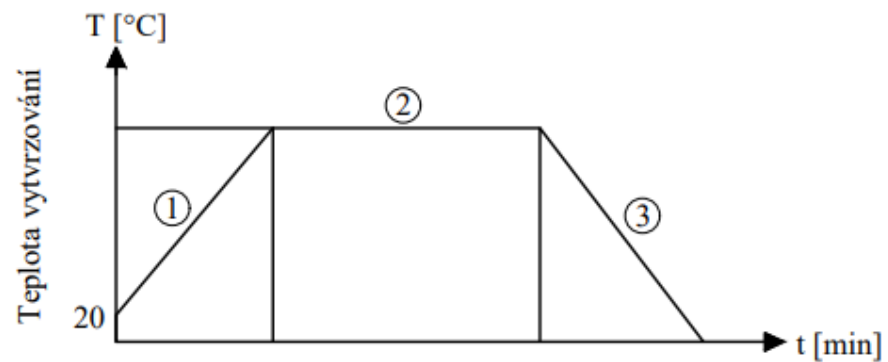
c) Porovnání vytvrzovacích cyklů ve vytvrzovací peci a autoklávu

U obou metod je prepregový polotovár vystaven identickému chování průběhu teplot během vytvrzovacího cyklu. Nejprve je prepreg zahřát na teplotu vytvrzování, poté je zanechán určitou dobu na této teplotě, a nakonec je pozvolně ochlazen na teplotu vyhazovací. [16, 18]

Pro prepregový polotovár zpracovávaný ve vytvrzovací peci je vakuum vytvořeno před začátkem působení teploty. K opětovnému zajištění atmosférického tlaku dochází až po dokončení vytvrzovacího cyklu. Teplota a podtlak pod vakuovou fólií jsou jedné veličiny působící na prepregový polotovár během vytvrzovacího cyklu. Vytvrzovací cyklus ve vytvrzovací peci je schematicky zobrazen na obrázku 11.

Stejně tak i u zpracování v autoklávu dochází ke vytvoření vakua, ale oproti metodě ve vytvrzovací peci vzniká navíc působení tlaku vlivem autoklávu na vnější stranu vakuové fólie, která těsní celý systém s prepregovým polotovárem. Před začátkem vytvrzování je pod vakuovou fólií vytvořeno vakuum. Z hodnoty vakua vzroste tlak na určitou hodnotu podtlaku v čase, kdy začne působit vně vakuové folie tlak autoklávu, který roste až do konce náběhu teploty a poté je konstantní po celou dobu vytvrzování. Hodnota podtlaku je neměnná, dokud nedojde k ukončení vytvrzovacího cyklu. Vytvrzovací cyklus ve vytvrzovací peci je zobrazen na obrázku 12. [16, 18]

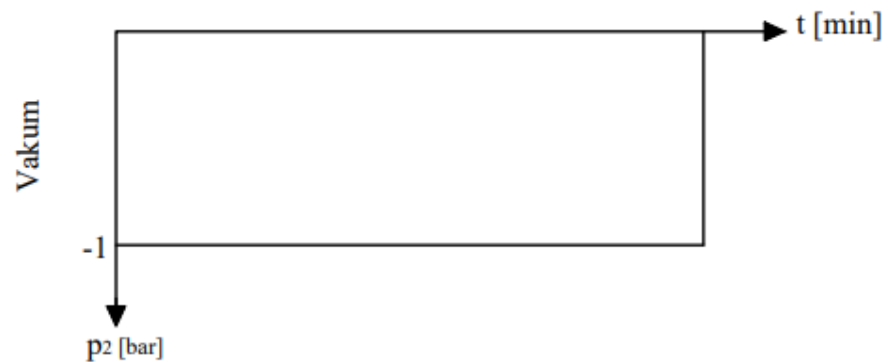
Vytvrzovací cyklus ve vytvrzovací peci



1 - Náběh na teplotu vytvrzování

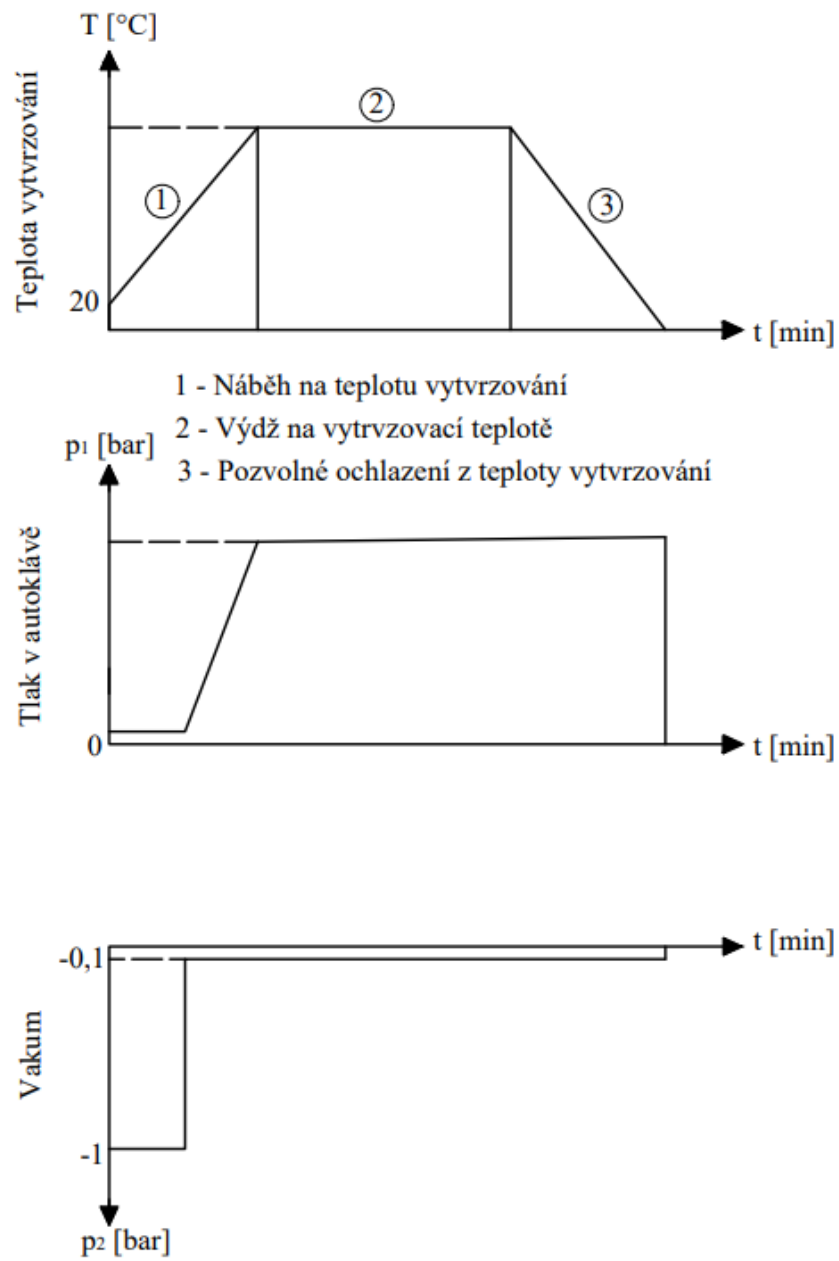
2 - Vých na vytvrzovací teplotě

3 - Pozvolné ochlazení z teploty vytvrzování



Obrázek 11 Vytvrzovací cyklus prepregového polotovaru ve vytvrzovací peci [16, 18]

Vytvrzovací cyklus v autoklávu



Obrázek 12 Vytvrzovací cyklus prepregového polotovaru v autoklávu [16, 18]

2.3 Smart tooling technologie

Smart tooling technologie patří mezi nejmodernější technologie zabývající se výrobou kompozitních součástí. Tato technologie bývá nejvíce využívána k vytvoření společně vytvrzené struktury laminátu. Společně vytvrzená struktura vznikne spojením dvou a více nevytvrzených komponentů, které se společně vytvrdí a vytvoří jednotnou součást. Typickou aplikací pro společně vytvrzené struktury bývá spojení těla součásti z laminátu a žebra z laminátu. Tato technologie je charakterizována tím, že nevytvrzený laminát spolu s pomocnými materiály se kladou na jádro zvané Smart Tool, a nikoliv do formy, jak to bývá u běžných technologií. Díky tomu, odpadá náročnost na správné umístění nevytvrzeného laminátu ve formě a komplikovanější vytvoření vakua.

Smart tooling technologie se dělí na dva způsoby, které lze rozdělit dle zvoleného jádra:

- Smart tooling technologie využívající duši
- Smart tooling technologie využívající trn [20]

a) Smart tooling technologie využívající vak

Při této aplikaci vak (Smart Tool) je obložen laminačními vrstvami a je vložen do vytvrzovací formy. Během vytvrzování laminátu vak překročí teplotu skelného přechodu a stává se elastickým, díky tomu se vak rozpíná a způsobuje tím působení tlaku na laminát, správné ztuhnutí laminátu a rovnoměrné rozprostření pryskyřice. Po dokončení vytvrzování je Smart Tool stále elastický a umožňuje snadné vyjmutí z kompozitní součásti. Dále se samotný Smart Tool vloží znovu do vyhřívané formy a za působení vakua je opět zafixován na požadovaný tvar. Nakonec je schlazen a je připraven na další cyklus výroby kompozitní součásti. Vak je vyroben z polymeru s tvarovou pamětí, a proto je možné jej opakovaně převádět z tuhého do elastického stavu.

Smart Tooling z epoxidu vydrží 60 až 100 cyklů. Následným nadměrným použitím se projeví degradace materiálu, která je způsobena oxidací vlivem opakovaného tepelného namáhání. Nevhodný způsob odformování zkracuje trvanlivost vaku a způsobuje rychlé opotřebení povrchu. Tuhle metodou jsou vyráběny lamináty, u kterých jsou vyžadovány tolerance na vnitřní povrch součástí. Typickými výrobky vyrobené touto technologií jsou potrubí, součásti motoru a jiné. [20]

b) Smart tooling technologie využívající vnější trn

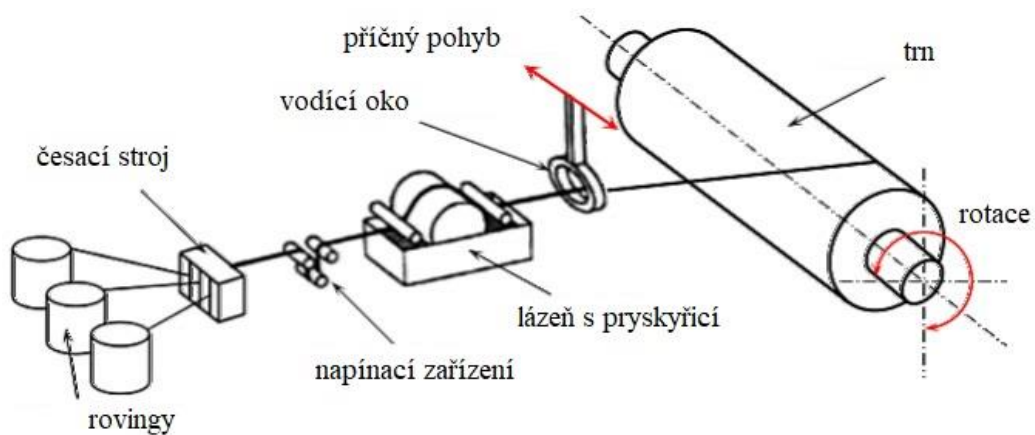
U této technologie Smart Tool tvoří trn. Smart Tool se nestává elastický během vytvrzovacího cyklu, ale setrvává v tuhém stavu. To se děje za účelem, aby trn pouze plnil funkci zaformování. Přejít do elastického stavu je nutný až při dotvrzovací fázi, při které se vyžaduje, aby se trn rozpínal a aby dále bylo možné vytvrzený laminát z vnitřku trnu vyjmout. Po dokončení laminátu je trn stejně jako vak v předchozí technologii zpátky vložen do vyhřívané formy, schlazen a smrštěn na původní pracovní geometrii. Smart Tooling technologie využívající trn se aplikuje při výrobě součástí s požadavkem na vysoké tolerance povrchu vně výrobku. Své uplatnění nachází například v leteckém průmyslu na výrobu wingletu (malá pomocná plocha na konci nosného křídla letadla usměrňující vzdušné víry). [20]



Obrázek 13 Trn s vytvrzeným laminátem před vložením do pece na dotvrzení. [20]

2.4 Navíjení

Pomocí technologie navíjení je možné vyrábět dutá tělesa, zejména rotačně symetrického tvaru, ale také je možné dosáhnout tvaru nesymetrického s konvexními povrchy. Při technologii navíjení je současně vykonáván rotační pohyb trnu a zpětný a dopředný pohyb suportu, kdy dochází ke křížovému navíjení výztuže na trn. V případě mokrého navíjení je výztuž ve formě nekonečného vlákna dopravována lázní s pryskyřicí a následně je navíjena na trn. Je dokonce možné navíjet tkaniny nebo rohože. Z důvodu smrštění navíjeného tělesa při vytvrzování jsou navíjecí jádra z jednoho kusu nebo skládací. Pro snadnější vyjmutí vytvrzeného kompozitu z jednodílných trnů, jsou trny opatřeny mírným zkosením. Vytvrzování kompozitu může být zajištěno pomocí vyhřívaného trnu, infračerveného zářiče, vytvrzovací pece a kombinací těchto metod nebo jednoduše na vzduchu za pokojových podmínek. Navíjením jsou vyráběny součásti, jako jsou trubky, nádrže, těla raket, golfové hole atd. Navíjení je mechanizovanou technologií s vysokou přesností a reprodukovatelností. [1, 6]



Obrázek 14 Schéma technologie navíjení [21]

3 VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V KONSTRUKCÍCH BEZPILOTNÍCH LETADEL

3.1 Definice dronu

Názvem dron bývá označováno letadlo, které je řízeno na dálku, nebo může létat samostatně pomocí naprogramovaných letových plánů, či složitějších dynamických autonomních systémů. Méně častým pojmenováním je bezpilotní letadlo a pod anglickým označením se uplatňuje zkratka UAV (Unmanned Aerial Vehicle). [22, 23]

Drony jsou zde již od brzkých let 20. století. Zpočátku byly především využívány pro vojenské operace. Ale od té doby, co elektronika se stává čím dál menší, dostupnější a více výkonná, nachází drony své užití v mnoha odvětvích. Kde dříve vědci mohli pozorovat geografii krajiny Země z výšky pouze pomocí běžných letadel a satelitů, nyní rozvíjí a zdokonalují svůj výzkum za pomoci dronů. V současnosti mohou drony nabývat rozměrů od velikosti letadla až po velikosti čmeláka. Jejich řízení bývá nejčastěji umožněno pomocí rádiového signálu, kdy na zemi se nachází ovládací zařízení a na konstrukci bezpilotního letadla je připevněna anténa přijímací danou frekvenci. Většina malých dronů je napájena lithium-polymerovými bateriemi, zatímco ty větší mohou být poháněny leteckými motory. [22, 23]

3.2 Příklady využití dronů

V závislosti na jejich funkci, jsou drony obstarány různými druhy vybavení a zařízení ke snímání obrazu. Pomocí digitálních kamer je možné identifikovat zvířata a rostliny a napomáhají k vytváření 3D map. Termokamery umožňují detekovat teplo u živých organismů, jakou jsou zvířata a rostliny, ale také dokáží snímat rozložení teplot ve vodních ekosystémech. Hyperspektrální zobrazování identifikuje rysy rostlin a vody pomocí měření odraženého světla a dokáže interpretovat širší rozsah vlnových délek, než vidí lidské oko. Prostřednictvím technologie LiDAR (Light Detection and Ranging), v překladu světelná detekce a měření rozsahu, měří, jak dlouho trvá, než emitovaný puls světla dosáhne cíle a vrátí se k senzoru, lze ji použít k výpočtu vzdálenosti a výšky objektu, což se využívá například k vytváření 3D map. [22]

a) Vojenské užití v průzkumu a boji

Armáda byla prvním uživatelem technologie dronů. Drony byly aplikovány k shromažďování klíčových informací na bojišti. Pro tuto aplikaci je tato technologie využívána i dnes, pouze se zvýšila její účinnost. Dnes mohou výkonné drony létající několik stovek kilometrů nad oblohou, vybavené nejvýkonnějšími zobrazovacími nástroji, shromažďovat kompletní informace o nepříteli na jeho území.

Kromě průzkumných misích se technologie používá také pro aktivní bojové role. Spojené státy jako největší výrobce a uživatel vojenských bezpilotních letounů tuto technologii po desetiletí využívá k boji s nepřítelem. Hlavní výhodou užití dronů v aktivní bojové roli je, že je možné likvidovat nepřátelské cíle na dálku. [23, 24]

b) Zemědělské aplikace

Užití dronů v zemědělství má také velký význam. Drony nabízejí farmářům cenově dostupné a efektivní metody monitorování plodin. Drony vybavené infračervenými senzory jsou zvláště užitečné pro sledování zdraví plodin a poskytují zemědělcům rychlé a zároveň spolehlivé informace. Díky čemuž je možné uskutečňovat preventivní opatření a zlepšovat podmínky růstu plodin a výslednou kvalitu produktu. Dalším uplatněním dronů v zemědělství je při aplikaci postřiků na plodiny. Užití dronů při této aplikaci je daleko účinnější jak při použití běžných tradičních metod. [24, 25]

c) Mapování terénu

Využívají se drony řízené umělou inteligencí, jsou předem naprogramovány tak, aby se pohybovaly po dané trajektorii a létaly bez nutnosti zásahu člověka. Dron může buď ukládat záznam do svého interního úložiště, nebo posílat video či obrázky v reálném čase na pozemní stanici. Tato aplikace dronu je zvláště užitečná pro vytváření DEM neboli digitálních výškových modelů terénů (z anglického Digital Elevation Model), které se následně využívají v různých vědeckých výzkumech, včetně dálkového průzkumu Země. [24]



Obrázek 15 Využití dronů – mapování terénu [25]

d) Humanitární pomoc při katastrofách

Je také jedním z důležitých a více používaných technologických nástrojů. Jedinečná schopnost dronů rychleji přistupovat do oblastí zasažených katastrofou a nulové riziko ohrožení na lidských životech z nich dělá neúčinnější nástroj pro shromažďování informací a vytváření plánů záchranných operací. Díky speciálním sensorům, kamerám a radarům mohou bezpilotní letadla pomáhat záchranářům získat úplný obrázek o úrovni katastrofy a podle toho sestavit strategii záchranného plánu. Drony s výbavou k hašení požáru bývají využívány v nepřístupných místech, kde se v dané situaci fyzicky člověk nemůže dostat, například ve výškových vícepodlažních budovách. [24, 26]

e) Doprava a doručení

Doprava a doručování zásilek za pomoci dronů nabývá čím dál většího zastoupení. Prvními průkopníky ve využívání bezpilotních letadel pro tuto aplikaci se stávají mezinárodní společnosti, jako je například Amazon a DHL. Tato technologie umožňuje doručovacím společnostem upevnit svůj doručovací systém a nabídnout zákazníkům lepší a rychlejší služby. Největší význam ve využití dronů pro tuto aplikaci nabývá u maloobchodních prodejen nebo poboček, kdy je zboží doručováno zákazníkovi v blízké vzdálenosti, jelikož přeprava v těsné blízkosti bývá nejnákladnější z přepravního procesu. Tímto způsobem je možné dosáhnout snížení nákladů a úspory času. [24, 25]

f) Závody dronů

Popularita závodu dronů za posledních pár let rapidně vzrostla a nyní je závodění považováno za profesionální sport, přičemž šampionáty se konají po celém světě. Tento sport zahrnuje použití kamery připevněné na dronu k okamžitému odeslání videa do FPV brýlí, díky kterými je pilotovi umožněno ovládat dron z pohledu kokpitu. Závodí se s malými, rychlými kvadrokoptéry rychlostí až přes 190 km/h. Cílem je v závodním okruhu proletět všemi brankami a tunely a zároveň dokončit závod co nejrychleji. [27]

3.3 Materiály pro drony

Drony pro běžné spotřebitele jsou vyrobeny z materiálů, které jsou lehké a umožňují snadné a přesné manévrování. Materiály musí být pevné a nesmí snadno podléhat ohybu nebo se lámat. Materiály rámu FPV se v průběhu vývoje tohoto hobby měnily. Mezi nejvíce užívané materiály patří plast, sklolaminát a uhlíkový kompozit. Nicméně rámy z uhlíkového kompozitu jsou aktuálním standardem. [28, 29]

3.3.1 Konvenční materiály

a) Dřevo

V počátcích tohoto hobby bylo použití různých druhů dřeva pro rámy dronů docela běžné. Dřevo se sice nevyznačuje nejlepšími mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, ale i tak má i dnes své využití. Uplatňuje se pro výrobu překližkových prototypů před zhotovením uhlíkového kompozitu, jelikož při porušení má podobné charakteristické chování. Využití dřeva pro výrobu rámu spadá pod nejlevnější varianty. Dostatečná pevnost a poměrná tuhost dřeva může být také důvodem pro použití překližky na rámy malých amatérských dronů s celkovou nízkou hmotností. [29, 30]

b) Termoplasty a reaktoplasty

Protože jsou termoplasty opakovatelně tavitelné a je možné je následně převádět do tuhého stavu, využívají se na výrobu rámu dronů pomocí technologie 3D tisku, kdy dochází k natavování materiálu ve formě struny. Obvyklé materiály k 3D tisku rámu jsou polyamid 12 (nylon) a termoplastický polyuretan (TPU). [29, 30]

Díky této technologii je možné vytvářet rámy na míru. Mezi nevýhody ráků z termoplastu patří, že nejsou odolné vůči chemikáliím, povětrnostním vlivům a nemají tak dobré mechanické vlastnosti. I přesto že nejsou tak pevné ve srovnání s uhlíkovými kompozity nebo lehkými slitinami, lze plasty použít k vytvoření cenově méně nákladnějších ráků nebo jejich částí. Zvláště výhodné je použití plastů na výrobu ochranné ulity těla dronu. [29, 30]



Obrázek 16 Dron s rákem z polyamidu 12 [30]

c) Kovy

Největší firmy zabývající se výrobou ráků dronů vytváří ráky ze slitiny hořčíku. Označení této slitiny je AZ91D a její složení se skládá z 90 % hořčíku, 9 % hliníku a 1 % zinku. AZ91D je neuvěřitelně lehký a vysoce pevný materiál odolný vůči korozi. Slitina má hustotu $1,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, což z ní dělá jeden z nejlehčích konstrukčních kovů na světě. Hliník je docela tvárný a tažný, takže se snadno ohýbá a deformuje. [28, 29]

Ačkoliv ocel má výrazně lepší mechanické vlastnosti oproti lehkým slitinám, využívá se ve výrobě dronů minimálně. Vzhledem k vysoké hustotě, a tudíž i vysoké hmotnosti je ocel nevhodným materiálem pro výrobu kostry dronu.



Obrázek 17 Dron s rámem ze slitiny hořčíku [28]

Lepšími vlastnosti, než má ocel a hliník, se vyznačuje právě titán. Má značnou tuhost a téměř o polovinu menší hustotu než ocel. Hlavní nevýhodou je jeho cena, která je výrazně vyšší než u oceli a hliníku. [28, 29]

3.3.2 Kompozitní materiály

a) Uhlíkový kompozit

Tak jako v leteckém nebo automobilovém průmyslu získává uhlíkový kompozit čím dál větší popularitu, tak i pro výrobu rámu bezpilotních letadel je velice žádaným materiálem. Jeho popularita je přičítána jeho mimořádným vlastnostem, a to zejména ohromné pevnosti v tahu při zachování velice nízké hmotnosti. Uhlíkový kompozit je složen z reaktoplastické pryskyřice a uhlíkových vláken, kdy uhlíková vlákna obstarávají kompozitu pevnost v tahu a reaktoplastická pryskyřice je zodpovědná za tuhost a pevnost v ohybu výsledné konstrukce rámu dronu. [27, 28, 29]

Nevýhodou volby uhlíkového kompozitu může být například výroba, jelikož laminační proces může být složitý a časově náročný. Uhlíkové vlákno také nemůže odolat velkému množství ohybových cyklů při vysokém zatížení. Pokud je uhlíkové vlákno nuceno se neustále ohýbat, pryskyřice spojující vlákna může být oslabena. To může zanechat uhlíkové vlákno trvale oslabené anebo deformované.

Je známo, že uhlíková vlákna blokují rádiové signály, což může jevit problémy. Proto je nutné, při volbě rámu dronu z uhlíkového kompozitu, vhodně umístit na dron anténu a počítat ze všemi parametry spjatými s přenosem rádiového signálu. [27, 28, 29]

b) Sendvičové struktury

Sendvičová struktura je složena z potahů, jádra a spojovacího lepidla. Potahy pokrývají jádro z horní a dolní strany a jsou spojeny k jádru adhezní vrstvou, která má funkci lepidla. Adhezní vrstva může být součástí potahu, pokud se jedná o prepreg, nebo může být zvlášť jako samostatná složka. Jádro tvoří lehčená struktura neboli voština, nejčastěji hliníková nebo z polymerní pěny. Hlavní výhodou kompozitního sendviče je vysoká pevnost v ohybu a tuhost vzhledem k jeho hmotnosti. Nevýhodou kompozitních sendvičových materiálů pro aplikaci v konstrukci dronů je jejich nízká schopnost odolávat přímým nárazům. Hliníková voština po deformaci ztrácí svou pevnost v tlaku a pěna absorbující nárazy se při stlačení drolí. [29]

c) G10 – skelná vlákna

Kompozitní materiál s výplní skelných vláken s označením G10 může být použit jako levnější varianta oproti uhlíkovému kompozitu, jelikož je také charakterizován vysokou pevností a rozměrovou stabilitou. G10 je většinou k dispozici ve formě plátů a používá se převážně pro horní a spodní desky těla dronu. Na rozdíl od uhlíkových vláken G10 neblokuje rádiové signály. [27, 30]

4 ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE

4.1 Rozdělení dronů podle konstrukce

Průmysl zabývající se bezpilotními letadly je velice rozsáhlý s širokou rozmanitostí. Typy konstrukcí dronů se liší podle počtu rotorů a ramen, popřípadě ramena jsou nahrazena pevnými křídly. Každé konstrukční řešení má své typické použití a nese s sebou své klady a zápory. [31]



Obrázek 18 Rozdělení dronů podle křidel a rotorů [31]

4.1.1 Multikoptéry

Multikoptéry jsou nejnámějším typem dronů, jsou charakterizovány celistvým tělem, vícero rameny a vrtulemi dosahujícími vysokých otáček. Jsou provedeny v různých velikostech a jsou pojmenovány podle počtu rotorů. Předpona tri značí 3 rotory, kvadro 4 rotory, hexa 6 rotorů a okto 8 rotorů.

Jejich hlavní výhodou je snadné použití i v tísněných prostorech. Tahle značná výhoda oproti jiným typům dronů je způsobena tím, že jejich vzlet a přistání probíhá ve vertikálním směru. Díky vertikálnímu vzletu a přistání, neboli funkci VTOL (z anglického Vertical Take-off And Landing), se dokáží vznášet na místě a s možností ovládní více rotorů se snadněji ve vzduchu stabilizují. Pomocí těchto dronů není obtížné vytvořit kvalitní videonahrávku.

Nevýhodou multikoptér je jejich omezená výdrž a rychlost, což je činí nevhodnými pro letecké mapování ve velkém měřítku. Přestože se technologie neustále zlepšuje, vícerotory jsou v zásadě velmi neefektivní a vyžadují spoustu energie, aby se udržely ve vzduchu. Proto patří mezi drony s nejkratší dobou letu, která činí průměrně 25 minut. [31, 32, 33]

4.1.2 Drony s pevnými křídly

Drony s pevnými křídly mají křídla, která se nepohybují, jsou pevně připevněna k trupu bezpilotního letadla. Provedení je podobné jako u běžných letadel, takže mohou mít pohyblivé části jako je směrovka, která je součástí ocasu bezpilotního letadla a křídélka, která jsou připevněna k pevným křídlům. Jeden až dva rotory jsou nejčastěji umístěny před nebo za pevnými křídly.

Jejich pohyb je možný pouze směrem dopředu a je pro ně charakteristický aerodynamický tvar. Díky tomu mají velmi vysokou energetickou účinnost. K zvýšení účinnosti je také možné použít jako zdroj energie plynový motor a zásluhou vyšší energetické hustotě paliva může mnoho dronů s pevnými křídly zůstat ve vzduchu více než 16 hodin. Právě proto jsou využívány na mapování větších oblastí.

Mezi nevýhody patří vzletnutí a přistání, k čemuž se vztahuje nutnost použití zařízení na způsob katapultu, který uvede dron do letu a přistávací dráha, padák nebo síť sloužící k bezpečnému přistání. Pouze nejmenší drony s pevnými křídly jsou vhodné pro ruční start a přistání do terénu dopadem na spodní část trupu. [31, 32, 33, 34]

4.1.3 Drony s jedním rotorem (helikoptéry)

Zatímco multikoptéry mají tři a více rotorů umožňující udržet dron v pohybu, drony s jedním rotorem uskutečňují pohyb pomocí hlavního rotoru s vrtulí, který poskytuje vertikální pohyb a ocasní rotor, který zabraňuje točivému momentu. Další variantou může být nahrazení hlavního rotoru dvěma koaxiálně uloženými, u kterých se vrtule otáčejí v opačném směru a kde ocas helikoptéry neobsahuje žádný další rotory.

Stejně tak jako u multikoptér je i u dronů s jedním rotorem výhodou, že mohou startovat a přistávat prakticky kdekoli. Další výhodou je, že mají mnohem větší účinnosti oproti multikoptérám a tudíž mají delší dobu letu, navíc je také možné výdrž ještě více navýšit pomocí plynového motoru. Tenhle typ dronů je vhodný pro převoz vyššího zatížení na své palubě, typickým zařízením může být například LiDAR skener.

Na druhou stranu manévrování s nimi není tak jednoduché a nejsou tak stabilní ve vzduchu. V případě špatného přistání je větší pravděpodobnost, že dojde k poškození bezpilotního letadla. Patří mezi cenově nejdražší typy dronů. [31, 32, 33, 35]

4.1.4 Hybridní drony s pevnými křídly VTOL

Tento typ dronů kombinuje výhody multikoptér a dronů s pevnými křídly, umožňují přechod mezi dvěma letovými režimy, režimu vznášení se a dopředného letu.

Schopnost vertikálně vzlétnout a přistát bez potřeby odpalovacího zařízení nebo přistávací dráhy znamená, že tyto drony lze provozovat téměř v jakémkoli prostředí. Konstrukce hybridních dronů pevnými křídly VTOL poskytují schopnosti překonávat delší vzdálenosti a umožňují létat na větší rychlosti, díky čemuž jsou vhodné pro mapování větších ploch. Drony VTOL s pevnými křídly jsou všestrannou volbou pro širokou škálu komerčních a vojenských aplikací.

Jejich nedostatek spočívá v tom, že nedokáží uskutečnit dopředný let či vznášení se v dokonalém provedení. [31, 33, 36]

4.2 Namáhání kostry dronu

Předtím než je volen materiál kostry dronu, je nutné vědět jakými způsoby zatěžování je konstrukce vystavena. Způsob zatěžování může být vlivem mechanických sil, popřípadě působením teplotních, magnetických anebo jiných fyzikálních účinků. Nejčastěji posuzované fyzikální vlastnosti při volbě materiálu jsou hustota materiálu, odolnost proti korozi a vodivost.

Kostra je základní částí bezpilotních letadel a je nejvíce postižena působením mechanického namáhání během vzletu a přistávání. Točivý moment vrtulí generovaný rotory vytváří na každém jednotlivém rameni vertikální tah. Dále na konstrukci působí síly během přistávání vlivem nárazů a jiných vnějších sil. Schopnost odolávat mechanickým a fyzikálním účinkům je nesmírně důležitá pro funkci a životnost rámu. Kromě toho musí být kostra dronu lehká, aby doba letu byla co nejdelší a dron byl schopen po přidání závaží (kamery, jiného vybavení nebo zboží k přepravě) schopen letu. A zároveň musí být zaručena tuhost konstrukce. Simulace mechanického napětí v rámu dronu může být zjištěna například Von Misesovou hypotézou pomocí softwarů s podporou analýzy pevnosti FEM neboli Metodou konečných prvků. [29, 37, 38]

Mechanické vlastnosti branné v úvahu při volbě materiálu kostry dronu:

a) Pevnost v tahu a tlaku

Je schopnost materiálu odolávat napětí v tahu nebo tlaku. Součástí je v praxi použitelná tehdy, nenastanou-li trvalé deformace, tedy do meze úměrnosti, popřípadě pružnosti. Pod mezí pružnosti dochází ještě k vratným deformacím. Při porovnávání houževnatých materiálů jsou orientačními hodnotami mez kluzu a mez pevnosti, zatímco u křehkých materiálů je to pouze mez pevnosti, jelikož mez kluzu nemají. U dosažení meze kluzu se materiál začíná rychle prodlužovat, a to i tehdy, jestliže se napětí nemění nebo mírně klesne. Až do dovršení meze pevnosti při růstu napětí značně roste poměrné prodloužení. [29, 38]

b) Pevnost ve smyku

Pevnost ve smyku je schopnost materiálu rámu odolat zatížení rovnoběžných, opačně působících sil, ležících v rovině smyku, kdy tyto zatěžující síly nevyvozuji ohybový ani kroutící moment. Určujícími body je mez kluzu a mez pevnosti ve smyku. [29, 38]

c) Modul pružnosti

Modul pružnosti v tahu (Youngův modul) je poměr napětí a deformace. Je to materiálová charakteristika. Jeho velikost závisí na druhu materiálu. Materiály s vysokým modulem pružnosti v tahu tak snadno nepodléhají deformaci, zatímco materiály s nízkým modulem ano. Například rám dronu z uhlíkového kompozitu bude mít daleko větší modul pružnosti jak rám z ABS (Akrylonitrilbutadienstyren). [29, 38]

d) Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu je napětí, které může materiál vydržet, než se trvale deformuje nebo zlomí. Pevnost v ohybu lze definovat jako normálové napětí vznikající v materiálu v důsledku ohýbání prvku při ohybové zkoušce. Vyhodnocuje se metodou třibodového ohybu, při kterém se vzorek kruhového nebo obdélníkového průřezu poddává, dokud se nezlomí. [29, 38]

e) Tvrdost

Tvrdost je mechanická vlastnost materiálu, je to odpor, který klade materiál proti vniknutí cizího tělesa. [29]

4.3 Materiálová skladba konstrukce

Jak již bylo řečeno v kapitole 1, uhlíková vlákna získávají uplatnění pro aplikace, kde se vyžaduje odolnost vůči vysokému mechanickému namáhání a kde je nutná úspora hmotnosti. Navíc uhlíková vlákna vynikají v tom, že váží pětkrát méně než ocel, a pokud je vhodně zvolena orientace a druh vláken, mohou být srovnatelná nebo i lepší z hlediska tuhosti a pevnosti než samotná ocel. Z čehož vyplývá, že pro materiál bezpilotních letadel jsou vhodnou volbou. Kromě toho se uhlíková vlákna vyznačují dobrou odolností proti tečení a dobrou kompatibilitou s epoxidovou pryskyřicí. Nicméně, nesou si s sebou i nedostatky. Jsou náchylné na nárazy v důsledku křehkosti uhlíkových vláken a patří mezi nejdražší typy. [39]

Řešením těchto nedostatků je zvolením hybridního kompozitu, což je kompozitní materiál složený z více druhů materiálu výztuží. V kombinaci výztuže uhlíkových vláken může být použito například vláken skelných nebo aramidových, která poskytnou výslednému kompozitu značnou houževnatost a tažnost. K získání nejlepších mechanických vlastností hybridního kompozitu by složka uhlíkových vláken měla mít v poměru větší zastoupení než složka skelných nebo aramidových.

Hybridní kompozit lze vyrobit dvěma způsoby: buď smícháním více typů vláken ve společné matrici, nebo laminováním střídavě rozložených vrstev každého typu materiálu.

Základní inženýrské vlastnosti kompozitního materiálu mohou být určeny buď experimentální napěťovou analýzou (jinak řečenou testováním) nebo teoretická mechanikou neboli mikromechanikou. Mikromechanika využívá znalost vlastností jednotlivých typů vláken, vlastností pryskyřice a výsledného poměru výztuže a matrice kompozitního materiálu. Základním způsobem testování mechanických vlastností materiálu se provádí na trhacím stroji, kde je vykonávána tahová zkouška za účelem stanovení pevnosti v tahu měřeného materiálu.

Hybridní kompozitní materiál oproti uhlíkovému kompozitu vykazuje lepší mechanické vlastnosti, zejména pevnost v tahu. Ale tloušťka kompozitního materiálu také zdatelně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti. Ačkoliv by se předpokládalo že kompozit s vyšší tloušťkou bude mít vyšší pevnost v tahu. Není tomu tak. U kompozitního materiálu s větší tloušťkou tedy s větším počtem lamin (vrstev materiálu výztuže) vzniká ve větší míře zastoupení míst neobsahující pryskyřici, což vede k delaminaci a poklesu mechanických vlastností kompozitu. Jiným důvodem může být nedostatečné slisování vrstev výztuže. [39]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Bakalářská práce je zaměřena na návrh materiálové skladby kompozitní součásti a návrh její výroby. Aby bylo možné dokázat, zda je možné součást se zvolenou materiálovou skladbou a technologií výroby spolehlivě vyrobit, je provedena také samotná výroba. Bylo také provedeno mechanické testování zkušebních těles pro ověření mechanických vlastností kompozitní struktury v závislosti s volbou její tloušťky vycházející ze studií zabývajících se danou problematikou. Podrobnější popis problematiky je vyjádřen v podkapitole 7.1.

Postup při vypracování praktické části bakalářské práce lze rozdělit do jednotlivých kroků:

1. Vypracování literární rešerše s pomocí odborných zdrojů.
2. Návrh modelu kompozitní součásti s ohledem na kompatibilitu vybraných komponentů.
3. Návrh materiálové skladby a procesu výroby kompozitních součástí modelu.
4. Vyhodnocení navržených řešení a pojednání o přínosu bakalářské práce.

6 POPIS SOUČÁSTÍ A NÁVRH MODELU

Prvním krokem a zároveň hlavním hlediskem při navrhování modelu kostry dronu bylo stanovení rozměrů jednotlivých částí konstrukce s ohledem na elektroniku, kterou by bylo možné připevnit ke konstrukci. Přidáním elektroniky by tak byl vytvořen plně funkční bezpilotní letoun. Návrh a sestavení modelu byl realizován prostřednictvím CAD programu Autodesk Inventor Professional 2022.



Obrázek 19 Model dronu s barevně označenými součástmi

Jednotlivé součásti jsou v modelu barevně označeny:

- Zelená – horní a dolní část těla.
- Červená – ramena.
- Modrá – přistávací nohy
- Fialová – komponenty 3D tisku – dosedací plochy, upevnění FPV kamery, upevnění elektromotorů, distanční sloupky, distanční sloupky FPV kamery.
- Oranžová – nakupované díly – FPV kamera, baterie, řídicí jednotka, elektrický regulátor rychlosti, rádiový přijímač, elektromotory, vrtule.

6.1 Tělo

Tělo dronu se skládá z horní a dolní části. Mezi horní a dolní částí jsou umístěna ramena, distanční sloupky a upevnění FPV kamery. Celá konstrukce je spojena šroubovým spojením.

Rozměry těla jsou navrženy podle několika parametrů:

- Šířka těla musí být dostatečně velká, aby ramena mohly být vhodně připevněna a aby bylo možné ramena skládat do přepravné polohy.
- Šířka i délka těla musí být navržena tak, aby baterie dosednula celou svou plochou k tělu a byla pevně upevněna.
- Rozměr těla musí umožňovat připevnění veškeré elektroniky.

a) Horní část těla

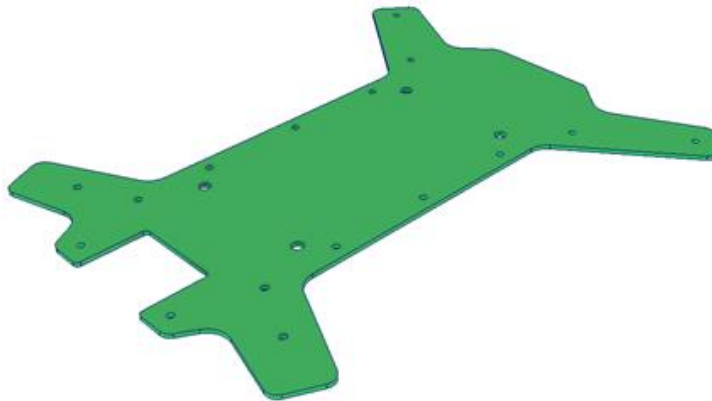
Model je navržen tak, že seshora těla je připevněna baterie a anténa. Úkolem antény je zachycování rádiového signálu z rádiového vysílače – ovladače, čímž je umožněno řízení dronu. K zabezpečení baterie slouží dva obdélníkové průřezy na každé straně těla, kterými by byly provléknuty pásky na suchý zip a baterie by byla následně spolehlivě stažena k horní části těla. Kromě upevnění páskami je také baterie zajištěna dvěma stěnami o výšce 3,8 mm, aby nedocházelo k posunutí baterie v podélném směru. Přesná poloha umístění stěn je navržena s ohledem na rozměr zvolené baterie.



Obrázek 20 Horní část těla

b) Dolní část těla

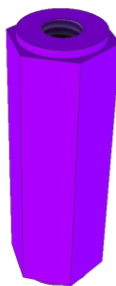
Dolní část těla slouží zejména k připevnění přistávacích noh a umístění elektroniky jako je řídicí jednotka, rádiový přijímač a elektronický regulátor rychlosti, který dále vede podél ramen dronu. Pozice nožek je navržena tak, aby bylo možné s dronem přistávat stabilně při dosednutí na povrch o mírné nerovnosti a aby upevnění nožek nezasahovalo do umístění elektroniky ve středu těla.



Obrázek 21 Dolní část těla

6.1.1 Distanční sloupky

Hlavní funkcí distančních sloupků je zpevnění konstrukce těla a vymezení prostoru pro elektroniku ve vertikálním směru. Počet sloupků a jejich umístění je navrženo tak, aby bylo dosaženo nízké hmotnosti konstrukce a zároveň dostatečného zpevnění. Výška distančních sloupků je určena podle velikosti nejvyššího komponentu nacházejícího se ve vnitřku těla a je shodná s vnějším průměrem ramen.



Obrázek 22 Distanční sloupek

6.1.2 FPV kamera

Pro model dronu byla zvolena FPV kamera Qunam 700TVL Sony 1/3 Camera 2.1mm Lens (PAL). Tento typ FPV kamery disponuje vestavěným OSD modulem a infra režimem. OSD neboli „On Screen Display“ poskytuje informace o letu do FPV videa, výhodou této kamery je, že není nutné připojení externího zařízení, které tuto funkci běžně umožňuje. Předností této FPV kamery je také pozorovací úhel 156° . Pro umístění a připevnění kamery byla navržena součást – upevnění kamery a výřez v dolní části těla. [40]



Obrázek 23 FPV kamera [40]

6.1.3 Upevnění FPV kamery

Jelikož je dron v dopředném letu nakloněn, tak že zadní ramena a rotory s vrtulemi jsou ve vyšší pozici jak přední, měla by pozorovací optika FPV kamery být pootočená o určitý úhel vzhůru. Pootočením kamery je získáno kvalitnějších záběrů a lepšího manévrování s dronem. Úhel natočení se v praxi liší a závisí na individuálních preferencích operátora, celkové konstrukce dronu a rychlosti létání. Vzhledem k většímu celkovému rozměru dronu, zejména velikosti připevněných přistávacích noh, je v modelu navržena plocha k připevnění kamery pod úhlem pouhých 15° . Rozměr pro zapojení kamery a případnou manipulaci se zapojením je vymezen distančními sloupky, kterými prochází šrouby spojující FPV kameru s upevněním kamery. Ve vertikálním směru je upevnění FPV kamery připevněno k tělu dronu, také pomocí šroubového spojení.



Obrázek 24 Upevnění FPV kamery

6.1.4 Baterie

Vhodnou baterii pro sestavu dronu je ultra vysokokapacitní Li-Pol baterie – Lithium-polymerový akumulátor Multistar High Capacity 10000mAh 4S 10C Multi-Rotor Lipo Pack XT90. Hlavními důvody volby této baterie je její vysoká kapacita – 10 000 mAh a nižší hmotnost v porovnání s jinými vysoce kapacitními bateriemi na trhu. Kvůli kompatibilitě s dalšími přídatnými elektronickými komponenty je důležitým parametrem napětí – počet článků 2-6S v závislosti na výkonu elektromotorů.

Dalším důležitým parametrem je hodnota C, která udává velikost vybíjecího proudu. Baterií s vyšší hodnotou C je možno dodat větší množství energie, a tedy vyšší výkon elektromotorů. [41]



Obrázek 25 Baterie [41]

6.1.5 Řídící jednotka

Řídící jednotkou dronu byl zvolen typ Naza M Lite + GPS Combo. Naza M Lite je modul fungující na principu procesoru. Je to malá krabička obsahující inteligentní elektroniku a software. Úkolem řídicí jednotky je zpracovávat povely operátora, veškeré operace, které dron vykoná a zaznamenávat informace o výšce a směru letu z integrované jednotky – čidel jako je gyroskop, akcelometr a barometrický výškoměr, popřípadě z externího GPS modulu. Pro napájení je možné použití Li-Pol akumulátor 2-6S. [42]



Obrázek 26 Řídící jednotka [42]

6.1.6 Elektronický regulátor rychlosti

Jedná se o vysokovýkonný komponent. Zprostředkovává spojení mezi řídicí jednotkou a elektromotory. Na každý elektromotor připadá jeden elektronický regulátor rychlosti. V případě navrženého modelu – kvadrokoptéry se tedy jedné o 4 moduly.

Pro model byl zvolen elektronický regulátor rychlosti DYS 30Amp Mini Opto BLHeli Multi-Rotor Electronic Speed Controller (BLHeli Firmware) SN30A. [43]



Obrázek 27 Elektronický regulátor rychlosti [43]

6.1.7 Rádiový přijímač

Rádiový přijímač je zařízení schopné přijímat příkazy z rádiového vysílače a převádět rádiový signál do řídicí jednotky, díky které dron následně vykoná danou úlohu. Rádiový přijímač musí být kompatibilní s rádiovým vysílačem, což znamená, že pro navázání komunikace musí pracovat na stejné frekvenci. Pro model dronu byl zvolen rádiový přijímač FrSky X4RSB 3/16ch 2.4Ghz ACCST Receiver (w/telemetry). [44]

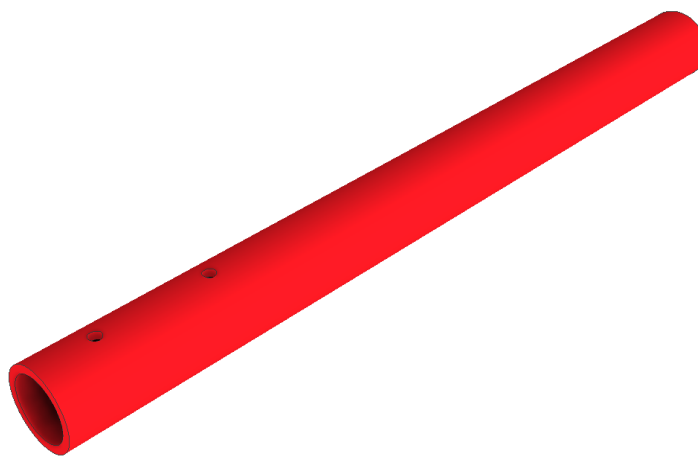


Obrázek 28 Rádiový přijímač [44]

6.2 Ramena

Délka ramen byla navrhována v závislosti na velikosti vrtulí použitých v modelu a rozměr průřezu na velikosti prostoru mezi horní a dolní částí těla. Model ramen je obstarán dvěma dírami ve vertikálním směru. Díra v rameni umístěná v kratší vzdálenosti od jejího konce blíže k tělu umožňuje rozebíratelný spoj čepu se závlačkou. Rozebráním spoje je možné ramena skládat do přepravné polohy.

Druhou dírou je rameno připevněno k tělu dronu pomocí šroubu, matice a dvou podložek. Jedna podložka se nachází pod hlavou šroubu a druhá nad maticí. Použití podložek je z důvodu, aby vlivem utahování spoje bylo napětí rovnoměrně rozloženo a u matice nedocházelo k samovolnému pootočení. Umístění děr se u předních a zadních ramenech liší, protože geometrie těla je jiná a ramena jsou orientována pod rozdílným úhlem. Odlišný úhel ramen ovlivňuje letové schopnosti dronu.



Obrázek 29 Model ramena

6.2.1 Elektromotor

Jako vhodný typ elektromotoru pro model dronu byl zvolen Tarot 4108 380KV 6S Multirotor Brushless Disc Motor - TL68P07. Jedná se o vysoce výkonný elektromotor, který je běžně napájen akumulátorem jmenovitým napětím o velikosti 22,2 V. [45]

Hodnota KV vyjadřuje otáčky za minutu (RPM) které motor vykoná za působení napětí 1 V. Model dronu je definován jako kvadrokoptéra, takže je opatřen čtyřmi elektromotory. [45]



Obrázek 30 Elektromotor [45]

6.2.2 Vrtule

Aby měl dron žádoucí letové schopnosti, je třeba volit také kompatibilní a dostatečně velké vrtule. Obecně platí, že čím je větší velikost a hmotnost dronu, tím větší se volí rozměr vrtulí. Jako vhodnou volbou byly vybrány 15" vrtule Multirotor Carbon Fiber T-Style Propeller 15x5.5 Black. Vrtule jsou připevněny k elektromotorům pomocí dvou šroubů M3. [46]



Obrázek 31 Vrtule [46]

6.2.3 Upevnění elektromotoru

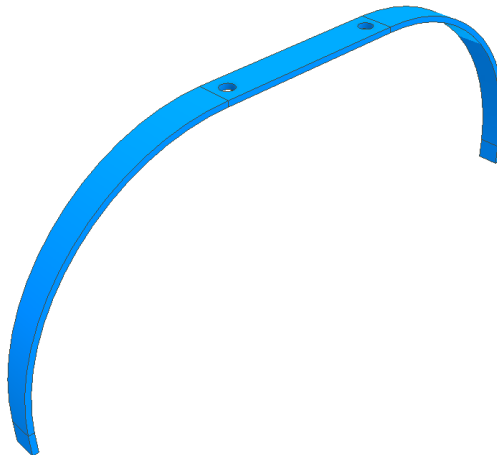
Ke každému upevnění je připevněn elektromotor pomocí tří šroubů M3. Upevnění elektromotorů jsou spojeny s rameny pomocí lepeného spoje. Byly navrhovány tak, aby podstatně nezvýšily celkovou hmotnost celé sestavy a zároveň aby jejich upevnění s rameny bylo dostatečně pevné a také aby elektromotory byly spolehlivě připevněny k upevněním elektromotorů.



Obrázek 32 Upevnění elektromotoru

6.3 Přistávací nohy

Dělí se pouze na dvě součásti, na přistávací nohy přední a zadní. Jejich konstrukční provedení je totožné. Spojením noh v jeden kus je získáno vyšší tuhosti celé konstrukce a je také dosaženo jejich přesného nastavení do žádoucí pozice. Každý kus je spojen v páru šroubů, podložek a narážecích matic, které jsou zbaveny hrotů.



Obrázek 33 Přistávací nohy

6.3.1 Dosedací plochy

K přistávání dronu k zemi jsou nožky opatřeny dosedacími plochami. Na každý kus nožek jsou nasazeny a pevně přilepeny dvě dosedací plochy.



Obrázek 34 Dosedací plochy

6.4 Ověření a optimalizace navrženého modelu

Pro účely ověření byl model vytisknut na Ústavu výrobního inženýrství tiskárnou Creality Ender 3 Pro a Průša MK3s. Materiál 3D tisku byl zvolen PLA od dodavatele C-tech. PLA je biologicky rozložitelný materiál, vyráběný z kukuřičného nebo bramborového škrobu či cukrové třtiny. Kvůli jeho dobrým vlastnostem zpracování patří mezi rozšířené materiály pro 3D tisk. [47]

U modelu dronu bylo nutné ověřit tyto kritéria:

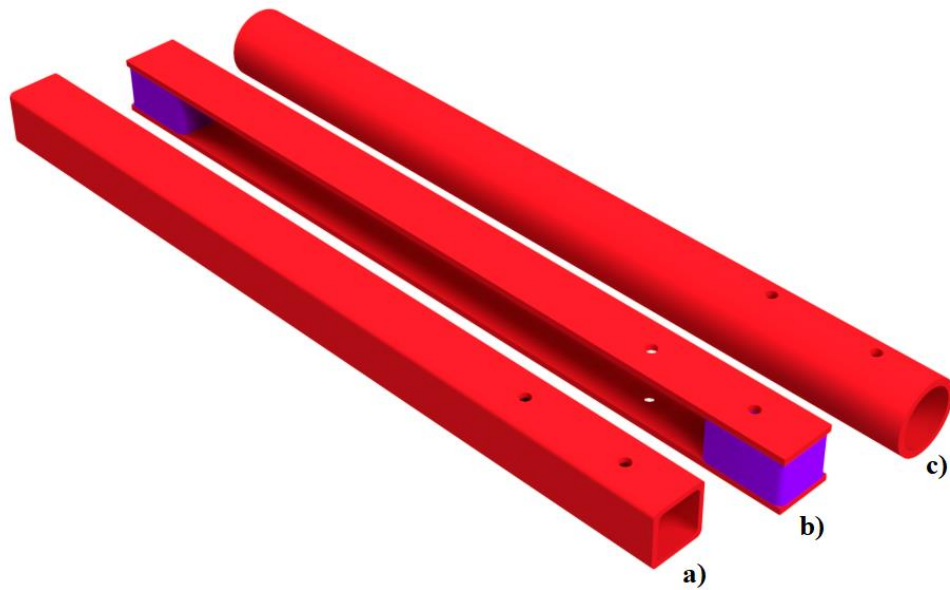
- Funkčnost skládání dronu.
- Ověření zástavbových rozměrů jednotlivých komponentů kvůli následné montáži celkové sestavy dronu.
- Funkčnost dosedacích ploch přistávacích noh.
- Ověření pevného spojení ramen s upevněním elektromotorů.



Obrázek 35 Prototyp kostry dronu vytisknutý 3D tiskárnou

Během navrhování bylo vytvořeno více variant modelu a bylo dosaženo postupného zdokonalení a optimalizace. Příkladem je provedení ramen, kdy původní varianta měla čtvercový průřez, ale z důvodu obtížné výroby byl v konečné verzi zvolen průřez kruhový. Podrobnější popis problému s čtvercovým průřezem ramen a řešení vzniklého problému bude zmíněno v následující kapitole.

Byla také navržena varianta ramene, kde rameno bylo složeno z dvou kompozitních plátů, které byly spojeny dvěma polymerními podporami. Kvůli neestetickému vzhledu a větší náchylnosti na poškození byla ve výsledném modelu dána přednost provedení ramene s kruhovým průřezem.



Obrázek 36 Varianty provedení modelu ramen

Legenda k obrázku 31 – Varianty provedení modelu ramen: a) Rameno s čtvercovým průřezem, b) Rameno složené z dvou kompozitních plátů spojené dvěma podporami, c) Rameno s kruhovým průřezem.

7 NÁVRH MATERIÁLOVÉ SKLADBY A PROCESU VÝROBY SOUČÁSTÍ KOMPOZITNÍ STRUKTURY

7.1 Tělo

7.1.1 Návrh skladby

Tloušťka kompozitních rámů FPV dronů z uhlíkového kompozitu bývá běžně 1,5 až 6 mm. Pro navržený model byla zvolena tloušťka těla 1,9 mm. Volba dané tloušťky vychází ze studie o vlivu variace tloušťky na tahové vlastnosti hybridních polymerních kompozitů a GFRP kompozitů, kde bylo experimentální metodou zjištěno, že s rostoucím počtem lamin může docházet k poklesu mechanických vlastností, a to z důvodu nedostatečného prosycení výztuže pryskyřicí nebo nesprávným slisováním lamin. Také bylo zjištěno, že hybridní kompozit s tloušťkou 2 mm odolává největšímu napětí v tahu a v porovnání s uhlíkovým kompozitem se jejich pevnost v tahu liší nepatrně. Na této studii se podílela čtveřice odborníků z Bangalore University sídlící v Indii, pan M. Nayeem Ahmed, Dr. P. Vijaya Kumar, Dr. H.K. Shivanand a pan Syed Basith Muzammil. [39]

Výztuž materiálové skladby těla tvoří 6 vrstev uhlíkové tkaniny a 1 vrstvu aramid-diolenové tkaniny, která je pohledovou stranou kompozitní součásti. Výztuže jsou orientovány pod 45°, takže je dosaženo lepších mechanických vlastností. Typem matrice byla zvolena epoxidová pryskyřice, jelikož patří mezi pryskyřice s nejlepšími mechanickými vlastnostmi a jsou vhodné v kombinaci s uhlíkovými vlákny.

Tabulka 1 Vlastnosti tkanin výztuže

Materiál výztuže	Vazba	Plošná hmotnost	Tloušťka
Aramid-diolenová tkanina	plátno	170 [g/m ²]	0,3 [mm]
Uhlíková tkanina 3K	kepr	200 [g/m ²]	0,25 [mm]

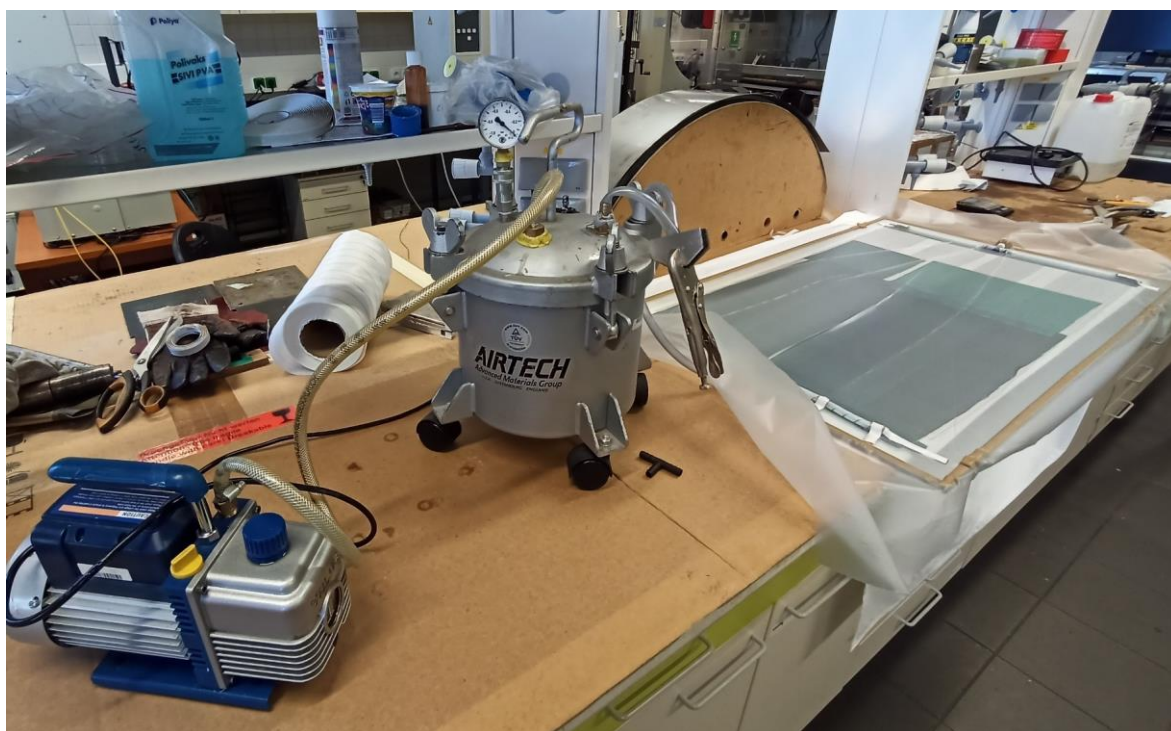
7.1.2 Návrh procesu výroby

Kompozitní součásti tohoto typu – jednoduché geometrie je možné vyrábět standartní metodou ruční laminace, ručním laminování pod vakuovou fólií nebo vakuovou infuzí. Pro dosažení nejlepší možné kvality vytvrzené struktury a optimalizace poměru matrice a výztuže se jeví vhodnou volbou technologie využívající vakuum. Dodržením správnosti procesu výroby u obou technologií – laminace pod vakuovou fólií a vakuové infuze je možné dojít ke stejným žádoucím výsledkům. Nicméně hlavní nevýhodou ruční laminace pod vakuovou fólií je, že nutné nejprve výztuže ručně prosytit pryskyřicí, což vede k znečištění pracoviště pryskyřicí a po prosycení výztuže je nutné neprodleně zajistit podtlak nad součásti, aby mohla být pomocí vakuové vývěvy spolehlivě odsáta přebytečná pryskyřice. Utěsnění celého systému není vždy jednoduchým úkolem a po delší snaze o utěsnění může místy dojít k vytvrzení pryskyřice a nebude dosaženo výrobku žádoucích vlastností. Proto je nejvhodnější technologií pro výrobu těla dronu metoda vakuové infuze, kde není kladen důraz na okamžité utěsnění systému a je možné efektivně najít neutěsněná místa, jelikož k prosycování výztuže dochází až po zajištění vakua, takže nedojde k předčasnému vytvrzení pryskyřice.

7.1.3 Ověření výroby

K ověření správnosti navržené skladby těla dronu a zvolené technologie na jeho výrobu byla výroba uskutečněna. Prvním krokem byl nástřih jednotlivých vrstev tkanin na daný rozměr. Šířka tkanin byla nastřihávána na rozměr 0,5 m a délky, které u zvolené uhlíkové tkaniny činí 1 m a u aramid-diolonové 1,2 m, byly zachovány. Větší rozměr vytvrzené desky poskytnul dostatečné místo pro vyřezání testovacích vzorků a jednoho dodatečného páru horní a dolní části těla a ramen dronu. Dalším krokem bylo třeba naseparovat formu – skleněnou tabuli pomocí houbičky a po 15 minutové výdrži kdy separační vosk zcela zaschl, byl povrch důkladně rozleštěn papírovými ubrousky. Tento cyklus se opakoval třikrát, aby bylo pokryto separačním voskem každé místo a vznikla tak kvalitní pohledová strana vytvrzené kompozitní desky a aby bylo možné vytvrzený kompozit jednoduše odformovat. K výrobě součásti byl použit separační vosk TR-102 REGULAR MOLD RELEASE. Po rozleštění poslední vrstvy separačního vosku byly kladeny na formu jednotlivé vrstvy výztuže. Dále byla výztuž pokryta odtrhovou tkaninou a ni byla umístěna nastříhaná rozváděcí rohož. Poté byla k formě po obvodu přilepena oboustranná těsnící

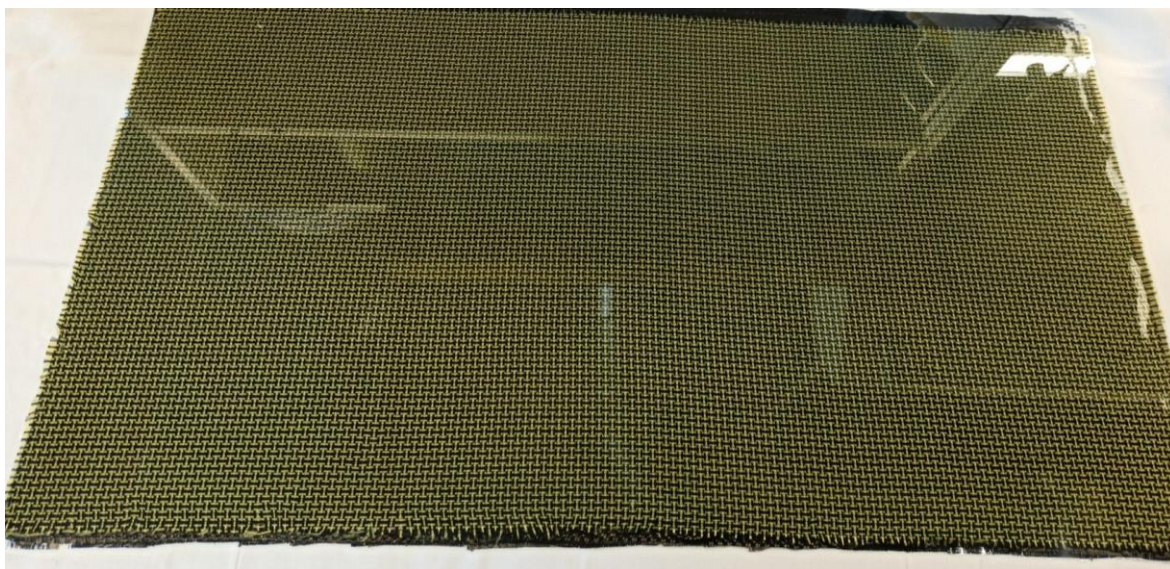
páska se spojkami a trubicemi. Nakonec byl celý systém překryt vakuovou fólií, která byla přilepena k horní straně oboustranné těsnící pásky a následně byl prostor pod fólií pečlivě zaizolován. Nyní bylo možné pomocí vakuové vývěvy odsát veškerý vzduch pod vakuovou fólií. Vzduch byl odsáván prostřednictvím hadice připevněné z jedné strany k vývěvě a z druhé strany ke spojce, která musela být z vnější strany společně s fólií pečlivě utěsněna. Prostřednictvím druhé spojky a hadice po dosažení vakua pod vakuovou fólií bylo možné nasávat z kelímku namíchanou směs tužidla a pryskyřice. K výrobě kompozitní součásti byla použita Epoxidová pryskyřice L 285 (MGS) a Tužidlo 285 (MGS) od výrobce Havel Composites v hmotnostním poměru 100:40. K rovnoměrnému prosycení výztuže značně pomohla rozváděcí rohož. Po vytvrzení byla kompozitní deska odformována a zbavena pomocných materiálů.



Obrázek 37 Vakuová infuze – vytvoření vakua



Obrázek 38 Vakuová infuze – systém připravený k prosycování výztuže



Obrázek 39 Pohledová strana vytvrzené kompozitní desky

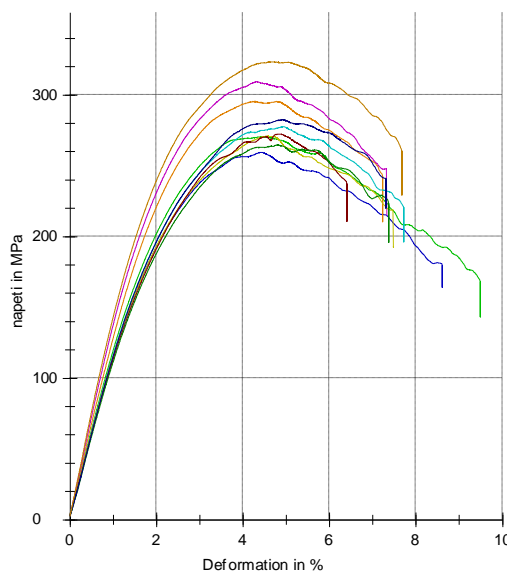
7.1.4 Testování

Pro ověření mechanických vlastností kompozitní desky byly z desky vodním paprskem vyřezány zkušební tělesa. Zkušební tělesa byla podrobena zkoušce 3-bodovým ohybem na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456. Tento typ namáhání byl zvolen kvůli tomu, že na tělo dronu působí tíha baterie a dochází tak k ohybu. U této zkoušky bylo sledováno maximální napětí v ohybu, poměrná deformace na mezi pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Rozměry zkušebních těles vyřezaných z kompozitní desky byly 15 x 1,85 x 150 mm. Vzdálenost mezi podporami byla nastavena na 47 mm.

U výroby kompozitní desky bylo dodrženo všech podmínek určující její kvalitu a chování. Deska po zatížení vyvolala výrazně větší deformace, než kterým by mělo docházet u kompozitního materiálu tvořeného uhlíkovou výztuží a při namáhání ohybem nedošlo k přerušení testovaného vzorku.

Tabulka 2 Naměřené hodnoty zkušebních těles kompozitní desky

n = 10	E [MPa]	σ_{Max} [MPa]	$\epsilon_{\sigma_{Max}}$ [%]	$W_{\sigma_{Max}}$ [N·mm]
\bar{x}	12300	283	4,6	1305,68
s	1240	20,6	0,3	117,62

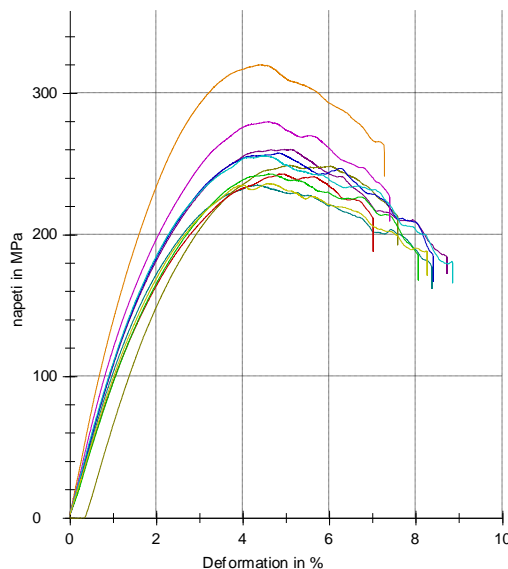


Obrázek 40 Zatížení zkušebních těles kompozitní desky

Kvůli neobvyklému chování kompozitní desky byl soubor několika zkušebních těles nechán na dovytvrzení ve vytvrzovací peci. Dovytvrzení probíhalo za teploty 60 °C po dobu dvou hodin. Ukázalo se, že dovytvrzení nemělo žádný vliv na mechanické vlastnosti testovaných vzorků.

Tabulka 3 Naměřené hodnoty dovytvrzených zkušebních těles kompozitní desky

n = 10	E [MPa]	σ_{Max} [MPa]	$\epsilon_{\sigma_{Max}}$ [%]	$W_{\sigma_{Max}}$ [N·mm]
\bar{x}	9850	188	9,3	1186,78
s	3870	18,6	0,5	123,29



Obrázek 41 Zatížení dovytvrzených zkušebních těles kompozitní desky

7.2 Ramena

7.2.1 Návrh skladby

Nejčastější konstrukční provedení rámu FPV dronů z uhlíkového kompozitu spočívá v tom, že je celý rám složen z jednotlivých plátů. Tloušťka ramen bývá zpravidla dvakrát větší, než tloušťka těla. Větší tloušťka ramen poskytuje větší tuhost a odolnost vůči ohybu vlivem vertikálnímu tahu způsobeného rotací vrtulí. U dronů větších rozměrů jsou ramena ve formě

tenkostěnných profilů, nejčastěji kruhového, čtvercového nebo obdélníkového průřezu. Ramena v provedení tenkostěnných profilů mají výrazně větší tuhost než ramena ve formě plátů. Jak již bylo řečeno v kapitole 6. velikost vnějšího rozměru průřezu ramen souvisí také s vymezením prostoru pro elektroniku mezi horní a dolní částí těla. V případě modelu se tedy jedná o tenkostěnný profil kruhového průřezu s navrženou tloušťkou 2 mm. Navržená tloušťka 2 mm spolehlivě zaručí tuhost ramen. Materiálová skladba každého ramene je složena ze 7 vrstev uhlíkové punčochy, epoxidové pryskyřice a tužidla. Přední a zadní pár ramen se liší osmou (poslední položenou) vrstvou, kde u zadních ramen se jedná o sklo-uhlíkovou punčochu červené barvy a u předních ramen o stejnou uhlíkovou punčochu aplikovanou u ostatních 7 vrstev. Barevná odlišnost poslední vrstvy je navržena z estetických důvodů a kvůli lepší rozlišitelnosti přední a zadní části konstrukce dronu. Celkově se tedy každé rameno skládá z 8 vrstev výztuže, která je spojena matricí ze směsi epoxidové pryskyřice a tužidla.



Obrázek 42 Skelná a uhlíková punčocha

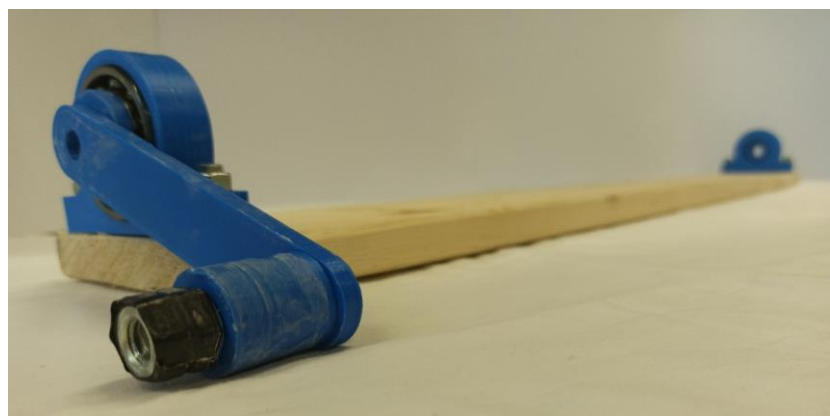
7.2.2 Návrh procesu výroby

Jak již bylo řečeno v kapitole 2, k výrobě dutých těles patří mezi vhodné výrobní postupy technologie navíjení. Nevýhodou standartní technologie navíjení je, že vyžaduje rozměrné poloautomatizované výrobní linky, kterými jsou vybaveny pouze firmy specializované touto výrobou. Proto bylo navrženo inovativní řešení, které spočívá v kombinaci technologií pro výrobu kompozitních materiálů – technologie navíjení a balení role. Tato modifikace technologií spočívá v tom, že jsou nejprve na trn navlečeny vrstvy výztuže ve formě

punčochy a poté je na výztuž nanášena matrice. Dalším krokem je přilepení speciální pásky k jedné straně trnu a zajištění postupného navíjení pásky po celé délce prosycené výztuže prostřednictvím rotace trnu. Speciální páska těsně přilne k výztuži, stáhne vrstvy výztuže blíže k sobě a vytlačí tak nadbytečnou pryskyřici. Touto metodou je dosaženo lepšího poměru matrice s výztuží a zároveň kvalitnějšího výrobku. K zajištění rovnoměrné těsnosti pod páskou, správného prosycení výztuže po celé délce a získání rovnoměrné tloušťky vytvrzené kompozitní součásti bylo třeba navrhnout přípravek. Speciální páskou je označována technická teplem smrštitelná fólie, která umožňuje její snadné odstranění po vytvrzení kompozitní součásti.

7.2.3 Návrh přípravku

Přípravek se skládá z dřevěné základny, dvou ložiskových domků a kliky umožňující otáčení trnu. Ložiskové domky jsou k základně připevněny pomocí šroubového spojení. V každém ložiskovém domku se nachází kuličkové ložisko. Na jedné straně přípravku je v ložisku posazen vnitřní kroužek a na druhé straně je v ložisku nasazena klika. Během procesu výroby je trn s vnitřním kroužkem a klikou v těsném uložení, aby nedocházelo k protáčení trnu. Ložiskové domky, klika a vnitřní kroužky byly vytištěny na 3D tiskárně Ender 3 z materiálu PLA od dodavatele C-tech.



Obrázek 43 Přípravek k výrobě ramen dronu

7.2.4 Ověření výroby a optimalizace

Prvním krokem bylo zbavení trnů – tenkostěnných profilů od nečistot pomocí acetonu značky Severochema a papírových ubrousků. Poté byly standartním postupem naneseny a

rozleštěny 3 vrstvy separačního vosku značky TR-102 REGULAR MOLD RELEASE, aby bylo možné vytvrzený kompozitní materiál odformovat.

Poté bylo postupováno přesně podle navrženého procesu výroby:

- 1) Navlečení jednotlivých vrstev výztuží na trn.
- 2) Umístění trnu do navrhnutého přípravku.
- 3) Nanesení pryskyřice pomocí štětce na vrstvy výztuže a následné prosycení v celém objemu pomocí válečku.
- 4) Přilepení začátku speciální pásky na trn.
- 5) Navíjení pásky na trn prostřednictvím otáčení kliky po konec výztuže.
- 6) Očištění trnu od přebytečné pryskyřice, odstříhnutí pásky z cívky a zabezpečení pásky na trnu od odlepení.
- 7) Vyjmutí trnu z přípravku.
- 8) Vytvrzování kompozitu za pokojových podmínek.
- 9) Odformování vytvrzené kompozitní součásti.

Z ekonomického hlediska byl navržený proces výroby nejprve otestován s vrstvami výztuže skelné punčochy. Původní verze ramen dronu byla menšího rozměru čtvercového průřezu a po vytvrzení vznikl problém s odformováním. Výroba byla optimalizována zvětšením celkového průřezu a tloušťky kompozitního výrobku a přechodem z čtvercového průřezu na kruhový. Původní rozměr čtvercového průřezu byl 15 mm a byl nahrazen průřezem kruhovým o vnějším průměru 19 mm. Tloušťka byla zvětšena přidáním 2 vrstev výztuže, kdy původní verze obsahovala 6 vrstev výztuže ve formě punčochy a finální 8. Optimalizace spolehlivě poskytla odformování ramen s již navrženou materiálovou skladbou. Pro navíjení byla použita technická teplem smrštelná fólie FILAMENT 160 Thermoshrinkable film značky Diatex.



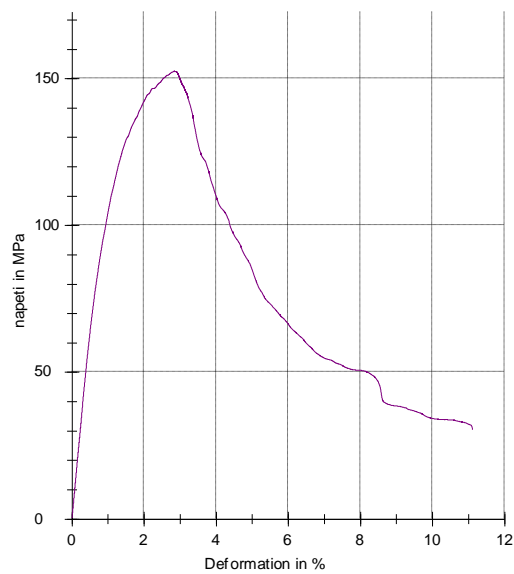
Obrázek 44 Kompozity kruhového průřezu vytvrzující za pokojových podmínek

7.2.5 Testování

Pro testování ramen byly vytvořeny čtyři vzorky zkušebních těles o vnějším 19 mm průměru 19 mm a vnitřním 15 mm. Tyto rozměry byly poté užity i u ramen výsledného modelu kostry dronu. Takto malý soubor testovaných vzorků byl zvolen, kvůli obtížnosti a časové náročnosti výroby. Zkušební tělesa ramen byla také testována 3-bodovým ohybem na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456. Tento typ namáhání byl zvolen, jelikož při letu dronu vlivem rotace vrtulí dochází v místě upevnění vrtule a elektromotoru k vertikálnímu tahu a rameno je tak podrobena ohybu.

Tabulka 4 Naměřené hodnoty testovaného ramene se skelnou výztuží

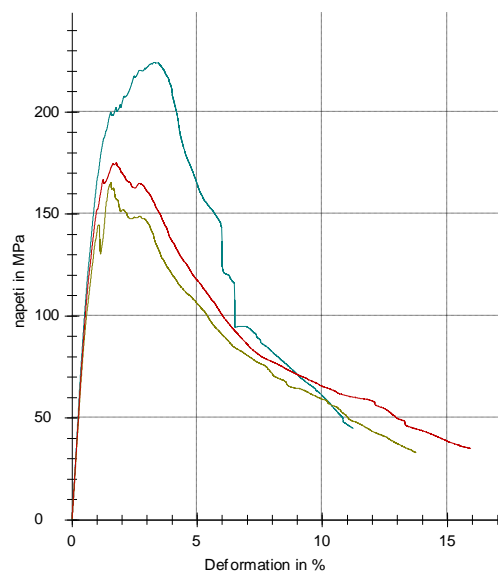
n = 1	E [MPa]	σ_{Max} [MPa]	$\epsilon_{\sigma_{Max}}$ [%]	$W_{\sigma_{Max}}$ [N·mm]
	13 100	1620	6	6955,53



Obrázek 45 Zatížení ramene se skelnou výztuží

Tabulka 5 Naměřené hodnoty testovaného ramene s uhlíkovou výztuží

n = 3	E [MPa]	σ_{Max} [MPa]	$\epsilon_{\sigma_{Max}}$ [%]	$W_{\sigma_{Max}}$ [N·mm]
\bar{x}	20 100	2000	4,7	7081,56
s	1160	336	2	10,99

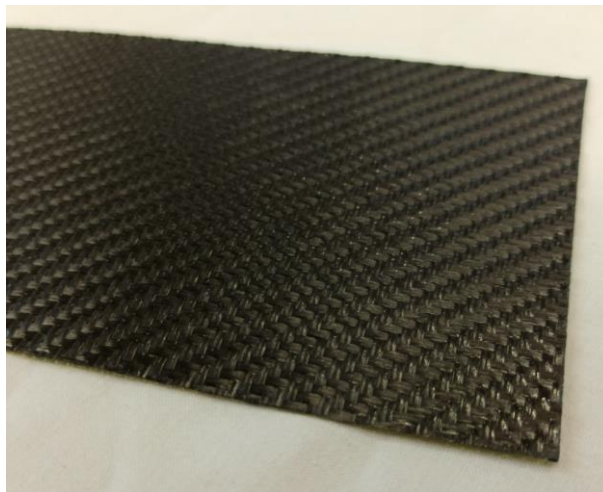


Obrázek 46 Zatížení ramene s uhlíkovou výztuží

7.3 Přistávací nohy

7.3.1 Návrh skladby

Hlavním hlediskem při navrhování přistávacích noh byla úspora hmotnosti při zachování dostatečné tuhosti struktury. Takovýchto vlastností je možno dosáhnout materiálovou skladbou ve formě uhlíkového prepregu, jelikož výsledný vytvrzený výrobek se řadí mezi struktury obsahující největší objemové zastoupení vláknové výztuže. Pro model byl navržen uhlíkový prepreg od firmy Delta-preg, složený z výztuže vysokopevnostní uhlíkové tkaniny GG200T (Tenax HTA-3k) a epoxidové pryskyřice DT806R.



Obrázek 47 Uhlíkový prepreg

7.3.2 Návrh procesu výroby

Pro výrobu kompozitní součásti tvaru oblouku se jeví vhodnou technologií zpracování prepregů ve vytvrzovací peci. Pomocí autoklávového lze dosáhnout lepší struktury o nižší pórovitosti, ale proces výroby je zdoluhavý a na rozdíl od autoklávového zpracování nejsou s technologií spjaté tak vysoké náklady na výrobu. Začátkem procesu je navržení formy k výrobě kompozitní součásti. Jedná se o jednodílnou formu, kde dutina formy je negativem navrženého výrobku. Dále je třeba stanovit nástřih předimpregnované výztuže ke spolehlivému vyplnění dutiny formy. Jakmile je forma vyrobená a předimpregnovaná výztuž nastřihána, následuje ruční kladení prepregu do dutiny formy. Poté je forma s prepregem utěsněna vakuovou fólií a je vytvořeno v prostoru pod fólií vakuum.

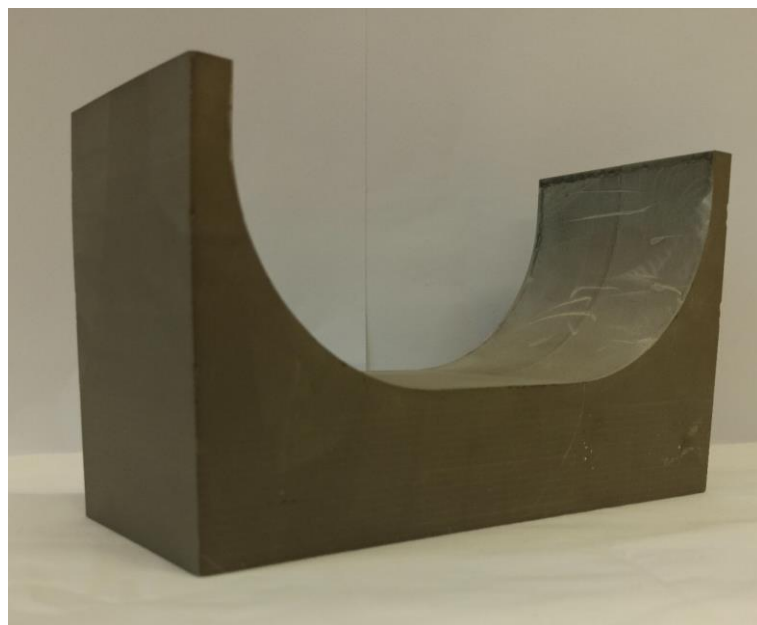
Nakonec je forma vložena do temperační jednotky Zwick/Roell | W91255, kde je prepreg vytvrzován za těchto podmínek:

- 1) Náběh na teplotu vytvrzování 80 °C při růstu teploty 2 °C za minutu.
- 2) Výdrž na teplotě vytvrzování 80 °C po dobu 4 hodin.
- 3) Pozvolné ochlazení na vyhazovací teplotu 40 °C při poklesu teploty 2 °C za minutu.

Po dokončení vytvrzovacího cyklu je forma vyjmuta z vytvrzovací pece a následně je výrobek odformován.

7.3.3 Návrh formy

Materiál formy pro zhotovení přistávacích noh dronu byl zvolen Ebaboard 1050. Jedná se o umělé dřevo umožňující odolávat teplotám až 100 °C. Je dodáváno ve formě kvádru, proto bylo nutné jej následně obrobit na navrženou geometrii formy. Polotovar z umělého dřeva byl obroben pomocí Frézky CNC s naklápěcím rotačním stolem DMG MORI | DMU 50 na Fakultě aplikované informatiky.



Obrázek 48 Forma přistávacích noh

7.3.4 Ověření výroby

Ověření výroby proběhlo přesně podle návrhu. Po obrobení formy lze postup výroby zapsat do jednotlivých kroků:

- 1) Nástřih uhlíkové předem nasycené výztuže pryskyřicí.
- 2) Kladení uhlíkové předem nasycené výztuže pryskyřicí do dutiny formy.
- 3) Vložení formy s uhlíkovým prepregem do vakuové fólie.
- 4) Odsátí vzduchu v prostoru pod vakuovou fólií pomocí vakuové vývěvy.
- 5) Vložení zavakuované formy do vytvrzovací pece.
- 6) Vytvrzování uhlíkového prepregu ve vytvrzovací peci.
- 7) Vyjmutí formy s vytvrzeným prepregem z vytvrzovací pece.
- 8) Odformování vytvrzeného výrobku – přistávacích noh dronu.

Po dokončení procesu výroby přistávacích noh dronu následovaly dokončovací operace.

Dokončovací operaci zahrnovaly technologie soustružení a vrtání. Blíže je vysvětleno v následující kapitole.

8 METODY DOKONČENÍ

8.1 Tělo

K získání požadované geometrie těla dronu byl tvar vyřezán pomocí vodního paprsku. Kvůli získání lepších mechanických vlastností bylo tělo v nařezávacím plánu pootočeno o 45° k orientaci vláken v podélném směru. Vyřezání výsledného tvaru bylo uskutečněno v MRB Sazovice.

Pro vytvoření děr v těle byla vyrobena šablona s označenými místy nacházejících se děr, která byla přilepena na pohledovou stranu těla. Poté byly díry vyvrtány pomocí stolní stojanové vrtačky a vrtáku z rychlořezné oceli povlakovaného kobaltem.

8.2 Ramena

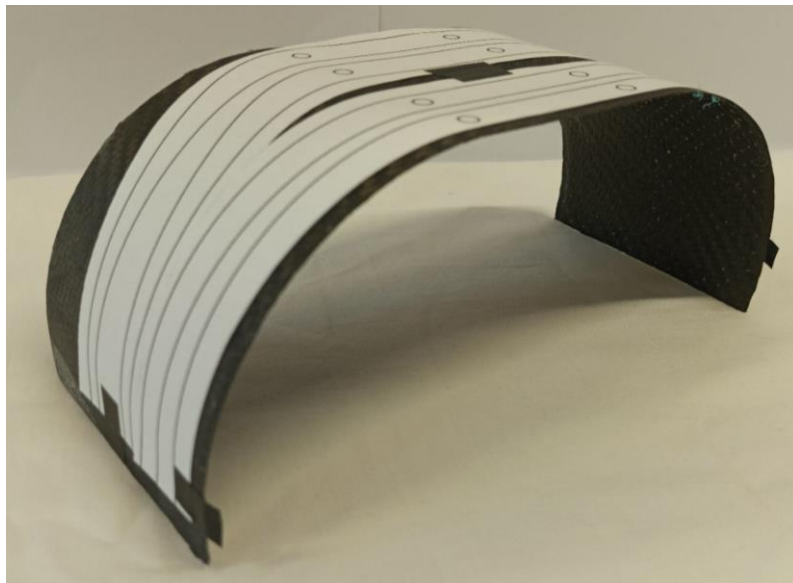
Po výrobě ramen technologií navíjení bylo nutné ramena obrobít na požadovanou délku a vyvrtat do nich díry. Jelikož u ramen po technologii navíjení nebyla zaručena kolmost čel s pláštěm, byla první zvolenou metodou dokončení technologie soustružení. Ramena byla soustružena na hrotovém soustruhu SU 32. Díry v ramenech byly vytvořeny pomocí vertikální vyvrtávačky. Obě dokončovací operace proběhly ve firmě Kubiček VHS.



Obrázek 49 Tělo a ramena dronu po metodách dokončení

8.3 Přistávací nohy

K vyhotovení předního a zadního dílu přistávacích noh byla vytvořena papírová šablona, která byla přilepena na vnější část vytvrzené kompozitní struktury. Pomocí ruční modelářské frézky byly vyřezány přistávací nohy na požadovaný tvar. A díry byly vyvrtány pomocí Aku vrtačky a sady vrtáků z rychlořezné oceli.



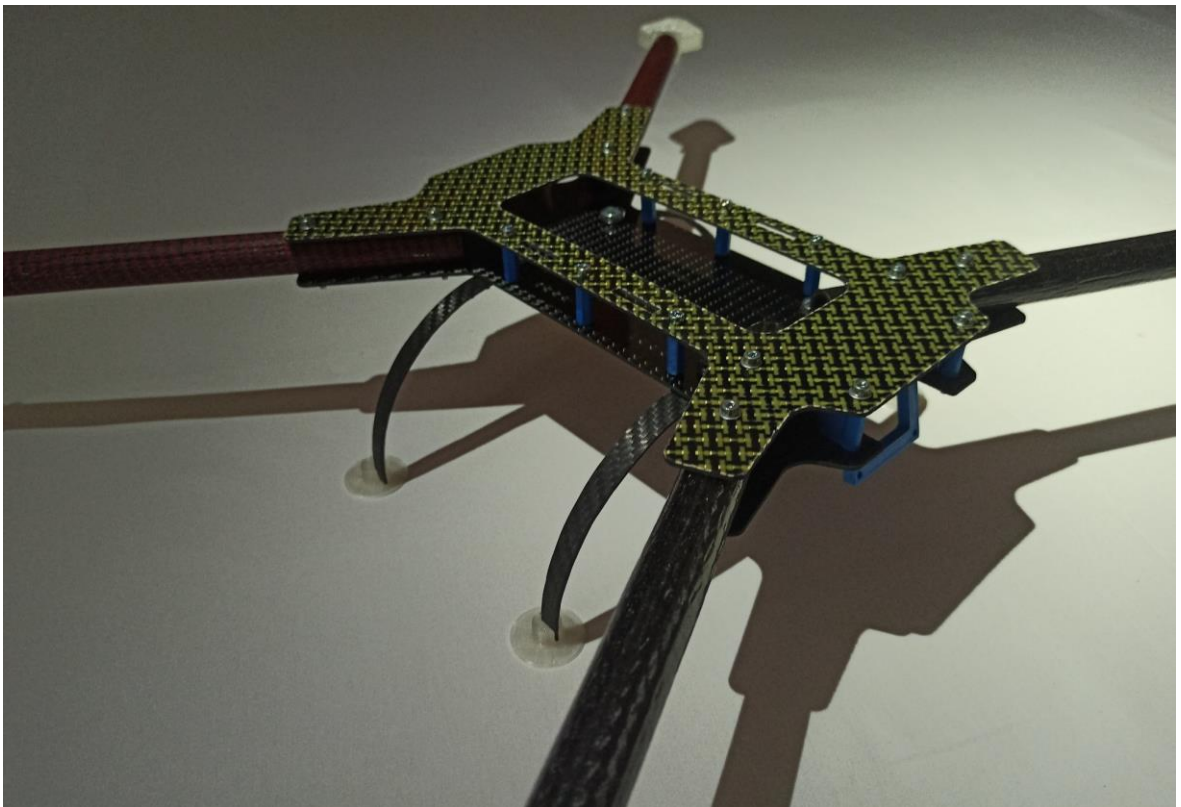
Obrázek 50 Přistávací nohy před vyřezáním na požadovaný tvar



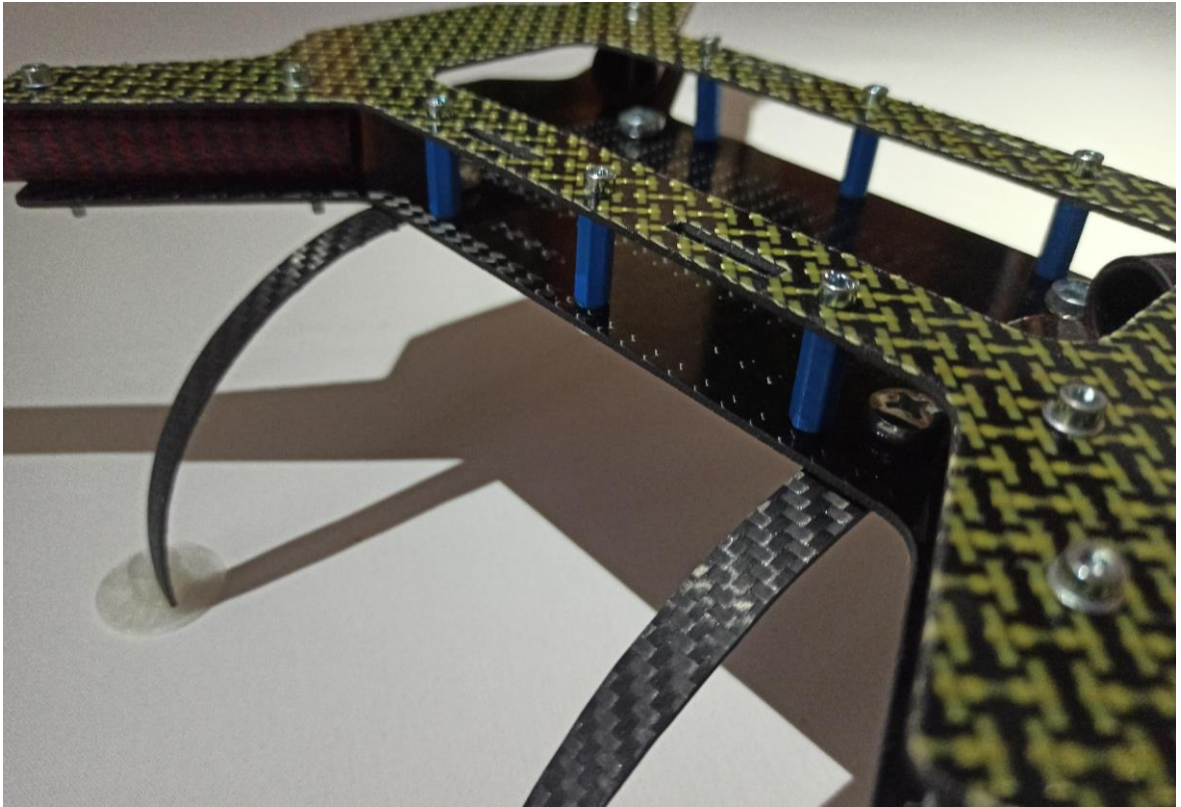
Obrázek 51 Přistávací nohy po metodách dokončení

8.4 Sestavení modelu z vybraných komponent

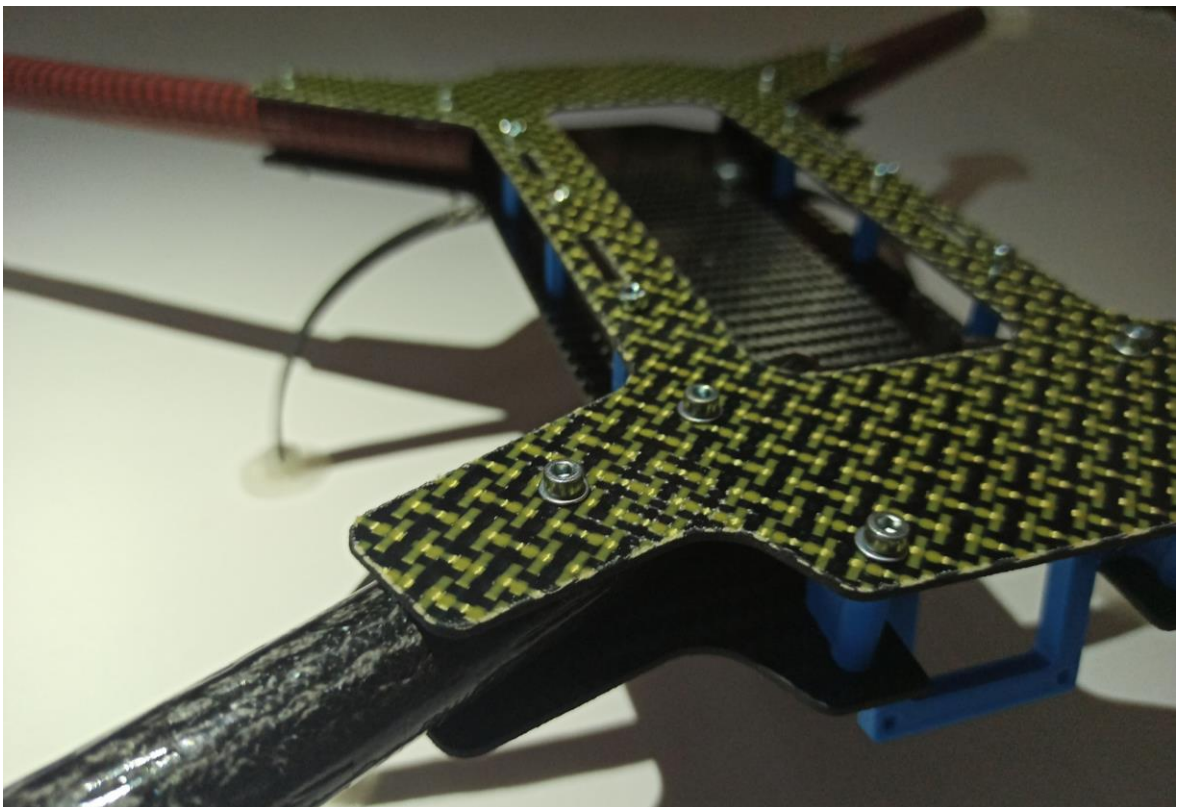
Pro úplnost kostry dronu byly k vyrobeným kompozitním součástem přidány komponenty 3D tisku vytištěné z materiálu PLA stejnými tiskárnami jako u přípravku k výrobě ramen a modelu dronu sloužícímu k optimalizaci. Určité součásti spojovacího materiálu se mezi navrženým modelem a vyrobeným modelem liší. Jedná se o čep s hlavou a dírou pro závlačku, který byl kvůli jeho nedostupnosti nahrazen šroubovým spojením a u spojení přistávacích noh s dolní částí těla, které bylo realizováno pomocí matice narážecí, podložky a šroubu u kterého bylo zjištěno, že se mezi hlavou šroubu a přistávacími nohami nachází vůle a není tak dosaženo pevného spojení. Proto bylo spojení nahrazeno větší velikostí šroubu, podložky a matice nízké. Šroub ve vyrobeném modelu zaujmul pozici narážecí matice. U komponent 3D tisku musely být zvětšeny díry pro šroubové spojení, aby bylo možné komponenty spolehlivě upevnit ke konstrukci.



Obrázek 52 Sestavený model kostry dronu



Obrázek 53 Sestavený model kostry dronu detailní pohled



Obrázek 54 Sestavený model kostry dronu detailní pohled 2

9 CENOVÁ KALKULACE VÝROBY

Ceny jsou počítány podle spotřebovaného množství z velikosti nakupovaného materiálu s aktuální cenou na trhu. V cenové kalkulaci není započítána cena lidské práce laminačních a dokončovacích technologií. Celková doba výroby činí cca 50 hodin.

Tabulka 6 Cenová kalkulace těla dronu

Materiál/ technologie	Nakupované množství	Cena za jednotku	Spotřebované množství	Cena materiálu/technologie výroby
Uhlíková tkanina	10 m ²	358,62 Kč	3 m ²	1075,86 Kč
Aramid-diolenová tkanina	20 m ²	368,45 Kč	0,5 m ²	184,23 Kč
Pryskyřice	10 kg	529,98 Kč	0,9 kg	476,98 Kč
Tužidlo	4 kg	533,48 Kč	0,31 kg	165,38 Kč
Odtrhová tkanina	10 m ²	95,83 Kč	0,25 m ²	23,96 Kč
Distribuční medium	50 m ²	65,82 Kč	0,25 m ²	16,46 Kč
Těsnící páska	1 ks	208,97 Kč	0,2 ks	41,79 Kč
Vakuová folie	10 m ²	100,94 Kč	1 m ²	100,94 Kč
Separáční vosk	1 ks	436,3 Kč	0,08 ks	36,36 Kč
Vakuovací spojka	30 ks	49,13 Kč	2 ks	98,26 Kč
Infuzní hadice	10 m	176,66 Kč	1 m	176,66 Kč
Řezání vodním paprskem MRB Sazovice	–	–	–	950 Kč
Vyvrtání děr	–	–	–	Vlastní prostředky
Povlakovaný vrták 3 mm	–	–	–	Vlastní prostředky
CELKEM				3346,87 Kč

Tabulka 7 Cenová kalkulace ramen dronu

Materiál/ technologie	Nakupované množství	Cena za jednotku	Spotřebované množství	Cena materiálu/technologie výroby
Skelná barvená punčocha	5 m	80,68 Kč	0,5 m	40,34 Kč
Uhlíková punčocha	20 m	215,14 Kč	7,5 m	1613,55 Kč
Pryskyřice	10 kg	529,98 Kč	0,3 kg	158,99 Kč
Tužidlo	4 kg	533,48 Kč	0,11 kg	56,02 Kč
Speciální páska	1 ks	942,24 Kč	0,06 ks	58,89 Kč
Separační vosk	1 ks	436,30 Kč	0,07 ks	29,09 Kč
Profil kruhový hliníkový	1 ks	135 Kč	0,67 ks	90 Kč
Obrábění čel firmou Kubíček VHS	–	–	–	Prostředky firmy
Vrtání děr firmou Kubíček VHS	–	–	–	Prostředky firmy
CELKEM				2046,88 Kč

Tabulka 8 Cenová kalkulace přistávacích noh dronu

Materiál/ technologie	Nakupované množství	Cena za jednotku	Spotřebované množství	Cena materiálu/technologie výroby
Polotovary formy	–	–	–	Prostředky fakulty
Uhlíkový prepreg	1 m ²	1945,08 Kč	0,03 m ²	58,35 Kč
Vakuová folie	10 m ²	100,94 Kč	0,25 kg	25,24 Kč
Těsnící páska	1 ks	208,97 Kč	0,07 kg	13,93 Kč
Separační vosk	1 ks	436,30 Kč	0,03 ks	10,91 Kč
Sada vrtáků z rychlořezné oceli	–	–	–	Vlastní prostředky
Univerzální sada na broušení	–	–	–	Vlastní prostředky
Ruční modelářská frézka	–	–	–	Vlastní prostředky
Aku vrtačka	–	–	–	Vlastní prostředky
Spojovací materiál	–	–	–	98 Kč
CELKEM				206,43 Kč

Tabulka 9 Cenová kalkulace modelů 3D tisku

Název	Počet	Cena
Ložiskový domek	2 ks	22,68 Kč
Klika	1 ks	10,99 Kč
Madlo kliky	1 ks	6,61 Kč
Redukce na kruhový profil	1 ks	1,25 Kč
Vymezení hřídele v ložisku kruhový profil	1 ks	5,91 Kč
Vymezení hřídele v ložisku klika	1 ks	7,09 Kč
Horní část těla prototypu dronu	1 ks	36,83 Kč
Dolní část těla prototypu dronu	1 ks	48,74 Kč
Rameno prototypu dronu	4 ks	53,08 Kč
Distanční sloupky prototypu dronu	6 ks	1,98 Kč
Přistávací nohy dronu prototypu dronu	2 ks	9,72 Kč
Dosedací plochy	8 ks	6,32 Kč
Distanční sloupky modelu dronu	6 ks	2,40 Kč
Upevnění FPV kamery modelu dronu	1 ks	6,31 Kč
Upevnění elektromotorů modelu dronu	4 ks	39,64 Kč
CELKEM		259,55 Kč

Tabulka 10 Cenová kalkulace celkové výroby

Název	Cena
Tělo dronu	3346,87 Kč
Ramena dronu	2046,88 Kč
Přistávací nohy dronu	206,43 Kč
Modely 3D tisku	259,55 Kč
CELKEM	5859,72 Kč

Výrobní cena kompozitních součástí a modelů 3D tisku, mezi které patří přípravek na výrobu ramen, prototyp dronu a modely výsledné kostry dronu, dohromady činí 5859,72 Kč.

ZÁVĚR

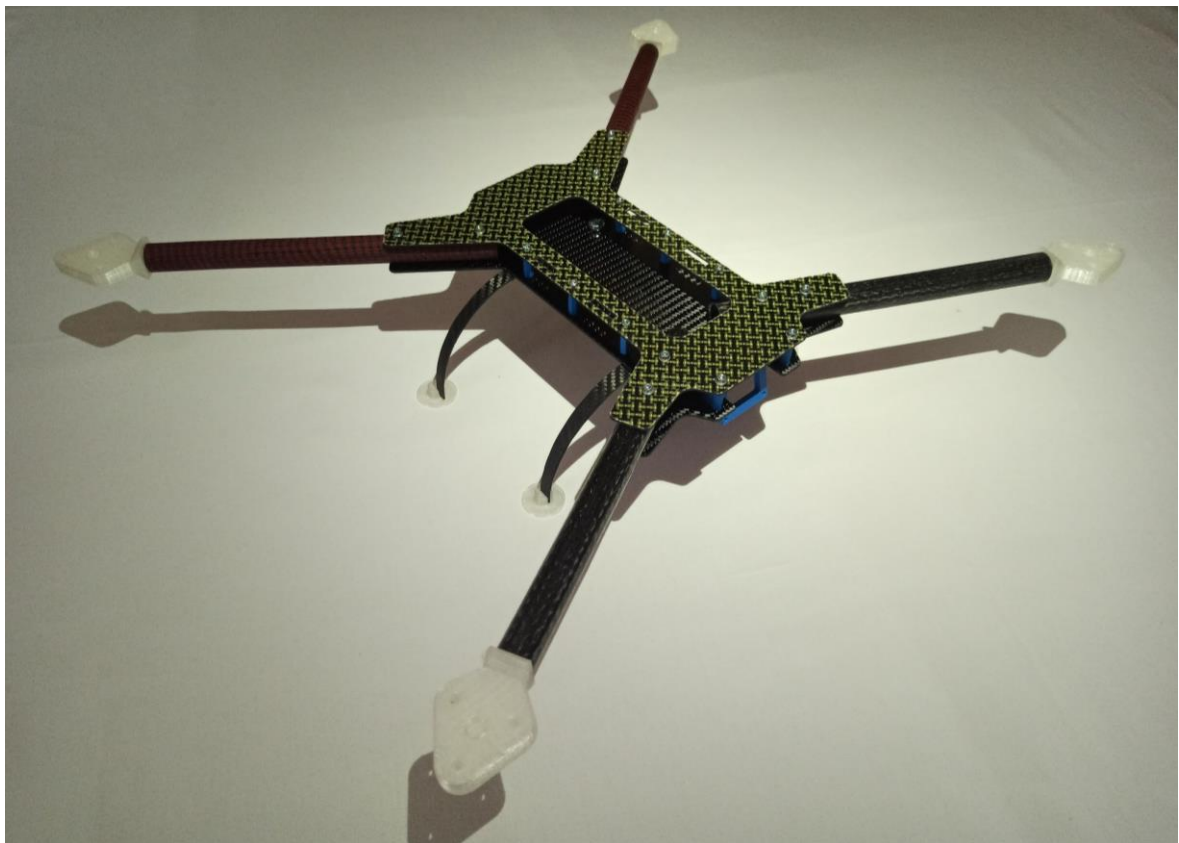
Cílem bakalářské práce bylo navrhnout materiálovou skladbu a proces výroby kompozitní součásti. Jako součást byla zvolena kostra bezpilotního letadla, která se skládá ze tří hlavních částí – těla, ramen a přistávacích noh. Práce zahrnuje návrh modelu v závislosti na kompatibilitě přidaných komponent, návrh výroby a materiálové skladby konstrukce, výrobu součástí a mechanické testování zkušebních vzorků. Pro každou část kostry dronu je zvlášť určen návrh skladby, výroby a výroba kompozitní součásti. Při návrhu kompozitních součástí bylo vycházeno z odborných studií a literární rešerše bakalářské práce.

Materiálová skladba těla dronu je složena z šesti vrstev uhlíkové tkaniny, jedné vrstvy aramid-diolenové tkaniny a epoxidové pryskyřice. Základem výroby těla bylo vyhotovení kompozitní desky pomocí technologie vakuové infuze. Dokončovací operace zahrnovaly vyřezání geometrie těla a zkušebních těles pomocí vodního paprsku a vyvrtání děr v těle pomocí stolní stojanové vrtačky. Po provedení mechanických zkoušek zkušebních těles bylo zjištěno anomální chování této kompozitní desky. Proto z tohoto důvodu byla vyrobena druhá deska, která se mírně lišila výztuží, obsahovala sedm vrstev pouze uhlíkové tkaniny.

Materiálová skladba předních a zadních ramen dronu se mírně liší. Přední ramena jsou složena z osmi vrstev uhlíkové punčochy a epoxidové pryskyřice, zadní mají výztuž obsahující sedm vrstev uhlíkové a jednu vrstvu barvené skelné punčochy. Metodou výroby byla zvolena modifikovaná technologie navíjení, která spočívala v navlečení vrstev výztuže na trn, následného prosycení výztuže pryskyřicí a optimalizování poměru výztuže a matrice. K výrobě ramen byl navržen přípravek, který umožnil vytvoření rovnoměrného vnějšího rozměru ramene, zajištění optimálního poměru matrice a výztuže a zefektivnění výroby. Prostřednictvím přípravku vlivem navíjení speciální pásky byla vytlačována přebytečná pryskyřice. Po dokončení procesu navíjení byl výrobek vytvrzen za pokojových podmínek. První variantou návrhu ramen bylo provedení menšího čtvercového průřezu. Z důvodu ověření výroby byly nejprve vyhotoveny ramena s výztuží skelných vláken, přičemž bylo zjištěno, že kompozitní součást není možná po vytvrzení z trnu odformovat. Proto byla v konečné verzi navrhnutá ramena kruhová s větším průřezem, která umožnila po vytvrzení spolehlivé vyjmutí z trnu. Dokončovací operace zahrnovaly sražení čel pomocí technologie soustružení a vyvrtání děr pomocí vertikální vyvrtávačky. Pro vybrané vzorky byla provedena zkouška tří bodovým.

Přistávací nohy byly navrženy s ohledem na úsporu hmotnosti a získání nejlepších možných mechanických vlastností. Těchto podmínek je možné docílit volbou materiálové skladby z prepregového materiálu a použitím technologie vakuového lisování. Materiál přistávacích noh byl vybrán uhlíkový prepreg od výrobce Delta-preg s označením GG200T (Tenax HTA-3k) + DT806R. Před samotnou výrobou bylo nutné navrhnout výrobní formu umožňující spolehlivé vyhotovení kompozitní součásti. Forma byla vyrobena z umělého dřeva Ebaboard 1050, které odolává teplotám až 100 °C. Metodou vakuového lisování byla zvolena technologie zpracování ve vytvrzovací peci. Vytvrzení součásti bylo provedeno v temperační jednotce Zwick/Roell | W91255. Vytvrzenou kompozitní strukturu bylo nutné ořezat na požadovanou geometrii pomocí ruční modelářské frézky. Po vyřezání přistávacích noh byly v dílech za pomoci Aku vrtačky vyvrtány díry sloužící ke spojení s dolní částí těla dronu. Pro přesné vyvrtání byla použita sada rychlořezných vrtáků.

Po dokončovacích operacích kompozitních součástí bylo posledním krokem složení součástí v jednu konstrukci. K sestavené kompozitní konstrukce byly následně přidány komponenty 3D tisku, které tak vytvořily funkční kostru bezpilotního letadla.



Obrázek 55 Vyrobený model kostry dronu

Přínosem této bakalářské práce je především potvrzení vhodnosti návrhů materiálové skladby a procesů výroby kompozitních součástí na základě realizovaných výrobních procesů a získání znalostí a poznatků o celkovém návrhu zvolené kompozitní součásti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] DVORÁK, Zdeněk, LAMBOROVÁ, Romana. ZÁKLADY VÝROBNÍCH PROCESŮ, díl 1, Konstrukční materiály polymerní a kompozity.
- [3] Zadní nárazník McLaren P1 [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <http://www.scopioneusa.com/blog/McLaren-Full-Carbon-Fiber-Option-for-P1>
- [4] VRBKA, Jan. MECHANIKA KOMPOZITŮ [online]. [cit. 2021-6-11]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojního-inženýrství-vut-v-brne.html>
- [5] WANBERG, John. Composite Materials: Fabrication Handbook #1. Wolfgang Publications, 2009, 144 s. ISBN 978-1-929133-76-5.
- [6] KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity [online]. [cit. 2021-6-11]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz>
- [7] Alibaba.com: Assembled E-glass composite fiber glass roving [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/fiber-reinforcement-forms>
- [8] Nový přírodní materiál může změnit svět aut, drahý karbon ale nevyrovnává ve všem [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/predstaveni/novy-prirodni-material-muze-zmenit-svet-aut-drahy-karbon-ale-nevyrovna-ve-vsem/>
- [9] Materials & Processes: Fiber formats for composites. CompositesWorld [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/fiber-reinforcement-forms>
- [10] CIOBANU, Luminita. Development of 3D Knitted Fabrics for Advanced Composite Materials. ATTAF, Brahim, ed. Advances in Composite Materials - Ecodesign and Analysis [online]. InTech, 2011, 2011-03-16 [cit. 2022-03-04]. ISBN 978-953-307-150-3. Dostupné z: doi:10.5772/14876

- [11] Struktura multiaxiálních tkanin [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-Multiaxial-Warp-Knitted-Fabrics-for-in-Jinlian-Jiang/08484387d163d4b86748f2d1ae01354c637e2e82>
- [12] ENCYCLOPEDIA OF FIBER & TEXTILE TECHNOLOGY [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/Fibers/Fiberpedia%20W.html>
- [13] Vacuum Bagging Equipment and Techniques for Room-Temp Applications [online]. [cit. 2021-08-11]. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/vacuum-bagging-equipment-and-techniques-for-room-temp-applications/Learning_Center
- [14] What is a Prepreg? [online]. [cit. 2021-19-11]. Dostupné z: <https://matmatch.com/learn/material/what-is-prepreg>
- [15] Technology update: prepregs. Reinforced Plastics [online]. 2003, 47(6), 20-21 [cit. 2022-03-04]. ISSN 00343617. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-3617(03)00627-1
- [16] Prepreg_Technology [online]. [cit. 2021-19-11]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf
- [17] HAMILL, Lee, Timotei CENTEA a Steven NUTT. Surface porosity during vacuum bag-only prepreg processing: Causes and mitigation strategies. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing [online]. 2015, 75, 1-10 [cit. 2022-03-04]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2015.04.009
- [18] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Přednášky – Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. UTB - Zlín, 2021.
- [19] Laminating and Bagging a Carbon Fibre Tube Using a Split Mould [online]. [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/learning/split-mould-carbon-fibre-tube>
- [20] Co-cured Composite Structures Using Smart Tooling [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://smarttooling.com/portfolio/using-smart-tooling-for-co-cured-composite-structures/>
- [21] QUANJIN, Ma, M.R.M. REJAB, M.S. IDRIS, Bo ZHANG, M.N.M. MERZUKI a Nallapaneni Manoj KUMAR. Wireless technology applied in 3-axis filament winding machine control system using MIT app inventor. IOP Conference Series: Materials Science

and Engineering [online]. 2018, 469 [cit. 2022-03-04]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/469/1/012030

[22] Co je dron? [online]. [cit. 2022-29-1]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/co-je-dron>

[23] How Drones are Advancing Scientific Research [online]. [cit. 2022-29-1]. Dostupné z: <https://news.climate.columbia.edu/2017/06/16/how-drones-are-advancing-scientific-research/>

[24] 15 Drone Applications And Use Cases in 2020 [online]. [cit. 2022-31-1]. Dostupné z: <https://www.folio3.ai/blog/drone-applications-use-cases/>

[25] A Comprehensive List of Commercial Drone Use Cases (128+ And Growing) [online]. [cit. 2022-31-1]. Dostupné z: <https://www.dronegenuity.com/commercial-drone-use-cases-comprehensive-list/>

[26] Jak budou drony hasit požáry výškových budov [online]. [cit. 2022-31-1]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/jak-budou-drony-hasit-pozary-vyskovych-budov/>

[27] Drone Racing [online]. [cit. 2022-31-1]. Dostupné z: <https://airdronecraze.com/drone-racing/>

[28] What Are Consumer Drones Made Of? [online]. [cit. 2022-1-2]. Dostupné z: <https://www.letusdrone.com/what-are-consumer-drones-made-of/>

[29] FPV Frame Materials: Will Carbon Fibre Be Replaced? [online]. [cit. 2022-1-2]. Dostupné z: <https://www.getfpv.com/learn/fpv-essentials/fpv-frame-materials/>

[30] How to Make a Drone / UAV - Lesson 2: The Frame [online]. [cit. 2022-1-2]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/how-make-drone-uav-lesson-2-frame-chandra-shekhar-tasupalli->

[31] CHAMOLA, Vinay, Pavan KOTESH, Aayush AGARWAL, NAREN, Navneet GUPTA a Mohsen GUIZANI. A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. Ad Hoc Networks [online]. 2021, 111 [cit. 2022-03-04]. ISSN 15708705. Dostupné z: doi:10.1016/j.adhoc.2020.102324

[32] Types of Drones and UAVs [online]. [cit. 2022-3-2]. Dostupné z: <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-of-drones>

- [33] DRONE TYPES: MULTI-ROTOR VS FIXED-WING VS SINGLE ROTOR VS HYBRID VTOL [online]. [cit. 2022-3-2]. Dostupné z: <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>
- [34] Rudder [online]. [cit. 2022-3-2]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/rudder>
- [35] JAN HRDÝ. Fyzikální principy letu kvadrokoptéry [online]. [cit. 2022-3-2]. Dostupné z: http://home.pf.jcu.cz/~vnufcb/CD/pdf/VNUF23_12.pdf
- [36] Hybrid VTOL Fixed-Wing UAV Manufacturers [online]. [cit. 2022-4-2]. Dostupné z: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/hybrid-vtol-fixed-wing-uav-manufacturers/>
- [37] MARTINETTI, Alberto, Mihran MARGARYAN a Leo van DONGEN. Simulating mechanical stress on a micro Unmanned Aerial Vehicle (UAV) body frame for selecting maintenance actions. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, 16, 61-66 [cit. 2022-03-04]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2018.10.160
- [38] VOLEK, František. *Základy pružnosti a pevnosti*. Vyd. 2. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2006. ISBN 80-7318-440-0.
- [39] Ahmed M. Nayeem, Kumar P. Vijaya, Shivanand H. K., Muammil Syed Basith (2013). *A Study on Effect of Variation of Thickness on Tensile Properties of Hybrid Polymer Composites (Glassfibre-Carbonfibre- Graphite) and GFRP Composites*. *International Journal of Engineering Research and Applications* [online]. [cit. 2022-4-2]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/256475136_A_Study_on_Effect_of_Variation_of_Thickness_on_Tensile_Properties_of_Hybrid_Polymer_Composites_Glassfibre-Carbonfibre-Graphite_and_GFRP_Composites
- [40] FPV kamera Quanam 700TVL Sony 1/3 Camera 2.1mm Lens (PAL) [online]. [cit. 2022-4-4]. Dostupné z: <https://www.rc-levneji.cz/quanam-700tv1-sony-13-camera-21mm-lens-pal>
- [41] Multistar High Capacity 10000mAh 4S 10C Multi-Rotor Lipo Pack XT90 [online]. [cit. 2022-4-4]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/multistar-high-capacity-4s-10000mah-multi-rotor-lipo-pack.html?store=en_us
- [42] DJI Naza-M Lite Version Multirotor Flight Controller GPS Combo for DJI [online]. [cit. 2022-4-4]. Dostupné z: https://nz.banggood.com/DJI-NAZA-Flight-Control-System-and-GPS-Lite-Version-p-906572.html?cur_warehouse=CN

- [43] DYS 30Amp Mini Opto BLHeli Multi-Rotor Electronic Speed Controller (BLHeli Firmware) SN30A [online]. [cit. 2022-4-4]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/dys-30amp-mini-opto-blheli-multi-rotor-electronic-speed-controller-blheli-firmware-sn30a.html
- [44] FrSky X4RSB 3/16ch 2.4Ghz ACCST Receiver (w/telemetry) [online]. [cit. 2022-4-4]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/frsky-x4rsb-3-16ch-2-4ghz-accst-receiver-w-telemetry.html?gclid=CjwKCAjwrqqSBhBbEiwAlQeqGs9pQ45gdPjp1w27ggflznLPL1tQ8TsjYud4q8Y7piC88hI1oeE0BoCI4YQAvD_BwE&__store=en_us
- [45] Tarot 4108 380KV 6S Multirotor Brushless Disc Motor - TL68P07 [online]. [cit. 2022-6-4]. Dostupné z: <https://www.flyingtech.co.uk/electronics/tarot-4108-380kv-6s-multirotor-brushless-disc-motor-tl68p07>
- [46] TAROT 1555 FOLDING PROPELLER CLIP SET TL100D04 FOR MULTICOPTER [online]. [cit. 2022-6-4]. Dostupné z: https://alexnld.com/product/tarot-1555-folding-propeller-clip-set-tl100d04-for-multicopter/?gclid=CjwKCAjw9LSSBhBsEiwAKtf0nwqldVua4qv5n3HXFHDxryX39P8pt8NKLRrJt_kZuXcGuQ9ez9FzFhoCLIsQAvD_BwE
- [47] PLA [online]. [cit. 2022-4-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

tj.	To je
%	Procenta
°	Stupeň
°C	Stupeň Celsia
HM	Uhlíková vlákna s vysokým modulem pružnosti, pevné
HT	Uhlíková vlákna standartního typu
µm	Mikrometr
1K	Tisíc svazků v uhlíkovém vláknu
3K	Tři tisíce svazků v uhlíkovém vláknu
6K	Šest tisíc svazků v uhlíkovém vláknu
12K	Dvanáct tisíc svazků v uhlíkovém vláknu
24K	Dvacet čtyři tisíc svazků v uhlíkovém vláknu
cm	Centimetr
atd.	A tak dále
kPa	Kilopascal
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
3D	Trojrozměrný
LiDAR	Light Detection and Ranging
DEM	Digital Elevation Model
FPV	First Person View
TPU	Termoplastický polyuretan
g	Gram
VTOL	Vertical Take-off And Landing
FEM	Finite Element Method
TPU	Termoplastický polyuretan

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CAD	Computer Aided Desing
OSD	On Screen Display
mAh	Miliampérhodina
GPS	Global Positioning System
V	Volt
C	Velikost vybíjecího proudu
RPM	Revolutions Per Minute
"	Palec
PLA	Polylaktidová vlákna
mm	Milimetr
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic
n	Počet měření
\bar{x}	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
E	Modul pružnosti [MPa]
σ_{Max}	Mez pevnosti v ohybu [MPa]
$W_{\sigma Max}$	Práce na mezi pevnosti [N.mm]
$\varepsilon_{\sigma Max}$	Poměrná deformace [%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Příklad využití kompozitu v automotive – Nárazník McLaren P1 [3].....	11
Obrázek 2 Uhlíková vlákna – Uhlíková tkanina.....	15
Obrázek 3 Skelná vlákna – Skelná rohož	16
Obrázek 4 Aramidová vlákna – Aramid-diolenová tkanina	17
Obrázek 5 Přírodní vlákna – Lněná tkanina [8].....	17
Obrázek 6 Rovingy – Uhlíkový roving.....	18
Obrázek 7 Struktura multiaxiálních tkanin [10]	19
Obrázek 8 Vazby tkanin: a) plátňová, b) keprová, c) saténová, d) košíková [11].....	19
Obrázek 9 Schéma ruční laminace pod vakuovou fólií [14, 18]	24
Obrázek 10 Schéma zpracování prepregů pomocí vytvrzovací pece [16, 18].....	25
Obrázek 11 Vytvrzovací cyklus prepregového polotovaru ve vytvrzovací peci [16, 18] ...	27
Obrázek 12 Vytvrzovací cyklus prepregového polotovaru v autoklávu [16, 18].....	28
Obrázek 13 Trn s vytvrzeným laminátem před vložením do pece na dotvrzení. [20].....	30
Obrázek 14 Schéma technologie navíjení [21]	31
Obrázek 15 Využití dronů – mapování terénu [25]	34
Obrázek 16 Dron s rámem z polyamidu 12 [30]	36
Obrázek 17 Dron s rámem ze slitiny hořčíku [28].....	37
Obrázek 18 Rozdělení dronů podle křídel a rotorů [31]	39
Obrázek 19 Model dronu s barevně označenými součástmi.....	47
Obrázek 20 Horní část těla.....	48
Obrázek 21 Dolní část těla.....	49
Obrázek 22 Distanční sloupek	49
Obrázek 23 FPV kamera [40]	50
Obrázek 24 Upevnění FPV kamery	51
Obrázek 25 Baterie [41].....	51
Obrázek 26 Řídící jednotka [42].....	52
Obrázek 27 Elektronický regulátor rychlosti [43]	53
Obrázek 28 Rádiový přijímač [44]	53
Obrázek 29 Model ramena.....	54
Obrázek 30 Elektromotor [45].....	55
Obrázek 31 Vrtule [46]	55
Obrázek 32 Upevnění elektromotoru.....	56
Obrázek 33 Přistávací nohy	56
Obrázek 34 Dosedací plochy	57

Obrázek 35 Prototyp kostry dronu vytisknutý 3D tiskárnou	58
Obrázek 36 Varianty provedení modelu ramen	59
Obrázek 37 Vakuová infuze – vytvoření vakua.....	62
Obrázek 38 Vakuová infuze – systém připravený k prosycování výztuže	63
Obrázek 39 Pohledová strana vytvrzené kompozitní desky	63
Obrázek 40 Zatížení zkušebních těles kompozitní desky	64
Obrázek 41 Zatížení dovytvrzených zkušebních těles kompozitní desky	65
Obrázek 42 Skelná a uhlíková punčocha	66
Obrázek 43 Přípravek k výrobě ramen dronu	67
Obrázek 44 Kompozity kruhového průřezu vytvrzující za pokojových podmínek.....	69
Obrázek 45 Zatížení ramene se skelnou výztuží	70
Obrázek 46 Zatížení ramene s uhlíkovou výztuží	70
Obrázek 47 Uhlíkový prepreg.....	71
Obrázek 48 Forma přistávacích noh	72
Obrázek 49 Tělo a ramena dronu po metodách dokončení	74
Obrázek 50 Přistávací nohy před vyřezáním na požadovaný tvar.....	75
Obrázek 51 Přistávací nohy po metodách dokončení.....	75
Obrázek 52 Sestavený model kostry dronu	76
Obrázek 53 Sestavený model kostry dronu detailní pohled	77
Obrázek 54 Sestavený model kostry dronu detailní pohled 2	77
Obrázek 55 Vyrobený model kostry dronu.....	82

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti tkanin výztuže.....	60
Tabulka 2 Naměřené hodnoty zkušebních těles kompozitní desky	64
Tabulka 3 Naměřené hodnoty dovytvrzených zkušebních těles kompozitní desky	65
Tabulka 4 Naměřené hodnoty testovaného ramene se skelnou výztuží	69
Tabulka 5 Naměřené hodnoty testovaného ramene s uhlíkovou výztuží	70
Tabulka 6 Cenová kalkulace těla dronu.....	78
Tabulka 7 Cenová kalkulace ramen dronu	79
Tabulka 8 Cenová kalkulace přistávacích noh dronu	79
Tabulka 9 Cenová kalkulace modelů 3D tisku	80
Tabulka 10 Cenová kalkulace celkové výroby	80

SEZNAM PŘÍLOH

Součástí bakalářské práce je několik příloh, které byly nezbytné pro její vypracování. Tyto přílohy jsou uloženy na přiloženém CD-ROM.

Příloha P I: Model dronu s výkresovou dokumentací

Příloha P II: Řezací plán kompozitní desky

Příloha P III: Materiálový list uhlíkového prepregu GG200T (Tenax HTA-3k) + DT806

Příloha P IV: Technický list epoxidové pryskyřice L 285 (MGS) a tužidla

L 285 (MGS)

Příloha P V: Naměřené hodnoty mechanických zkoušek 3-bodovým ohybem