

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

NÁVRH KONSTRUKCE A VÝROBY KOMPOZITNÍHO VRTULOVÉHO
LISTU

DESIGN AND MANUFACTURE COMPOSITE PROPELLER BLADE

AUTOR: Václav Urban

STUDIJNÍ PROGRAM: Letectví a kosmonautika

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Karel Barák

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Urban** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **459653**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh konstrukce a výroby kompozitního vrtulového listu

Název diplomové práce anglicky:

Design and manufacture composite propeller blade

Pokyny pro vypracování:

Návrh konstrukce a výroby kompozitního vrtulového listu sklopné tlačné vrtule pro elektromotor o výkonu do 25 kW

- 1) Stanovení zatížení vrtulového listu
- 2) Konstrukce vrtulového listu
- 3) Pevnostní kontrola vrtulového listu
- 4) Rešerše technologií výroby kompozitních vrtulí
- 5) Návrh technologie výroby vrtulového listu
- 6) Konstrukce formy
- 7) Výkresová dokumentace

Seznam doporučené literatury:

Jungmann, Radek. Návrh vrtule pro letoun s elektrickým pohonem. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2018-09-11.

Tari, David. Aerodynamický návrh vrtule. Praha, 2019. Magisterská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky.

Baránek, Pavel. Návrh náboje sklopné stavitelné vrtule. Praha, 2019. Magisterská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Karel Barák, ústav letadlové techniky FS


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


Datum zadání diplomové práce: **24.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Karel Barák
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis otkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29.4.2020

Datum převzetí zadání

Urban

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a ostatních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu, jenž je součástí této práce.

V Praze dne

Podpis autora

Poděkování:

Rád bych poděkoval všem, kteří přispěli svými cennými radami a poznatky ke vzniku této diplomové práce. Především pak vedoucímu práce Ing. Karlu Barákovi.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Václav Urban

Název práce: Návrh konstrukce a výroby kompozitního vrtulového listu

Title: Design and manufacture composite propeller blade

Rok: 2020

Studijní program: Letectví a kosmonautika

Ústav: Ústav letadlové techniky

Vedoucí práce: Ing. Karel Barák

Bibliografické údaje:	počet stran	60
	počet obrázků	39
	počet grafů	5
	počet tabulek	9
	počet příloh	3

Klíčová slova:

vrtule, vrtulový list, konstrukce, zatížení, výroba, kompozit, infuze, technologie, forma

Keywords:

propeller, propeller blade, structure, loading, manufacturing, composite, infusion, technology, mould

Abstrakt:

Tato práce se zabývá návrhem kompozitního vrtulového listu. V práci je vypočítáno zatížení vrtulového listu, navržena konstrukce a proveden pevnostní výpočet. Dále je zde navržena technologie výroby vrtulového listu.

Abstract:

This thesis deals with a design of composite propeller blade. In this thesis is calculated loading of propeller blade, designed construction and performed strength analysis. Further there is designed technology of manufacturing of the propeller blade.

Obsah

Seznam použitých zkratek	9
Seznam použitých symbolů	9
Úvod.....	11
1 Konstrukce vrtulového listu	12
1.1 Historický vývoj konstrukce	12
1.2 Kompozitní konstrukce vrtulového listu	13
1.2.1 Příklady konstrukcí kompozitních vrtulových listů	13
2 Výroba kompozitních vrtulí.....	18
2.1 Historický vývoj výroby	18
2.2 Technologie výroby kompozitních vrtulí.....	18
2.2.1 Kontaktní laminace (Wet lay up)	19
2.2.2 Infuzní technologie	19
2.2.3 Oplétání.....	20
2.3 Příklad výroby kompozitního vrtulového listu	21
3 Zatížení vrtulového listu	23
3.1 Pevnostní výpočet vrtulového listu.....	23
3.1.1 Zatížení od odstředivých sil.....	24
3.1.2 Zatížení od aerodynamických sil	28
4 Výpočet zatížení vrtulového listu.....	31
4.1 Výpočet tahové síly od odstředivých sil	31
4.2 Výpočet kroutícího momentu od odstředivých sil	32
4.3 Výpočet rozkřivování listu od odstředivých sil.....	33
4.4 Výpočet ohybového momentu od aerodynamických sil	34
4.5 Výpočet kroutícího momentu od aerodynamických sil	36
5 Návrh konstrukce a volba materiálu vrtulového listu	37

5.1	Návrh konstrukce vrtulového listu	37
5.2	Volba materiálu	38
5.2.1	Materiál pásnic	38
5.2.2	Materiál potahu	39
5.2.3	Materiál jádra	39
5.2.4	Matrice.....	39
6	Pevnostní výpočet.....	40
6.1	Popis výpočetní metody.....	40
6.1.1	Směšovací pravidlo	40
6.1.2	Klasická laminátová teorie	41
6.1.3	Pevnostní kritéria	41
6.2	Výpočet	42
6.3	Ověření pevnostního výpočtu	45
7	Návrh technologie výroby vrtulového listu	48
7.1	Konstrukce formy pro výrobu vrtulového listu	48
7.1.1	Umístění vtokových a odsávacích ventilů.....	50
7.2	Výroba formy.....	51
7.2.1	Výroba modelů (negativů formy, kopyt)	51
7.2.2	Výroba formy	52
7.3	Výroba vrtulového listu	53
7.3.1	Výroba pěnového jádra	53
7.3.2	Výroba předlisků	53
7.3.3	Prosycení.....	54
7.3.4	Finální úpravy.....	54
	Závěr	55
	Seznam použité literatury	56

Seznam obrázků, grafů, tabulek a příloh	58
Obrázky:	58
Grafy:.....	59
Tabulky:.....	59
Přílohy:.....	60

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Název
CNC	..... Computer Numerical Control
HM	..... High Modulus
HS	..... High Strength
HT	..... High Tenacity
MDF	..... Medium Density Fibreboard
MKP	..... Metoda Konečných Prvků
NDT	..... Non Destructive Testing
PMI	..... Polymetakrylimid
PP	..... Polypropylen
PS	..... Polystyren
PUR	..... Polyuretan
PVC	..... Polyvinylchlorid
RIM	..... Reaction Injection Moulding
RTM	..... Resin Transfer Moulding
S-RIM	..... Structure Reaction Injection Moulding
UHM	..... Ultra High Modulus
VARTM	..... Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding

Seznam použitých symbolů

Symbol	jednotka	název veličiny
A	$[N \cdot m^{-1}]$	matice tahové tuhosti
a_1, a_2	$[-]$	součinitele profilu
B	$[N]$	matice vazební tuhosti
b	$[m]$	šířka
c_D	$[-]$	součinitel odporu
c_L	$[-]$	součinitel vztlaku
c_M	$[-]$	součinitel momentu
D	$[N \cdot m]$	matice ohybové tuhosti
D	$[N]$	odpor
d	$[m]$	průměr
E	$[Pa]$	modul pružnosti
F	$[N]$	síla
G	$[Pa]$	modul pružnosti ve smyku
I	$[m^4]$	hlavní moment setrvačnosti
K	$[-]$	permeabilita

K_ω	$[-]$	součinitel odstředivé síly
k	$[m^{-1}]$	křivost
k_3	$[-]$	opravný součinitel profilu
L	$[N]$	vztlak
l	$[m]$	délka
m, M	$[kg]$	hmotnost
M	$[N \cdot m]$	moment
N	$[N \cdot m^{-1}]$	výslednice sil
n	$[-]$	počet otáček
p	$[Pa]$	tlak
Q	$[-]$	Měrné délkové zatížení
r, R	$[m]$	poloměr
S	$[m^2]$	obsah
T	$[N]$	tah
t	$[m]$	tloušťka
U	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost
V	$[-]$	objemový podíl
v	$[m^3]$	objem
W	$[m \cdot s^{-1}]$	náběžná rychlost proudu
Z	$[-]$	Počet listů na vrtuli
β	$[^\circ]$	rychlostní úhel
γ	$[^\circ]$	zkosení
ε	$[-]$	poměrné prodloužení
θ	$[^\circ]$	úhel natočení vláken
μ	$[Pa \cdot s]$	viskozita
ν	$[-]$	Poissonovo číslo
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota
σ	$[Pa]$	napětí
Φ	$[^\circ]$	úhel nastavení
ω	$[rad/s]$	úhlová rychlost

Úvod

Tato práce se zabývá konstrukčním, pevnostním a poté výrobním návrhem kompozitního vrtulového listu. Vrtulový list je určen pro sklopnou tlačnou vrtuli s elektromotorem o výkonu 25kW. V rešeršní části této práce je probrán historický vývoj konstrukce vrtulových listů až po současné konstrukční řešení. Jsou zde uvedeny výhody použití kompozitních materiálů, které spočívají zejména v úspoře hmotnosti. Obsahem rešeršní části je také shrnutí současných technologií výroby kompozitních vrtulových listů, které se odvíjejí od současných trendů ve vývoji zpracování kompozitních materiálů. Také je zde uvedena potřebná teorie k provedení výpočtu zatížení vrtulového listu. Samotný výpočet zatížení je začátkem praktické části práce. Aerodynamická data potřebná k výpočtu zatížení jsou přebrána z aerodynamického návrhu vrtulového listu [1]. Následuje návrh konstrukčního řešení a pevnostní kontrola. Pevnostní výpočet je prováděn dle předpisu pro 141 % jmenovitých otáček motoru a úhel nastavení 25°, při kterém je zatížení největší. V poslední kapitole je navržena infuzní technologie výroby, společně s konstrukcí formy a technologickým postupem výroby.

1 Konstrukce vrtulového listu

V této kapitole bude shrnut vývoj a současné trendy v konstrukci vrtulových listů. Zde uvedené teoretické poznatky následně poslouží k návrhu konstrukce vrtulového listu v praktické části.

1.1 Historický vývoj konstrukce

Jedna z prvních vrtulí byla zkonstruována již na přelomu 15. a 16. století Leonardem da Vincim. Byla použita pro pohon stroje podobného vrtulníku a fungovala na principu vzdušného šroubu. O prvních vrtulích, tak jak je známe dnes, se dá hovořit až na přelomu 19. a 20. století. První úspěšný pokus použití vrtule jako pohonu byl v letadle Flyer I. bratří Wrightů., kteří použili dvě tlačné dřevěné vrtule.

První vrtule byly dvoulisté dřevěné vrtule vyráběné z jednoho kusu dřeva. Postupem času se přešlo na výrobu vrtulí z vrstveného dřeva, které se vyráběly lepením latí, nejčastěji z jasanu a smrku, a poté opracováním do finálního tvaru. Se zvyšováním výkonů motorů postupem doby bylo nutné přejít od celodřevěných vrtulí na vrtule celokovové, které vykazovaly vyšší pevnost, životnost a aerodynamickou jemnost. Celokovové vrtulové listy byly vyráběny jako plné z hliníkových slitin, nebo duté ocelové. S rozmachem kompozitních materiálů se začaly konstruovat i kompozitní vrtulové listy, zejména kvůli redukci hmotnosti a jednoduchosti výroby [2].

Jelikož má dřevo velkou schopnost útlumu, neprojeví se u dřevěných konstrukcí problémy s vynuceným kmitáním a únavou materiálu. S příchodem kovových a kompozitních konstrukcí se již tyto problémy projeví. Při dimenzování těchto konstrukcí je rozhodující právě dynamické namáhání z vynuceného kmitání listu. Proto je pro tyto konstrukce nutné provedení pevnostního výpočtu, testování dynamických stavů a kontroly únavové pevnosti. V současné době je konstrukce vrtulového listu navrhována podle teorie *Safe Life*. Je požadováno, aby životnost vrtule limitovalo poškození v důsledku provozního prostředí (např.: eroze, koroze), nikoliv únava materiálu [2].

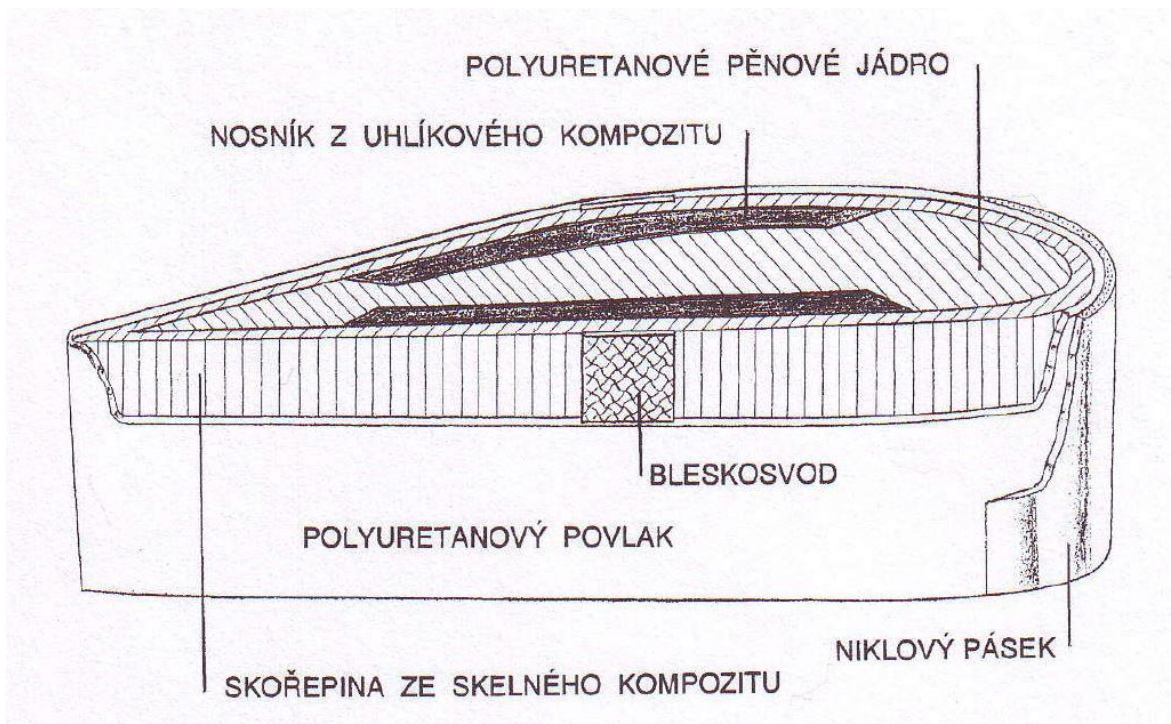
1.2 Kompozitní konstrukce vrtulového listu

Kompozitní materiály přinesly do konstrukce vrtulových listů řadu výhod. Dokázaly výrazně snížit hmotnost vrtulí, úspora hmotnosti se pohybuje od 2,5 kg do 9 kg oproti obdobnému listu z hliníkové slitiny. Někteří výrobci uvádějí úsporu až 16 kg. Snížená hmotnost vrtule znamená snížení zatížení od odstředivých sil, což má za následek snížení namáhání částí motoru, zejména hřídele a motorového lože. Další výhodou úspory hmotnosti kompozitních listů je to, že na vrtuli může být více listů, aniž by byla překročena hmotnost původní kovové vrtule. Více listů pak může znamenat více výhod: lepší výkon, snížené vibrace, snížený hluk, větší světlá výška. Snížení hluku a vibrací také napomáhá pěnové jádro, které absorbuje vibrace. Další výhodou kompozitních vrtulí je jejich snadná údržba a oprava. Na rozdíl od generálních oprav kovových vrtulí, které zahrnují broušení a úběr materiálu, se kompozitní čepele opravují přidáváním materiálu. Výsledkem je, že kompozitní listy lze snadno vrátit do stavu výrobní specifikace po každé generální opravě. Jsou schopny odolat vícenásobným opravám a generálním opravám, aniž by vyžadovaly úplnou výměnu. Někteří výrobci certifikují kompozitní listy vrtulí na neomezenou životnost. Další nespornou výhodou kompozitních materiálů je možnost přesného tvarování vrtulového listu se štíhlým a účinným profilem. Výsledkem je vyšší výkon vrtule. Někteří výrobci zaznamenali zlepšení cestovní rychlosti při přechodu na kompozitní vrtuli až o 8 uzlů [3,4].

1.2.1 Příklady konstrukcí kompozitních vrtulových listů

V této kapitole bude uvedeno několik příkladů řešení konstrukce kompozitního vrtulového listu.

Obrázek 1 zachycuje typickou konstrukci kompozitního vrtulového listu. Základem této konstrukce je jádro tvořené polyuretanovou pěnou. Do tohoto jádra je zapuštěn nosník z uhlíkových vláken, která jsou orientována kolmo na osu otáčení vrtule. Uhlíkový nosník přenáší hlavní část zatížení vrtule, které se skládá z tahu a ohybu. Celou konstrukci poté zpevňuje skořepina ze skelných vláken, která také přenáší zatížení od krutu. Skořepinu pokrývá polyuretanový povlak, chrání vrtulový list před poškozením a povětrnostními vlivy. Součástí vrtule je také kovový pásek, bleskosvod, který chrání vrtuli před účinky elektrického výboje. Náběžnou hranu pak proti poškození chrání niklový pásek [5].



Obrázek 1 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 1 [6]

Na obrázku 2 je další kompozitní konstrukce vrtulového listu, která je tvořena pěnovým jádrem a nosným potahem. Na náběžné hraně lze opět vidět ochranný niklový pásek. Odtoková hrana zde má zeslabený potah, jelikož přenáší minimální zatížení.



Obrázek 2 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 2 [7]

Dále, na obrázku 3, vidíme konstrukční řešení kompozitního dutého vrtulového listu. Potah je nosný z uhlíkového vlákna a uvnitř listu se nachází oválný nosník ze skelných vláken.

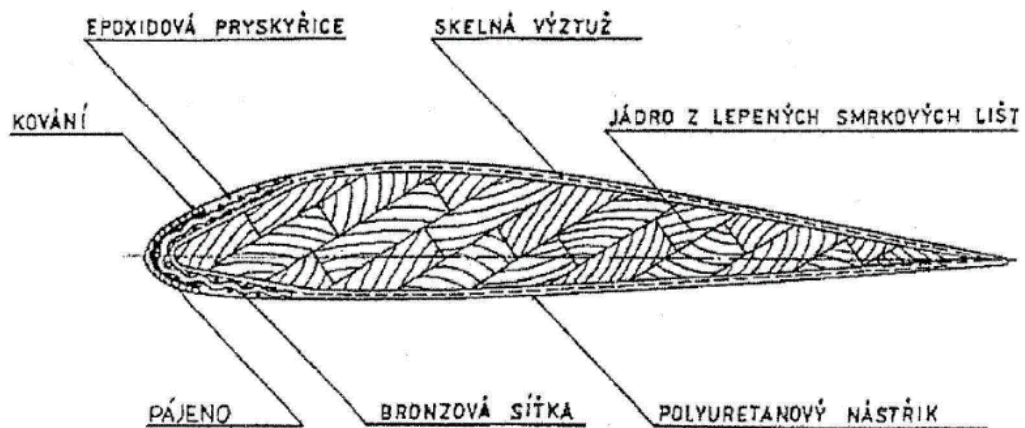


Obrázek 3 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 3

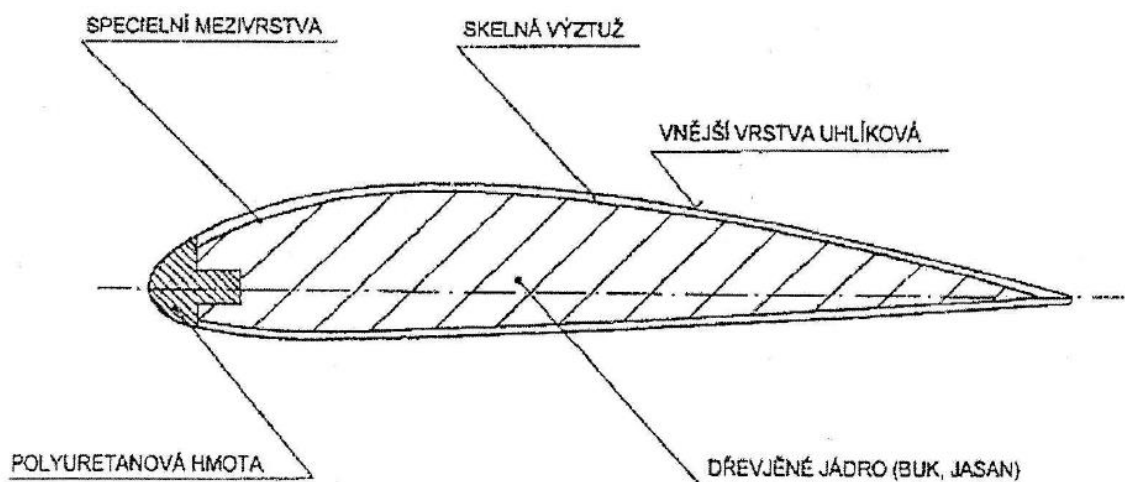
Na obrázcích 4, 5 a 6 jsou uvedeny příklady konstrukčních řešení vrtulových listů, které kombinují dřevo a skelná či uhlíková vlákna. Profil tvoří vysoce stlačené slepené latě bukového a smrkového dřeva. Kompozitní potah dřeva umožňuje přesné tvarování profilu listu pro dosažení požadované aerodynamické jemnosti, maximalizaci výkonu a také zajišťuje ochrannou funkci.



Obrázek 4 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 4



Obrázek 5 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 5 [8]



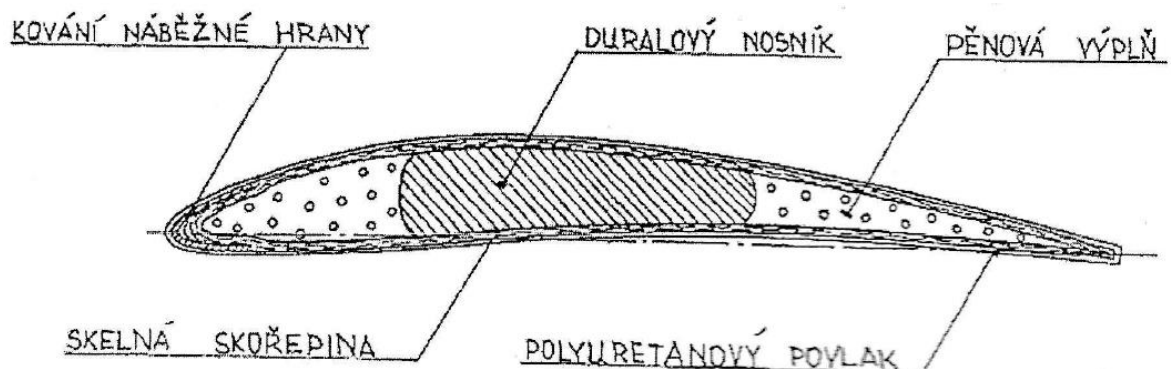
Obrázek 6 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 6 [8]

Na obrázku 7 lze vidět porovnání celokompozitních a dřevěných vrtulových listů firmy Hartzell. Celokompozitní listy mají pevnost v tahu 1200 MPa, zatímco listy vyrobené z bukového dřeva mají pevnost v tahu okolo 270 MPa, ze smrkového dřeva se jedná zhruba o 60 MPa. Vysoká pevnost v tahu kompozitních materiálů tedy umožňuje vyrábět tenké a hluboké vrtulové listy s vysokou účinností a štíhlostí [9].

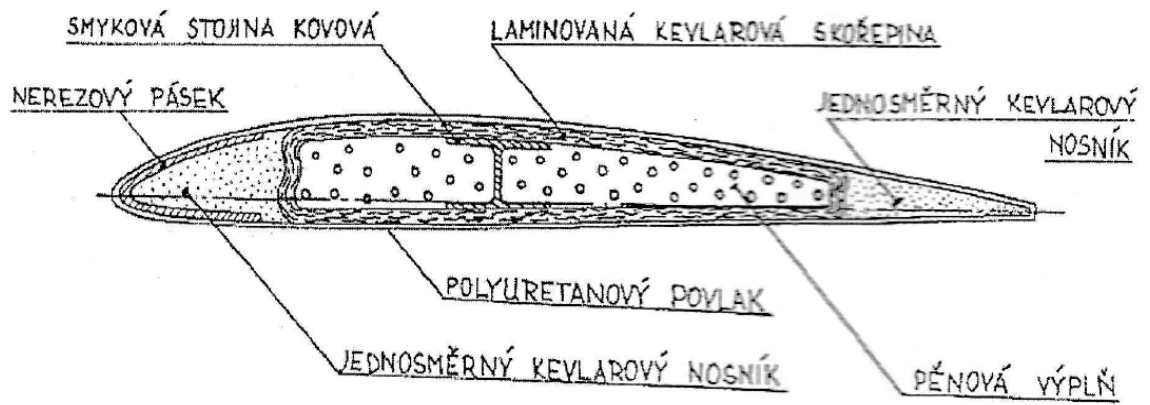


Obrázek 7 - Porovnání celokompozitních listů s dřevěnými listy s kompozitním potahem [9]

Další méně typické příklady konstrukce kompozitních vrtulových listů, které kombinují kompozitní materiály s kovovými materiály, jsou uvedeny na následujících obrázcích.



Obrázek 8 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu s kovovým konstrukčním prvkem 1 [8]



Obrázek 9 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu s kovovým konstrukčním prvem 2 [8]

2 Výroba kompozitních vrtulí

Tato část představuje teoretický úvod do problematiky technologií výroby. První část je zaměřena na historický vývoj. Následně bude věnována pozornost i současným trendům. Tato kapitola je zde uvedena za účelem ucelení představy o běžně užívaných technologiích a slouží navíc k vysvětlení pojmů, jež budou využity v části praktické.

2.1 Historický vývoj výroby

První kompozitní vrtule byly konstruovány již ve dvacátých letech 19. století. Materiál, z něhož byly vrtule vyráběny, byla tzv. *micarta*, kompozit složený z vrstev papíru, kůže či bavlny. Nicméně vrtule z tohoto materiálu byly drahé a náročné na výrobu, proto nebyly využívány tolik, jako vrtule dřevěné. Vývoj kompozitních vrtulí byl obnoven v 60. a 70. letech 19. století, s primárním cílem snížit hmotnost současných vrtulí. Hlavní motivací pro snížení hmotnosti vrtulí byla jejich hlučnost. S narůstající rychlostí na špičce vrtule značně vzrůstala i její hlučnost, tudíž byla tendence zvětšovat průměr a snižovat otáčky vrtule. Se zvětšováním průměru hliníkových vrtulí rychle rostla i hmotnost. Tento problém řeší listy vrtule z kompozitních materiálů. Jako první materiál pro výrobu kompozitních vrtulí bylo používáno skelné vlákno a poté následoval kevlar, boron a uhlíkové vlákno [10].

Oproti klasickému obrábění kovových a dřevěných vrtulí, které je časově a cenově náročné, je výroba kompozitních vrtulí rychlá a levná, tudíž je vhodná pro výrobu velkého množství kusů. Kompozitní materiály mají také výhodu vyšší meze pevnosti v tahu, tuhosti a únavové pevnosti.

2.2 Technologie výroby kompozitních vrtulí

Pro výrobu kompozitních vrtulí je využíváno různých technologií a postupů, které si každý výrobce chrání před zveřejněním. Tyto technologie však vychází z veřejně známých a ověřených technologií zpracování kompozitních materiálů, na kterých pak jednotliví výrobci staví a více či méně je vylepšují. V této kapitole bude uvedeno několik nejznámějších a nejpoužívanějších technologií zpracování kompozitních materiálů, které se používají k výrobě vrtulí.

2.2.1 Kontaktní laminace (Wet lay up)

Kontaktní laminace je asi nejjednodušší metoda výroby, se kterou se můžeme setkat už jen u menších výrobců. Materiál (vlákna, pěnové jádro) je po jednotlivých vrstvách kladen do formy, kde je ručně prosycován matricí. Matrice je na vlákna aplikována válečkem, který vytlačuje vzduchové bubliny z materiálu. Poté se forma uzavře a za působení tlaku a teploty je kompozit vytvrzován. Mezi výhody této metody patří jednoduchost a cenová nenáročnost, nevýhodou je pak menší objemový podíl vláken v kompozitu (10-38 %), a tudíž horší mechanické vlastnosti [11].

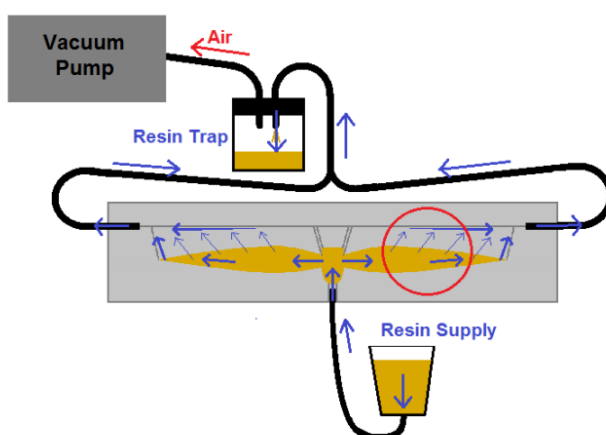
2.2.2 Infuzní technologie

Oproti předchozí se tato metoda liší tím, že výztuž a jádro jsou do dvoudílné formy vkládány suché. Poté se forma uzavře a utěsní. Formy jsou vyráběny většinou z laminátu nebo vysoce plněných pryskyřic, pro větší série nebo při potřebě vytápěné formy se používají lehké ocelové formy. Vytápění formy značně zkracuje výrobní čas a snižuje viskozitu pojiva, čímž se zlepšuje zatékání pojiva [12].

Další postup může být rozdělen do více kategorií. Zde budou uvedeny ty nejznámější a nejpoužívanější:

2.2.2.1 Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM)

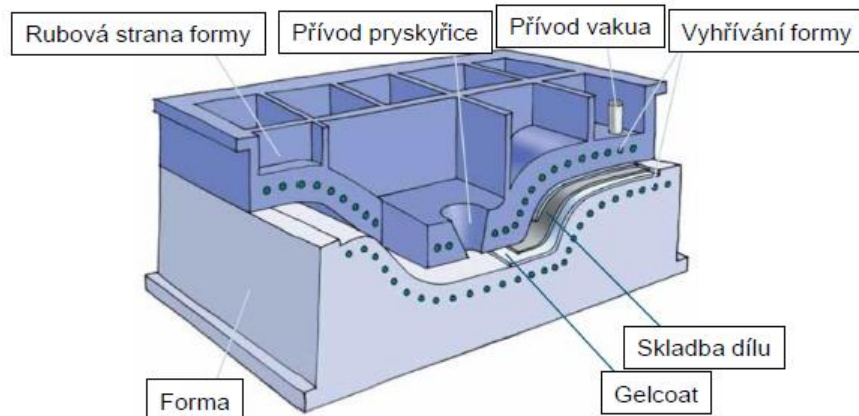
Odsáním vzduchu se ve formě vytvoří vakuum, pomocí něhož je do formy přivedena matrice. Matrice prosytí vlákna a přebytek oteče. Tato metoda má produktivitu zhruba 50 ÷ 1000 dílů / forma / rok.



Obrázek 10 - Schéma VARTM [13]

2.2.2.2 Resin transfer molding

U této infuzní technologie je matrice do formy zaváděna pod tlakem 0,2 až 1 MPa. Následně je použito vakuum, které podporuje prosycení výztuže a odstranění bublin z matrice. Často se používá jádro z polyuretanové pěny kvůli zvýšení ohybové tuhosti. Jádro se vyrábí ve speciální formě a následně je jeho povrch zdrsňen pro dosažení dobrého spoje s matricí. Produktivita této technologie se pohybuje mezi 500 ÷ 5000 díly / forma / rok [12, 14].



Obrázek 11 - Schéma RTM [14]

Požadavek na zkrácení výrobního cyklu vedl k vývoji technologie RIM (reaction injection moulding). U této technologie se jednotlivé složky matrice mísí až po vstříknutí do formy, což umožňuje dosáhnout kratších vytvrzovacích časů. Další modifikací RTM je tzv. S-RIM (structural RIM), kde se do formy vkládá již předtvarovaná výztuž. U infuzních technologií se dosahuje většího objemového podílu vláken, a to 25–65 % [12].

2.2.3 Oplétání

Tato technologie byla převzata z textilního průmyslu. Jedná se o značně náročnou technologii, vyžadující poměrně vysoké investiční náklady. Vytzužujícími vlákny z posuvného oplétacího zařízení se oplétá nepohyblivé jádro pomocí rotující hlavy. Na jádru se tedy vytváří struktura podobná tkanině. Díky mnohonásobnému překřížení vláken, a tudíž vysokému tření mezi vlákny, je možné vyrobit velmi složitá uložení vláken. Touto technologií lze vyrábět poměrně složitá tělesa. K prosycení vláken matricí se používá metoda RTM popsaná v předchozí kapitole [12].



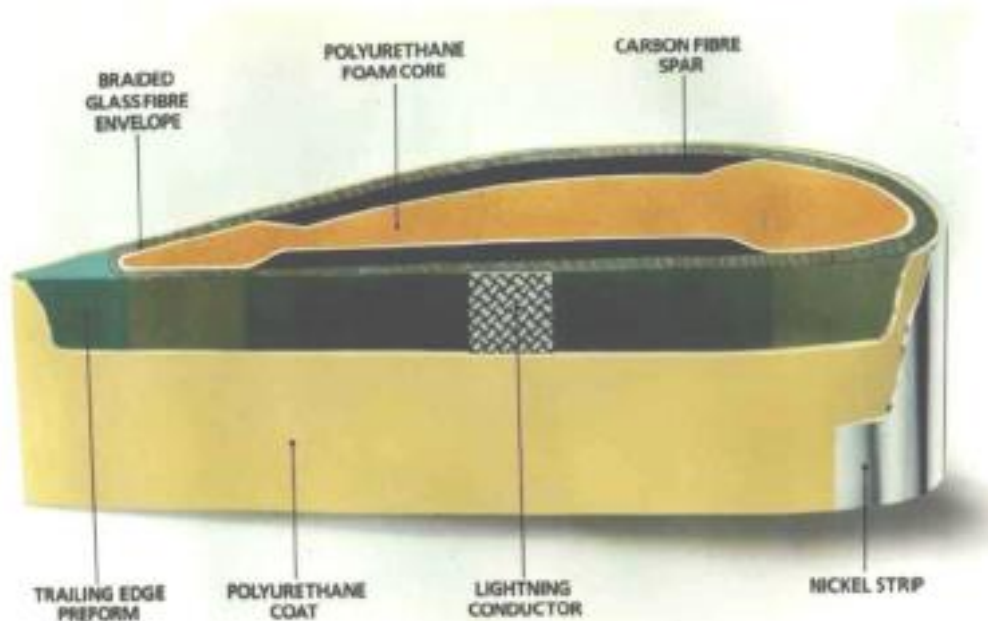
Obrázek 12 - Výroba vrtulového listu oplétáním ve firmě Dowty [15]

2.3 Příklad výroby kompozitního vrtulového listu

V této kapitole bude uveden reálný případ výroby celkompozitního vrtulového listu.

V tomto případě je využito více technologií zmíněných v předchozí kapitole.

- 1) V prvním kroku je na CNC stroji nařezána tkanina (kombinace skelných a uhlíkových vláken) na potřebné tvary a jednotlivé přířezy jsou naskládány do formy. Takto se vytvoří vnitřní skořepina ze skelného vlákna a nosníky z uhlíkových vláken.
- 2) Celá forma se vloží do rámu a do dutiny vytvořené nosníky a skořepinou je vstříknuto pěnové jádro.
- 3) Poté je na kompozitní strukturu nasazena kovová část kořenu listu, která slouží k upnutí listu do vrtulové hlavy. Dále jsou nasazeny klíny, které zajišťují pevný spoj mezi kovovým kořenem a kompozitním listem.
- 4) Oplétáním se vytvoří na vnějším povrchu skořepiny potah vrtulového listu z uhlíkových a skelných vláken.
- 5) Metodou RTM se vlákna prosytí matricí a list se nechá vytvrdnout.
- 6) Následuje kontrola listu NDT metodami.
- 7) Na konec listu je přilepena odtoková hrana z polyuretanové pěny a na celý list se nanese vrstva polyuretanu proti erozi. Provede se finální nátěr listu.
- 8) Předposlední krok je instalace niklových lišt na ochranu náběžné hrany a instalace odmrazovacích plotének.
- 9) V posledním kroku je vrtulový list vyvážen [16].



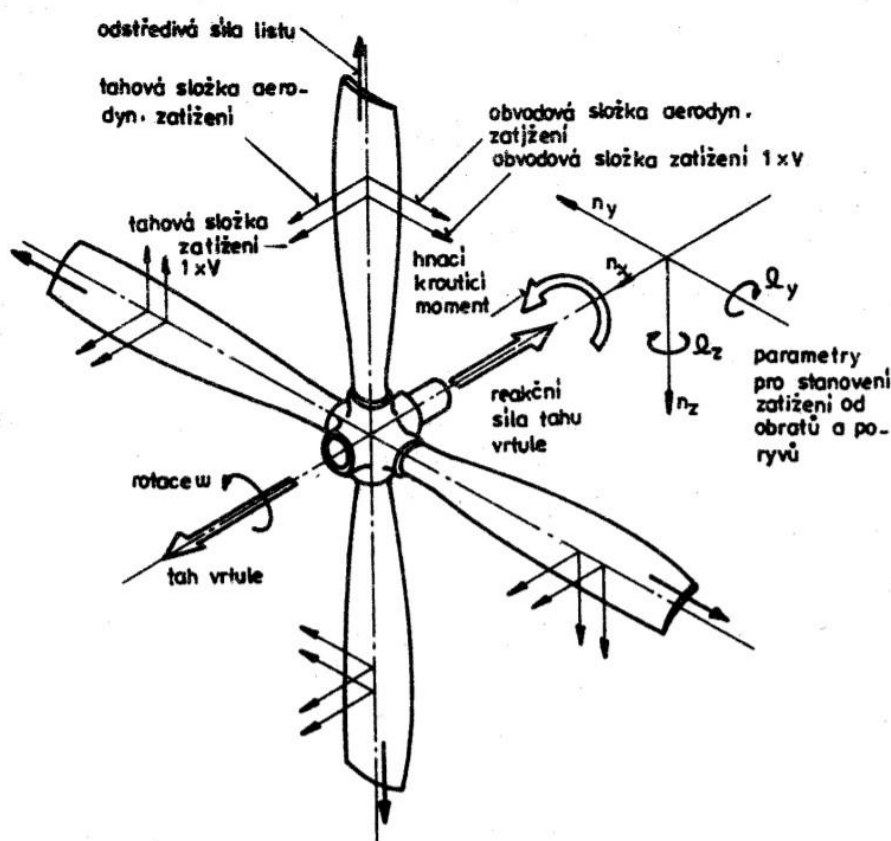
Obrázek 13 - Konstrukční uspořádání listu popsaného v této kapitole [16]



Obrázek 14 - Konstrukční uspořádání kořenové části listu popsaného v této kapitole [16]

3 Zatížení vrtulového listu

Na vrtulový list působí soustava sil a momentů, které můžeme dělit na kvazistatická zatížení, cyklická zatížení, účinky gyroskopických sil a letových násobků a na dynamická zatížení. V této práci budou rozebrána pouze kvazistatická zatížení vrtulového listu. Ta lze dále rozdělit na zatížení od odstředivých a od aerodynamických sil. Obrázek 15 znázorňuje působení hlavních zatížení vrtule [2].



Obrázek 15 - Soustava sil a momentů zatěžujících vrtuli [2]

3.1 Pevnostní výpočet vrtulového listu

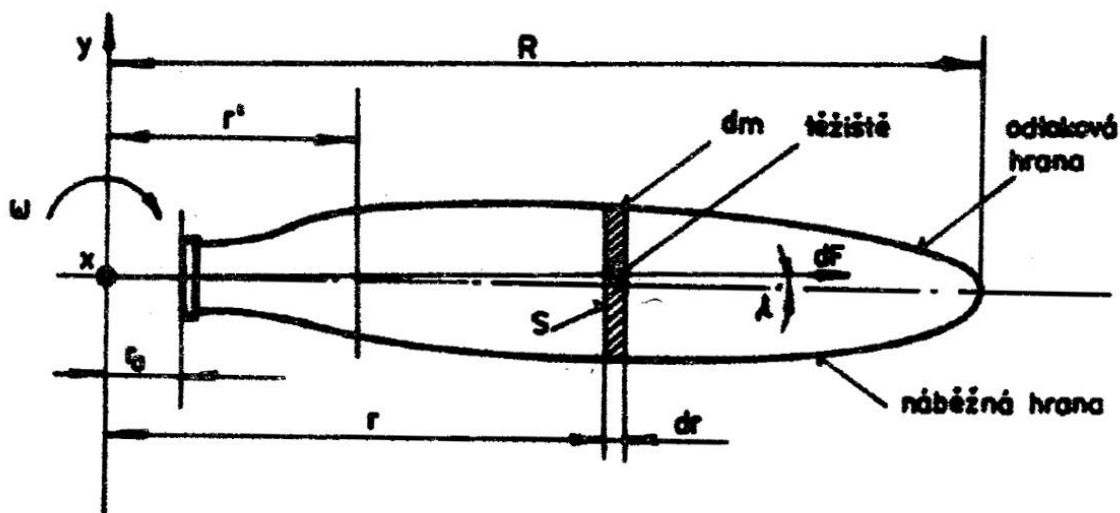
Aby bylo možné provést pevnostní výpočet vrtulového listu, je třeba znát konstrukční uspořádání listu, geometrické parametry, aerodynamické parametry, materiálové parametry a také provozní podmínky, za kterých bude vrtule provozována. Režimy, pro které je nutné výpočet provádět, jsou uvedeny v předpisu. Nejčastěji se výpočet provádí pro vzletový režim s nulovou dopřednou rychlostí, pro režim letu s maximální rychlostí a také pro režimy letu střemhlav a obráceného tahu [2].

V dalších podkapitolách budou uvedeny jednotlivé silové účinky a způsob jejich výpočtu.

3.1.1 Zatížení od odstředivých sil

Velikost zatížení vrtule od odstředivých sil závisí na úhlové rychlosti a její hmotnosti. U moderních vrtulí velkých průměrů a vysokých otáček jsou tyto síly dominantní.

3.1.1.1 Tahové zatížení



Obrázek 16 - Schéma vrtulového listu k výpočtu tahového zatížení [2]

Za předpokladu rovnoměrného rozdělení tahového zatížení po řezu listu a velmi malého úhlu λ , lze určit odstředivou sílu působící na element listu ze vztahu

$$dF = r \cdot \omega^2 \cdot dm = r \cdot \omega^2 \cdot \rho \cdot S \cdot dr, \quad (3.1)$$

kde S - plocha řezu, r - poloměr, ω - úhlová rychlost, dm - element hmotnosti, ρ - hustota materiálu.

Plochu řezu lze zjednodušeně vyjádřit pomocí opravného součinitele profilu k_3 :

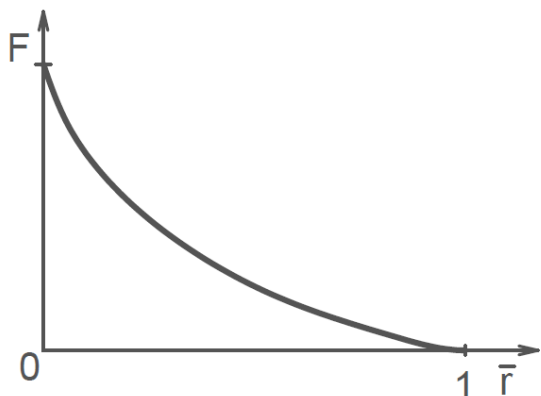
$$S = b \cdot t \cdot k_3, \quad (3.2)$$

kde b - šířka listu, t - tloušťka listu.

Po dosazení za $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_s$ a součinitele odstředivé síly $dK_\omega = \frac{\pi^2}{60^2} \cdot k_3 \cdot b^2 \cdot t \cdot r \cdot dr$ dostáváme vztah pro odstředivou sílu:

$$dF = dK_\omega \cdot \rho \cdot n^2 \cdot d^4, \quad (3.3)$$

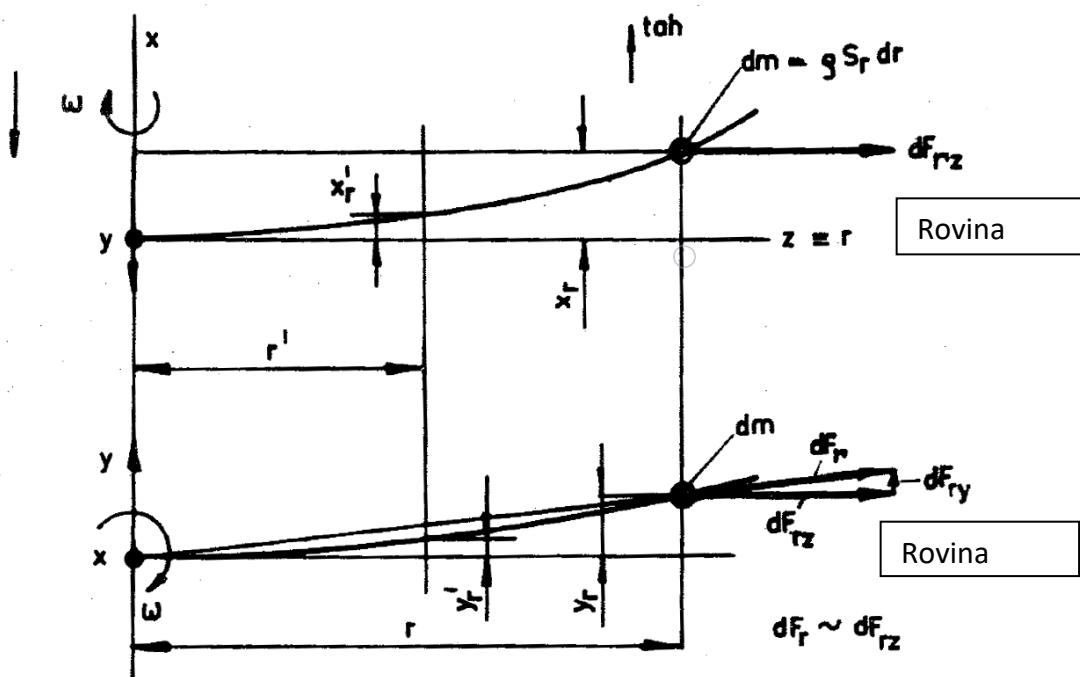
kde n je počet otáček za minutu a d je průměr vrtule [17].



Obrázek 17 - Typický průběh odstředivé síly po poloměru listu [17]

3.1.1.2 Vratný moment

Vrtulový list si lze představit jako štíhlý nosník, který se vlivem aerodynamických sil deformuje v rovině tahu a v rovině vrtule. Vlivem deformace vznikají ohybové momenty, které vracejí osu listu do původní polohy. Momenty a deformace jsou znázorněny na obrázku 18 [2].



Obrázek 18 - Vliv vratného momentu [2]

V rovině tahu bude ohybový moment

$$(M_{O_y})_{r'} = \int_{r'}^R \left(\frac{dx}{dr} \right)_r \cdot F_r \cdot dr, \quad (3.4)$$

kde $\left(\frac{dx}{dr}\right)_r$ je sklon směrnice průhybové čáry v rovině tahu na poloměru r a F_r je celková odstředivá síla v tomto místě.

V rovině vrtule bude ohybový moment

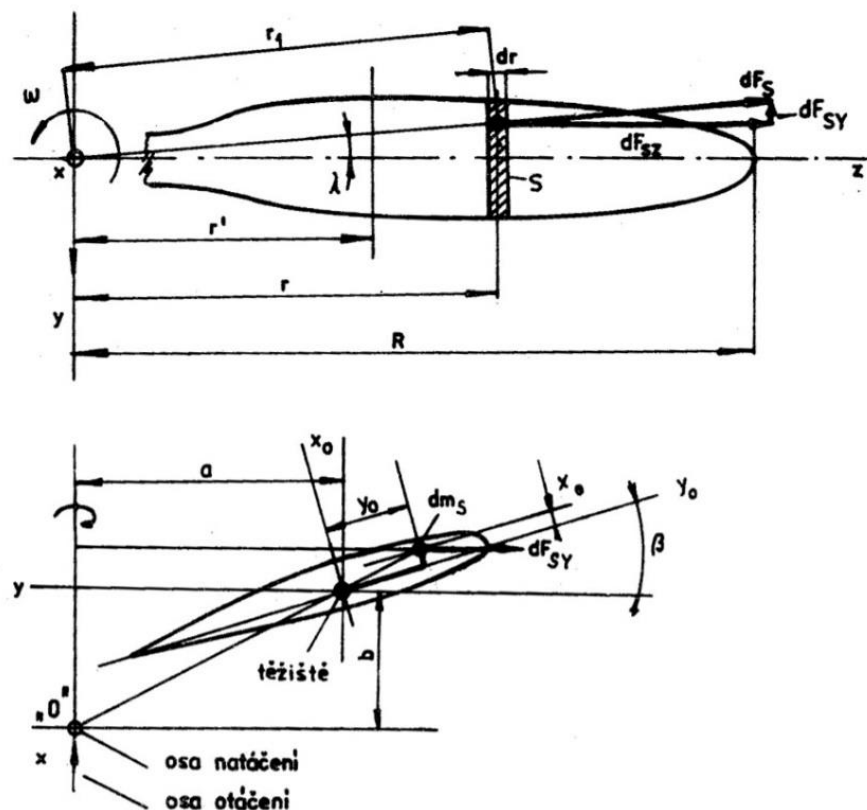
$$(M_{O_x})_{r'} = \int_{r'}^R \left(\frac{dy}{dr}\right)_r \cdot F_r \cdot dr - \rho \cdot \omega^2 \cdot \int_{r'}^R \int_{r'}^R y_r \cdot S_r \cdot dr' \cdot dr, \quad (3.5)$$

kde $\left(\frac{dy}{dr}\right)_r$ je sklon směrnice průhybové čáry v rovině vrtule na poloměru r .

Ke stanovení vratných momentů je nutné znát ohybové deformace od aerodynamických sil, výsledné ohybové momenty se počítají postupnou iterací. K redukci ohybového momentu pro určité režimy se využívá konstrukčního vyklonění těžištní osy [2].

3.1.1.3 Kroutící moment

Vlivem odstředivé síly vzniká kroutící moment působící kolem osy natáčení vrtulového listu. Tento moment ovlivňuje hlavně mechanismus natáčení vrtule. Na obrázku 19 je vidět schéma působení kroutícího momentu.



Obrázek 19 - Schéma k výpočtu kroutícího momentu [2]

Hodnotu kroutícího momentu působícího na celý list získáme pomocí vztahu 3.6

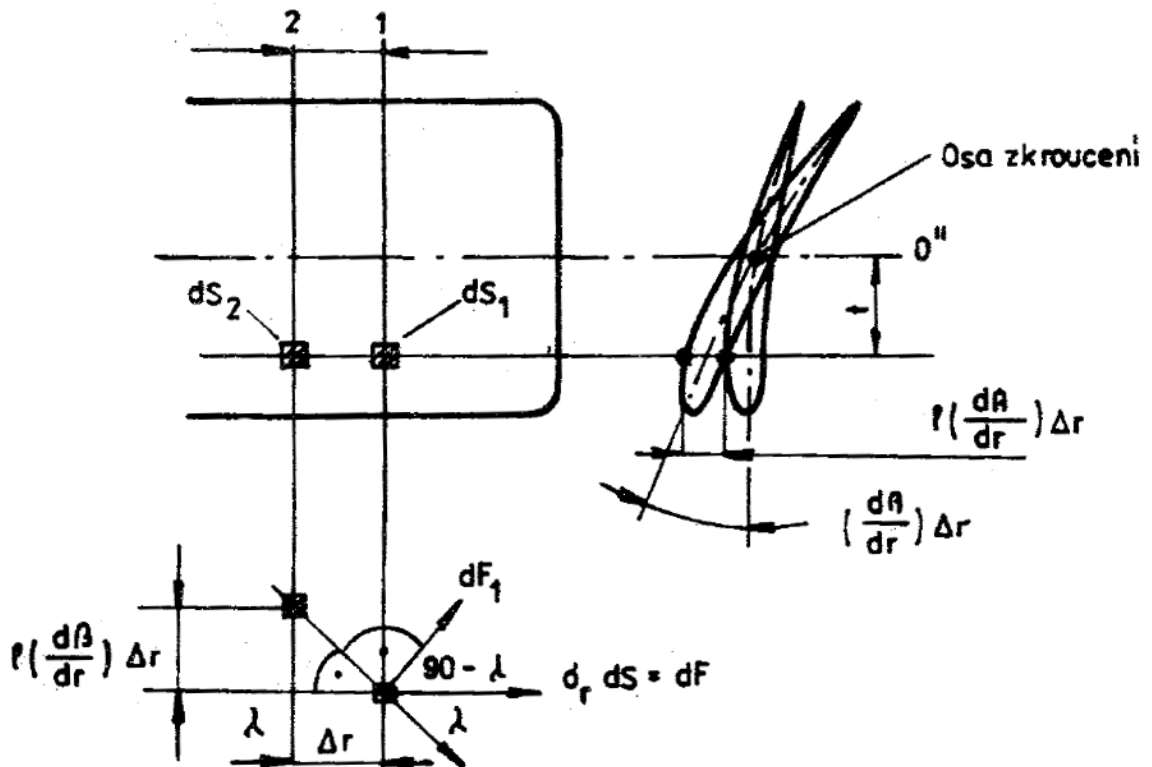
$$M_{KF_{r'}} = \frac{\rho}{2} \cdot \omega^2 \left[\int_{r'}^R (I_{max} - I_{min}) \cdot \sin 2\beta \cdot dr + \int_{r'}^R a \cdot b \cdot S \cdot dr \right], \quad (3.6)$$

kde I_{max} a I_{min} jsou hlavní momenty setrvačnosti řezu.

Hodnota kroutícího momentu se stanovuje v závislosti na úhlu nastavení listu. Člen $\int_{r'}^R a \cdot b \cdot S \cdot dr$ lze zanedbat, pokud list není konstrukčně vykloněn [2].

3.1.1.4 Rozkrucování listu

U širokých listů s velkým poměrným zkroucením vzniká vlivem tahového zatížení od odstředivé síly rozkrucovací moment. U listů s malým poměrným zkroucením lze tento moment zanedbat.



Obrázek 20 - Schéma k výpočtu rozkrucovacího momentu [2]

Integrací přes celou plochu listu a za předpokladu, že torzní osa 0 je těžištní osou, dostáváme vztah pro rozkrucovací moment

$$(M_{Kroz})_r = \sigma_r \cdot \left(\frac{d\beta}{dr} \right) \cdot (I_{max} + I_{min}), \quad (3.7)$$

kde σ_r je axiální zatížení listu způsobené odstředivou silou [2].

3.1.2 Zatížení od aerodynamických sil

Pro stanovení zatížení od aerodynamických sil je nutné definovat režimy, pro které je zatížení počítáno. Jedná se o režim vzletový tzv. statický, v němž je rychlost letadla nulová při maximálním výkonu vrtule a maximálním tahu. V tomto režimu jsou zatížení vrtule největší. Jako další výpočetní režim považujeme letový režim. V tomto režimu jsou aerodynamická zatížení menší než u prvního případu, ovšem tento režim je důležitý především z hlediska únavové pevnosti a životnosti [2].

3.1.2.1 Kvazistatické zatížení

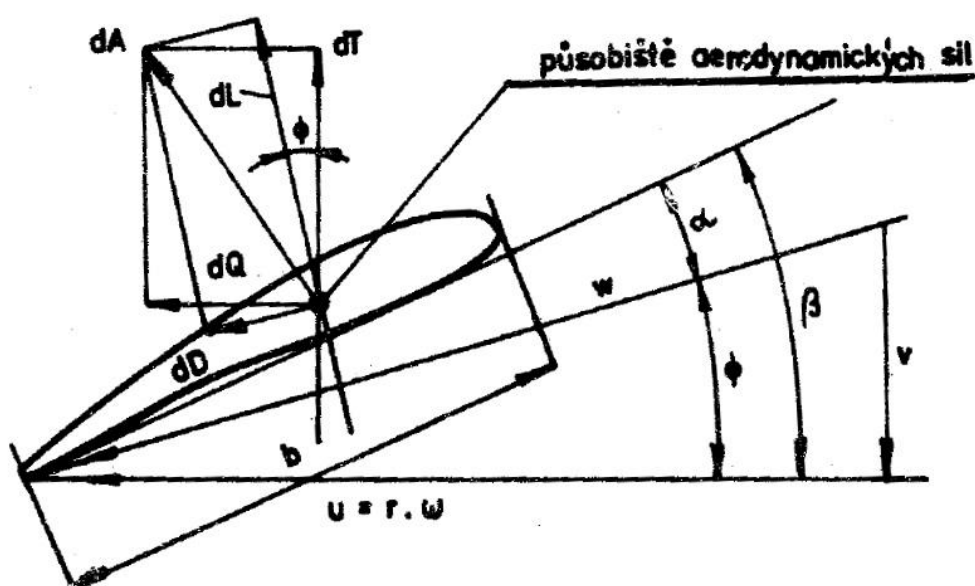
Toto zatížení je výslednicí aerodynamických sil, které vznikají v důsledku rotačního pohybu vrtule a axiální rychlosti nabíhajícího vzduchu. Výslednicí těchto sil je tah vrtule a kroutící moment na hřídeli. Jednotlivé složky jsou vztlaková síla, odporová síla a moment, které můžeme vyjádřit v elementárním tvaru

$$dL = \frac{1}{2} \cdot c_L \cdot \rho \cdot W^2 \cdot b \cdot dr, \quad (3.8)$$

$$dD = \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot \rho \cdot W^2 \cdot b \cdot dr, \quad (3.9)$$

$$dM = \frac{1}{2} \cdot c_M \cdot \rho \cdot W^2 \cdot b^2 \cdot dr, \quad (3.10)$$

kde W je relativní rychlost, což je vektorový součet obvodové rychlosti a axiální rychlosti nabíhajícího proudu [2].



Obrázek 21 - Schéma k výpočtu kvazistatického zatížení [2]

Elementární síla dT v rovině tahu je dána následovně

$$dT = dL \cdot \cos \Phi - dD \cdot \sin \Phi = t \cdot dr, \quad (3.11)$$

kde t je měrné délkové zatížení určující tah listu. Poté je možné vypočítat posouvající sílu v rovině tahu

$$(T)_r = \int_{r_0}^R dT = \int_{r_0}^R t \cdot dr. \quad (3.12)$$

Elementární síla v rovině vrtule je

$$dQ = dD \cdot \cos \Phi + dL \cdot \sin \Phi = q \cdot dr, \quad (3.13)$$

kde q představuje měrné délkové zatížení určující kroutící moment k ose vrtule. Posouvající síla v rovině vrtule pak bude dána integrací

$$(Q)_r = \int_{r_0}^R dQ = \int_{r_0}^R q \cdot dr. \quad (3.14)$$

Elementární síla v rovině tahu bude mít za následek ohybový moment

$$M_{Tr} = \int_r^R \int_r^R t \cdot dr \cdot dr = \int_r^R T \cdot dr. \quad (3.15)$$

Elementární síla v rovině vrtule bude mít za následek ohybový moment

$$M_{Qr} = \int_r^R \int_r^R q \cdot dr \cdot dr = \int_r^R Q \cdot dr. \quad (3.16)$$

Kroutící moment na hřídeli vrtule

$$M_{KQ} = Z \cdot \int_{r_0}^R \int_{r_0}^R q \cdot dr \cdot dr. \quad (3.17)$$

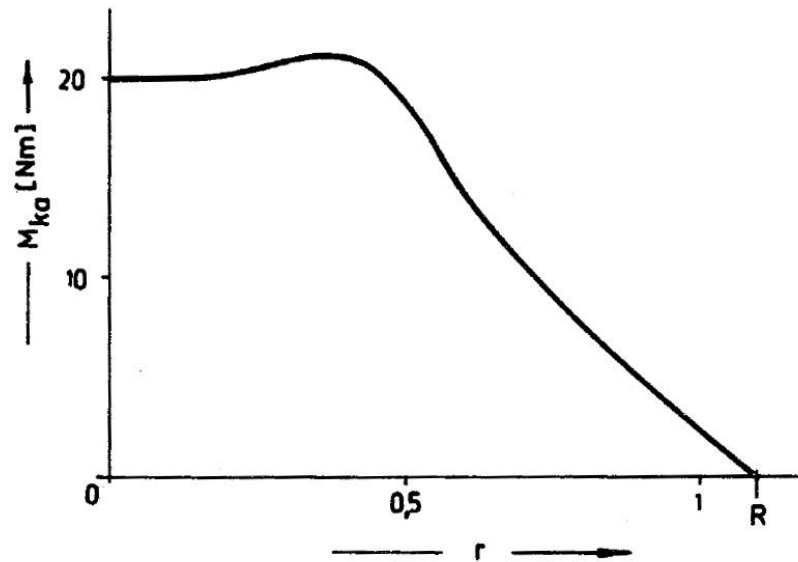
Celkový ohybový moment listu bude menší díky vratnému ohybovému režimu, který byl zmíněn v předchozí podkapitole [2].

3.1.2.2 Kroutící moment

Kroutící moment od aerodynamických sil $M_{K\alpha}$ natáčí list kolem osy natáčení na větší úhel stoupání při kladných úhlech stoupání. Pokud je úhel náběhu záporný, změní se smysl vztlačové síly a kroutící moment natáčí list na menší úhel stoupání [2].

$$M_{K\alpha} = \frac{\rho}{2} \cdot \int_r^R c_M \cdot b^2 \cdot W^2 \cdot dr \quad (3.18)$$

Je-li moment uvažován k ose natáčení, součinitel momentu c_M je vztažen k této ose. Při stanovení momentu z hlediska namáhání je součinitel c_M vztažen k torzní elastické ose. Hodnota kroučícího momentu je důležitá pro dimenzování stavěcího mechanismu. Příklad průběhu kroučícího momentu je uveden na obr.22.



Obrázek 22 - Průběh kroučícího momentu od aerodynamických sil [2]

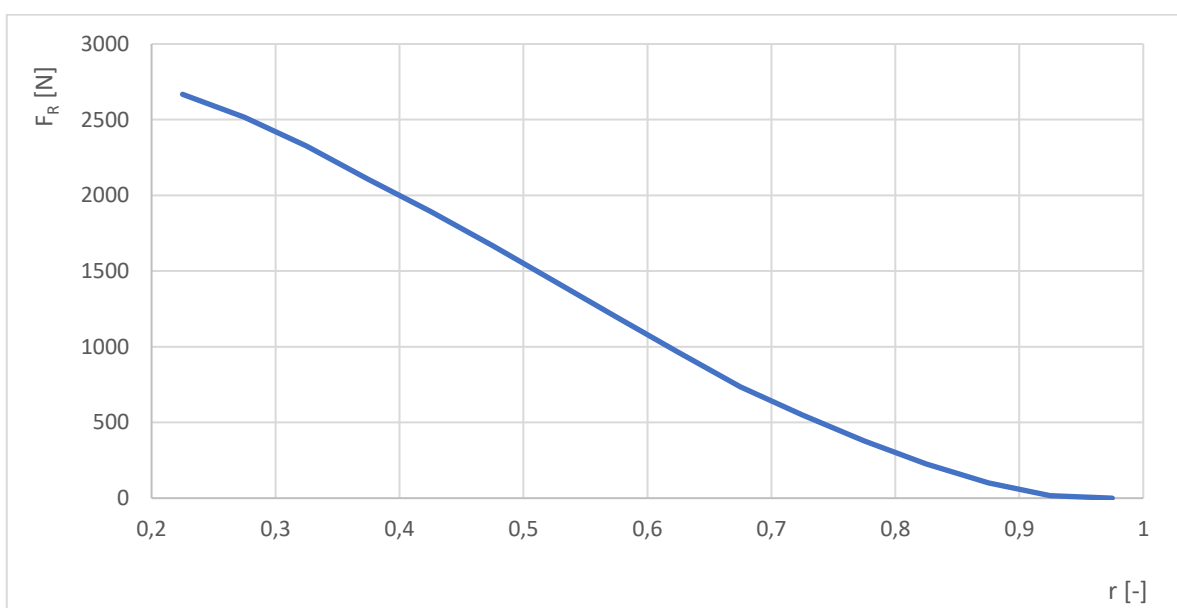
4 Výpočet zatížení vrtulového listu

V této kapitole budou aplikovány poznatky z kapitoly 3 a bude vypočítáno zatížení vrtulového listu. Geometrické a aerodynamické podklady potřebné pro výpočet zatížení byly použity z [1]. Zatížení, která budeme uvažovat, jsou:

- a) Zatížení od odstředivých sil:
 - 1) Tahová síla
 - 2) Kroutící moment
 - 3) Rozkrucování listu
- b) Zatížení od aerodynamických sil
 - 1) Ohybový moment
 - 2) Kroutící moment

4.1 Výpočet tahové síly od odstředivých sil

Pro výpočet tahové síly od odstředivých sil byl použit vztah (3.1). Hmotnosti jednotlivých elementů byly vypočteny pomocí známých geometrických charakteristik za použití kompozitních materiálů. Tahová síla je počítána pro konstrukční konfiguraci na obrázku 25 uvedeném v kapitole 5. Otáčky jsou dle předpisu zvoleny na 141 % jmenovitých otáček motoru. Graf 1 zobrazuje průběh tahové síly od odstředivých sil po poloměru listu. V tabulce č. 1 jsou uvedeny parametry, ze kterých výpočet vycházel.



Graf 1 - Průběhy odstředivé síly

Tabulka 1: Parametry pro výpočet odstředivé síly a výsledek

č. řezu	R	b profilu	S_r	b pásnic	t pásnic	Fr
	[m]	[m]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[N]
1	0.16	0.08	650.46	36.18	0.60	2780.99
2	0.19	0.09	705.33	37.97	0.60	2667.59
3	0.23	0.10	747.50	40.27	0.60	2515.78
4	0.26	0.10	791.37	41.28	0.60	2325.82
5	0.30	0.10	779.97	41.01	0.60	2106.09
6	0.33	0.10	738.49	39.88	0.40	1893.76
7	0.37	0.10	678.66	38.17	0.40	1667.69
8	0.40	0.09	608.90	36.05	0.40	1433.30
9	0.44	0.08	522.25	33.69	0.40	1196.71
10	0.47	0.08	447.20	31.13	0.40	962.72
11	0.51	0.07	373.37	28.38	0.40	734.60
12	0.54	0.06	301.68	25.42	0.20	549.91
13	0.58	0.06	232.50	22.19	0.20	378.65
14	0.61	0.05	155.06	18.57	0.20	226.31
15	0.65	0.04	91.35	14.25	0.20	101.41
16	0.68	0.02	29.92	8.16	0.20	15.72
17	0.70	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00

4.2 Výpočet kroutícího momentu od odstředivých sil

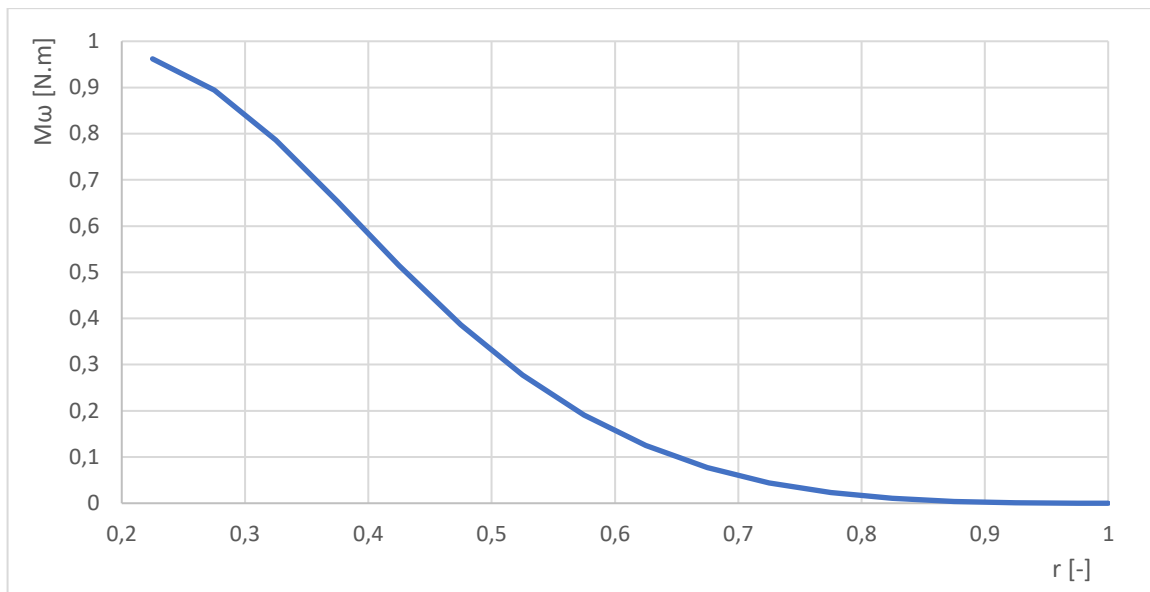
Pro výpočet kroutícího momentu od odstředivých sil byl použit vztah (3.6). K výpočtu hlavních momentů setrvačnosti řezu bylo za účelem zjednodušení využito následujících vztahů dle zdroje [18]

$$I_{max} = a_1 \cdot b^3 \cdot t, \quad I_{min} = a_2 \cdot b \cdot t^3, \quad (4.1)$$

kde a_1 a a_2 jsou součinitele, jejichž hodnota závisí na použitém profilu. Pro náš profil RAF-6 mají tyto součinitele hodnoty $a_1 = 0,0446$, $a_2 = 0,0464$.

Jelikož je list z kompozitních materiálů, hustota není v jednotlivých řezech konstantní. Vzhledem k malému vlivu kroutícího momentu od odstředivých sil byla použita průměrná hustota pro celý list.

Integrace ve vztahu (3.6) byla provedena numericky lichoběžníkovou metodou. Výsledný kroutící moment od odstředivých sil v závislosti na poloměru lze vidět na grafu 2. Parametry výpočtu jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.



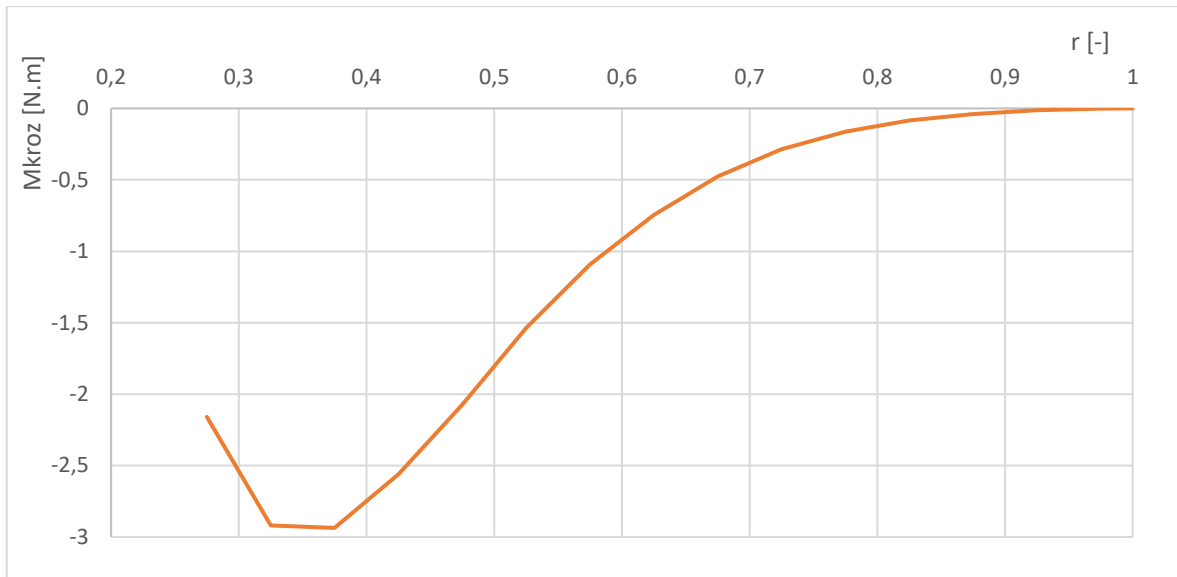
Graf 2 - Průběh kroutícího momentu od odstředivých sil

Tabulka 2 - Parametry výpočtu kroutícího momentu od odstředivých sil a výsledek

č. řezu	R	I_{\max}	I_{\min}	β	M_{ω}
	[m]	[m ⁴]	[m ⁴]	[°]	[N.m]
1	0.16	2E-07	2.23E-09	60.52	0.96
2	0.19	3.58E-07	4.09E-09	54.84	0.89
3	0.23	4.8E-07	5.56E-09	50.04	0.79
4	0.26	5.27E-07	6.02E-09	45.92	0.65
5	0.30	5.17E-07	5.99E-09	42.35	0.51
6	0.33	4.57E-07	5.2E-09	39.25	0.39
7	0.37	3.86E-07	4.42E-09	36.54	0.28
8	0.40	3.06E-07	3.47E-09	34.15	0.19
9	0.44	2.34E-07	2.66E-09	32.04	0.12
10	0.47	1.72E-07	1.99E-09	30.16	0.08
11	0.51	1.17E-07	1.33E-09	28.49	0.04
12	0.54	7.51E-08	8.46E-10	26.98	0.02
13	0.58	4.39E-08	5.01E-10	25.62	0.01
14	0.61	2.13E-08	2.38E-10	24.38	0.00
15	0.65	7.62E-09	9.05E-11	23.24	0.00
16	0.68	8.29E-10	1.01E-11	22.00	0.00
17	0.70	0	0		0.00

4.3 Výpočet rozkrucování listu od odstředivých sil

Rozkrucovací moment od odstředivých sil je vypočten pomocí vztahu (3.7). Moment, jehož průběh v závislosti na poloměru zachycuje graf 3, je vypočten pro konstrukční konfiguraci na obrázku 25. Parametry výpočtu jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.



Graf 3 - Průběh rozkručovacího momentu, pro jednotlivé konstrukční konfigurace

4.4 Výpočet ohybového momentu od aerodynamických sil

Dosazením vztahů (3.8) a (3.9) do vztahu (3.11) byl získán vztah pro výpočet elementární síly v rovině tahu

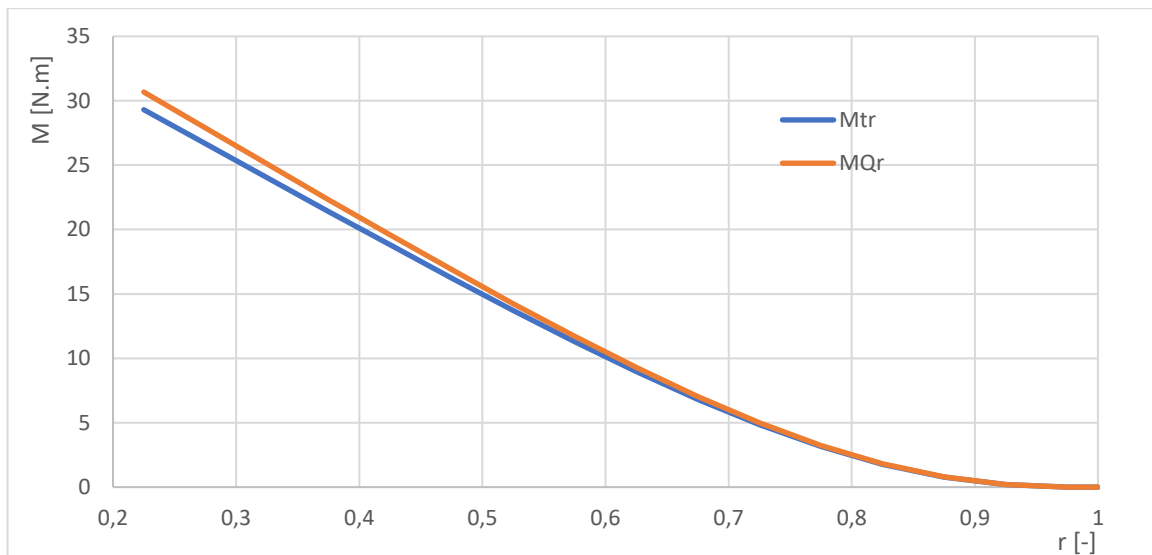
$$dT = \frac{1}{2} \cdot c_L \cdot \rho \cdot W^2 \cdot b \cdot dr \cdot \cos \Phi - \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot \rho \cdot W^2 \cdot b \cdot dr \cdot \sin \Phi \quad (4.2)$$

Numerickou integrací podle vztahu (3.12) byl vypočítán průběh posouvající síly v rovině tahu. Numerickou integrací podle vztahu (3.15) pak byl vypočítán ohybový moment v rovině tahu.

Výpočet elementární síly v rovině vrtule byl proveden dosazením vztahů (3.8) a (3.9) do vztahu (3.13)

$$dQ = \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot \rho \cdot W^2 \cdot b \cdot dr \cdot \cos \Phi + \frac{1}{2} \cdot c_L \cdot \rho \cdot W^2 \cdot b \cdot dr \cdot \sin \Phi \quad (4.3)$$

Numerickou integrací podle vztahu (3.14) byl vypočítán průběh posouvající síly v rovině vrtule. Numerickou integrací podle vztahu (3.16) pak byl vypočítán ohybový moment v rovině vrtule. Průběh složek ohybového momentu po poloměru zachycuje graf 4.

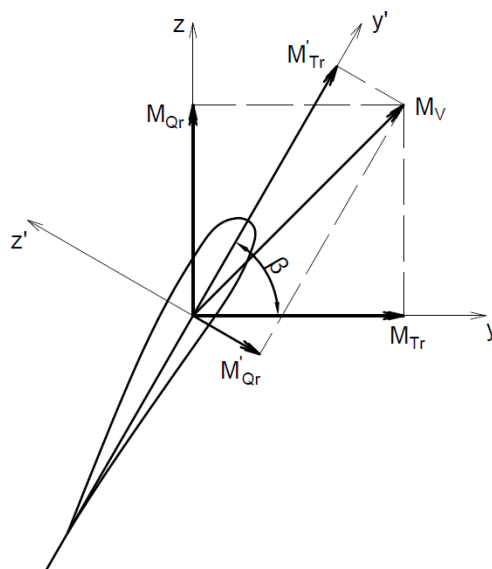


Graf 4 - Průběh složek ohybového momentu po poloměru

Složky ohybového momentu je poté třeba transformovat do směrů hlavních os průřezu profilu pro každý řez listem. To je provedeno pomocí transformační matice

$$\begin{bmatrix} M'_{Tr} \\ M'_{Qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{Tr} \\ M_{Qr} \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Na obrázku 23 lze vidět směr působení jednotlivých složek ohybového momentu a jejich transformace do hlavních os průřezu. V tabulce 3 jsou uvedeny parametry výpočtu a výsledky.



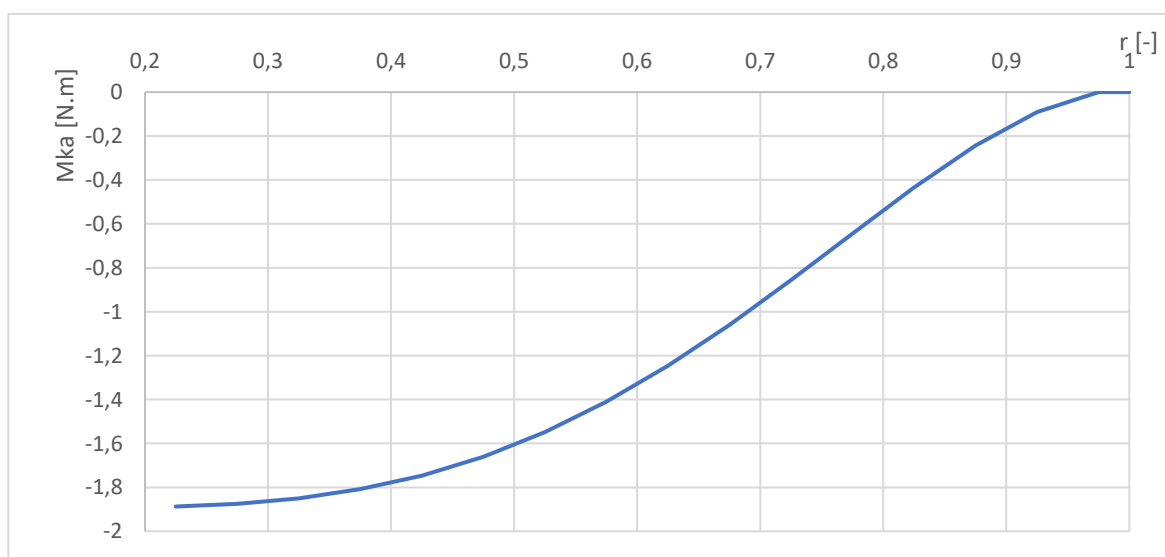
Obrázek 23 - Schéma transformace momentů

Tabulka 3 - Parametry výpočtu ohybového momentu od aerodynamických sil a výsledky

č. řezu	R	W	ϕ	c_L	c_D	M_{Tr}	M_{Qr}	M_{Tr}'	M_{Qr}'
	[m]	[m/s]	[°]	[-]	[-]	[N.m]	[N.m]	[N.m]	[N.m]
1	0.16	23.72	56.63	0.153	0.025	29.31	30.68	41.13	-10.41
2	0.19	30.77	51.04	0.163	0.024	26.67	27.89	38.15	-5.74
3	0.23	38.75	46.26	0.166	0.024	24.03	25.10	34.68	-2.30
4	0.26	47.72	42.19	0.172	0.023	21.41	22.33	30.94	0.16
5	0.30	57.73	38.71	0.182	0.023	18.81	19.59	27.10	1.81
6	0.33	68.83	35.72	0.195	0.022	16.24	16.89	23.27	2.81
7	0.37	81.03	33.14	0.210	0.021	13.73	14.26	19.52	3.28
8	0.40	94.36	30.90	0.227	0.020	11.30	11.71	15.92	3.35
9	0.44	108.84	28.94	0.245	0.019	8.97	9.29	12.53	3.11
10	0.47	124.46	27.21	0.263	0.017	6.81	7.03	9.42	2.66
11	0.51	141.25	25.69	0.282	0.016	4.85	5.00	6.65	2.08
12	0.54	159.20	24.33	0.300	0.015	3.15	3.25	4.28	1.46
13	0.58	178.32	23.11	0.318	0.014	1.78	1.83	2.39	0.88
14	0.61	198.61	22.02	0.336	0.013	0.78	0.80	1.04	0.41
15	0.65	220.08	21.03	0.356	0.012	0.19	0.19	0.25	0.10
16	0.68	242.72	20.13	0.396	0.011	0.00	0.00	0.00	0.00

4.5 Výpočet kroutícího momentu od aerodynamických sil

Pro výpočet kroutícího momentu od aerodynamických sil byl použit vztah (3.18). Součinitel momentu c_M je vztahený k aerodynamickému středu profilu, a použita byla hodnota c_{M_0} , která nezávisí na součiniteli vztlaku. Hodnota $c_{M_0} = -0,098$ byla získána pomocí programu X-Foil. Integrace vztahu (3.18) byla provedena numerickou lichoběžníkovou metodou. Níže jsou uvedeny výsledky výpočtu. Na grafu 5 je zachycen průběh kroutícího momentu od aerodynamických sil po poloměru. Parametry výpočtu jsou uvedeny v tabulkách č. 1 a 3.

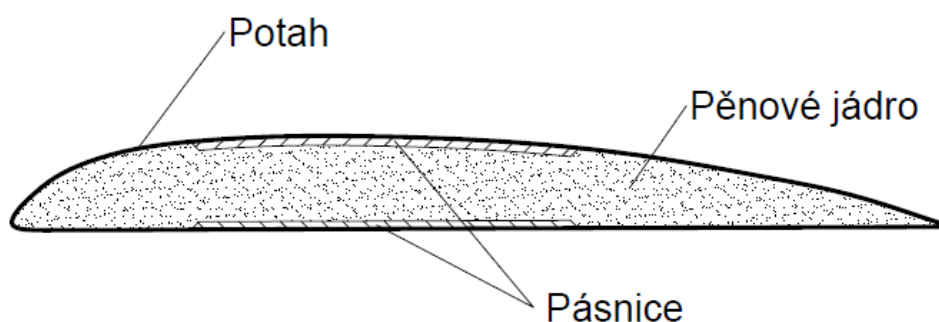


Graf 5 - Průběh kroutícího momentu od aerodynamických sil po poloměru

5 Návrh konstrukce a volba materiálu vrtulového listu

5.1 Návrh konstrukce vrtulového listu

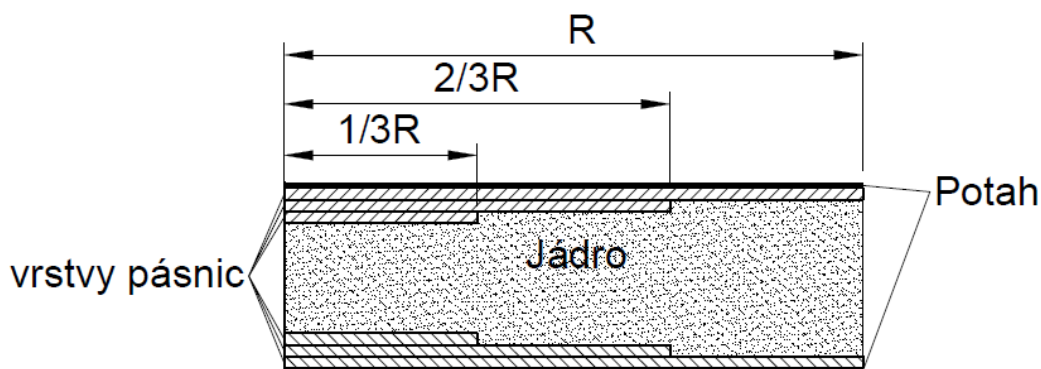
Na základě kapitoly 1 byla zvolena celokompozitní konstrukce vrtulového listu. List se bude skládat z pěnového jádra, kompozitních pásnic a potahu. Schéma zvolené konstrukce lze vidět na obrázku číslo 24. Hlavní výhodou této konstrukce je úspora hmotnosti, což znamená snížení namáhání listu od odstředivých sil.



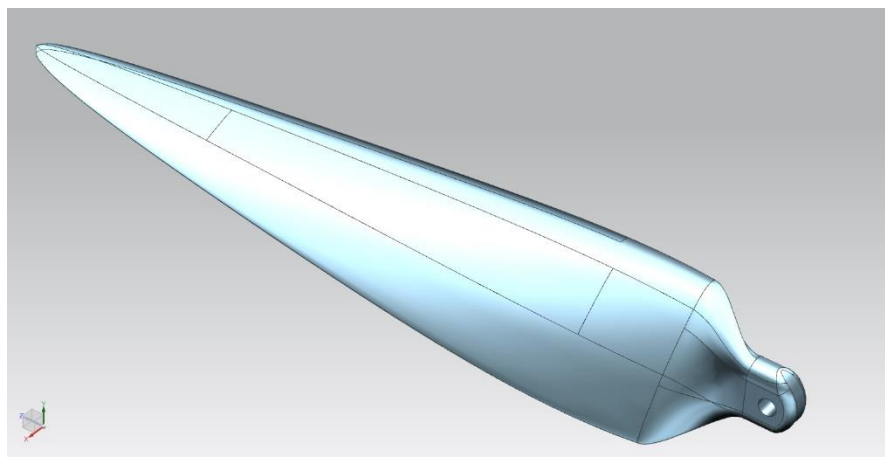
Obrázek 24 - Schéma zvolené konstrukce v řezu

Konstrukce je navržena tak, aby pásnice přenášely hlavní zatížení od odstředivých sil a aerodynamický ohybový moment. Potah a pěnové jádro poté bude přenášet kroutící momenty.

Pásnice se skládají z jednotlivých lamin, které jsou po délce listu odstupňovány podle průběhu zatížení. Pro prvotní výpočet zatížení byly použity konfigurace pásnic se 3 laminami. Na základě pevnostního výpočtu poté bude stanovena finální konfigurace laminátu, včetně orientací vláken. Na obrázku 25 je vidět schéma výpočetního modelu.



Obrázek 25 - Schéma výpočetního modelu



Obrázek 26 - 3D model listu s naznačeným rozvržením pásnic

Uchycení listu do náboje bude řešeno čepem, stěna otvoru pro čep bude složena ze dvou vrstev skelné tkaniny a vyztužena bude titanovou vložkou pro roznesení sil po celé ploše otvoru. List je nastaven vůči ose čepu závěsu vrtule na úhel nastavení 22.5°. Tento úhel odpovídá optimálnímu úhlu nastavení. Vrtulový list tak může být použit pro stavitelný i nestavitelný náboj vrtule. Za předpokladu použití stavitelného náboje s rozsahem stavění 15°, jsou možné polohy listu v rozsahu 15° až 30°

5.2 Volba materiálu

5.2.1 Materiál pásnic

Jelikož pásnice přenáší většinu zatížení normálového charakteru, materiál musí mít vysoký podélný modul pružnosti v tahu. Zároveň však musí mít co nejnižší hustotu pro zachování nízké hmotnosti konstrukce. V tabulce 3 se nachází porovnání vlastností zvažovaných materiálů.

Tabulka 4 - Porovnání vlastností materiálů [12]

Vláknó	E_{\parallel} [kN · mm ⁻²]	E_{\perp} [kN · mm ⁻²]	G_{\perp} [kN · mm ⁻²]	ν_{\perp}	E_{\parallel}/E_{\perp}	ρ [kg · m ⁻³]
E-sklo	73	73	30	0,25	1	2600
Aramidové vysokomodulové vlákno (HM)	133	5,4	12	0,38	24,6	1450
Uhlíkové vlákno standartní typ (HT)	240	15	10	0,28	16	1750
Uhlíkové vysokomodulové vlákno (HM)	500	5,7	8	0,36	88	1800

Z tabulky vyplývá, že pro naši aplikaci budou nejvhodnější uhlíková vlákna, jelikož mají vysoký podélný modul pružnosti v tahu a hustotu mají relativně nízkou. Uhlíková vlákna se vyrábějí s různými vlastnostmi, HS – vysokopevnostní vlákna, HM – vysokomodulová vlákna, UHM – ultravysokomodulová a další. Z ekonomického hlediska roste cena uhlíkových vláken s rostoucími mechanickými vlastnostmi. S ohledem na cenovou dostupnost a mechanické vlastnosti byla zvolena uhlíková vlákna standardního typu.

5.2.2 Materiál potahu

Jelikož potah nebude přenášet tak výrazná zatížení, lze použít skelná vlákna, která jsou oproti uhlíkovým výrazně levnější. Z hlediska technologie jsou skelná vlákna výhodnější, neboť mají vyšší permeabilitu. To v případě použití infuzní technologie znamená lepší prostupnost matrice materiálem.

5.2.3 Materiál jádra

V dnešní době se na sendvičové konstrukce nejčastěji používají jádra voštinová nebo jádra pěnová. Pro tuto aplikaci bude vhodnější jádro pěnové. Pěnové jádro zvyšuje celkovou tuhost konstrukce a má dobré tlumící vlastnosti. Mechanické vlastnosti pěny se zlepšují se zvyšující se hustotou pěny. Z hlediska technologického je pěnové jádro také výhodnější. Pěnová jádra jsou dostupná z mnoha materiálů, PVC, PMI (Polymetakrylimid), PS (Polystyren), PP (polypropylen), PUR (polyuretan) a další. Jelikož jádro bude vyrobeno technologií lití do uzavřené formy, bude využito polyuretanového dvousložkového vypěňovacího systému.

5.2.4 Matrice

Volba matrice je závislá na použité technologii výroby. Pro výrobu bude použita infuzní technologie, tudíž základní požadavek pro matrici je nízká viskozita, která umožní dobré prosycení výztuže. V dnešní době jsou pro tuto technologii nejpoužívanější matrice vinyl esterové, polyesterové a epoxidové se sníženou viskozitou. Výrobci nabízejí matrice přímo určené pro infuzní technologie. Zvolena byla epoxidová matrice se sníženou viskozitou, díky svým dobrým mechanickým vlastnostem, dobré odolnosti vůči nárazu a dostupnosti [12].

6 Pevnostní výpočet

Pro pevnostní výpočet byl použit program LamiEx V3 [18]. Tento program počítá materiálové charakteristiky kompozitu pomocí směšovacího pravidla, k výpočtu zatížení je zde použita klasická laminační teorie a pro pevnostní výpočet používá modifikované Tsai-Hillovo pevnostní kritérium a Puckovo pevnostní kritérium.

6.1 Popis výpočetní metody

6.1.1 Směšovací pravidlo

Směšovacím pravidlem jsou počítány 4 elastické konstanty E_L , E_T , ν_{LT} , G_{LT} , které jsou nutné pro popis vztahu mezi napětím a deformací. Elastické konstanty kompozitu jsou vyjádřeny pomocí známých materiálových charakteristik:

M, M_f, M_m – hmotnost kompozitu, vlákna, matrice

ρ, ρ_f, ρ_m – hustota kompozitu, vlákna, matrice

V, V_f, V_m – objemový podíl kompozitu, vlákna, matrice

Modul pružnosti v podélném směru (ve směru vláken) E_L :

$$E_L = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} = V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m = V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m. \quad (6.1)$$

Modul pružnosti v příčném směru E_T :

$$E_T = \frac{\sigma_T}{\varepsilon_T} = \frac{E_f \cdot E_m}{V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m} = \frac{E_m}{V_m + V_f \cdot \frac{E_m}{E_f}} = \frac{E_m}{1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}. \quad (6.2)$$

Poissonovo číslo:

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = V_f \cdot \nu_f + V_m \cdot \nu_m = V_f \cdot \nu_f + (1 - V_f) \cdot \nu_m. \quad (6.3)$$

Modul pružnosti ve smyku:

$$G_{LT} = \frac{G_f \cdot G_m}{V_m \cdot G_f + V_f \cdot G_m} = \frac{G_m}{V_m + V_f \cdot \frac{G_m}{G_f}} = \frac{G_m}{1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_f}\right)}. \quad (6.4)$$

Konstanty získané tímto výpočtem jsou tzv. efektivní konstanty, udávající vlastnosti laminy v podélném a příčném směru [20].

6.1.2 Klasická laminátová teorie

Pomocí klasické laminátové teorie se určují napětí $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$ a přetvoření $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}$ v jednotlivých vrstvách kompozitu. Výsledkem klasické laminátové teorie je soustava rovnic vyjadřující závislost sil a momentů na deformacích ve střední rovině [12,19].

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Vztah (6.5) můžeme zjednodušeně zapsat jako:

$$\begin{bmatrix} N \\ \dots \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & B \\ \dots & \vdots & \dots \\ B & \vdots & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_m^\circ \\ \dots \\ k \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Matice tahové tuhosti A váže složky sil a deformace ve střední rovině. Matice ohybové tuhosti D vyjadřuje závislost mezi složkami momentů a křivostí plochy. Matice vazební tuhosti B vyjadřuje závislost momentů na deformacích ve střední rovině a závislost vnitřních sil na křivosti plochy. N_x, N_y, N_{xy} jsou výslednice sil, které mají rozměr $[N \cdot mm^{-1}]$, síla na jednotku délky pásu a M_x, M_y, M_{xy} jsou výslednice momentů, které mají rozměr $[N \cdot mm \cdot mm^{-1}]$, tj. moment na jednotku délky pásu. Zavedené síly a momenty působí na příčný průřez k -té vrstvy tloušťky $h_k - h_{k-1}$. Pro výslednice sil a momentů v jednotlivých směrech platí vztahy (6.7) a (6.8) [19].

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \cdot dz \quad (6.7)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \cdot z \cdot dz \quad (6.8)$$

6.1.3 Pevnostní kritéria

Podmínky pevnosti pro kompozitní materiály vycházejí z podmínek pevnosti pro homogenní izotropní materiál. Tyto podmínky byly rozšířeny a upraveny tak, aby mohly být použity na materiál kompozitní. Většina podmínek počítá s homogenním materiálem, který

není rozlišen na vlákno a matrici, a také s tím, že je napětí lineární až do okamžiku porušení. Všechny pevnostní teorie jsou vyjádřeny pomocí základních pevnostních parametrů, určených v jednotlivých materiálových směrech [20].

F_{Lt} – podélná tahová pevnost, F_{Lc} – podélná tlaková pevnost

F_{Tt} – příčná tahová pevnost, F_{Tc} – příčná tlaková pevnost

F_{LT} – smyková pevnost

6.1.3.1 Tsai-Hillovo pevnostní kritérium

Toto pevnostní kritérium vychází z Hillova pevnostního kritéria, které dále vychází z Von Misesovy podmínky pro izotropní materiál. Hill tuto podmínku rozšířil pro ortotropní materiály a Tsai ji poté zjednodušil pro případ jednosměrných kompozitů. Tato podmínka má tvar:

$$\left(\frac{\sigma_L}{F_L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{F_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{LT}}{F_{LT}}\right)^2 - \frac{\sigma_L \cdot \sigma_T}{F_L^2} = 1 \quad (6.9)$$

Vztah vyjadřuje uzavřenou plochu v souřadnicovém systému L, T, LT [20].

6.1.3.2 Puckovo pevnostní kritérium

Toto kritérium aplikuje současně dvě nezávislá kritéria.

- a. Kritérium pro porušení vláken
- b. Kritérium pro porušení mezi vlákny

Puck toto vysvětluje tím, že porušení vláken je odlišného charakteru než porušení mezi vlákny. Ani jedno kritérium není možno vynechat a zároveň nelze tyto dvě kritéria spojit jako to dělá Tsai-Hill [19].

6.2 Výpočet

Jako výpočetní model byl použit model popsany v kapitole 5, který zachycuje obrázek 25. Pro zjednodušení výpočtu byla uvažována část listu, která přenáší největší zatížení, tj. potah nad pásnicemi, pásnice a pěnové jádro mezi pásnicemi. Zatížení, pro něž byl výpočet prováděn, jsou uvedena v kapitole 4. Výpočet byl proveden pro 16 řezů po poloměru vrtulového listu. Zde budou uvedeny výsledky pouze kritických řezů, a to v kořeni vrtule a na rozhraní jednotlivých vrstev pásnic.

Materiály uvažované při výpočtu a jejich charakteristiky uvádí tabulka 4. Zatížení v uvažovaných kritických řezech uvádí tabulka 5.

Tabulka 5 - Charakteristiky použitých materiálů [18]

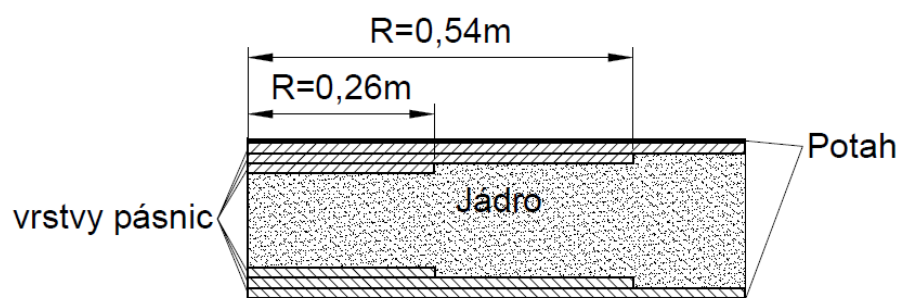
Materiál	Hustota	Podélný modul pružnosti v tahu	Příčný modul pružnosti v tahu	Modul pružnosti ve smyku
	ρ	E_L	E_T	G
	[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
Uhlíková vlákna t600	1750	230000	15000	50000
Skelná vlákna	2600	74000	74000	30000
Polyuretanová pěna	50	40	40	20
Epoxidová pryskyřice	1200	4500	4500	1600

Tabulka 6 - Zatížení v kritických řezech listem

Zatížení		R=0.1575 m	R=0.2625 m	R=0.5425 m
Osový tah/tlak	N_x [N/mm]	76.87	56.35	21.64
Osový tah/tlak	N_y [N/mm]	0.00	0.00	0.00
Smyk	N_{xy} [N/mm]	0.00	0.00	0.00
Ohybový moment	M_x [Nmm/mm]	1136.76	749.57	168.50
Ohybový moment	M_y [Nmm/mm]	-287.84	3.82	57.50
Ohybový moment	M_{xy} [Nmm/mm]	-85.27	-99.13	-30.83

Výsledky pevnostních kritérií, společně se skladbou, orientací a tloušťkou jednotlivých vrstev pro kritické řezy, jsou uvedeny v následujících tabulkách. Ve výpočtu byla uvažována rezerva bezpečnosti pro případné nepřesnosti ve výpočtu zatížení a zjednodušení geometrie.

Podle pevnostního výpočtu byla optimalizována skladba laminátu. Výsledné rozložení pásnic po optimalizaci je zobrazeno na obrázku 27.



Obrázek 27 - Rozložení jednotlivých lamin pásnic po délce listu po pevnostním výpočtu

Tabulka 7 - Složení kompozitu a výsledky pevnostních kritérií v kořeni vrtulového listu
řazení vrstev: od vrstvy číslo 1 shora po vrstvu číslo 7

Vlákna nebo jiné materiály	Matric e	V _f	t	θ	Modifikované Tsai-Hillovo kritérium		Puckovo kritérium			
					Horní vrstva	Spodní vrstva	Horní vrstva porušení vláken	Horní vrstva porušení matrice	Spodní vrstva porušení vláken	Spodní vrstva porušení matrice
		%	mm	°	-	-	-	-	-	-
sklo	epoxid	40	0.100	45	0.529	0.516	0.115	0.546	0.113	0.533
sklo	epoxid	40	0.100	-45	0.790	0.771	0.029	0.812	0.029	0.792
t600	epoxid	40	0.600	0	0.928	0.782	0.383	0.868	0.310	0.736
polyuretan		-	6.800	-	0.005	0.002	0.000	0.005	0.000	0.002
t600	epoxid	40	0.600	0	0.351	0.406	0.249	0.240	0.283	0.282
sklo	epoxid	40	0.100	-45	0.489	0.500	0.037	0.369	0.038	0.377
sklo	epoxid	40	0.100	45	0.507	0.519	0.213	0.537	0.218	0.547

Tabulka 8 - Složení kompozitu a výsledky pevnostních kritérií v R=0,26m vrtulového listu
řazení vrstev: od vrstvy číslo 1 shora po vrstvu číslo 7

Vlákna nebo jiné materiály	Matrice	V _f	t	θ	Modifikované Tsai-Hillovo kritérium		Puckovo kritérium			
					Horní vrstva	Spodní vrstva	Horní vrstva porušení vláken	Horní vrstva porušení matrice	Spodní vrstva porušení vláken	Spodní vrstva porušení matrice
		%	mm	°	-	-	-	-	-	-
sklo	epoxid	40	0.100	45	0.123	0.120	0.034	0.100	0.033	0.098
sklo	epoxid	40	0.100	-45	0.174	0.171	0.115	0.141	0.113	0.138
t600	epoxid	40	0.400	0	0.252	0.224	0.210	0.145	0.184	0.133
polyuretan		-	9.200	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.003
t600	epoxid	40	0.400	0	0.240	0.257	0.202	0.230	0.215	0.256
sklo	epoxid	40	0.100	-45	0.173	0.176	0.066	0.445	0.067	0.439
sklo	epoxid	40	0.100	45	0.392	0.398	0.053	0.398	0.055	0.405

Tabulka 9 - Složení kompozitu a výsledky pevnostních kritérií v R=0,54m vrtulového listu
řazení vrstev: od vrstvy číslo 1 shora po vrstvu číslo 7

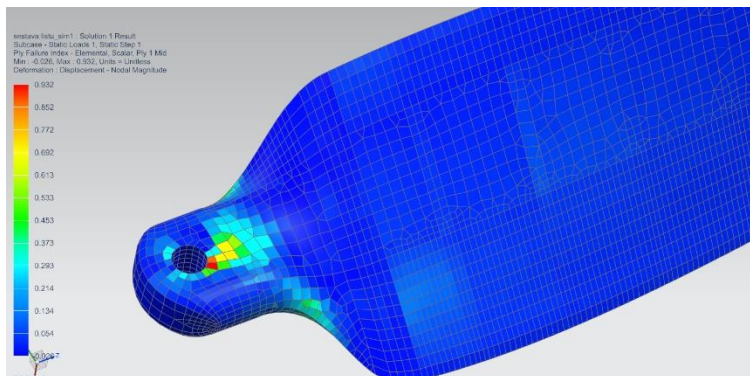
Vlákna nebo Jiné materiály	Matrice	V _f	t	θ	Modifikované Tsai-Hillovo kritérium		Puckovo kritérium			
					Horní vrstva	Spodní vrstva	Horní vrstva porušení vláken	Horní vrstva porušení matrice	Spodní vrstva porušení vláken	Spodní vrstva porušení matrice
		%	mm	°	-	-	-	-	-	-
sklo	epoxid	40	0.100	45	0.139	0.135	0.017	0.133	0.017	0.129
sklo	epoxid	40	0.100	-45	0.146	0.141	0.131	0.060	0.127	0.058
t600	epoxid	40	0.200	0	0.155	0.142	0.100	0.105	0.089	0.098
polyuretan		-	5.800	-	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.002
t600	epoxid	40	0.200	0	0.290	0.310	0.129	0.266	0.135	0.285
sklo	epoxid	40	0.100	-45	0.223	0.229	0.072	0.213	0.075	0.219
sklo	epoxid	40	0.100	45	0.456	0.469	0.020	0.456	0.020	0.469

6.3 Ověření pevnostního výpočtu

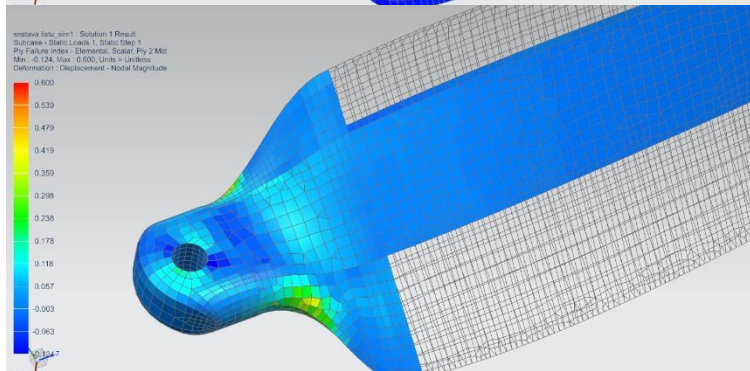
Pro ověření výsledků předchozího výpočtu byla provedena pevnostní analýza metodou konečných prvků. Pevnostní analýza měla také za úkol kontrolu kořenové části vrtulového listu, jelikož tato část nebyla zohledněna v předchozím výpočtu. Simulace byla provedena v programu NX 12, který k řešení využívá řešič NX Nastran. Geometrie vrtulového listu pro výpočet byla převzata z 3D modelu viz obrázek 26. Model byl rozdělen na potah s pásnicemi a jádro. Jádro bylo modelováno jako 3D a vysítováno pomocí 3D sítě s elementem o velikosti 8 mm. Pásnice s potahem byly modelovány jako 2D laminát a vysítovány pomocí 2D sítě s velikostí elementu 4 mm. Byla provedena kontrola sítě. Jednotlivým prvkům poté byly přiřazeny materiálové vlastnosti podle tabulky 5. Dalším krokem bylo zavedení okrajových podmínek a zatížení listu. Zatížení bylo zavedeno pomocí simulace rotace 3243 otáček za minutu, což odpovídá 141 % jmenovitých otáček. Ohybový moment od aerodynamických sil byl poté simulován pomocí vypočítaného náhradního zatížení.

Byla ověřena konstrukce navržená pomocí předchozího pevnostního výpočtu. Při kontrole dle pevnostního kritéria Tsai Wu nebyla na konstrukci nalezeny žádná selhání. Tím byla ověřena dobrá shoda mezi výsledky analytického výpočtu a numerické simulace. Při kontrole kořenové části však bylo zjištěno selhání. Složení laminátu v kořenové části tedy bylo upraveno. Do složení pásnic byla přidána jedna vrstva uhlíkové jednosměrné tkaniny a potah se v kořenové části bude skládat ze 2 vrstev sklené tkaniny. Otvor pro čep bude složen ze 3 vrstev skelné tkaniny a titanové vložky.

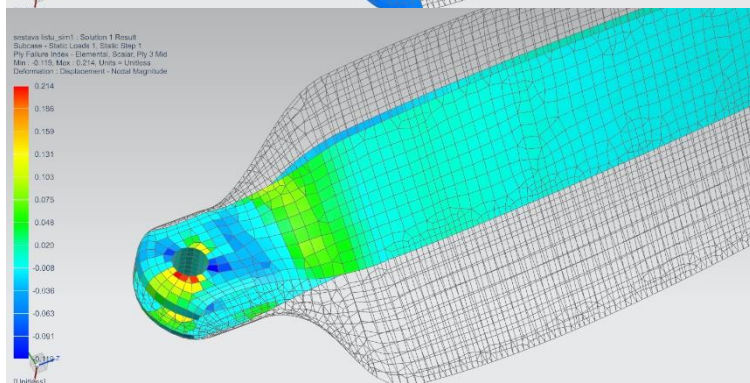
Kořenová část byla shledána kritickým místem v konstrukci vrtulového listu. Výsledky pevnostního kritéria Tsai Wu po optimalizaci skladby kompozitu v kořenové části jsou vidět na následující stránce. Obrázky jsou seřazeny od první po poslední vrstvu kompozitu, což také znázorňuje složení jednotlivých vrstev v kořenové části. Na další straně jsou poté výsledky celkového posunutí a natočení elementů. U každého obrázku je na levé straně stupnice s hodnotami.



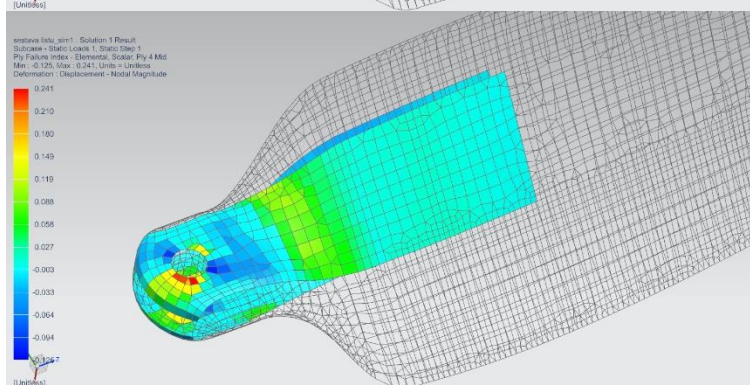
Obrázek 28 - Tsai Wu kritérium pro první vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu



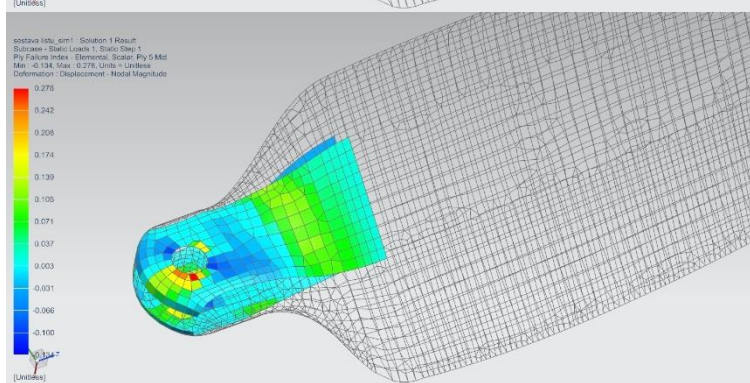
Obrázek 29 - Tsai Wu kritérium pro druhou vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu



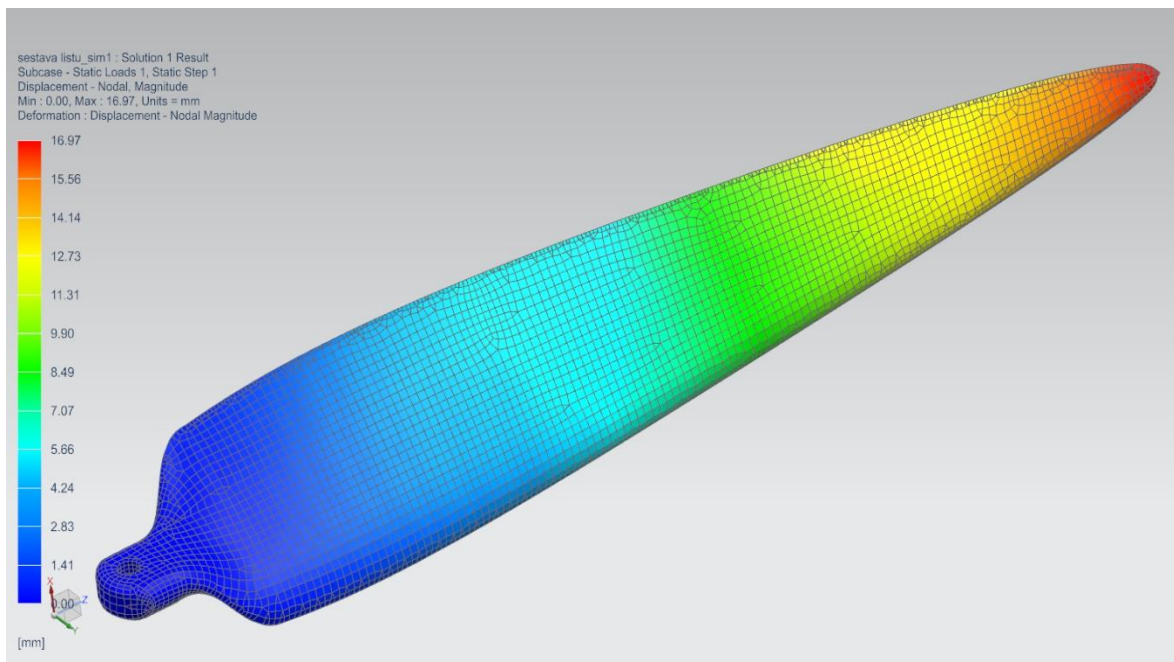
Obrázek 30 - Tsai Wu kritérium pro třetí vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu



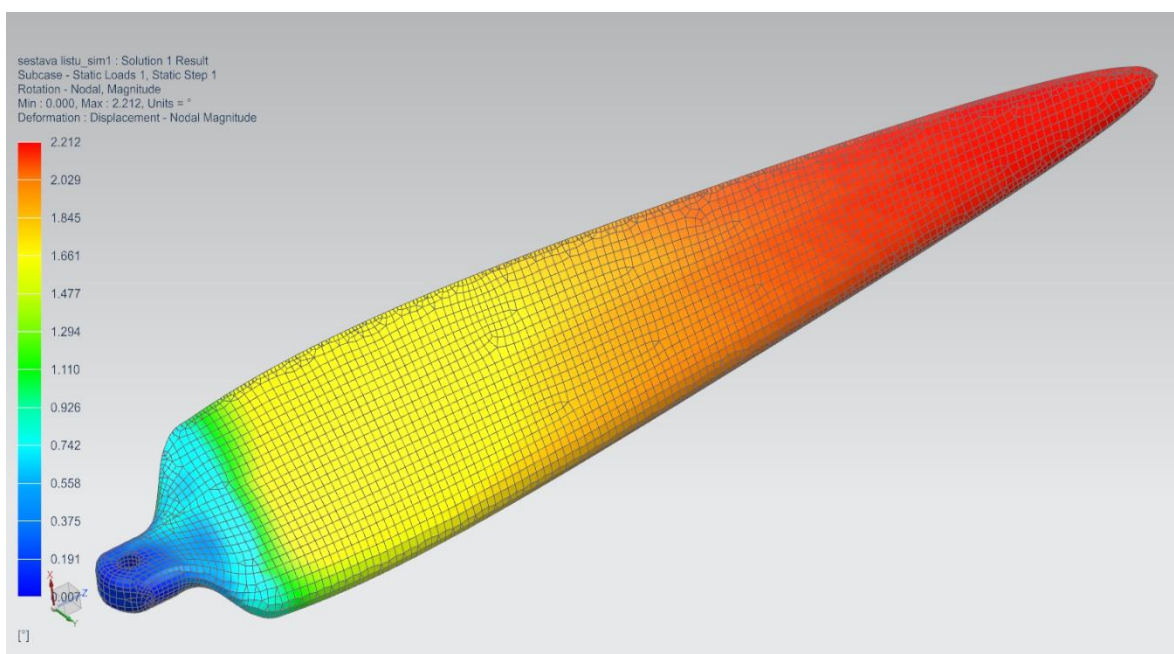
Obrázek 31 - Tsai Wu kritérium pro čtvrtou vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu



Obrázek 32 - Tsai Wu kritérium pro pátou vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu



Obrázek 33 - Posunutí elementů



Obrázek 34 - Rotace elementů

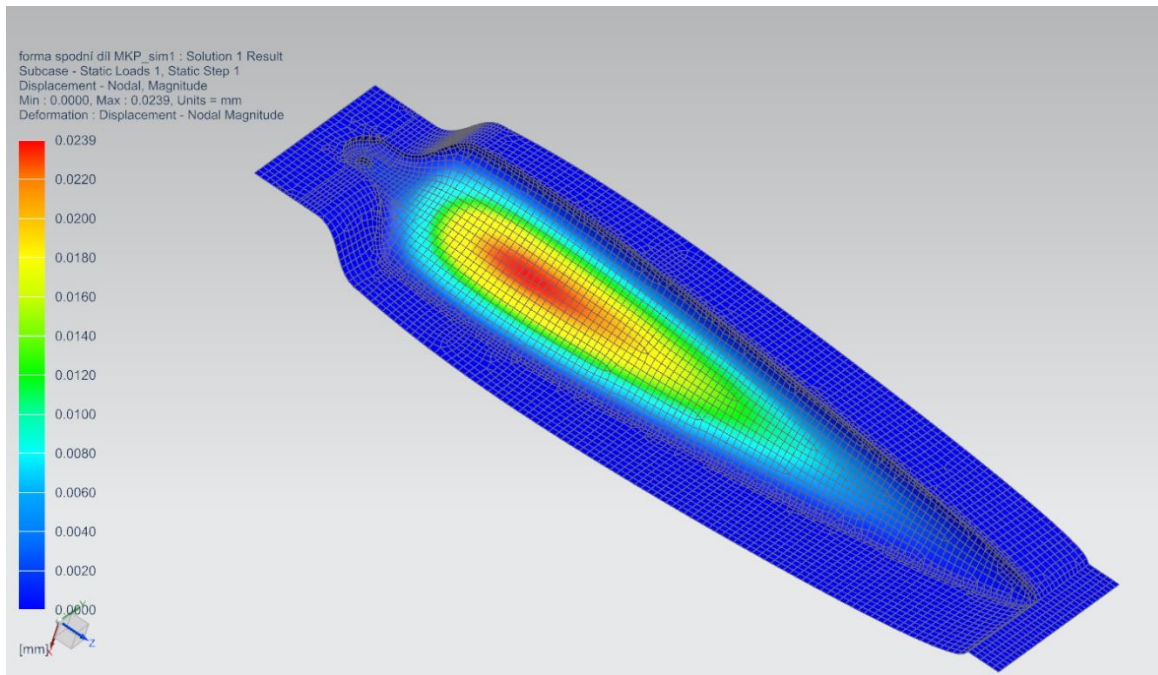
7 Návrh technologie výroby vrtulového listu

Na výrobu vrtulového listu byla zvolena technologie Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM), která vychází z technologie Resin Transfer Molding (RTM). Tato technologie spočívá ve vytvoření podtlaku v dutině formy. Podtlak poté zajistí nasátím pojiva prosycení výztuže umístěné ve formě. Tato technologie byla zvolena z důvodu nižších výrobních nákladů, než je tomu u technologie RTM. U technologie VARTM dosahujeme nižších tlaků než u RTM, což umožňuje konstruovat formy s menší tloušťkou stěny, a také tato technologie není tak náročná na vybavení jako RTM. Nevýhodou této technologie je dosažení menšího objemového podílu vláken v kompozitním materiálu než u RTM.

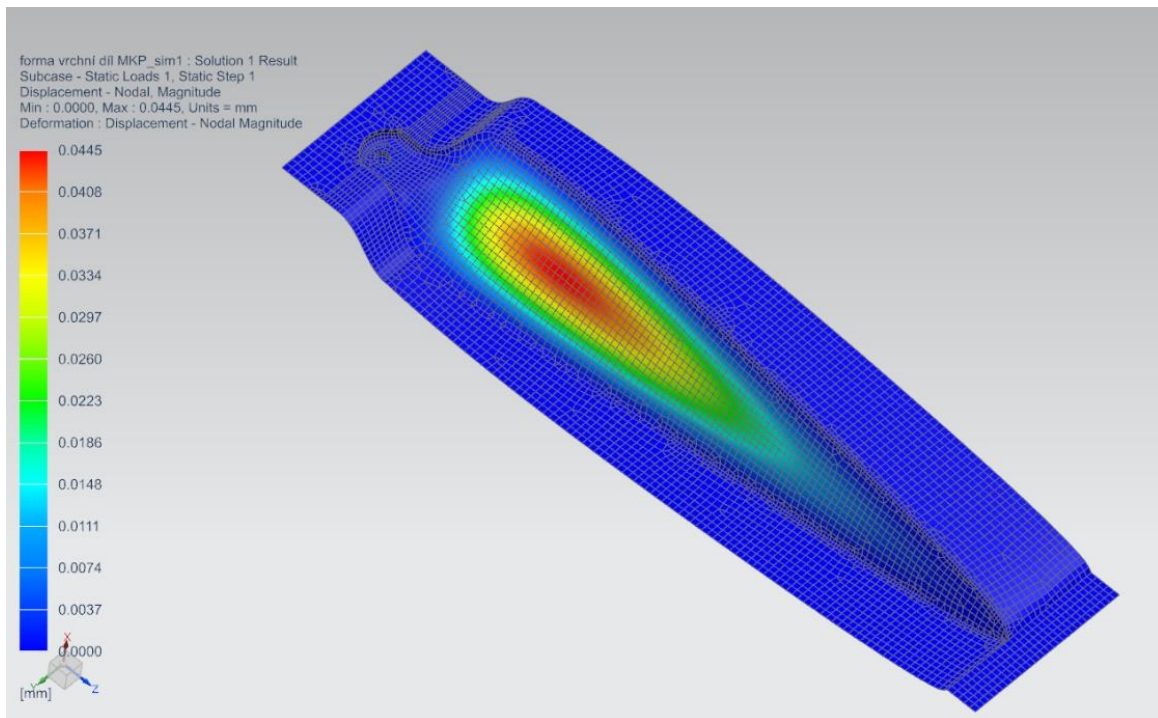
7.1 Konstrukce formy pro výrobu vrtulového listu

Konstrukce tvaru formy je odvozena od tvaru modelu vrtulového listu. Forma je konstruována na teoreticky přesný tvar listu vrtule. Horní polovina formy obsahuje dvě drážky pro těsnění. První těsnění je okolo dutiny formy a slouží k udržení podtlaku v dutině a brání pryskyřici zatékat mimo ni. Druhé těsnění je po obvodu formy a slouží k vytvoření podtlaku v prostoru mezi těsněními. Z důvodu případných netěsností je důležité, aby podtlak vytvořený mezi těsněními byl větší než v dutině formy. Při výskytu netěsnosti tak bude nasáta pryskyřice do prostoru mezi těsněními, a ne vzduch do prostoru dutiny formy.

K výrobě formy bude použit skelný kompozit. Jelikož forma bude zatěžována tlakem, je třeba určit tloušťku stěny tak, aby deformace stěn formy nepřesahovaly zvolenou toleranci. Tolerance byla zvolena na základě [20] na 0,05mm. Podtlak vytvořený ve formě byl uvažován 0,9 baru. Tloušťka stěny formy byla zvolena na základě MKP simulace v programu NX na 6 mm. Výsledky simulace pro zvolenou tloušťku stěny formy lze vidět na obrázcích 35 a 36, kde stupnice v levé části obrázků ukazuje, že deformace jsou v mezích zvolené tolerance.



Obrázek 35 - Deformace spodního dílu formy při zatížení tlakem 0,9 baru



Obrázek 36 - Deformace vrchního dílu formy při zatížení tlakem 0,9 baru

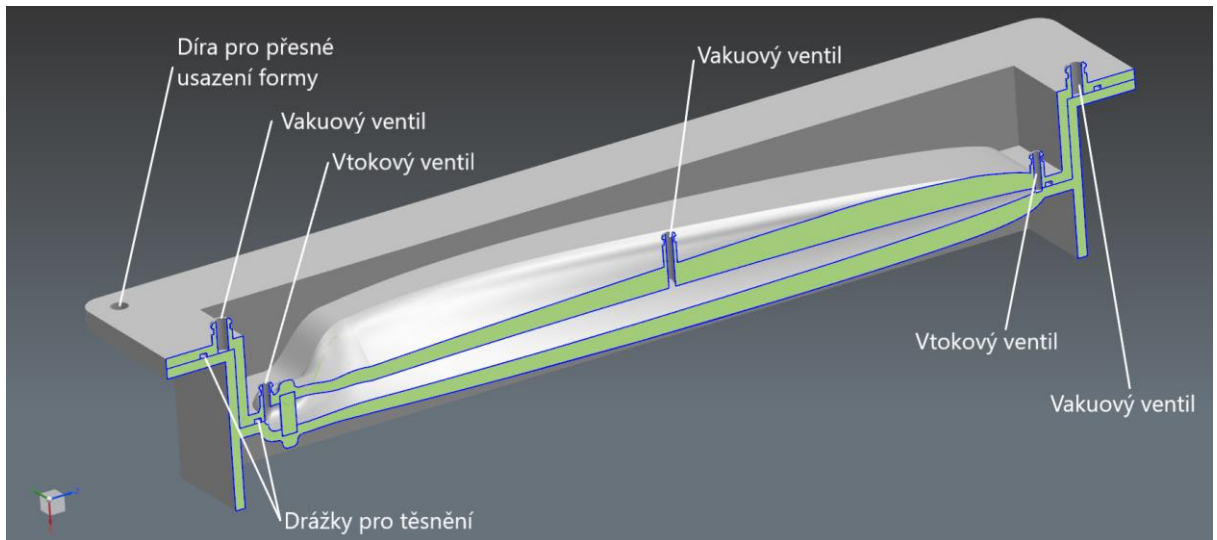
7.1.1 Umístění vtokových a odsávacích ventilů

Umístění vtokových a odsávacích ventilů tvoří důležitou součást konstrukčního návrhu formy. Jejich vhodné umístění zajistí úplné prosycení výztuže ve všech místech dutiny. Rychlost a úplnost prosycení závisí na mnoha faktorech. Za základ pro popis proudění pryskyřice je považován Darcyho zákon:

$$U = \frac{K}{\mu} \cdot \left(\frac{dp}{dx}\right), \quad (7.1)$$

kde U představuje rychlost proudění pryskyřice, K představuje permeabilitu, μ viskozitu pryskyřice a $\left(\frac{dp}{dx}\right)$ je tlakový gradient. Permeabilita je závislá na typu materiálu, jeho orientaci a objemovém podílu vláken. Jelikož permeabilita není součástí dokumentace jednotlivých materiálů, je nutné ji stanovit experimentálně. Viskozita je dána především typem materiálu, ale je možné ji ovlivnit teplotou. Rychlost prosycení tedy roste s rostoucí permeabilitou, tlakovým gradientem a klesající viskozitou. S rostoucí složitostí tvaru dutiny formy roste také náročnost stanovení vhodných pozic k umístění vtokových a odsávacích ventilů. Pro stanovení vhodných pozic se dnes používají experimentální zkoušky nebo programy na simulaci proudění pryskyřice ve formě jako například RTM-Worx či PAM-RTM [20].

Pro navrhovanou formu bylo zvoleno umístění dvou vtokových ventilů na špičce a u kořene listu, a jednoho vakuového ventilu zhruba uprostřed dutiny formy. Další vakuové ventily budou umístěny do prostoru mezi těsnění a budou sloužit k uzavření formy vytvořením podtlaku mezi jednotlivými díly formy. Umístění ventilů byla stanovena na základě rešerše VARTM technologie. Vakuový ventil pro odsání vzduchu z dutiny formy je umístěn mírně excentricky směrem ke špičce listu, jelikož se předpokládá rychlejší prosycování od kořene listu, kde je více vrstev vláknové výztuže. Nicméně ověření správného umístění ventilu by bylo vhodné ověřit experimentálními zkouškami nebo použitím výše zmiňovaných programů. Schéma formy v řezu je na následujícím obrázku 37.



Obrázek 37 - Řez formou

7.2 Výroba formy

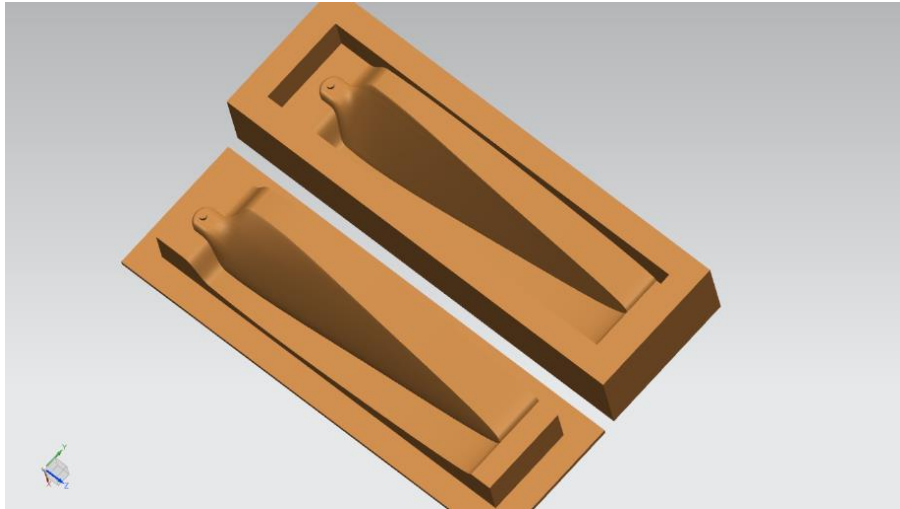
Forma bude vyrobena nepřímou metodou z kompozitního materiálu. Nepřímá metoda výroby formy je finančně méně náročná, neboť zde není třeba formu strojně obrábět. Výroba bude probíhat ve dvou fázích. První fází je výroba modelů (negativ formy), druhá fáze pak představuje samotnou laminaci jednotlivých dílů formy.

7.2.1 Výroba modelů (negativů formy, kopyt)

Forma je rozdělena na dva díly, spodní a vrchní část, je tedy třeba vyrobit pro každou část formy její negativ (kopyto). Běžně používané materiály pro výrobu kopyt jsou MDF desky, polyuretanové pěny, polystyreny či kompozitní materiály. Při volbě materiálu musí být zohledněny jeho parametry tak, aby forma dosahovala navrhované přesnosti a jakosti povrchu. Pro výrobu kopyt byl zvolen materiál MDF (Medium Density Fibreboard). Tento materiál se vyznačuje dobrou obrobiteľností, přijatelnou cenou, avšak po obrobení je nutné povrch upravit. Nevýhodou tohoto materiálu je nasákavost a rozměrová stabilita při působení vlhkosti.

V programu NX byl vytvořen model kopyt. U modelu je důležité zohlednit technologické přídatky jako je přidavek na smrštění materiálu. Kopyta budou obrobena na CNC frézce dle 3D modelu. Po obrobení následuje broušení brusným papírem vysoké zrnitosti a poté nanesení polyuretanového plniče pro zanesení pórů a vyrovnání drobných nerovností. Dále jsou kopyta opět přebroušena jemným brusným papírem a vyleštěna do požadované

jakosti povrchu. Nakonec je na povrch nanesen separátor pro snadné oddělení laminátu od formy. Takto jsou kopyta připravena na výrobu formy.



Obrázek 38 - 3D modely kopyt formy

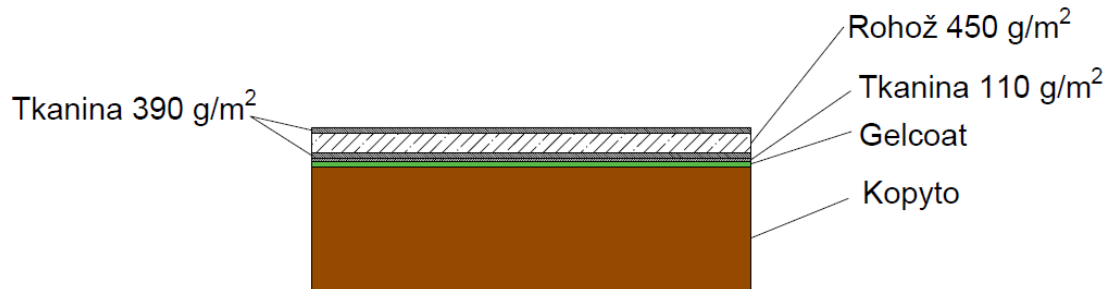
7.2.2 Výroba formy

Jak již bylo řečeno výše, forma bude vyrobena ze skelného kompozitu a tloušťka stěny formy je vypočtena na 6 mm. Stěna formy se bude skládat z povrchové vrstvy gelcoatu, několika vrstev skelné tkaniny a rohože. Jako pryskyřice byla vybrána pevnostní epoxidová pryskyřice, jež je vhodná k výrobě pevnostně náročných dílů. Forma bude vyráběna kontaktní laminací.

První a povrchovou vrstvou formy bude tvořit epoxidový gelcoat, který je určen pro výrobu forem. Tento gelcoat bude nanesen stříkáním na povrch kopyta ve vrstvě zhruba 1 mm. Výhodou tohoto gelcoatu je vytvoření přesného povrchu kopírováním povrchu kopyta. Po vytvrzení vrstvy gelcoatu lze přistoupit ke kladení jednotlivých vrstev laminátu. Na vrstvu gelcoatu bude jako první přiloženo 5 vrstev sklené tkaniny o gramáži 110 g/m² ve vazbě plátno o celkové tloušťce 0,5 mm. Jako další vrstva bude použita skelná tkanina o gramáži 390 g/m² ve vazbě plátno ve 3 vrstvách o tloušťce 1 mm. Tato vrstva by měla zajistit dobrou tvarovou stálost formy. Další vrstvou bude představovat skelná rohož o gramáži 450 g/m², ve 4 vrstvách o celkové tloušťce 3,5 mm. Poslední vrstvou bude opět skelná tkanina o gramáži 390 g/m² ve vazbě plátno ve 3 vrstvách o tloušťce 1 mm. Všechny vrstvy je nutné dobře prosytit pryskyřicí a přebytečnou pryskyřici odstranit společně se vzduchovými bublinami. Poté budou na laminát nanесeny technologické vrstvy: strhávací tkanina, separační folie, odsávací tkanina a vakuová plachetka. Díl je třeba řádně utěsnit a následně

z prostoru mezi formou a vakuovou plachetkou odsát vzduch. Za působení tlaku po určitý čas dojde k vytvrzení laminátu. Po vytvrzení bude forma vyjmuta a bude provedena kontrola kvality povrchu a případná oprava. Tento postup je identický pro oba díly formy. Nakonec budou do vrchní části formy vyvrtány otvory a do drážek vloženo těsnění. Pro vymezení otvoru pro čep je vyroben čep o vnějším průměru 11 mm a délce 28 mm.

Schématické zobrazení laminátu formy lze vidět na obrázku 39.



Obrázek 39 - Detail složení laminátu formy

7.3 Výroba vrtulového listu

Výroba samotného vrtulového listu se bude skládat z několika fází, a to výroba pěnového jádra, výroba předlisků, prosycení pryskyřicí a finálních úprav.

7.3.1 Výroba pěnového jádra

Pro výrobu pěnového jádra byla zvolena technologie vypěnění polyuretanové pěny do přesné formy. Forma na jádro bude vyrobena pomocí technologie 3D tisku podle modelu. K vypěnění pak bude použit polyuretanový dvoukomponentní vypěňovací systém s hustotou polyuretanové pěny 50 kg/m^3 . Jednotlivé složky pěny budou promíchány ve správném poměru a poté bude pěna pod tlakem vstříknuta do dutiny formy. Po vytvrzení bude jádro vyjmuto z formy a provedena kontrola a případné opravy.

7.3.2 Výroba předlisků

K výrobě předlisků bude použita forma vyrobená pro samotné prosycování celého dílu. Jednotlivé nástřihy budou vkládány do obou dílů formy zvlášť do požadované pozice. Na jednotlivé vrstvy bude nanесena vrstva spojovacího materiálu (v anglické literatuře „binders“). Pro tuto operaci byl zvolen kontaktní lepicí sprej, který zajistí dobrou přilnavost jednotlivých vrstev při lisování. Jednotlivé díly formy budou poté vloženy do vakuového

vaku a za působení tlaku bude předlisek zhutněn a vytvrzen. Po vytvrnutí spojovacího materiálu zůstane předlisek v požadovaném tvaru [20].

7.3.2.1 Materiál k výrobě nástřihů

Na potah vrtulového listu byla zvolena E-skelná tkanina ve vazbě plátno s gramáží 300 g/m².

Na pásnice pak bude použita jednosměrná uhlíková tkanina s gramáží 200 g/m².

7.3.3 Prosycení

Jako první je třeba nanést separátor na povrch dutiny formy pro snadné odformování. Poté je na povrch dutiny formy nanesen epoxidový gelcoat určený pro tenké vrstvy. Gelcoat tvoří zhruba 0.1 mm tlustou vrstvu. Pomocí gelcoatu dosáhneme hladké povrchové vrstvy, která je snadno opravitelná. Poté jsou do formy vloženy předlisky a jádro. Forma se následně uzavře a díly se ustaví do správné vzájemné pozice a stáhnou svorkami. Následuje připojení hadic pro odsátí vzduchu a přivedení pryskyřice. Z prostoru dutiny formy a mezi těsněními je odsán vzduch a vytvořen podtlak. Do dutiny formy je zavedena pryskyřice, která prosytí vláknovou výztuž. Doba prosycování lze určit dle Darcyho zákona za předpokladu znalosti hodnot permeability jednotlivých materiálů, které je nutné stanovit experimentálně. Po prosycení je forma uzavřena až do úplného vytvrzení kompozitu. Poté je díl z formy vyjmut.

7.3.4 Finální úpravy

Po vyjmutí z formy je provedena vizuální kontrola listu, jsou odstraněny a zabroušeny nátoky pryskyřice v místech otvorů a je provedeno celkové začistění dílu. Poté je do otvoru pro čep vlepena titanová vložka o vnějším průměru 11 mm s tloušťkou stěny 1 mm. Tato vložka bude sloužit k roznesení zatížení po celé ploše otvoru. Poslední operací je opatření náběžné hrany ochranou vrstvou, jelikož náběžná hrana musí odolávat abrazi a nárazům. Pro tento účel se používá polyuretanová samolepící páska či nerezový výlisek, který se přilepí na náběžnou hranu.

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala návrhem konstrukce a výroby celokompozitního vrtulového listu. Nejprve byla provedena rešerše, jež shrnula konstrukční a výrobní poznatky z oblasti kompozitních vrtulových listů. Byly zde představeny příklady konstrukcí celokompozitních vrtulových listů společně s technologií jejich výroby. Součástí rešerše bylo také teoretické uvedení do oblasti výpočtu zatížení vrtulového listu, na jehož základě pak bylo v praktické části zatížení vypočítáno.

Na základě poznatků z rešeršní části byl proveden návrh celokompozitní konstrukce. Jedná se o konstrukci tvořenou pěnovým jádrem, uhlíkovými pásnicemi a skelným potahem. Pevnost takovéto konstrukce byla ověřena výpočtem pomocí klasické laminátové teorie a pevnostních kritérií určených pro kompozitní materiály. Výpočet byl proveden v programu LamiEx V3.0. V poslední kapitole byla navržena technologie výroby vrtulového listu. Pro výrobu byla zvolena technologie Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding. Tato technologie kombinuje výhody klasické technologie RTM při zachování nízkých výrobních nákladů, nedosahuje však tak vysokého objemového podílu výztuže. Byla zde také popsána konstrukce a výroba formy a poté výroba samotného listu. Výsledky uvedené v této práci by bylo vhodné ověřit experimentálně. Z výrobní technologie by se jednalo o ověření prosycení celého dílu a případná úprava vtokové soustavy dle výsledků. Dále by bylo vhodné provést experimentální ověření pevnosti daného dílu.

Seznam použité literatury

- [1] Tari, D.: Aerodynamický návrh vrtule: diplomová práce, Praha: ČVUT - České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2019, 60 s. Vedoucí práce: Ing. Jan Klesa Ph.D.
- [2] STATEČNÝ, Jiří. Pevnost a životnost leteckých turbínových motorů: Část 1. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-00420-1.
- [3] Composite Propellers: Longevity, Efficiency. AVweb - AVweb [online]. Copyright © 2019 Aviation Publishing Group. All rights reserved. [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <https://www.avweb.com/ownership/composite-propellers-longevity-efficiency/>
- [4] What Are the Benefits of Composite Propellers? - Hartzell Propeller. Hartzell Propeller Inc. | Aircraft and Airplane Propeller Systems [online]. Copyright © 2015 Hartzell Propeller. All Rights Reserved. [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <http://hartzellprop.com/benefits-of-composite-propellers/>
978-80-86116-54-9
- [5] HORECKÝ, Rostislav. Modul 17: vrtule. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0688-6.
- [6] ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. Letadlové motory. Vyd. 2. Praha: Corona, 2008. ISBN 978-80-86116-54-9
- [7] [online]. Dostupné z: <http://avweb02.ipp-las-topaz.iproduction.com/media/newspics/>
- [8] HORECKÝ, Rostislav. Distanční texty pro výuku vrtulových jednotek I. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1639-5.
- [9] New Hartzell New High Performance 5-Blade, Swept-Tip Aerospace-Grade Composite Prop Developments Underway - Hartzell Propeller. Hartzell Propeller Inc. | Aircraft and Airplane Propeller Systems [online]. Copyright © 2015 Hartzell Propeller. All Rights Reserved. [cit. 01.03.2020]. Dostupné z: <http://hartzellprop.com/new-hartzell-new-high-performance-5-blade-swept-tip-aerospace-grade-composite-prop-developments-underway/>
- [10] JSTOR [online]. Dostupné z: https://www.jstor.org/stable/44699038?read-now=1&seq=1#page_scan_tab_contents <https://ppg.e-props.fr/fabrication.php>
- [11] [online]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/645/1/012018/pdf>

- [12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6
- [13] [online]. Dostupné z:
<http://people.cst.cmich.edu/yelam1k/asee/proceedings/2011/data/33-186-1-dr.pdf>
- [14] CABRNOCH, Bohuslav. *Technologie výroby kompozitních materiálů*. Prezentace předmětu Speciální letecké technologie. ČVUT FS 2013 Praha.
- [15] Dowty Propellers re-establishes its composite blade production. Home - Dowty Propellers [online]. Dostupné z: <http://dowty.com/feature-stories/blade-production-reestablished/>
- [16] SVOBODA, Martin. *Technologie výroby proudových pohonných jednotek*. Prezentace předmětu Technologie výroby letecké a kosmické techniky. ČVUT FS 2018 Praha.
- [17] ALEKSANDROV, Vladimír Leont'jevič. *Letecké vrtule*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. Řada energetické strojírenské literatury.
- [18] LamiEX v. 3.0: Program pro výpočet zatížení a pevnosti laminátů podle klasické laminační teorie. [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z:
<http://drone.fsid.cvut.cz/mcmfolder/laminator.xls>
- [19] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [20] POTTER, Kevin. *Resin transfer moulding*. London: Chapman & Hall, 1997. ISBN 0-412-72570-3.

Seznam obrázků, grafů, tabulek a příloh

Obrázky:

Obrázek 1 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 1 [6].....	14
Obrázek 2 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 2 [7].....	14
Obrázek 3 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 3	14
Obrázek 4 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 4	15
Obrázek 5 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 5 [8].....	15
Obrázek 6 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu 6 [8].....	15
Obrázek 7 - Porovnání celokompozitních listů s dřevěnými listy s kompozitním potahem [9]	16
Obrázek 8 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu s kovovým konstrukčním prvkem 1 [8]	16
Obrázek 9 - Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu s kovovým konstrukčním prvkem 2 [8]	17
Obrázek 10 - Schéma VARTM [13]	19
Obrázek 11 - Schéma RTM [14].....	20
Obrázek 12 - Výroba vrtulového listu oplétáním ve firmě Dowty [15]	21
Obrázek 13 - Konstrukční uspořádání listu popsaného v této kapitole [16].....	22
Obrázek 14 - Konstrukční uspořádání kořenové části listu popsaného v této kapitole [16]	22
Obrázek 15 - Soustava sil a momentů zatěžujících vrtuli [2]	23
Obrázek 16 - Schéma vrtulového listu k výpočtu tahového zatížení [2].....	24
Obrázek 17 - Typický průběh odstředivé síly po poloměru listu [17]	25
Obrázek 18 - Vliv vratného momentu [2]	25
Obrázek 19 - Schéma k výpočtu kroutícího momentu [2]	26
Obrázek 20 - Schéma k výpočtu rozkrucovacího momentu [2]	27
Obrázek 21 - Schéma k výpočtu kvazistatického zatížení [2].....	28
Obrázek 22 - Průběh kroutícího momentu od aerodynamických sil [2]	30
Obrázek 23 - Schéma transformace momentů	35
Obrázek 24 - Schéma zvolené konstrukce v řezu	37
Obrázek 25 -Schéma výpočetního modelu	37
Obrázek 26 - 3D model listu s naznačeným rozvržením pásnic	38
Obrázek 27 - Rozložení jednotlivých lamin pásnic po délce listu po pevnostním výpočtu.....	43
Obrázek 28 - Tsai Wu kritérium pro první vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu	46
Obrázek 29 - Tsai Wu kritérium pro druhou vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu	46

Obrázek 30 - Tsai Wu kritérium pro třetí vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu	46
Obrázek 31 - Tsai Wu kritérium pro čtvrtou vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu	46
Obrázek 32 - Tsai Wu kritérium pro pátou vrstvu laminátu v kořeni vrtulového listu	46
Obrázek 33 - Posunutí elementů.....	47
Obrázek 34 - Rotace elementů.....	47
Obrázek 35 - Deformace spodního dílu formy při zatížení tlakem 0,9 baru	49
Obrázek 36 - Deformace vrchního dílu formy při zatížení tlakem 0,9 baru	49
Obrázek 37 - Řez formou	51
Obrázek 38 - 3D modely kopyt formy	52
Obrázek 39 - Detail složení laminátu formy.....	53

Grafy:

Graf 1 - Průběhy odstředivé síly.....	31
Graf 2 - Průběh kroutícího momentu od odstředivých sil.....	33
Graf 3 - Průběh rozkrucovacího momentu, pro jednotlivé konstrukční konfigurace	34
Graf 4 - Průběh složek ohybového momentu po poloměru	35
Graf 5 - Průběh kroutícího momentu od aerodynamických sil po poloměru	36

Tabulky:

Tabulka 1: Parametry pro výpočet odstředivé síly a výsledek	32
Tabulka 2 - Parametry výpočtu kroutícího momentu od odstředivých sil a výsledek	33
Tabulka 3 - Parametry výpočtu ohybového momentu od aerodynamických sil a výsledky	36
Tabulka 4 - Porovnání vlastností materiálů [12]	38
Tabulka 5 - Charakteristiky použitých materiálů [18]	43
Tabulka 6 - Zatížení v kritických řezech listem	43
Tabulka 7 - Složení kompozitu a výsledky pevnostních kritérií v kořeni vrtulového listu řazení vrstev: od vrstvy číslo 1 shora po vrstvu číslo 7	44
Tabulka 8 - Složení kompozitu a výsledky pevnostních kritérií v R=0,26m vrtulového listu řazení vrstev: od vrstvy číslo 1 shora po vrstvu číslo 7	44
Tabulka 9 - Složení kompozitu a výsledky pevnostních kritérií v R=0,54m vrtulového listu řazení vrstev: od vrstvy číslo 1 shora po vrstvu číslo 7	44

Přílohy:

- Příloha 1 – Výkres vrtulového listu
- Příloha 2 – Výkres skladby kompozitu
- Příloha 3 – Výkres sestavy formy