

Model listu kompozitní vrtule

Bc. Daniel Čech

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Daniel Čech
Osobní číslo:	T23300
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Model listu kompozitní vrtule

Zásady pro vypracování

- Literární přehled
- Návrh numerického modelu
- Řešení modelu
- Vyhodnocení výsledků

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

Seznam doporučené literatury:

BOWER, Allan F. *Applied mechanics of solids*. Boca Raton: CRC Press, 2010, xxv, 794 s. ISBN 978-1-4398-0247-2.

EHRENSTEIN, G.W. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia Praha, 2009. ISBN 978-0521841887.

BARBERO, E. J. *Introduction to composite materials design*. Third edition, CRC Press, 2018. ISBN-13: 978-1138196803.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

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

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou 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 mohu užít své dílo – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá FEM analýzou kompozitního listu vrtule. FEM analýza bude zahrnovat pevnostní i modální vlastnosti listu a bude použita k posouzení bezpečnosti struktury vrtule při provozním zatížení.

V teoretické části je postupně rozebrána problematika kompozitních materiálů, základní poznatky o vrtulích a principy a základní metodiky konečně prvkové analýzy. Praktická část se zabývá tvorbou komplexního FEM modelu listu vrtule a následnou analýzou a interpretací výsledků lineární, nelineární a modální analýzy.

Klíčová slova: Kompozit, Prepreg, FEM analýza, Deformace, Napětí, Tsai-Wu, Vrtule

ABSTRACT

The master's thesis focuses on the FEM analysis of a composite propeller blade. The FEM analysis will include both strength and modal properties of the blade and will be used to assess the structural safety of the propeller under operational loads.

The theoretical part gradually discusses the topic of composite materials, fundamental knowledge about propellers, and the principles and basic methodologies of finite element analysis. The practical part is dedicated to the development of a comprehensive FEM model of the propeller blade, followed by analysis and interpretation of the results of linear, nonlinear, and modal analyses.

Keywords: Composite, Prepreg, FEM Analysis, Deformation, Stress, Tsai-Wu, Propeller

Touto formou bych rád poděkoval své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala a vytvořila zázemí, díky kterému mohla vzniknout tato práce. Dále bych chtěl poděkovat také svému vedoucímu doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D. za cenné rady, které mi v rámci konzultací k této práci vždy ochotně poskytnul.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH STRUKTUR	14
1.1.1 Izotropie a anizotropie.....	14
1.1.2 Adhezní síly	15
1.1.3 Synergický efekt.....	17
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	17
1.2.1 Rozdělení kompozitů podle materiálu matrice	17
1.2.2 Rozdělení podle tvaru disperze	18
1.3 VÝHODY VLÁKEN JAKO KONSTRUKČNÍHO PRVKU	20
2 VRSTVENÉ KOMPOZITY	22
2.1 KOMPOZICE VLÁKEN VÝZTUŽNÉHO SYSTÉMU	23
2.1.1 Pleteniny.....	23
2.1.2 Tkaniny	24
2.2 VYBRANÉ DRUHY VLÁKNOVÝCH MATERIÁLŮ	25
2.2.1 Skelná vlákna	25
2.2.2 Uhlíková vlákna	26
2.2.3 Aramidová vlákna	27
2.2.4 Přírodní vlákna	28
2.3 TERMOSETICKÁ MATRICE	28
2.4 SENDVIČOVÉ STRUKTURY	29
2.5 VÝROBA VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ	30
2.6 PREPREGY	31
2.6.1 Řezání prepregů	32
2.6.2 Vrstvení prepregů.....	32
2.6.3 Vytvrzování prepregů.....	34
3 DIMENZOVÁNÍ PRVKŮ Z VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ	36
3.1 MIKROMECHANIKA VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÉHO MATERIÁLU	36
3.1.1 Reprezentativní objemový element.....	37
3.1.2 Jednosměrně vyztužená vrstva	37
3.1.3 Stanovení elastických konstant	37
3.2 VZTAHY MEZI NAPĚTÍM A DEFORMACÍ	38
3.2.1 Hookův zákon při rovinné napjatosti	39
3.2.2 Deformace jednosměrně vyztužené vrstvy	40
3.2.3 Pootočení směru zatížení.....	41
3.2.4 Vrstva vyztužená tkaninou	43
3.3 KLASICKÁ LAMINÁTOVÁ TEORIE	44

3.4	TEORIE SELHÁNÍ KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	45
3.4.1	Kritérium maximálního napětí	46
3.4.2	Hoffmanovo kritérium.....	46
3.4.3	Kritérium Tsai-Wu	47
4	VRTULE	48
4.1	ZÁKLADY AERODYNAMIKY VRTULE	49
4.1.1	Aerodynamická síla	50
4.1.2	Celkový tah vrtule	51
4.1.3	Výkon pro pohon vrtule	51
4.1.4	Charakteristiky vrtule	52
4.2	ZATÍŽENÍ VRTULOVÉHO LISTU	52
4.3	VYUŽITÍ VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ PŘI NÁVRHU VRTULE.....	53
5	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	55
5.1	MKP V MECHANICE PEVNÝCH TĚLES	55
5.1.1	Modální analýza	56
5.1.2	Nelineární analýza.....	57
5.2	KONEČNĚ PRVKOVÁ SÍŤ.....	58
5.2.1	Uzly sítě.....	59
5.2.2	Elementy sítě	60
II	PRAKTICKÁ ČÁST	61
6	CÍLE PRÁCE.....	62
7	3D MODEL VRTULE	63
7.1	POPIS MODELU VRTULE	63
7.1.1	Náboj	64
7.1.2	Jádro	64
7.1.3	Výztuhy	65
7.1.4	Vnější plášť	66
7.2	ÚPRAVA CAD MODELŮ PRO FEM.....	68
8	FEM MODEL VRTULE	70
8.1	NÁBOJ	70
8.2	JÁDRO.....	71
8.3	VÝZTUHY	71
8.4	VNĚJŠÍ PLÁŠŤ	72
8.4.1	Tvorba materiálové struktury pláště.....	73
9	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	77
9.1	NASTAVENÍ KONTAKTŮ	77
9.2	NASTAVENÍ VAZEB	78
9.3	NASTAVENÍ ZATÍŽENÍ	79

10	LINEÁRNÍ ANALÝZA	84
10.1	VÝSLEDKY DEFORMACE	85
10.2	VÝSLEDKY REAKČNÍ SÍLY	86
11	NELINEÁRNÍ ANALÝZA.....	87
11.1	VÝSLEDKY NELINEÁRNÍ ANALÝZY	90
11.1.1	Výsledky deformace.....	90
11.1.2	Pevnostní analýza kompozitní struktury pláště.....	94
12	MODÁLNÍ ANALÝZA	102
	ZÁVĚR	105
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	107
	SEZNAM OBRÁZKŮ	110
	SEZNAM TABULEK.....	113
	SEZNAM GRAFŮ	114

ÚVOD

Svět letectví nepřestává udivovat svými složitými stroji a nádhernou elegantností své vědy. V srdci všeobecného letectví se často nachází vrtule letadla, kritická součást zodpovědná za tah, který posouvá letadlo dopředu. Historie leteckých vrtulí sahá do počátků letectví, kdy průkopníci jako např. Bratři Wrightové experimentovali s pohonnými mechanismy. Od té doby je evoluce vrtulí synonymem pro pokrok v letecké technologii. I se vzestupem proudových motorů zůstávají vrtule klíčové v mnoha kontextech letectví, především v menších letadlech s pístovým motorem, dronech apod.

Oblast technologie leteckých vrtulí není statická, ale stále se vyvíjí. Tento vývoj je poháněn snahou o vyšší efektivitu, výkon a snížení hluku. Poslední dobou jsou v popředí tohoto vývoje kompozitní materiály, které se v letectví začínají používat čím dál více nejen pro konstrukce vrtulí, ale pro celé potahy křídel či trupů letadel. Použití kompozitních materiálů v letectví nabízí úsporu hmotnosti a vylepšenou aerodynamiku při zachování pevnosti a odolnosti a celou řadu dalších výhod.

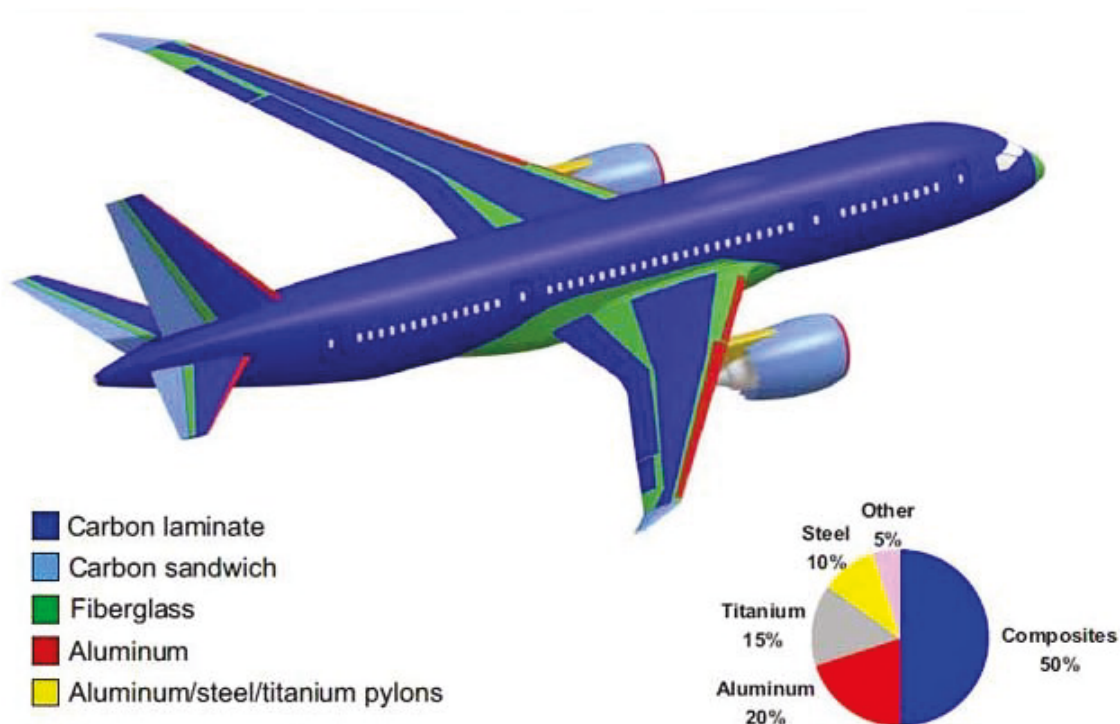
Kompozitní materiály představují materiály složené ze dvou či více základních materiálů, které mezi sebou mají rozpoznatelné rozhraní. V letectví je nejvíce rozšířeno použití kompozitů s polymerní matricí a orientovanými výztužnými vlákny. Použití těchto kompozitů nejčastěji probíhá formou vrstvení prepegů, které se do konstrukce postupně kladou a následně vytvrzením matrice vzniká pevný a houževnatý materiál.

Důležitou složkou výroby jakékoli součásti nejen v letectví je pevnostní výpočet, kterým lze předcházet selhání součásti během provozu. V současnosti je tento typ výpočtů realizován nejčastěji pomocí počítačových simulací. Nejpoužívanější metodou výpočtu v této oblasti je metoda konečných prvků, jejíž počátky sahají do 60. let minulého století.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou s lidstvem spjaty od dávné historie. Již první civilizace věděly, že spojením různých materiálů s různými vlastnostmi může vzniknout materiál, který bude vlastnosti základních materiálů přesahovat. Příkladem může být damascénská ocel či hliněné cihly plněné slámou. V moderním strojírenství se kompozitní materiály začaly nejvíce uplatňovat v minulém století, kdy došlo k rozmachu jejich výroby v podobě vrstvených laminátů zejména v leteckém průmyslu. Revolučním byl pro kompozitní materiály v leteckém průmyslu rok 2011, kdy byl představen komerční letoun Boeing 787 Dreamliner, jehož celková hmotnost byla z 50 % tvořena právě kompozitními materiály. V současné době se kompozitní materiály používají v celé řadě dalších strojírenských odvětví. [1] [2]



Obrázek 1 Materiálové složení Komerčního letadla Boeing 787 Dreamliner [2]

Při pevnostním návrhu konstrukce či mechanické součástky se vybírá použitý materiál tak, aby jeho pevnostní a případně další materiálové charakteristiky odpovídaly místu maximálního namáhání. Z pevnostního pohledu je materiál zcela využit pouze v této oblasti, což může být značně neefektivní. Technologie kompozitních materiálů umožňuje vytvořit strukturu, která odpovídá poli napjatosti a která je vysoce pevná tam, kde je vysoké namáhání, zatímco jinde již takové vlastnosti nemá. Moderní kompozitní materiály mají

celou řadu předností ve srovnání s běžnými kovovými konstrukčními materiály – nízká hustota, větší měrná pevnost, lomová houževnatost, odolnost vůči chemickým a povětrnostním vlivům, lepší tepelné a elektroizolační vlastnosti, dobrá prostupnost elektromagnetickým zářením, často snadnější technologie výroby atd. [3]

Základní definicí kompozitu je, že je složen ze dvou či více základních materiálů s rozdílnými vlastnostmi, které jsou většinou značně odlišné. Základní materiály kompozitu jsou vzájemně nerozpustné a tvoří viditelné rozhraní. Vlastnosti výsledného materiálu by měly být vyšší než poměrný součet vlastností jeho složek. Typicky je kompozitní materiál složen z vyztuzující disperzní fáze a matrice, která přenáší mechanické napětí na disperzní fázi a spojuje materiál do jednoho celku. Dle definice by pak disperzní (vyztužná) složka měla tvořit alespoň 5 % objemu materiálu. [4]

1.1 Vlastnosti kompozitních struktur

Jak již bylo uvedeno výše, kompozitní materiály jsou složeny ze dvou a více základních materiálů, které mají rozdílné vlastnosti a tvoří viditelné rozhraní. Výsledné makroskopické vlastnosti kompozitní struktury pak ovlivňují nejen použité základní materiály, ale také geometrie výztuže, která má vliv na anizotropii struktury – většina kompozitních materiálů vykazuje silnou anizotropii. Dále vlastnosti struktury ovlivňuje též synergický efekt, či mikroskopické síly, které se vytvářejí na rozhraní základních materiálů a které mají zásadní vliv na chování kompozitu jako celku. Tyto mikroskopické síly se nazývají adhezní síly a základní materiály kompozitní struktury by se vždy měly volit tak, aby byla adhezní síla mezi nimi co největší. [4]

1.1.1 Izotropie a anizotropie

Běžné klasické technické materiály jsou zcela izotropní, nebo jeví jen velmi malou anizotropii (např. za studena tažený ocelový drát). Pro kompozitní materiály je naopak typické, že řada z nich jeví silnou anizotropii vlastností. Z hlediska symetrie vlastností lze materiály rozdělit do několika základních typů:

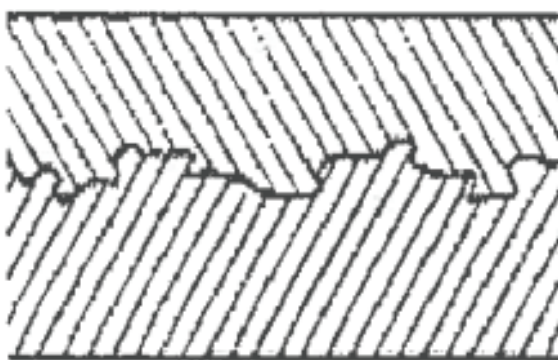
- **Izotropní materiál** má ve všech směrech stejné vlastnosti, kdybychom nějakou vlastnost nanесли na směrové vektory vycházející z jednoho bodu v počátku souřadnic, vytvořily by jejich koncové body kouli.

- **Anizotropní materiál** má v každém směru jiné vlastnosti, kdybychom nějakou vlastnost nanесли na směrové vektory vycházející z jednoho bodu v počátku souřadnic, vytvořily by jejich koncové body obecnou plochu.
- **Ortotropní materiál** má symetrické vlastnosti podle tří vzájemně kolmých rovin. Ve třech kolmých směrech tvořených průsečnicemi těchto rovin má vlastnosti vzájemně různé, ale bez typických efektů anizotropie.
- **Příčně izotropní materiál** má izotropní vlastnosti v určité rovině. Vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a dvou rovin na ni i na sebe vzájemně kolmých. Průsečnice těchto rovin je hlavní osa. Příčná izotropie je typická především pro kompozity s jednosměrným uspořádáním vláken. [5]

1.1.2 Adhezní síly

Adhezi tvoří několik mechanismů, jako absorpce a smáčení, elektrostatická interakce, kovalentní vázání povrchu, reakční vazby a nevázané interakce. Adhezní síly se mohou z hlediska původce působení dělit na mechanické, fyzikální a chemické.[4]

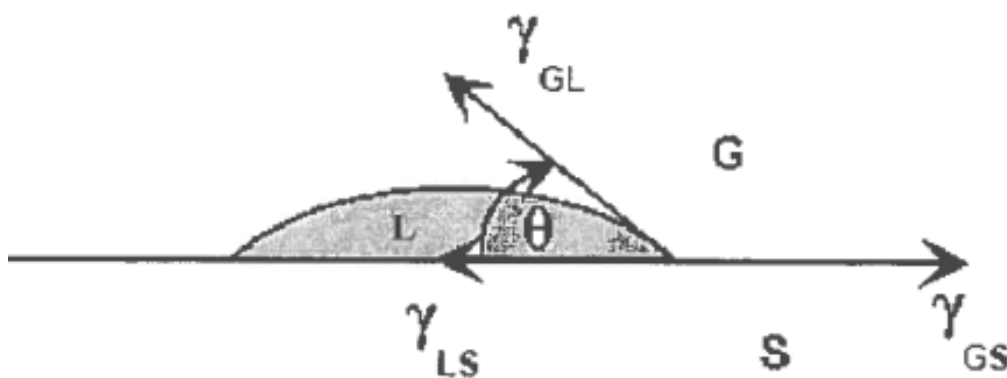
- **Mechanické zaklínění** je způsobeno nerovnostmi na povrchu matrice. Toto zaklínění při mechanickém zatížení brání vzájemnému pohybu matrice a disperze. Zaklínění je tím větší, čím je hranice mezi matricí a disperzí drsnější a jejich styk je dokonalejší. V praxi se proto povrch disperze často záměrně zdrsňuje. U uhlíkových vláken je zdrsňování prováděno jako pozitivní vedlejší efekt působením plazmy či oxidace, která se používá hlavně pro zlepšení chemické adheze vláken. [4] [5] [6]



Obrázek 2 Mechanického zaklínění [4]

- **Fyzikální adheze** je způsobena Van der Waalsovou silou mezi částicemi na rozhraní, tato vazba působí na vzdálenost 0,3 až 0,5 nm a její velikost, která odpovídá teoretické pevnosti rozhraní 0,7 až 7 GPa, úzce souvisí se vzájemnou smáčivostí

kapalné matrice a tuhé disperze. Základní charakteristikou smáčivosti je tzv. úhel smáčivosti θ . O dvou vzájemně smáčivých látkách mluvíme v případě, že je úhel θ menší než 90° , čím je tento úhel menší, tím jsou látky lépe smáčivé. U dvou smáčivých látek zvětšuje fyzikální adhezi také drsnost povrchu. Největší problém se smáčivostí u kompozitů nastává v případě použití termoplastických matric, které mají vysokou viskozitu. Rovněž u kompozitů s termosetickou matricí je fyzikální adheze důležitým prvkem, neboť většina operací s těmito kompozity, například ve formě prepregů, probíhá ve fázi, kdy je pryskyřice v nevytvrzeném (kapalném) stavu a její vazby s vlákny jsou až do vytvrzení závislé právě na fyzikální adhezi, přičemž dobrá smáčivost zajišťuje vznik chemických vazeb při vytvrzení v celém objemu kompozitu. [4][7]



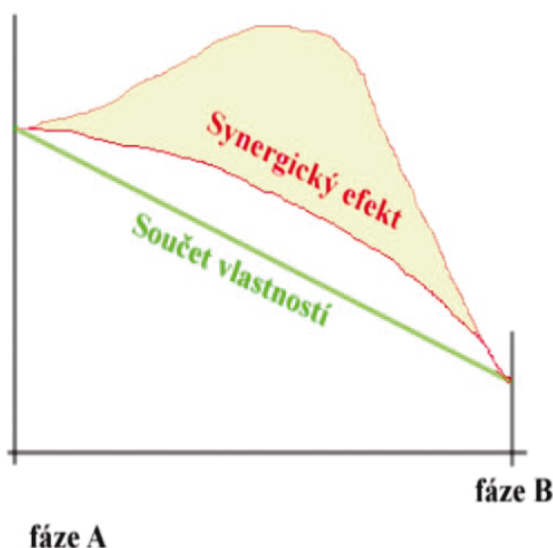
Obrázek 3 Základní schéma smáčivosti. S – pevná látka, L – kapalná látka G – okolní plynné prostředí [4]

- **Chemická adheze** zajišťuje největší adhezní síly. Vzniká pouze tam, kde může na rozhraní matrice-disperze dojít ke vzniku chemických vazeb. Chemické vazby mohou působit na vzdálenost 0,1 až 0,3 mm. Jejich teoretická pevnost je 7 až 70 GPa. K chemické adhezi může dojít přímo chemickou reakcí, kdy na rozhraní vzniká mezivrstva chemické sloučeniny, nebo také vzájemnou difuzí, kdy na rozhraní vzniká difuzní mezivrstva s velmi silnou adhezí. Nevýhodou této vazby je to, že při silné difuzi do matrice nebo chemické reakci může dojít ke znatelnému úbytku disperze. V takových případech se mezi matricí a disperzi často aplikuje mezivrstva, která působí jako difuzní bariéra. V praxi se k vytvoření chemických vazeb mezi matricí a výztuží většinou pomáhá, například chemicky neaktivní vlákna z ultra vysoko hustotního polyethylenu jsou před spojením s matricí vystaveny účinkům plazmy, která na povrchu vláken vytvoří aktivní radikály, které způsobí, že se povrch

vláken chemicky aktivizuje. Působení plazmy zaktivizuje povrch vláken i z dalších materiálů, například uhlíkových vláken. Za stejným účelem se na podobném principu pro různá vlákna používají také různé typy lubrikací. [4][6]

1.1.3 Synergický efekt

O synergickém efektu mluvíme tehdy, když vlastnosti kompozitního materiálu převyšují poměrný součet vlastností jeho základních materiálů. Základní materiály kompozitu by měly být navrženy tak, aby jejich synergický efekt byl co největší. Synergický efekt můžeme pozorovat u většiny kompozitních materiálů.



Obrázek 4 Synergický efekt

1.2 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály představují velice širokou škálu materiálů, které lze rozdělit z mnoha různých hledisek. Jedno z nejhlavnějších hledisek představuje fáze disperzní složky. To může být buď plynné, kapalně, nebo pevné. V tomto textu se omezíme pouze na kompozity s pevnou fází disperzní složky (kompozity prvního druhu), které jsou v technické praxi nejdůležitější. Tyto kompozity lze dále rozdělit podle tvaru disperze, případně podle materiálů výztuže a matrice. [4]

1.2.1 Rozdělení kompozitů podle materiálu matrice

- **Kompozity s keramickou maticí (CMCs)** mívají většinou keramickou také Výztuž. Keramickou maticí lze však kombinovat také s kovovými či polymerními vlákny. Nejčastějšími materiály výztuže těchto kompozitů jsou uhlíková vlákna,

nitrid křemíku (SiN), oxid hlinitý (Al_2O_3) a vlákna z karbidu křemíku (SiC). Primárním cílem výroby keramických kompozitů je snížení křehkosti keramiky. Tyto kompozity jsou používány tam, kde se vyžaduje vysoká pevnost a tepelná odolnost materiálu; například spalovací komory motorů. V současné době se jedná o jeden z nejslibnějších materiálů z hlediska výzkumu pro konstrukci teplotně namáhaných součástí v aerospace. [8][9]

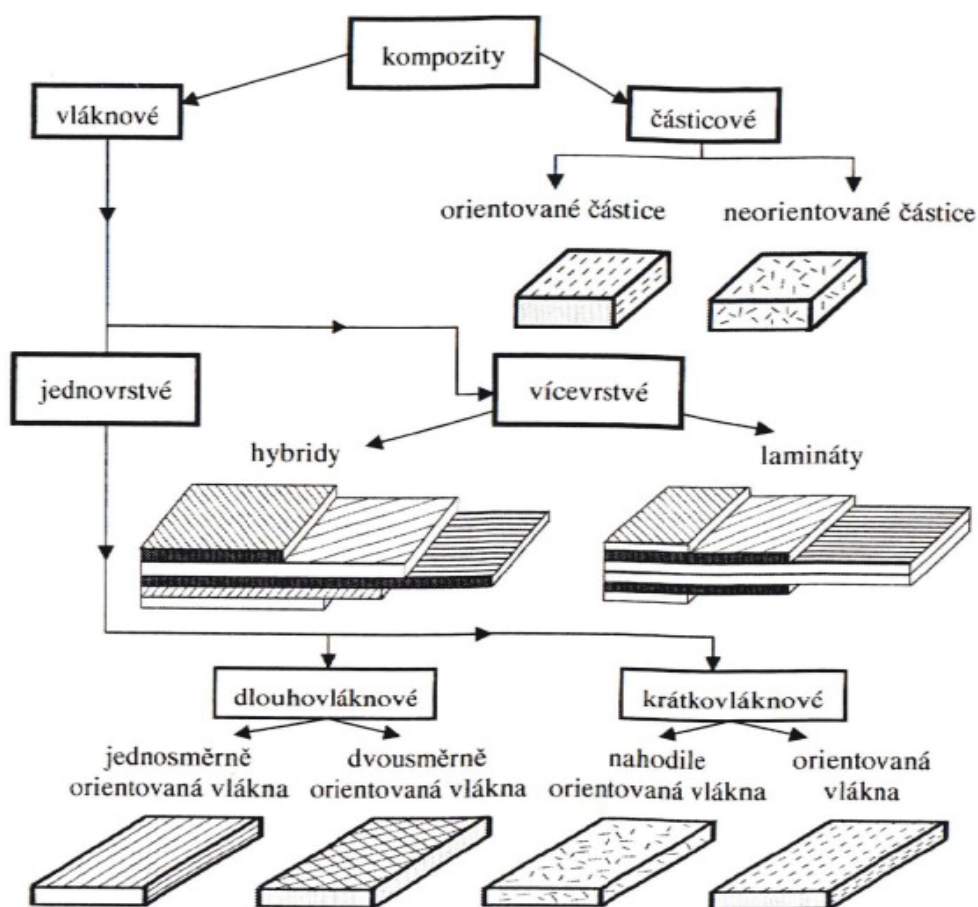
- **Kompozity s kovovou maticí (MMCs)** představují kovové materiály, nejčastěji hliník a titan, které mohou být vyztuženy keramikou (oxidy a karbidy), nebo jinými kovy s lepšími vlastnostmi (wolfram, molybden). Takovéto materiály mají výbornou pevnost vzhledem k hmotnosti, zvýšenou tuhost, odolnost proti opotřebení a také delší životnost. [8]
- **Kompozity s polymerní maticí (PMCs)** nabízejí spoustu zajímavých vlastností. Jedná se zejména o vysokou pevnost a nízkou hmotnost, odolnost proti povětrnostním vlivům, odolnost proti záření apod. Tyto vlastnosti jsou v kombinaci s nízkou cenou atraktivní v mnoha odvětvích průmyslu, zejména v automobilovém a leteckém. Kompozity s polymerní maticí můžeme dále rozdělit na kompozity s termosetickou maticí a termoplastickou maticí. Termosetická matrice je vytvrzena chemicky a po vytvrzení vytvoří mezi molekulami materiálu hustou chemickou síť. Po zahřátí se neroztaví. Naproti tomu termoplastická matrice je tvořena lineárními polymerními řetězci, které jsou spojeny pouze fyzikálními vazbami. To znamená, že při zahřátí se polymer roztaví. Rozdíly v těchto materiálech mají zásadní vliv na technologii výroby a aplikaci výsledného kompozitu. [8]

1.2.2 Rozdělení podle tvaru disperze

- **Částicové kompozity** mají tvar disperze je definován jako tvar, jehož rozměry jsou ve všech směrech řádově stejné – podle materiálu disperze to mohou být například koule, elipsoidy, vločky atd. Disperze se podílí na přenosu namáhání pouze v omezeném měřítku. Hlavní význam disperze je zlepšení mechanických vlastností materiálů, např. úprava elektrické a tepelné vodivosti, zvýšení odolnosti proti opotřebení a snížení koeficientu tření. Částice v matici mají náhodnou orientaci, nebo jsou orientovány z důvodu dosažení požadovaných mechanických vlastností v určitém směru, většinou však částicové kompozity mívají izotropní vlastnosti.

Typickým částicovým kompozitem je například beton (směs písku s cementem jako matrice, šterk jako disperze).

- **Vláknové kompozity** jsou vyztuženy vlákny, která mají délkové rozměry podstatně větší než průřezové. Mechanické vlastnosti těchto kompozitů silně závisí na vlastnostech vláken a přenosu sil mezi vlákny a matricí. Vláknové kompozity mívají často silnou anizotropii vlastností. Dále můžeme vláknové kompozity dělit na kompozity s krátkými vlákny a na kompozity s dlouhými vlákny. Kompozity s krátkými vlákny mohou mít vlákna nahodile uspořádaná (např. při vstřikování, kdy se vlákna používají pro zlepšení mechanických vlastností výstřiku), nebo orientována v jednom směru. Kompozity s dlouhými vlákny pak mívají vlákna orientována, a to buď v jednom, nebo ve dvou na sebe kolmých směrech. Kompozity vyztužené dlouhými orientovanými vlákny najdeme v praxi nejčastěji jako plošné objekty, které se při výrobě dílů vrství na sebe a vznikají vícevrstvé kompozity, ty se dále dělí na lamináty a hybridy.[10] [11]



Obrázek 5 Rozdělení kompozitů podle tvaru disperze [11]

1.3 Výhody vláken jako konstrukčního prvku

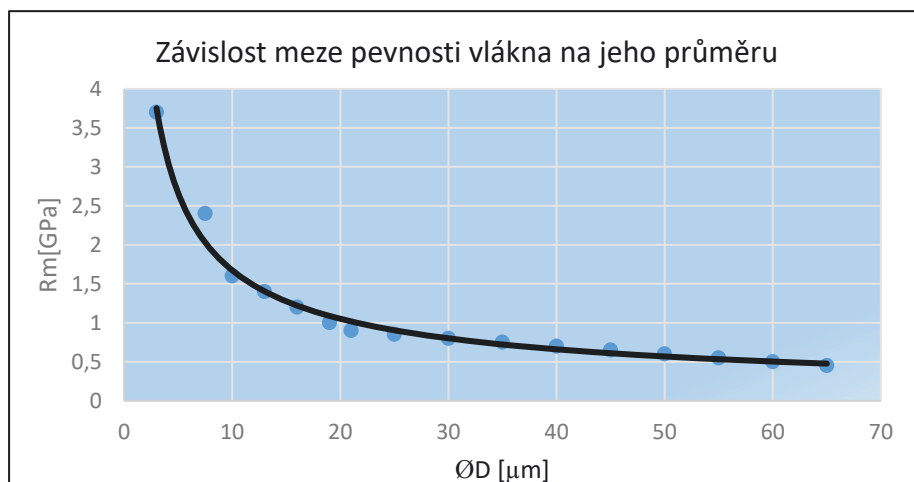
Výroba a zpracování vláken je náročný a poměrně drahý proces. Aby se jejich výroba vyplatila, musí mít vlákna sama o sobě vlastnosti, které jsou u kompaktních materiálů, ze kterých jsou vlákna vyrobena, nedosažitelné.

Nejdříve je nutné poznamenat, že některé materiály, zvláště pak materiály polymerní, mají výrazně nižší experimentálně naměřenou pevnost než pevnost teoretickou. To samé platí v případě modulu pružnosti v tahu. V případě vláken je však experimentálně naměřená hodnota modulu pružnosti i pevnosti v tahu mnohem příznivější. [11]

Tabulka 1 Teoretické a experimentálně naměřené mechanické hodnoty vybraných materiálů [11]

Materiál	E-modul (MPa)			mez pevnosti v tahu (Mpa)		
	teoretický	naměřený		teoretická	naměřená	
		vlákno	kompaktní hmota		vlákno	kompaktní hmota
Polyetylen	300 000	100 000 (33 %)	1 000 (0,33 %)	27 000	1 500 (5,5 %)	30 (0,1 %)
Polypropylen	50 000	20 000 (40 %)	1 600 (3,2%)	16 000	1 300 (8,1 %)	38 (0,24 %)
Polyamid	160 000	5 000 (3 %)	2 000 (1,3 %)	27 000	1 700 (6,3 %)	50 (0,18 %)
Sklo	80 000	80 000 (100 %)	70 000 (87,5 %)	11 000	4000 (36 %)	55 (0,5 %)
Ocel	210 000	210 000 (100 %)	210 000 (100 %)	21 000	4 000 (19 %)	1 400 (6,67 %)
Hliník	76 000	76 000 (100%)	77 000 (100%)	7 600	800 (10,5 %)	600 (7,89 %)

Další experimentálně naměřené hodnoty pevnosti vláken ukazují, že mez pevnosti v tahu silně závisí na průměru vláken. Čím je průměr vlákna menší, tím je jeho pevnost větší.



Graf 1 Vliv průměru skelného vlákna na jeho pevnost [11]

Tento fenomén lze vysvětlit tím, že výskyt poruch struktury vlákna a jejich vliv je o to menší, o co menší je průměr vlákna. Podobný vliv na pevnost vlákna má také délka zatížení vlákna. Čím větší je zatěžovaná délka, tím nižší je pevnost vlákna. Výhodou kompozitů je, že rovnoměrným uložení vláken v matrici se délka jejich zatížení blíží k nule, dochází k rozložení napětí, místní poruchy se mohou méně projevit a pevnost vláken je tak lépe využita. [11]

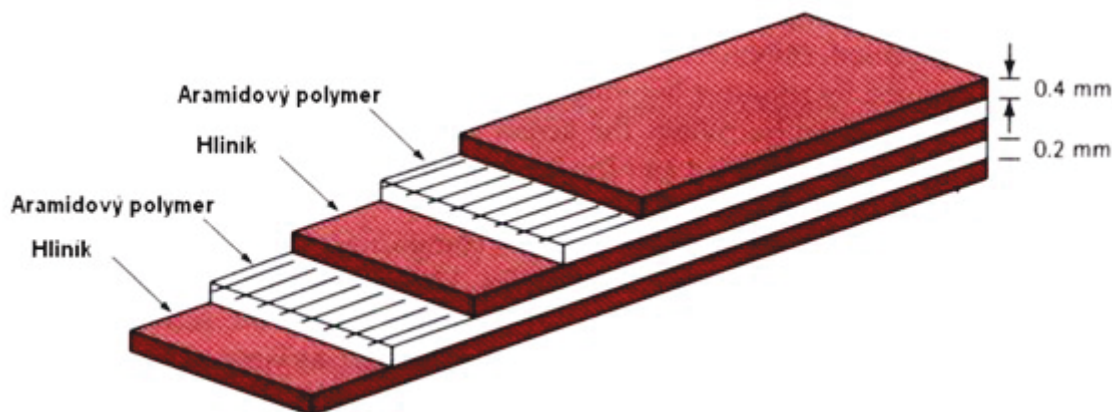
Výše uvedená fakta jsou důvodem, proč jsou vláknové kompozity tak rozšířeny, vlákna mají mnohem lepší mechanické vlastnosti než kompaktní materiál, ze kterého jsou vyrobeny. Uložení vláken do matrice jsou navíc mechanické vlastnosti vláken využity ještě lépe.

2 VRSTVENÉ KOMPOZITY

Vrstvené kompozity představují plošné objekty, složené z několika jednotlivých, rozlišitelných vrstev kompozitu s dlouhými, orientovanými vlákny. Jedna vrstva kompozitu se nazývá lamina. Jednotlivé vrstvy mohou mít různou orientaci vláken – dojde ke zvýšení stupně izotropie. Vrstvený kompozit může být navržen tak, aby odpovídal napětíovému poli, to v praxi znamená, že se ve směru a místě kde dochází k největšímu napětí uloží nejvíce vrstev s vlákny rovnoběžnými se směrem napětí. Tato možnost „dimenzování na míru“ má za následek značné snížení hmotnosti konstrukce, jelikož v místech, kde je napětí minimální, stačí použít menší počet vrstev a nenastává plýtvání materiálu. Nevýhodou je však skutečnost, že konstrukční díly z vrstvených kompozitů vyžadují vysoké náklady na vývoj a nutnost řešení speciálních problémů z hlediska vyrobitelnosti a ochrany životního prostředí. Z hlediska definice můžeme vrstvené kompozity rozdělit do dvou skupin:

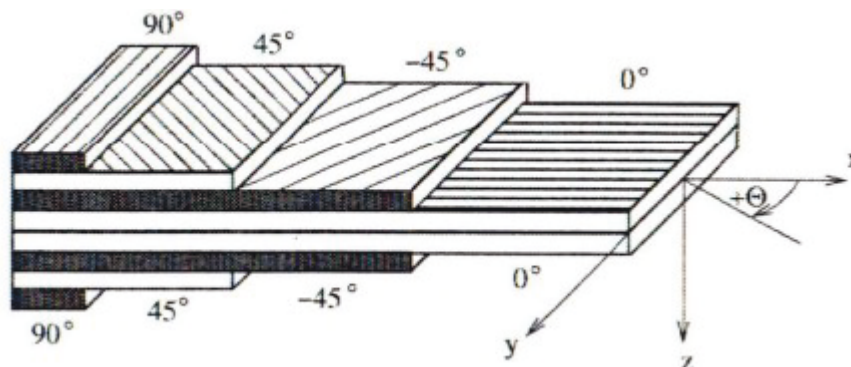
Lamináty jsou vrstvené kompozity, jejichž struktura je tvořena několika základními, různě orientovanými vrstvami. Jednotlivé vrstvy laminátu jsou ze stejného materiálu. Uložení vrstev z hlediska orientace vláken by pak mělo být symetrické ke střední ploše stěny.

Hybridy jsou rovněž tvořeny několika základními vrstvami, ovšem materiály vrstev se mohou lišit. Takovým způsobem lze kombinovat velké množství materiálů, v praxi lze však kombinovat pouze vrstvy s materiály, které mají dobrou adhezi. Příkladem může být kompozit složený z vrstev hliníku a aramidového polymeru. [10][11]



Obrázek 6 Struktura aramid – hliníkového hybridního kompozitu (Arral)

Úhel orientace vláken ve vrstveném kompozitu se zapisuje číselným kódem, v němž je zapsáno znaménko a úhel pootočení směru vláken dané vrstvy od zvoleného referenčního směru.



Obrázek 7 Označení orientace vrstev kompozitu [10]

2.1 Kompozice vláken výztužného systému

Vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Vlákna jsou ze zpracovatelských důvodů před použitím většinou zpracována na polotovary, které se dělí podle uspořádání vláken. Základní polotovary zhotovené z vláken jsou:

- **Příze** se vyrábí spřádáním vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky.
- **Nitě** se vyrábí jedno nebo víceřadově, skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny. Zpracovávají se dále podobně jako příze.
- **Pramenec** se skládá se ze sdružených, rovnoběžně uložených, nestočených vláken, nebo vláken tažených přímo z taveniny (skelná vlákna). Zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.
- **Jednosměrné pásy** jsou vyrobeny z jedné nebo více rovnoběžně uložených vrstev přímých, nezvlňených netkaných vláken, které jsou spojeny příčnou tenkou vrstvou lepicí rohože.

Tyto základní polotovary se dále používají na výrobu vyšších celků.

2.1.1 Pleteniny

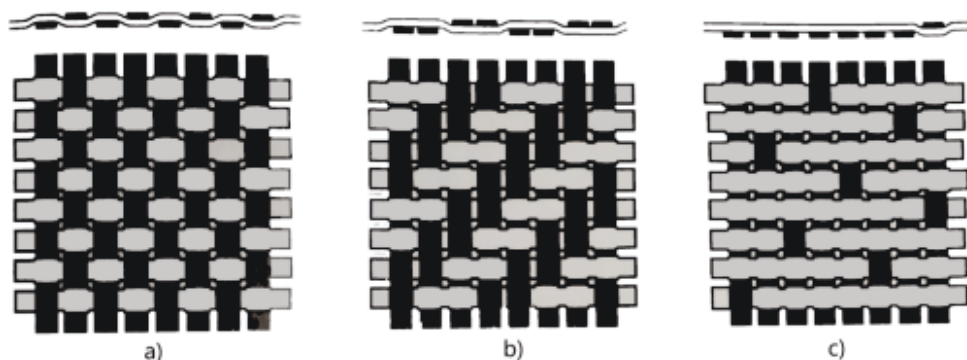
Pleteniny představují typ vyztužení, které může být přizpůsobeno tvaru a způsobu namáhání konstrukčních prvků formou předtvarovaných a bezpořezových výztuží prosycených pryskyřicí. Umožňují zabudování jednosměrných pásů v různých směrech.

Jejich použitím může být zajištěn plynulý přechod měnícího se průřezu, vyztužení v různých rovinách a uložení vláken odpovídající směru zatížení. Vzhledem k cíleně orientovaným spleteným vláknům je jejich pevnost a tuhost velmi vysoká.

2.1.2 Tkaniny

Tkaniny jsou plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech. Zvýšením poměru vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. Hmotnost vláken lze měnit v obou směrech až v poměru 1:20, čímž vznikají kvazijednosměrné tkaniny. Mezi základní vazby tkanin patří vazba plátňová, keprová a atlasová.

- **Plátňová vazba** je nejjednodušší vazba, která se vyznačuje vysokou pevností, ale je hůře tvarovatelná. Vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému ořepu při řezání se dobře zpracovává. Tato tkanina je nejrozšířenější, používá se ve většině laminovaných dílech. Jedinou nevýhodou je, že se nedá použít na tvarově složitější součásti. Tkaniny s touto vazbou jsou tkány tak, aby prameny útky procházely pokaždé pod a nad prameny osnovy.
- **Keprová vazba** tvoří tkaninu, která je oproti tkanině s plátňovou vazbou ohebnější, a dá se proto používat pro tvarově složitější díly. Zároveň dosahuje dobrých mechanických vlastností. Tkanina s keprovou vazbou je tkána tak, že prameny útky prochází vždy nad a pod dvěma prameny osnovy a vlákna jsou tedy méně vychýlena. Pro strukturu keprové vazby je charakteristický diagonální vzor.
- **Atlasová (saténová) vazba** má menší vychýlení vláken než keprová vazba a velmi dobrou řasitelnost. Tato vazba je vhodná pro tvarově složitější prvky. Pomocí tkanin s atlasovou vazbou lze navíc dosáhnout velmi hladký povrch. [11]



Obrázek 8 Druhy tkaninových vazeb – a) plátňová, b) keprová, c) atlasová vazba [11]

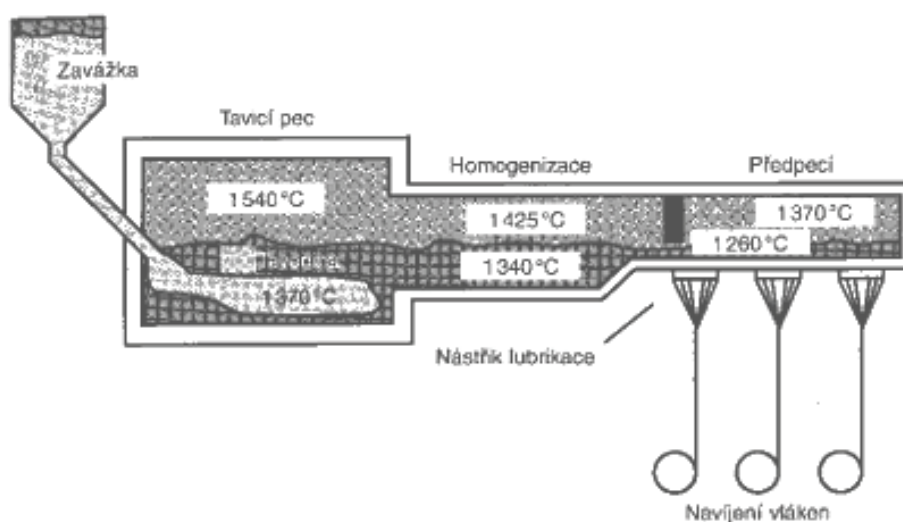
2.2 Vybrané druhy vláknových materiálů

Pro vyztužení vrstvených kompozitů se používá celá řada vláknových materiálů. Základním požadavkem na vyztužující vlákna je vysoká pevnost a tuhost, dále by vlákna měla zajišťovat dobrou adhezi s matricí a neměla by se lámat. V praxi se nejčastěji můžeme setkat s vlákny skelnými, uhlíkovými a aramidovými. V poslední době se z důvodu zaměření společnosti na ekologii začínají prosazovat též vlákna přírodní.

2.2.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna mají pravidelný kruhový průřez, jsou tvořeny trojrozměrnou sklovitou sítí s atomy křemíku a kyslíku, mezi nimiž jsou silné kovalentní vazby. Tyto vazby jsou pak důsledkem relativně vysoké hodnoty pevnosti a modulu pružnosti. Na rozdíl od Uhlíkových a aramidových vláken jsou skelná vlákna na základě své amorfnní struktury izotropní. Dodací formou skelných vláken jsou příze, pramence, sekané pramence a krátká vlákna.

Základní surovinou pro výrobu skelných vláken je křemičitý písek, kaolin, dolomit, kyselina boritá aj. Tyto suroviny se nejdříve roztaví ve sklářské peci, čímž vznikne E-sklovina. Ta se pak několik dní čiří a dále se vede do vyhřívaných spřádacích trysek. Potom co tavenina skla projde tryskami materiál zatuhne a vlákna jsou dále dlužena na velmi rychle rotujícím navíjecím zařízení, kde se prodlužují až na 40 000násobnou délku. Sdružením těchto téměř neviditelných vláken vzniká ohebné spřádací vlákno. Za účelem ochrany citlivého povrchu vláken a spojení elementárních vláken do spřádacího vlákna se před navíjením nanáší lubrikace. [11]

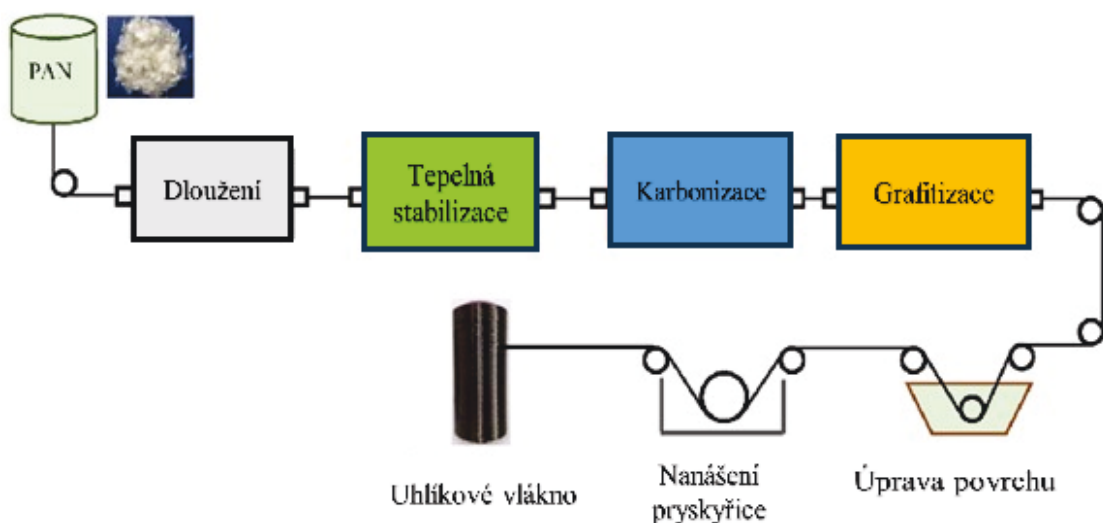


Obrázek 9 Výroba skelných vláken [11]

2.2.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna vynikají svou extrémní pevností. Jsou tvořena vrstvami grafitu, jejichž roviny jsou částečně nebo zcela rovnoběžné s osami vláken. Vlastnosti uhlíkového vlákna silně ovlivňují jak základní suroviny, ze kterých byla vlákna vyrobena, tak i procesní podmínky při zpracování. Nejčastější základní suroviny pro výrobu uhlíkových vláken jsou polyakrylonitril (PAN) a ropné smoly. Grafitové vrstvy uhlíkových vláken z ropné smoly jsou z principu výroby skvěle orientovány a propůjčují uhlíkovým vláknům velmi vysokou hodnotu E-modulu (až 700 000 MPa). Na druhou stranu mají nižší pevnost kvůli řidším vazbám mezi grafitovými rovinami (okolo 2 000 MPa)

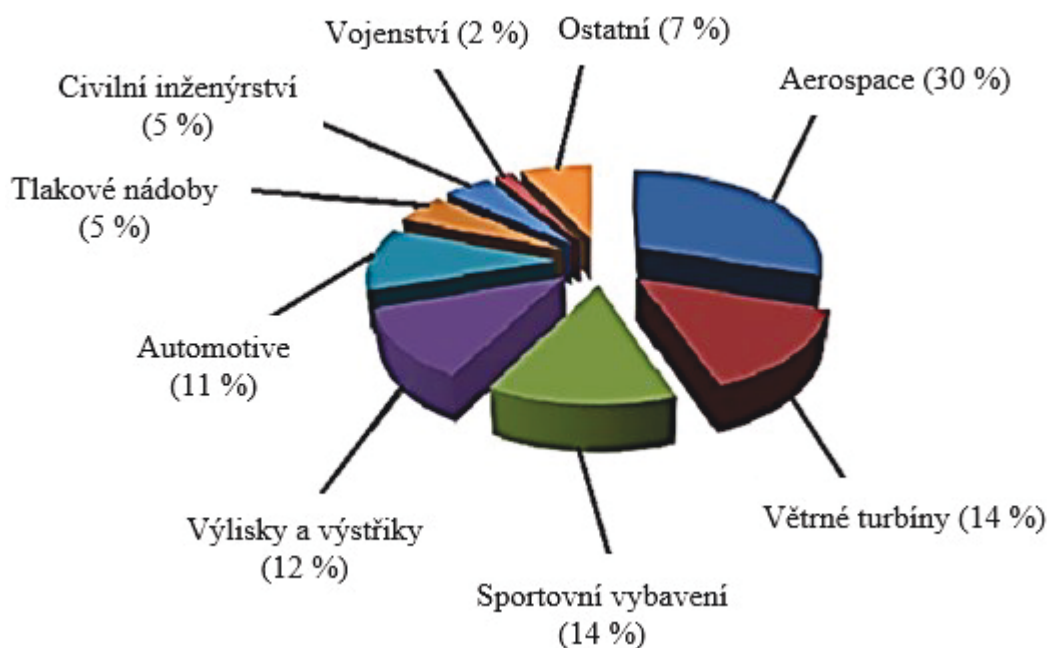
Polyakrylonitril je při výrobě uhlíkových vláken nejpoužívanější (asi 80 % produkce uhlíkových vláken). Tato vlákna mají standartní vlastnosti uhlíkových vláken; pevnost okolo 3 500 MPa a modul pružnosti okolo 230 000 MPa. Vlastnosti vláken z PAN však silně ovlivňují procesní podmínky výroby, kdy se určuje míra orientace grafitových vrstev a hustota a síla vazeb mezi vrstvami. [11][12]



Obrázek 10 Schéma výroby uhlíkového vlákna z PAN [12]

Při výrobě je Polyakrylonitril nejdříve dloužen pro orientaci molekul, míra dloužení základního polymeru ovlivňuje rovněž orientaci výsledné struktury. Následuje tepelná stabilizace při teplotách 200–300 °C. Následuje karbonizace v inertní atmosféře při teplotách do 1600 °C a grafitizace při teplotách 2500–3000°C. Po následné úpravě povrchu a nanesení pryskyřice jsou uhlíková vlákna navíjena do cívky a dále zpracována.

Využití nacházejí uhlíková vlákna pro svoji vynikající mechanické vlastnosti v letectví, automotive, větrných turbínách a podobně. Jejich nevýhodou je vysoká cena, která je způsobena značně komplikovaným způsobem výroby. Další omezení z hlediska použití je, že při kontaktu s kovy tvoří galvanický člunek, při kterém koroduje kov. Kompozit s uhlíkovými vlákny proto musí být s kovovými materiály oddělen nevodivým materiálem. [11] [12]



Obrázek 11 Oblast využití uhlíkových vláken za rok 2020 [12]

2.2.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Pro aromatický polyamid je typické pravidelné uspořádání fenylenových jader a aramidových skupin. Molekuly jsou navzájem spojeny vazbami vodíkových můstků. Tato struktura propůjčuje řetězcům vysokou tuhost a současně způsobuje orientované uspořádání. Mezi výhody aramidových vláken patří vysoká měrná pevnost v tahu a nízká hustota. Nevýhodou je potom fakt, že aramidová vlákna jsou hydrofilní, takže před použitím musí být vysušena. Další nevýhodou je pokles pevnosti při UV záření, nízká teplotní odolnost a obtížná obrobiteľnosť. Aramidová vlákna našla uplatnění při výrobě vojenského vybavení (neprůstřelné vesty), sportovní pomůcky (přilby, chrániče), ale také v automotive či železničním průmyslu. [11] [13]

2.2.4 Přírodní vlákna

V poslední době se při volbě materiálu čím dál více projevuje snaha o ekologičnost. V případě kompozitů tomu není jinak a za tímto účelem se v dnešní době rozšiřuje výzkum vláken na přírodní bázi. Základní stavební složku přírodních vláken pro vyztužování plastů tvoří celulóza, patří mezi ně len, konopí, juta, ramie a bavlna. Předmětem výzkumu dnešní doby je pak šlechtění těchto rostlin tak, aby jejich vlákna měly vyšší pevnost a lepší adhezi s polymerní matricí. Přírodní vlákna jsou vzhledem k nízké měrné hmotnosti zajímavou surovinou pro lehké konstrukce, dále mezi jejich výhody patří malá abrazivita při mechanickém zpracování a snadná recyklace. Mezi nevýhody patří citlivost na působení vlhkosti, omezená délka vláken a též omezená možnost volby matrice vzhledem k rozkladu při vysoké teplotě během zpracování (odolnost do 200 °C). [11][14]



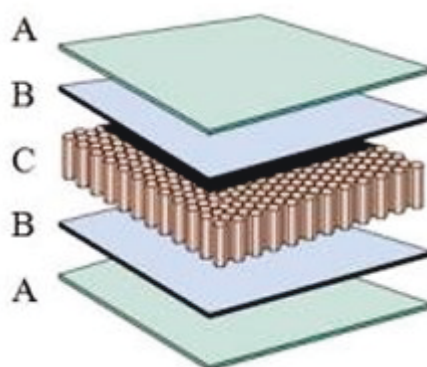
Obrázek 12 Vlákna z rýžové slámy zalitá v pryskyřici [14]

2.3 Termosetická matrice

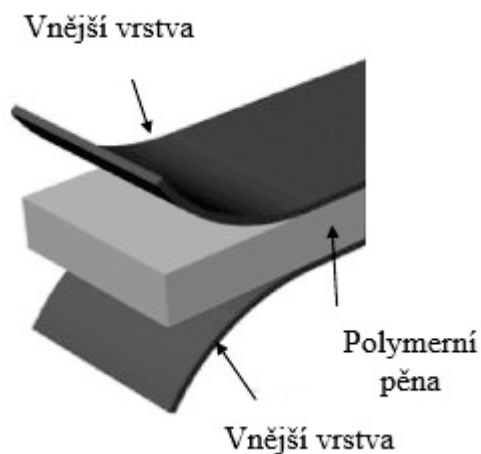
Termosetické matrice mají při výrobě vrstvených kompozitů zdaleka největší uplatnění. Jejich výhodou je fakt, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a při pokojové teplotě mají nízkou viskozitu, takže se snadno zpracovávají. Vytvrzují polyadící, nebo polymerací bez štěpení těkavých složek přidavkem katalyzátoru a urychlovače, v praxi však nejčastěji dodáním energie (teplo, záření) – tak získá kompozit své konečné vlastnosti. Po vytvrzení dosahují termosetické matrice vysokých hodnot pevnosti a tuhosti, ale jsou často křehké a jejich tažnost se pohybuje v řádu procent. Mezi jejich výhody dále patří, že na rozdíl od termoplastických matric neztrácí své vlastnosti vlivem tepla – vytvrzením vznikne v matrici trojrozměrná chemická síť. [11]

2.4 Sendvičové struktury

Zvláštním typem vrstvených kompozitů jsou sendvičové struktury. Sendvičové struktury jsou typicky složeny z několika tenkých vrstev laminátu a mnohem tlustějšího nízkohmotnostního jádra. Nosné vrstvy laminátu jsou s jádrem sendviče obvykle spojeny syntetickými lepidly na bázi fenol formaldehydových a epoxydových pryskyřic. Jako jádra se uplatňují především lehčené PVC, PUR, PS, korky, či voštiny, nejčastěji s hexagonální strukturou. Tyto struktury se obecně vyznačují vynikajícími mechanickými vlastnostmi při velmi nízké hmotnosti. Největší výhodou oproti běžným laminátům je pak značná ohybová tuhost. Mezi další výhody patří také výborné izolační vlastnosti. Nevýhodou sendvičových kompozitů je naopak značná smyková poddajnost, jelikož v podstatě celou smykovou sílu přebírá jádro s obecně nízkým smykovým modulem pružnosti. Sendvičové struktury nacházejí čím dál větší uplatnění v leteckém, stavebním, automobilovém a lodním průmyslu. [15][16]



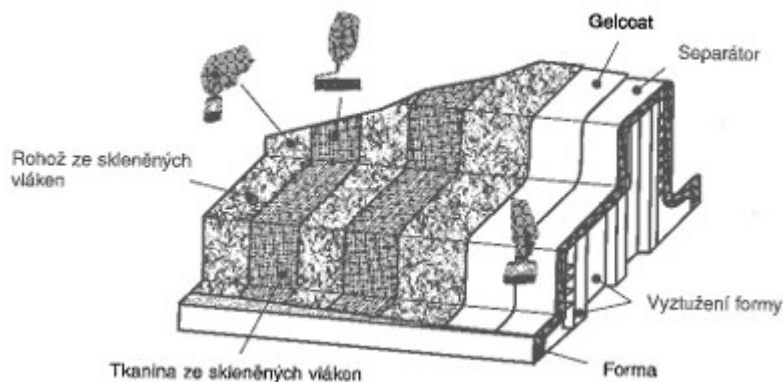
Obrázek 13 sendvičový kompozit s voštinou A) vnější vrstva, B) adhezni vrstva, C) jádro



Obrázek 14 Sendvičový kompozit s polymerní pěnou [15]

2.5 Výroba vrstvených kompozitů

Výroba vrstvených kompozitů představuje sled operací, které vedou ke spojení matrice a výztuže v jeden celek. Přičemž tento celek odpovídá požadovanému tvaru součásti a má všechny požadované vlastnosti. Je zřejmé, že každý kompozitní materiál má svoji specifickou technologii výroby, v tomto textu se proto omezíme na popis výroby vrstvených kompozitů s termosetickou matricí. Mezi základní operace, které obecně vedou k úspěšnému vytvoření kompozitního dílu patří příprava jednotlivých vrstev výztuže (řezání, stříhání). Následuje příprava formy (odmaštění, nanesení separátoru). Jakmile je forma připravena, je nanesen gelcoat (vrstva pryskyřice, která zabraňuje proniknutí výztuže na povrch a po vytvrzení slouží k vizuální úpravě výrobku). Následuje ukládání vrstev výztuže s prosycováním pryskyřice. Za tímto účelem se v průběhu času vyvinulo mnoho postupů, obecně však platí, že při ukládání vrstev do pryskyřice je nutné zamezit vzniku vzduchových bublin, které se mohou v laminátu projevit jako mikrovruby vedoucí ke snížení mechanických vlastností. Jakmile jsou všechny vrstvy uloženy, forma se uzavře a nastává vytvrzování. [11][17]

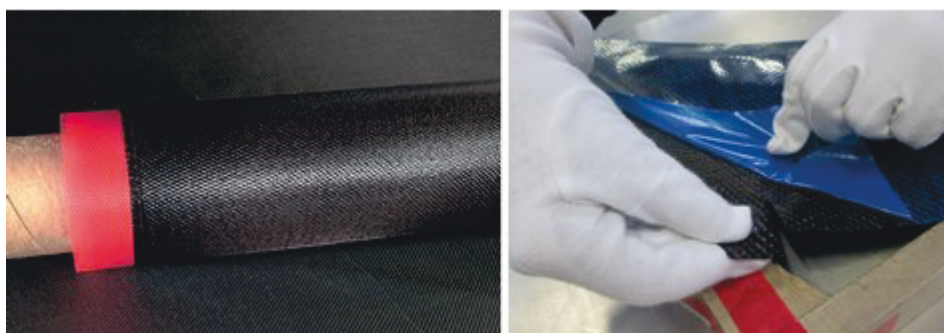


Obrázek 15 Postup ručního kladení [11]

Jak je patrné z předešlého odstavce, výroba kompozitních dílů je poměrně časově náročný proces. I když největší porci času při výrobě kompozitu vyžaduje vytvrzování, rovněž kladení vrstev je značně zdlouhavé. Kladení vrstev výztuže s postupným prosycováním pryskyřicí navíc vyžaduje proškolený a pečlivý personál. V praxi se též ukázal problém s opakovatelností výroby, jelikož postupné prosycování je z velké části ruční práce. Všechny uvedené problémy však částečně řeší použití prepregů, které s sebou nese značné ulehčení procesu kladení vrstev.[11][17]

2.6 Prepregy

Prepregy jsou polotovary skládající se z vysoce viskózní matrice a kontinuálních výztužných vláken. Použití prepregů má tu výhodu, že je oddělen složitý proces prosycování výztuže od dalšího zpracování. Tento postup se provádí za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek na speciálním zařízení. Konstrukce výztuže prepregu může být ve formě tkanin nebo rohoží. Výhodou prepregů je rovněž přesně definovaný objemový poměr obsahu matrice, který se obvykle udává s přesností $\pm 2,5$ %. Běžnou volbou kombinace plošné hmotnosti výztuže a matrice je cca 60 % hmotnosti výztuže, v mnoha případech se matrice během vytvrzování ztrácí, a proto je její obsah často upraven na vyšší hodnotu. Prepregy se dodávají v podobě navinutých rolí či kotoučů. Vrstvy prepregu jsou z obou stran opatřené fólií, aby během navíjení nedošlo k vzájemnému spojení vrstev a postupné degradaci pojiva.[11][18]



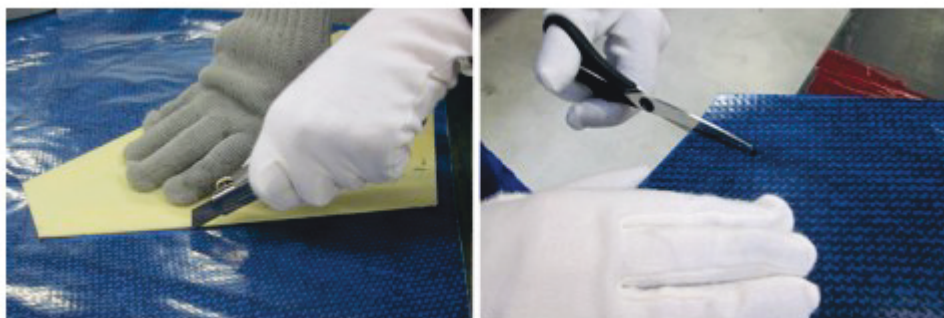
Obrázek 16 Prepregové polotovary [18]

Prepregy mohou být impregnovány buď termoplastickou, nebo termosetickou matricí. V praxi se mnohem častěji využívá matrice termosetická, neboť prepregy s termoplastickou matricí se musí před dalším zpracováním zahřát, což znesnadňuje manipulaci a tím i další použití. Prepregy s termosetickou matricí se naopak musí udržovat v chladu alespoň -20 °C, aby nedošlo k samovolnému síťování pryskyřice.

Vývoj prepregů měl značný vliv na rozmach vrstvených kompozitů, jelikož výrazně zjednodušil výrobu. Dnes jsou tyto materiály celosvětově rozšířené a používají se k výrobě kompozitních dílů například v leteckém, automobilovém a lodním průmyslu, výrobě vysokorychlostních vlaků a v mnoha dalších aplikacích.[18]

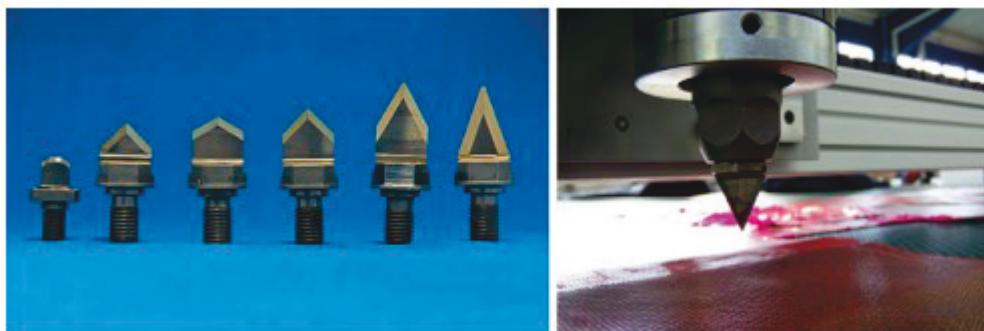
2.6.1 Řezání prepregů

Řezání prepregů slouží k vytvarování jednotlivých vrstev z velkoplošných polotovarů. Při řezání nesmí dojít k oddělení ochranných vrstev od prepregu. Řezání může probíhat manuálně nebo na stroji. K manuálnímu řezání prepregů se používá ocelový nůž nebo nůžky. K dosažení přesně vedených řezů se používají ocelová pravítka nebo šablony. Ruční řezání se používá především pro geometricky jednoduché tvary nebo malosériovou výrobu. Kvalita a přesnost nástřihu je závislá na zručnosti a zkušenostech pracovníků.[18]



Obrázek 17 Ruční tvarování prepregových vrstev

Pro tvarově složité díly a hromadnou výrobu se uplatňuje řezání na CNC strojích, součástí CNC strojů na řezání prepregů jsou speciální stoly, jejichž pracovní plocha je vybavena plstí či štětinami, což umožňuje řeznému nástroji lehce proniknout do řezné plochy. Nástrojem jsou pak jehlanové nože, tyto nástroje bývají vybaveny ultrazvukovým kmitáním, které zabraňuje přilepení břitu k předimpregnovanému materiálu.[18]



Obrázek 18 Nástroje pro CNC řezání prepregů

2.6.2 Vrstvení prepregů

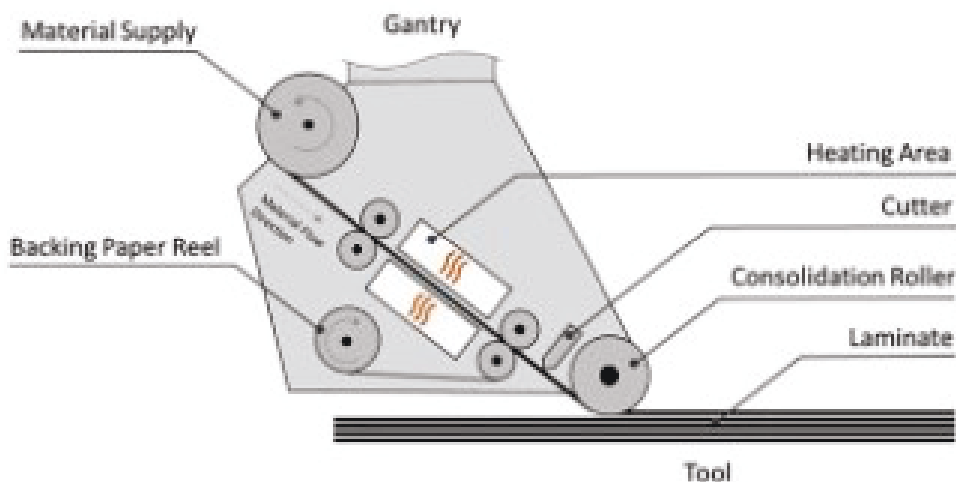
Vrstvení prepregu je operace, při které se jednotlivé vrstvy prepregu ukládají do tvarových vložek formy. Při ukládání se forma nejdříve vybaví separátorem, který zajistí snadné vytažení vytvrzeného dílu z formy a odtrhovou fólií, která zabraňuje šíření nečistot

formy na povrch součásti. Následně se z prepregu sejme ochranná fólie. Prepreg se poté může nahřát na teplotu okolo 60 °C, aby se nelepil. Poté se vrstva prepregu uloží do formy a začne se pomocí válečku tvarovat tak, aby doléhala do všech míst ve formě. Tato operace se provádí manuálně nebo na stroji, v obou případech je však nutné zajistit, aby mezi jednotlivými vrstvami prepregu nevznikaly vzduchové bubliny, které mohou vést k defektům výrobku.[11][18]



Obrázek 19 Ruční formování prepregu [18]

Strojní ukládání prepregů je poměrně komplexní proces, při kterém probíhá jak ukládání vrstvy, tak její stříhání v požadovaných místech. Pracovním prvkem stroje je robotické rameno opatřeno kladecí hlavou, která je vybavena tvarovacím válečkem, ohříváčem, řezacím ústrojím a kladkami, přes které je do hlavy ze zásobníku veden materiál. Použití strojního ukládání je omezeno pro tvarově jednoduché součásti, ovšem umožňuje velké zefektivnění výroby. [19]



Obrázek 20 Kladecí hlava [19]

Speciální technologií k vrstvení prepregů je **navíjení**, kterým se vyrábí dutá tělesa symetrická k ose otáčení. Jedná se například o nádrže, tlakové zásobníky, ale také trysky raketových motorů atd. Navíjení je technologií s vysokou přesností a dobrou reprodukovatelností. Při navíjení se otáčí trn, kolem nějž se axiálně pohybuje support se zásobníkem prepregu. Navíjecí trn bývá vybaven segmenty, které umožňují snadné vyjmutí trnu z dutiny součásti.[18][19]



Obrázek 21 Laminátový Trup letadla vyrobený navíjením [18]

2.6.3 Vytvrzování prepregů

Jakmile je materiál ve formě bezpečně uložen, nastává vytvrzování prepregů, během něž se z viskózní matrice stává tvrdý materiál, který zajistí stálý tvar součásti. Vytvrzování probíhá za působení tepla a tlaku. Důležitým faktorem vytvrzování je vytvrzovací teplota a doba vytvrzování. Tyto parametry jsou závislé na typu použité pryskyřice a určují se experimentálně například metodou DSC (diferenciální snímací kalorimetrie). Nedostatečné vytvrzení negativně ovlivňuje téměř všechny vlastnosti kompozitní součásti. Vytvrzování prepregu může být realizováno mnoha metodami, mezi nejznámější patří vytvrzování v autoklávu, v lisu či v mikrovlnné peci.[11][18]

Vytvrzování v autoklávu se používá pro vytvrzování tvarově složitých či rozměrných součástí. Při této technologii se používá pouze jednodílná forma, zabalená do vaku. Z vaku je následně odsát vzduch (zavakuování dílu) a jednotlivé vrstvy laminátu jsou k sobě i k formě přitlačovány atmosférickým tlakem. Následně se autokláv ohřeje na požadovanou

teplotu a nastává vytvrzování. V autoklávu dále dochází k vyvození přetlaku, který vrstvy laminátu přitlačuje ještě více a zaručuje minimální obsah pryskyřice. Tato technologie vede k vytvoření nejvyšších kompozitních dílů, ovšem je energeticky, a tedy i finančně náročná. Po vytvrzení je nutné zajistit pomalé chladnutí součásti, aby mohla relaxovat vnitřní pnutí v laminátu, vzniklá rozdílnou tepelnou roztažností složek kompozitu i různou orientací vrstev.[18]



Obrázek 22 Autokláv [18]

Vytvrzování v lisu probíhá ve dvojdielné kovové formě – tvárníku a tvárnici, přičemž na materiál působí teplota i tlak. Výhodou lisování je, že dochází k přímému kontaktu laminátu s vyhřívanými částmi stroje, což má za následek rychlejší přestup tepla a tím pádem také rychlejší vytvrzovací cyklus než při použití autoklávu. nevýhodou jsou pak značné požadavky na kvalitu formy a s tím spojené počáteční náklady, lisování se proto používá pouze při sériových a hromadných výrobach. [18]

Vytvrzování v mikrovlnné peci je vhodné pouze pro materiály mající polární molekuly, z čehož plyne jisté omezení použitelnosti. Používá se jednodílná forma a speciální polyimidové vaky, jejichž použití je nutné z toho důvodu, že běžné odvědušňovací vaky mikrovlny absorbují. Princip odvědušňování je stejný jako v autoklávu, jediným rozdílem je zdroj tepla, který umožňuje lepší kontrolu teploty při menší spotřebě energie a zrychlení procesu vytvrzování. [18]

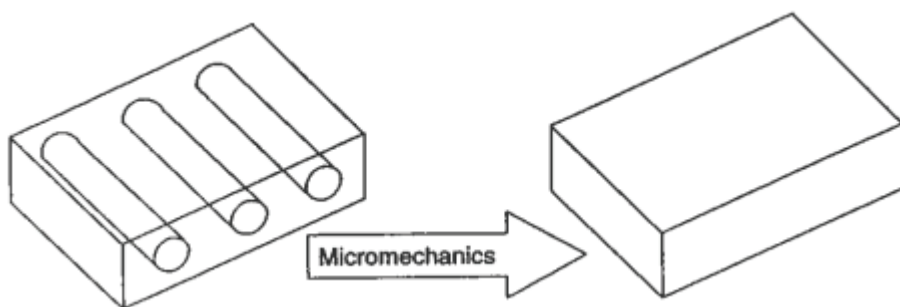
3 DIMENZOVÁNÍ PRVKŮ Z VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ

Základním rozdílem mezi dimenzováním prvků z vrstvených kompozitů a klasickými homogenními materiály je, že v případě vyztužených plastů je důležité správně navrhnout nejen vnější konstrukci, ale také vnitřní strukturu materiálu. Postup konstruování se tím stává mnohem komplikovanější, avšak umožňuje cíleně orientovat vlákna dle požadavků zatížení.

Vrstvené kompozity jsou nehomogenní materiál, složený z izotropní matrice a v ní uložených vysoce pevných a tuhých vláken. Jeho vlastnosti se lokálně skokově mění a napěťové pole v mikrostruktuře těchto materiálů je proto velmi komplikované. Při řešení problémů inženýrské praxe se tento problém zjednodušuje tak, že stěna kompozitu je považována za homogenní kontinuum a je charakterizována „zprůměrovanými“ makromechanickými, směrově závislými veličinami vyplývajícími ze způsobu uložení výztuže. Při stanovení těchto reprezentativních charakteristik se vychází z toho, že matrice i výztuž se chovají elasticky. [20][21]

3.1 Mikromechanika vláknově vyztuženého materiálu

Podíváme-li se na vláknově vyztužený materiál z mikromechanického pohledu, jedná se o heterogenní strukturu složenou z vyztužujících vláken a matrice. Použití mikromechanických výpočtů umožňuje „převést“ tuto heterogenní strukturu na strukturu homogenní na základě známých (naměřených) vlastností obou složek. Je však zřejmé, že tato operace je pouze jakýmsi zjednodušením jinak složitého mechanického chování kompozitních prvků. Mikromechanika kompozitů je poměrně náročnou disciplínou a časem byla vyvinuta řada složitých teoretických modelových postupů, pomocí kterých lze určit elastické konstanty základní jednosměrně vyztužené vrstvy jako homogenního anizotropního prvku. [20][21]



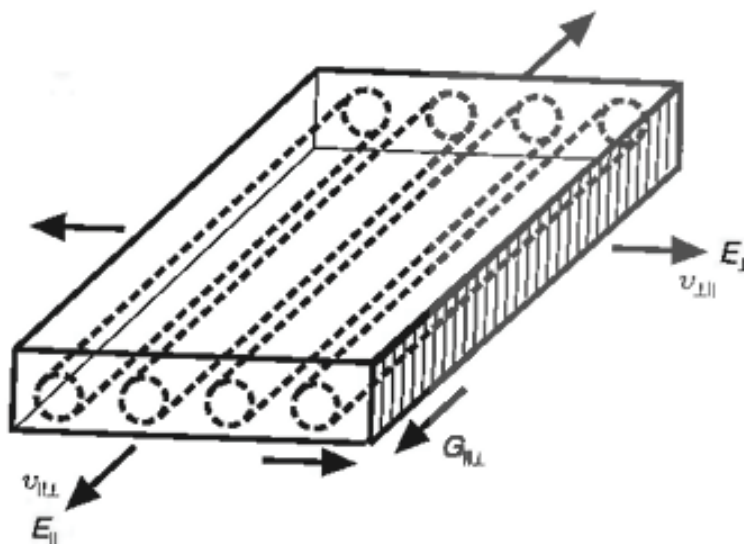
Obrázek 23 Převod heterogenního prvku na homogenní [21]

3.1.1 Reprezentativní objemový element

Výstupem mikromechanických vlastností je Reprezentativní objemový element (RVE), který představuje nejmenší možnou částici materiálu v homogenní podobě s anizotropními vlastnostmi. Tento element má definované elastické vlastnosti, které jsou dány vlastnostmi matrice a výztuže a objemovými zlomky obou složek. Pro zjednodušení se uvažuje dokonalá adheze mezi matricí a vlákny. Při určování vlastností jednosměrně vyztužené vrstvy jsou vlastnosti symetrické podle dvou vzájemně kolmých os, takže RVE je elementem s ortotropními vlastnostmi. [21]

3.1.2 Jednosměrně vyztužená vrstva

Při určování elastických konstant kompozitu vyztuženého dlouhými vlákny se používá element jednosměrně vyztužené vrstvy. V jednosměrně vyztužené vrstvě jsou vlákna navzájem rovnoběžná, kompozit má mnohem větší pevnost a tuhost ve směru vláken než ve směru kolmém na vlákna. tento typ anizotropie se nazývá ortotropie. K popisu chování jednosměrně vyztužené vrstvy při zatížení je potřeba znát celkem 5 elastických konstant, jsou to moduly pružnosti ve směru vláken ($E_{\parallel}$), ve směru kolmém na vlákna ($E_{\perp}$), ve smyku ($G_{\parallel\perp}$) a poissonova čísla ($\nu_{\parallel\perp}$) a ($\nu_{\perp\parallel}$). [11][21]



Obrázek 24 Zobrazení elastických konstant jednosměrně vyztužené vrstvy [11]

3.1.3 Stanovení elastických konstant

Jsou-li známy mechanické vlastnosti základních složek a jejich objemové podíly, lze elastické charakteristiky stanovit za těchto předpokladů:

- Matrice je izotropní, má modul pružnosti E_m a poissonovo číslo ν_m
- Vlákná jsou izotropní nebo anizotropní, pro popis izotropního vlákna stačí dvě elastické konstanty, pro anizotropní vlákna jsou nezbytné moduly pružnosti ve směru osy vlákna $E_{\parallel f}$ a kolmo k vláknu $E_{\perp f}$, modul ve smyku $G_{\parallel \perp f}$ a poissonovo číslo $\nu_{\parallel \perp f}$.
- Adheze mezi matricí a vlákny je dokonalá

Pro určení elastických konstant byla vypracována celá řada metod, nicméně pro stanovení $E_{\parallel}$ a $\nu_{\perp \parallel}$ lze s dostatečnou přesností použít pravidlo směsi, pro zbývající veličiny vyhovují vztahy dle Pucka: [11][21]

$$E_{\parallel} = \varphi E_{\parallel f} + (1 - \varphi) E_m \quad (1)$$

$$\nu_{\perp \parallel} = \varphi \nu_{\perp \parallel f} + (1 - \varphi) \nu_m \quad (2)$$

$$\nu_{\parallel \perp} = \nu_{\perp \parallel} \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} \quad (3)$$

$$E_{\perp} = \frac{E_m}{1 - \nu_m} \cdot \frac{1 + 0,85\varphi^2}{(1 - \varphi)^{1,25} + \varphi \frac{E_m}{(1 - \nu_m^2) E_{\perp f}}} \quad (4)$$

$$G_{\parallel \perp} = G_m \cdot \frac{1 + 0,6\varphi^{0,5}}{(1 - \varphi)^{1,25} + \varphi \frac{G_m}{G_{\parallel \perp f}}} \quad (5)$$

Kde φ je objemový podíl vláken, je-li obsah vláken udán jako hmotnostní podíl ψ , lze použít následující přepočty:

$$\varphi = \frac{\psi}{(1 - \psi) \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (6)$$

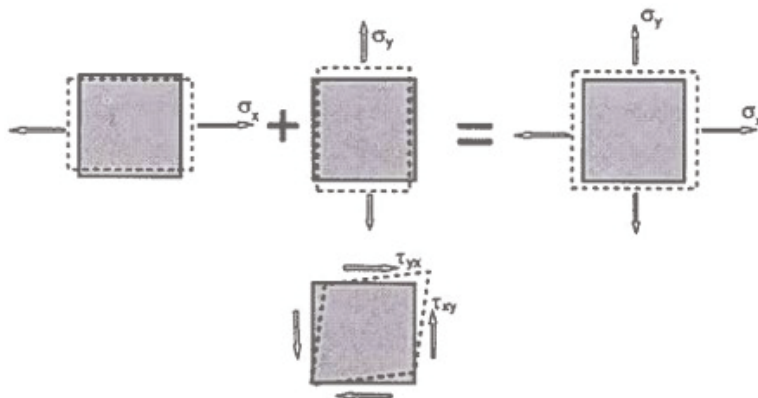
Kde ρ_f je hustota vláken a ρ_m je hustota matrice.

3.2 Vztahy mezi napětím a deformací

Známe-li všechny elastické konstanty materiálu, můžeme odvodit vztahy mezi napětím a deformací, vrstvené kompozity jsou plošné objekty, při jejich zatěžování proto vzniká rovinná napjatost. Vztahy mezi napětím a deformací popisuje Hookův zákon. [22]

3.2.1 Hookův zákon při rovinné napjatosti

Uvažujeme izotropní dvojrozměrný element. Začne-li na element působit normálové napětí například ve směru x , které označíme σ_x , vyvolá toto napětí deformace ε_x a ε_y ,



Obrázek 25 rovinná napjatost [22]

přičemž platí

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}, \quad \varepsilon_y = -\frac{\nu\sigma_x}{E} \quad (7)$$

Pokud začne napětí působit také v druhém směru, vyvolá toto napětí stejné deformace, platí princip superpozice;

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \nu\sigma_y}{E}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu\sigma_x}{E} \quad (8)$$

Při působení normálových napětí nedochází ke změně pravoúhlého tvaru elementu γ_{xy} . Změnu tvaru elementu může způsobit pouze smykové napětí τ_{xy} , které naopak nemá žádný vliv na poměrné prodloužení. ε_x a ε_y .

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (9)$$

Hookův zákon dvousé napjatosti lze přehledně vyjádřit v maticovém zápisu pomocí matice poddajnosti $[S]$ jejíž prvky jsou součinitelé poddajnosti. Pro poměrné deformace jako funkce napětí platí

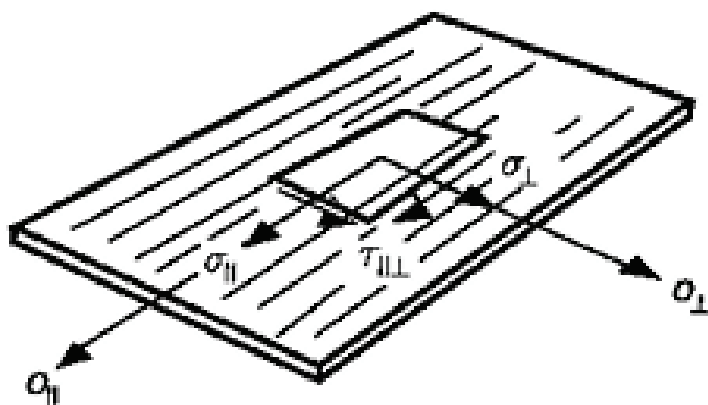
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [S] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Jak lze vidět, jedná se o matici symetrickou ($S_{12} = S_{21}$ atd). Najdeme-li matici, která je k matici poddajnosti inverzní, dostaneme matici tuhosti $[C]$, čím větší jsou prvky matice tuhosti, tím větší je potřeba napětí k dosažení dané deformace materiálu. [22]

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E & \nu E & 0 \\ \frac{1-\nu^2}{\nu E} & \frac{1-\nu^2}{E} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [C] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

3.2.2 Deformace jednosměrně vyztužené vrstvy

V případě zatížení jednosměrně vyztužené vrstvy je situace komplikovanější, neboť vlastnosti vrstvy záleží na směru uložení vláken, rovněž míra deformace bude závislá na směru namáhání. Normálovými napětími působícími na kompozit bude napětí $\sigma_{\parallel}$ působící ve směru vláken a $\sigma_{\perp}$, působící ve směru kolmém na vlákna. Dále bude na vrstvu působit smykové napětí $\tau_{\parallel\perp}$. [11][21]



Obrázek 26 Zatížení jednosměrně vyztužené vrstvy [11]

Složky deformace jednosměrně vyztužené vrstvy pak budou zapsány analogicky podle vztahů (8) a (9)

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{\sigma_{\parallel}}{E_{\parallel}} - \frac{\nu_{\parallel\perp} \sigma_{\perp}}{E_{\perp}} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\sigma_{\perp}}{E_{\perp}} - \frac{\nu_{\perp\parallel}\sigma_{\parallel}}{E_{\parallel}} \quad (13)$$

$$\gamma_{\parallel\perp} = \frac{\tau_{\parallel\perp}}{G_{\parallel\perp}} \quad (14)$$

Složky deformace můžeme vyjádřit obdobně jako v případě izotropního materiálu pomocí matice poddajnosti

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\parallel} \\ \varepsilon_{\perp} \\ \gamma_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{\parallel}} & -\frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} & 0 \\ -\frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{\parallel\perp}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = [S] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Mezi oběma poissonovými čísly a moduly pružnosti platí vztah, tzv. maxwell-bettiho věta:

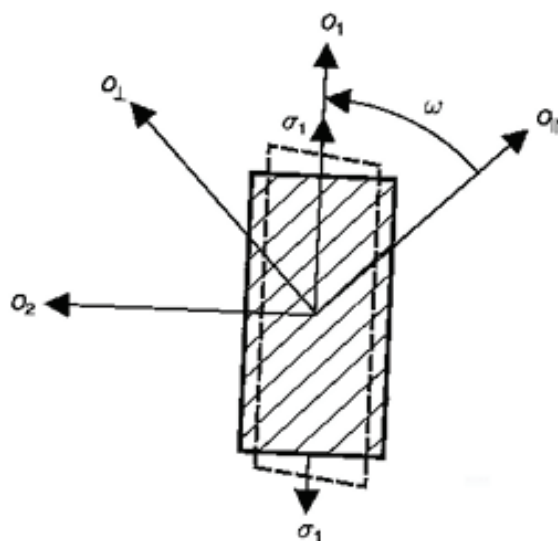
$$\frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} = \frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} \quad (16)$$

Tento vztah je ve shodě se symetrií matice poddajnosti plošného ortotropního prvku. Obdobně jako u rovinné napjatosti izotropního plošného prvku můžeme odvodit matici tuhosti [11][21]

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{\parallel}}{1 - \nu_{\parallel\perp}\nu_{\perp\parallel}} & \frac{\nu_{\parallel\perp}E_{\parallel}}{1 - \nu_{\parallel\perp}\nu_{\perp\parallel}} & 0 \\ \frac{\nu_{\perp\parallel}E_{\parallel}}{1 - \nu_{\parallel\perp}\nu_{\perp\parallel}} & \frac{E_{\perp}}{1 - \nu_{\parallel\perp}\nu_{\perp\parallel}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{\parallel\perp} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\parallel} \\ \varepsilon_{\perp} \\ \gamma_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = [C] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\parallel} \\ \varepsilon_{\perp} \\ \gamma_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

3.2.3 Pootočení směru zatížení

V případě, že jsou vlákna ve vrstvě oproti směru namáhání pootočena o určitý úhel. mění se v závislosti na úhlu pootočení také vlastnosti vrstvy. Dále přestane platit podmínka, že normálová napětí nezpůsobují smykové deformace, neboť směry napětí nejsou shodné se směrem roviny ortotropie. Matice poddajnosti i tuhosti tedy bude mít nenulové prvky S_{13} a S_{23} (C_{13} a C_{23}), obě matice však zůstanou symetrické. [11]



Obrázek 27 přetvoření jednosměrně vyztuženého elementu při normálovém zatížení pod úhlem ω [11]

Pro výpočet matice tuhosti i matice poddajnosti je nutné použít transformační vztahy, které popisují závislosti elastických vlastností vrstvy na úhlu pootočení směru zatížení od směru vláken. Transformační vztahy matice tuhosti jsou odvozeny pomocí tenzorového počtu jako [11]

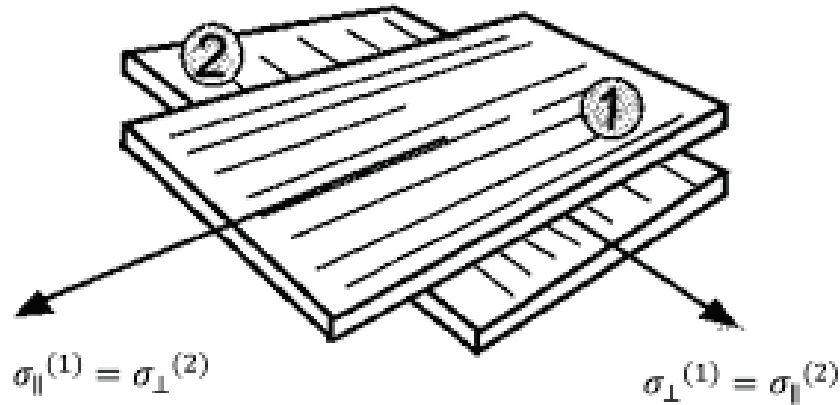
$$\begin{aligned}
 C_{11} &= C_{110}m^4 + 2(C_{120} + 2C_{330})m^2n^2 + C_{220}n^4 \\
 C_{22} &= C_{110}n^4 + 2(C_{120} + 2C_{330})m^2n^2 + C_{220}m^4 \\
 C_{12} &= C_{21} = C_{120}(n^4 + m^4) + (C_{110} + C_{220} - 4C_{330})m^2n^2 \\
 C_{33} &= C_{330}(n^4 + m^4) + (C_{110} + C_{220} - 2C_{120} - 2C_{330})m^2n^2 \\
 C_{13} &= C_{31} = (C_{110} - C_{120} - 2C_{330})m^3n - (C_{220} - C_{120} - 2C_{330})mn^3 \\
 C_{23} &= C_{32} = (C_{110} - C_{120} - 2C_{330})mn^3 - (C_{220} - C_{120} - 2C_{330})m^3n
 \end{aligned} \tag{18}$$

Kde $m = \cos \omega$, $n = \sin \omega$

Ve vztazích (18) odpovídají indexy prvků matice tuhosti příslušnému místu v přetvořené matici tuhosti, indexy prvků původní matice tuhosti jsou navíc opatřeny nulou. Ze vztahů dále vyplývá, že hodnoty prvků matice C_{13} a C_{23} jsou nulové pouze v případě, že je úhel pootočení ω roven nule, případně je kolmý na svou rovinu ortotropie. [11]

3.2.4 Vrstva vyztužená tkaninou

Vlastnosti vrstvy vyztužené tkaninou je možné modelovat jako dvě jednosměrně vyztužené vrstvy na sobě, přičemž poměr tloušťek vrstev odpovídá poměru plošné hmotnosti vláken v útku a osnově.



Obrázek 28 křížně vyztužený kompozit [11]

Prvky matice tuhosti vrstvy vyztužené tkaninou potom budou poměrným součtem vlastností jednosměrných vrstev

$$\begin{aligned}
 \bar{C}_{11} &= \frac{m_1}{m} \cdot \frac{E_{\parallel}^{(1)}}{1 - \nu_{\parallel\perp}^{(1)}\nu_{\perp\parallel}^{(1)}} + \frac{m_2}{m} \cdot \frac{E_{\perp}^{(2)}}{1 - \nu_{\parallel\perp}^{(2)}\nu_{\perp\parallel}^{(2)}} \\
 \bar{C}_{22} &= \frac{m_1}{m} \cdot \frac{E_{\perp}^{(1)}}{1 - \nu_{\parallel\perp}^{(1)}\nu_{\perp\parallel}^{(1)}} + \frac{m_2}{m} \cdot \frac{E_{\parallel}^{(2)}}{1 - \nu_{\parallel\perp}^{(2)}\nu_{\perp\parallel}^{(2)}} \\
 \bar{C}_{12} &= \frac{m_1}{m} \cdot \frac{\nu_{\parallel\perp}^{(1)}E_{\parallel}^{(1)}}{1 - \nu_{\parallel\perp}^{(1)}\nu_{\perp\parallel}^{(1)}} + \frac{m_2}{m} \cdot \frac{\nu_{\perp\parallel}^{(2)}E_{\perp}^{(2)}}{1 - \nu_{\parallel\perp}^{(2)}\nu_{\perp\parallel}^{(2)}} \\
 \bar{C}_{33} &= \frac{m_1}{m} \cdot G_{\parallel\perp}^{(1)} + \frac{m_2}{m} \cdot G_{\parallel\perp}^{(2)}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Kde: m – plošná hmotnost celé výztuže, m_1 – plošná hmotnost osnovy, m_2 – plošná hmotnost útku ($\frac{kg}{m^3}$).

V případě zatěžování tkanin, kde $\frac{m_1}{m} = 0,5$ normálovým napětím se směrem odchýleným od hlavních os ortotropie nedochází ke vzniku smykových deformací, neboť platí

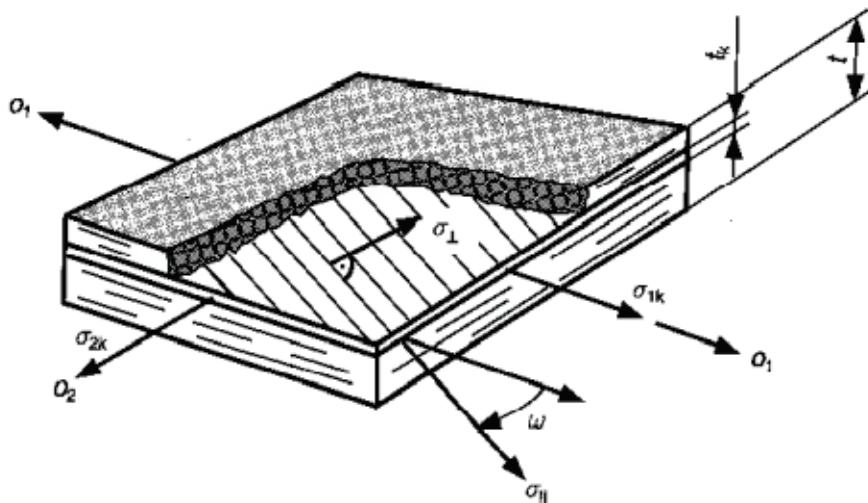
$$C_{13}^{(1)} = -C_{13}^{(2)}; \quad C_{23}^{(1)} = -C_{23}^{(2)}, \text{takže} \quad \bar{C}_{13} = \bar{C}_{13} = 0 \tag{20}$$

Hodnoty $C_{13}^{(1)}$ a $C_{13}^{(2)}$ se stejně jako hodnoty $C_{23}^{(1)}$ a $C_{23}^{(2)}$ navzájem ruší, to však neznamená, že jsou jednotlivé složky těchto napětí nulové, tato vzájemně působící smyková napětí tvoří kroutící moment, který materiál zkrucuje. [11][21]

3.3 Klasická laminátová teorie

V praxi se jednosměrně vyztužené vrstvy či vrstvy tkaniny často skládají na sebe, což vede k složitému mechanickému chování. K částečnému zjednodušení a popsání chování takto složeného prvku slouží klasická laminátová teorie, která umožňuje stanovit napětí $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ a příslušná přetvoření $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ v každé jednotlivé vrstvě kompozitu. Přitom se přijímají tyto předpoklady:

- tloušťka jednotlivých vrstev je ve srovnání s délkou a šířkou velmi malá
- posunutí jednotlivých bodů ve všech třech směrech jsou malá
- spoj mezi vrstvami je dokonalý, nekonečně tenký, a proto jsou napětí spojitá
- při rovinném zatížení se všechny vrstvy deformují stejně



Obrázek 29 Systém souřadnic a označení vrstveného kompozitu [11]

Protože se všechny vrstvy ve směru os a souřadnic deformují shodně, platí pro každou vrstvu geometrická podmínka kompatibility:

$$\varepsilon_{1k} = \bar{\varepsilon}_1, \quad \varepsilon_{2k} = \bar{\varepsilon}_2, \quad \gamma_{12k} = \bar{\gamma}_{12} \quad (21)$$

Kde hodnoty s pruhem označují přetvoření celého laminátu ve směrech os O_1 a O_2 .

Napětí v každé vrstvě lze stanovit pomocí tuhosti příslušné vrstvy ($k = 1$ až n)

$$\begin{aligned}
\sigma_{1k} &= C_{11k}\bar{\varepsilon}_1 + C_{12k}\bar{\varepsilon}_2 + C_{16k}\bar{\gamma}_{12} \\
\sigma_{2k} &= C_{12k}\bar{\varepsilon}_1 + C_{22k}\bar{\varepsilon}_2 + C_{26k}\bar{\gamma}_{12} \\
\tau_{12k} &= C_{16k}\bar{\varepsilon}_1 + C_{26k}\bar{\varepsilon}_2 + C_{66k}\bar{\gamma}_{12}
\end{aligned} \tag{22}$$

Podmínka rovnováhy je ve všech třech případech vyjádřena silami na jednotku délky.

$$\begin{aligned}
f_1 &= \bar{\sigma}_1 \cdot t = \sum_{k=1}^n \sigma_{1k} t_k \\
f_2 &= \bar{\sigma}_2 \cdot t = \sum_{k=1}^n \sigma_{2k} t_k \\
f_{12} &= \bar{\tau}_{12} \cdot t = \sum_{k=1}^n \tau_{12k} t_k
\end{aligned} \tag{23}$$

kde f_1, f_2, f_{12} – síly na jednotku délky, t – celková tloušťka laminátu t_k – tloušťka jednotlivé vrstvy a $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\tau}_{12}$ – střední napětí v kompozitu.

Dosazením podmínky rovnováhy do vztahu (22) získáme Hookův zákon vícevrstvého elementu

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma}_1 &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^n C_{11k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^n C_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^n C_{16k} \frac{t_k}{t} \\
\bar{\sigma}_2 &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^n C_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^n C_{22k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^n C_{26k} \frac{t_k}{t} \\
\bar{\tau}_{12} &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^n C_{16k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^n C_{26k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^n C_{66k} \frac{t_k}{t}
\end{aligned} \tag{24}$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že hodnota každého prvku matice tuhosti vícevrstvého kompozitu je rovna součtu tuhostí jednotlivých vrstev. Slabinou tohoto modelu je pak to, že neuvažuje uspořádání vrstev v laminátu.[11][21]

3.4 Teorie selhání kompozitního materiálu

Při určování toho, zda materiál selže v případě homogenních izotropních materiálů je možné vypočítat napětí v určitém místě, které se srovná s maximálním dovoleným napětím daného materiálu. V případě kompozitních materiálů je však situace komplikovanější; kompozitní materiály se skládají z různých složek, které mají odlišné mechanické vlastnosti.

V důsledku této heterogenity mohou být kompozitní materiály vystaveny různým typům selhání;

- Poškození vláken v podélném směru
- Poškození kolmo k vláknům – zejména mikrotrhliny v matrici mezi vlákny
- Poškození v mezivrstvách
- Poškození způsobené smykem

K posouzení toho, zda kompozitní materiál dané zatěžení vydrží či nikoliv bylo proto vytvořeno mnoho teorií selhání kompozitního materiálu, mezi nejdůležitější z nich patří kritérium maximálního napětí, Hoffmanovo kritérium, či kritérium Tsai-Wu. [23][24]

3.4.1 Kritérium maximálního napětí

Tato teorie předpokládá, že selhání nastane, pokud jakékoliv napětí v kompozitu přesáhne jeho mezní hodnotu. Každý směr (podélný, kolmý a smykový) má svou vlastní maximální mez pevnosti.

$$\sigma_1 \geq \sigma_{1max}, \quad \sigma_2 \geq \sigma_{2max}, \quad \tau_{12} \geq \tau_{12max} \quad (25)$$

Kde σ_1 – napětí ve směru vláken, σ_{1max} – dovolené napětí ve směru vláken, σ_2 – napětí ve směru kolmém na vlákna, σ_{2max} – dovolené napětí ve směru kolmém na vlákna, τ_{12} – smykové napětí, τ_{12max} – dovolené smykové napětí,

Jedná se o jednoduchou, ale ne vždy přesnou metodu, protože tato metoda nezohledňuje vzájemné interakce mezi různými složkami napětí. [23]

3.4.2 Hoffmanovo kritérium

Hoffmanovo kritérium je postaveno na základě lineární kombinace napětí, která zohledňuje různá napětí v různých směrech a jejich vzájemné interakce. Předpokladem je, že materiál selže, pokud součet těchto interakcí dosáhne mezní hodnoty, která charakterizuje selhání materiálu.

$$F(\sigma) = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1max}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{2max}} + \frac{\tau_{12}}{\tau_{12max}} \leq 1 \quad (26)$$

Kde $F(\sigma)$ je hodnota mezního kritéria

Toto kritérium je rozšířené kvůli své relativní jednoduchosti a jednoduché implementaci, poskytuje přesnější predikci než kritérium maximálního napětí [23]

3.4.3 Kritérium Tsai-Wu

Nejpoužívanějším kritériem pro určení selhání kompozitního materiálu je kritérium Tsai-Wu, které je podobně jako Hoffmanovo kritérium interakční, na rozdíl od něj však používá lineární i kvadratické členy. V jeho rozšířené verzi je zohledněno několik křížových interakcí mezi napětím ve směru vláken, napětím kolmo k vláknům a smykovým napětím.

$$F(\sigma) = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2max}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12max}}\right)^2 + 2\left(\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_{1max} \cdot \sigma_{2max}}\right) + \dots \leq 1 \quad (27)$$

Kritérium Tsai-Wu zahrnuje interakce napětí mezi směry s vyšší přesností, je zaměřeno na kompozitní materiály se silnou anizotropií, V rozšířeném modelu Tsai-wu lze velmi přesně modelovat kompozity skládající se z více vrstev; tento model zohledňuje interakce mezi vrstvami, což je klíčové pro predikci poruch v materiálu. [24]

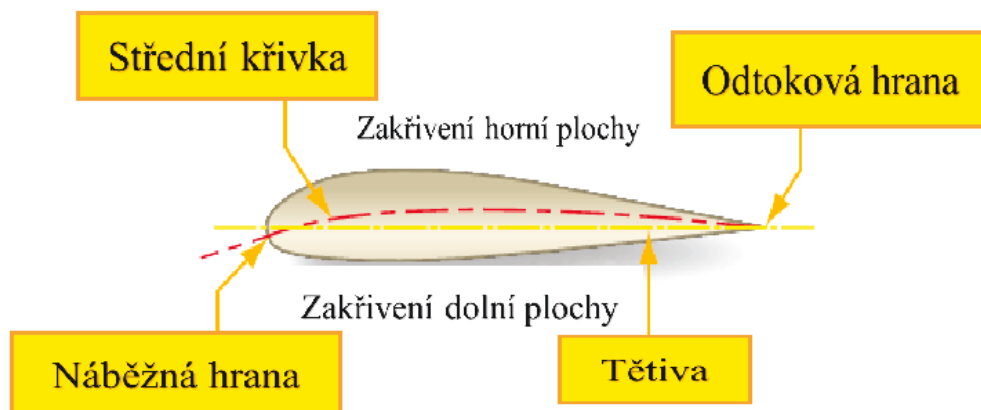
4 VRTULE

Vrtule je nástrojem pro převod kroutícího momentu hnacího ústrojí na sílu potřebnou k pohybu ve vzdušném prostoru, která je rovnoběžná s osou otáčení vrtule (tzv. tahová síla). K tomuto úkonu vrtule využívá listy, které jsou tvarem podobné křídlu. Vrtule je popsána několika základními parametry, mezi které patří průměr, stoupání (nebo také úhel nastavení), dopředná rozteč, počet listů a účinnost. Základní terminologie částí vrtule je popsána na obrázku 30.[25][26]



Obrázek 30 Základní části vrtule [25]

Geometrie listu vrtule může být popsána jako zkroucené křídlo na nepravidelné rovině. Každý list vrtule je napojen na náboj, který slouží k upnutí vrtule. Při pohledu na profil listu kolmý na osu otáčení vrtule se tento profil od náboje k hrotu čepele postupně zužuje, přičemž jeho tvar připomíná nepravidelnou kapku, zakončenou hrotem. Spojnice těchto hrotů tvoří odtokovou hranu listu. [25][26]



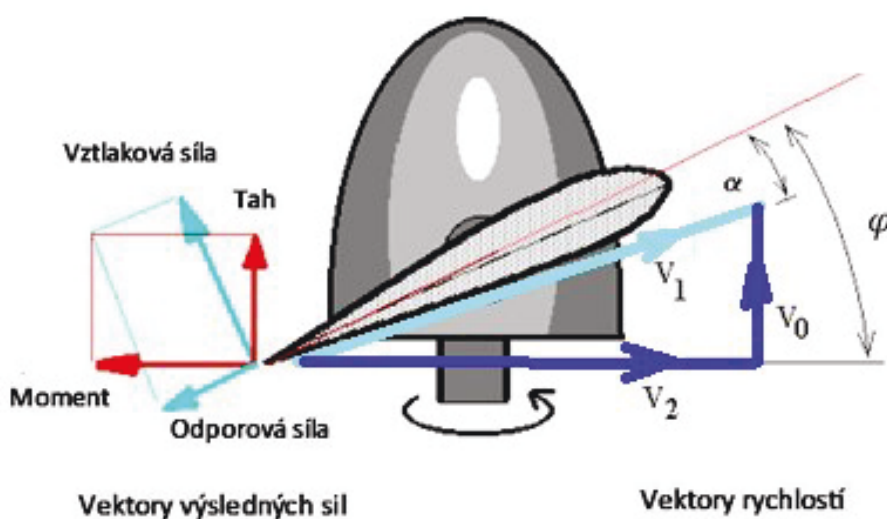
Obrázek 31 Profil listu vrtule [25]

Z hlediska popsání geometrie průřezu je důležitá tětiva a střední křivka průřezu. Tětiva vznikne spojením bodu na náběžné a odtokové hraně a je základním vztažným směrem, určujícím orientaci profilu. Střední křivka vznikne spojením středů kružnic vepsaných do profilu a tvoří jakýsi střed mezi obrysy spodní a horní plochy. Průběh střední křivky je určující pro aerodynamické charakteristiky profilu.

Letecká vrtule funguje na podobném principu jako křídlo, to znamená, že rozdíl tlaků způsobený odlišnými rychlostmi obtékaného proudu kolem horní a spodní plochy profilu vytváří vztlak. Pro popis složitého dynamického chování těles pohybujících se v tekutinách nachází uplatnění disciplína zvaná aerodynamika.

4.1 Základy aerodynamiky vrtule

Element listu vrtule se při letu pohybuje rychlostí V_1 , kterou můžeme rozdělit na dopřednou rychlost letu V_0 a obvodovou rychlost kolmou na směr letu V_2 . Úhel mezi vektorem obvodové rychlosti V_2 a celkovou rychlostí V_1 je úhel stoupání. Osa profilu je vzhledem k rovině kolmé na směr letu odchýlena o úhel nastavení φ . Profil listu je pak ofukován pod úhlem náběhu α , který je roven rozdílu úhlu nastavení a úhlu stoupání θ . Pro definici nastavení těchto úhlů se nejčastěji udávají úhly vztahující se na profil vzdálený zhruba ve $\frac{3}{4}$ poloměru vrtule od osy otáčení.[25][26][27]

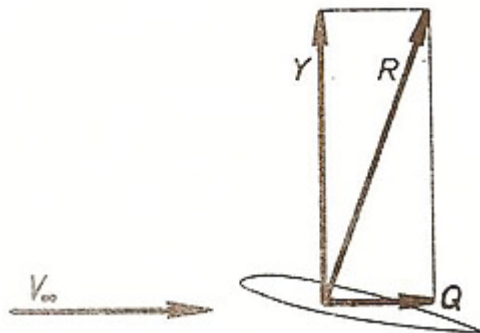


Obrázek 32 Rychlosti a síly působící na element průřezu [25]

Díváme-li se na vrtuli jako na otáčející křídlo v tekutině, působí na element listu vrtule aerodynamická síla. Rozložením výslednice této síly do směru letu a směru kolmém na směr letu dostaneme hodnoty tahu P a momentu M .

4.1.1 Aerodynamická síla

Aerodynamická síla je síla, kterou proud tekutiny působí na tělesa v něm ponořená, je možné ji rozdělit na složku působící ve směru proudu Q (odpor) a na složku působící kolmo ke směru proudu Y (vztlak).



Obrázek 33 Působení aerodynamické síly [27]

Je-li těleso uprostřed proudu tekutiny, který má rychlost V , způsobí jeho interakce zpomalení proudu na rychlost V_z . Odpor Q by se pak rovnal změně hybnosti za jednotku času. Zasažená hmota m je rovna:

$$m = \rho \cdot S \cdot V \quad (28)$$

Kde $S \cdot V$ je zasažený objem, změna hybnosti proudu za jednotku času potom bude:

$$\Delta mV = Q = m \cdot (V - V_z) = m \cdot C \cdot V = C \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 = c_x \frac{\rho V^2}{2} S \quad (29)$$

Kde C – koeficient změny rychlosti, tento koeficient se mění v závislosti na tvaru tělesa, $c_x = 2C$ je bezrozměrný koeficient měnící se podle tvaru tělesa, $\frac{\rho V^2}{2}$ je dynamický tlak nerušeného proudu z Bernoulliho rovnice a S je vztažná plocha, u křídel se většinou používá plocha půdorysného průmětu.

Rovnice aerodynamické síly neplatí pouze pro odpor, ale i pro výslednou aerodynamickou sílu a vztlak:

$$R = c_R \frac{\rho V^2}{2} S, \quad Q = c_x \frac{\rho V^2}{2} S, \quad Y = c_Y \frac{\rho V^2}{2} S \quad (30)$$

Kde c_R je součinitel aerodynamické síly, c_x je součinitel odporu a c_Y je součinitel vztlaku.

4.1.2 Celkový tah vrtule

Vezmeme-li v potaz element vrtule, který má definovaný tvar a určitý úhel θ a φ , bude na element o ploše ds působit aerodynamická síla v podobě tahu dP souladu s (30)

$$dP \sim \frac{\rho V_R^2}{2} dS \quad (31)$$

Kde V_R je rychlost, která bude přímo úměrná otáčkám n a průměru vrtule D . Tento vztah platí pro každý element vrtule, proto platí i pro celou vrtuli. Dále je třeba si uvědomit, že tvar vrtule zůstává při zvětšování průměru stejný, takže platí, že plocha S je rovna čtverci průměru, postupně tedy zapsáno jako:

$$dP \sim \frac{\pi \rho n^2 D^2}{2} dS; \quad P \sim \frac{\pi \rho n^2 D^2}{2} S; \quad P \sim \frac{\pi \rho n^2 D^4}{2} \quad (32)$$

Z toho plyne základní vztah pro tah celé vrtule:

$$P = \bar{\alpha} \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (33)$$

Kde $\bar{\alpha}$ je součinitel tahu, který je stálý pro daný způsob obtékání a daný geometrický tvar vrtule. Ze vztahu dále vyplývá, že zvětší-li se průměr vrtule dvakrát, zvětší se její tah šestnáctkrát. [27]

4.1.3 Výkon pro pohon vrtule

Podobně jako tomu bylo v případě tahu, pro daný typ geometrie a nastavení vrtule lze odvodit též celkový odpor.

$$Q \sim \frac{\pi \rho n^2 D^4}{2} \quad (34)$$

Tento odpor vyvolá na listu vrtule moment M , pro jehož překonání je nutná výkonnost N , platí:

$$dM = \frac{d}{2} dQ; \quad N = M \cdot n \quad (35)$$

Po zahrnutí konstanty úměrnosti $\bar{\beta}$, která se nazývá součinitel výkonnosti a je stálá pro daný geometrický tvar a způsob obtékání vrtule dostaneme základní vztah pro výkonnost potřebnou pro pohon vrtule. [27]

$$N = \bar{\beta} \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D^5 \quad (36)$$

4.1.4 Charakteristiky vrtule

Součinitelé $\bar{\alpha}$ a $\bar{\beta}$ jsou spolu s účinností η mají základní význam pro práci vrtule, závisí na geometrickém tvaru vrtule, úhlu nastavení φ , úhlu stoupání θ , ale také na bezrozměrných číslech R a M [26], turbulenci proudu a kvalitě povrchu. V praxi jsou hodnoty těchto součinitelů obvykle stanovovány experimentálně v aerodynamických tunelech. Naměřené hodnoty se udávají do diagramů v závislosti na tzv. rychlostním součiniteli

$$\bar{\lambda} = \frac{V}{nD} \quad (37)$$

Kde V je rychlost letounu, n jsou otáčky a D je průměr vrtule, koeficient $\bar{\lambda}$ pak vyjadřuje, o kolik se letoun posune za jednu otáčku vrtule. [27]

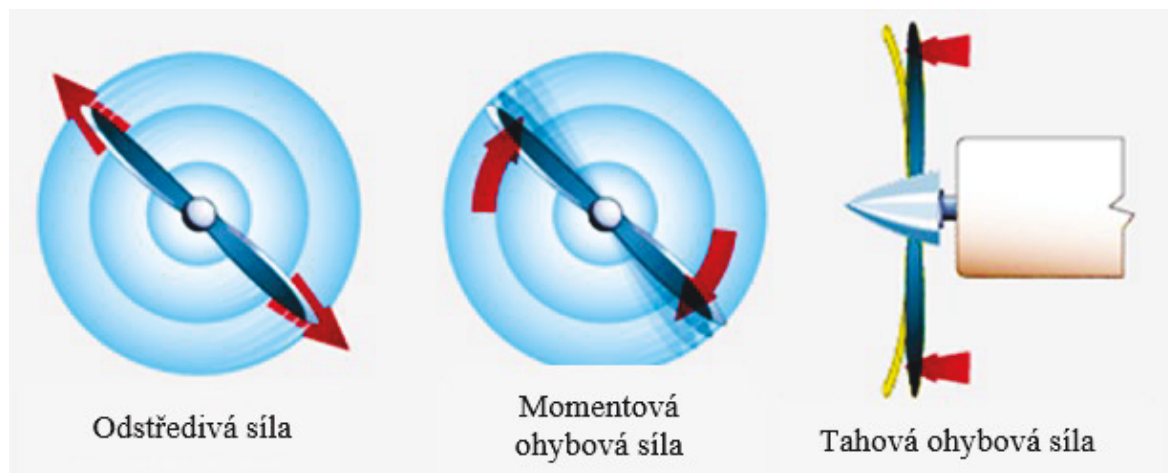
4.2 Zatížení vrtulového listu

Během provozu může být vrtule zatěžována staticky nebo dynamicky, v tomto textu budou uvedeny pouze základní druhy statického namáhání, na které musí být vrtule nadimenzována. Mezi základní složky namáhání vrtule patří:

Odstředivá síla je největším zatížením, které na vrtuli během provozu působí, její směr působení je kolmý na osu rotace a působí směrem od náboje k hrotu čepele. Její velikost je dána rychlostí otáčení a rozložením hmotnosti po délce listů vrtule.

Ohyb ve směru letu je způsoben tahovou složkou aerodynamické síly, list vrtule je kvůli podtlaku na straně před vrtulí vtahován kupředu a ohýbán ve směru letu.

Ohyb v rovině otáčení je způsoben momentovou složkou aerodynamické síly, vrtule je ohýbána proti směru otáčení.

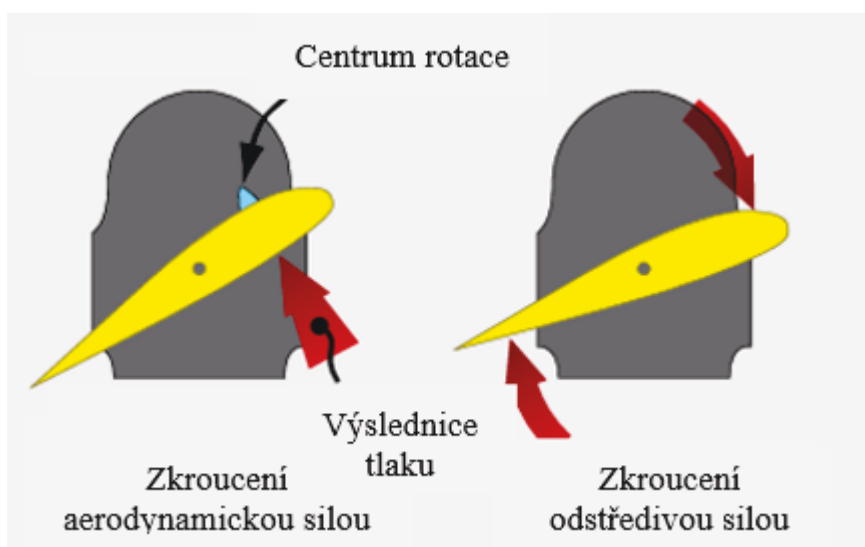


Obrázek 34 Zobrazení hlavních sil působících na vrtuli [25]

Dále je list vystaven také zkrucování, které je důsledkem výše uvedených hlavních sil. Toto zkrucování listu má za následek změnu úhlu nastavení a při konstrukci listu se s ním musí počítat. V zásadě existují dva typy zkrucování listu vrtule:

Zkroucení aerodynamickou silou listu vrtule vzniká působením aerodynamické síly a má tendenci zvětšovat úhel nastavení vrtule.

Zkroucení odstředivou silou vzniká působením odstředivé síly a má tendenci zmenšovat úhel nastavení vrtule. [25][28]



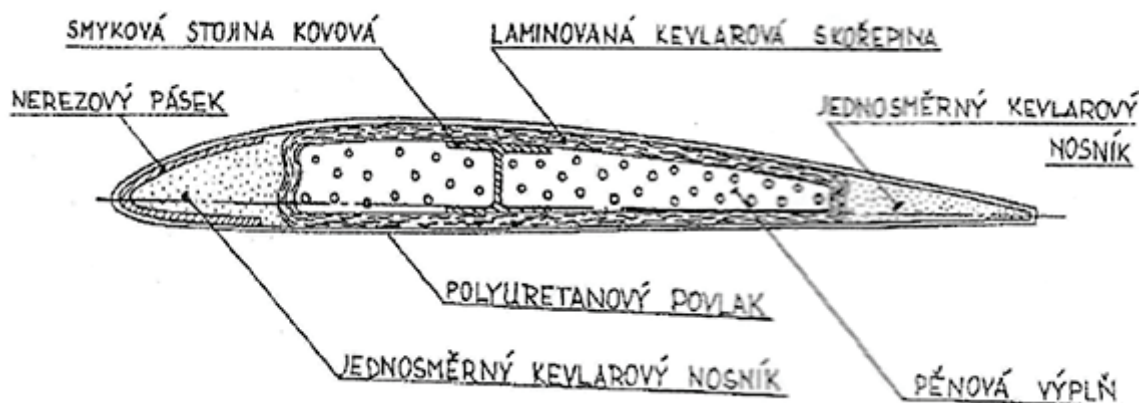
Obrázek 35 Kroucí síly působící na list vrtule

4.3 Využití vrstvených kompozitů při návrhu vrtule

Konstrukce vrtulí z kompozitů je v současnosti předmětem světového výzkumu, přestože je většina vrtulí stále vyráběna z pevných kovových materiálů jako je hliník, ocel, či různé slitiny mědi, s progresivním výzkumem kompozitních materiálů se situace začíná měnit. Největší uplatnění najdou kompozitní vrtule při stavbě malých rekreačních či sportovních letadel. Výhody kompozitních vrtulí jsou následující:

- Nízká hmotnost při vysoké pevnosti
- Vysoká odolnost proti korozi
- Nižší hlučnost za chodu
- Nutnost použití méně komplexních technologií při výrobě
- Lepší aerodynamické vlastnosti

Kompozitní vrtule bývají tradičně složeny z vrstveného kompozitního potahu a jádra, které může být vyrobeno z dřevěné překližky, nebo z polyuretanové pěny. Součástí kompozitních vrtulí bývají také různá žebra, stojny a nosníky, které se aplikují pro zvýšení pevnosti a geometrické stability listu. [29]



Obrázek 36 Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu [29]

Kompozitní vrstvený potah bývá nejčastěji vyroben z kompozitů s termosetickou matricí, a to zejména kvůli dobré zpracovatelnosti, menší energetické náročnosti a větší pevnosti oproti kompozitům s termoplastickou matricí.

Jako vyztužující vlákna, která jsou nositelem pevnosti a tuhosti se nejvíce používají vlákna aramidová, skleněná, či uhlíková, případně jsou vrstvené potahy konstruovány jako hybridy, složené z několika vrstev s různými výztužnými vlákny (např. skleněnými a uhlíkovými). Orientace vláken potahu je nejčastěji dána požadovanými mechanickými vlastnostmi struktury. [29]

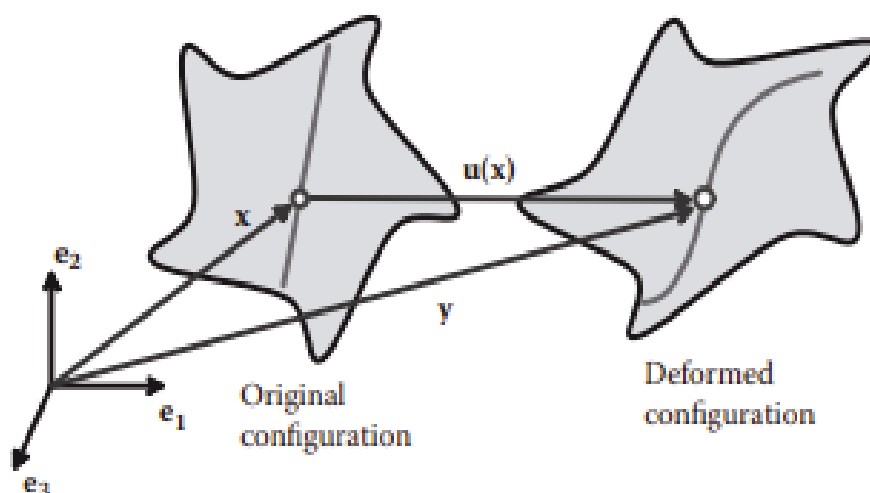
5 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků, zkráceně MKP nebo FEM z anglického Finite Element Method, se v inženýrské praxi používá k simulacím průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, teplotních polí atd. na fyzikálním modelu s podporou moderní výpočetní techniky. Využití najde téměř ve všech strojírenských odvětvích pro kontrolu a optimalizaci navrhovaných zařízení či součástí před zahájením výroby prototypu. Odpadají tak často složité a finančně nákladné pevnostní výpočty či zkoušení v reálných podmínkách, což má mimo jiné za následek také značné zkrácení předvýrobního procesu (doba od původního návrhu k hotovému výrobku).

Základní princip konečné prvkové analýzy spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, takzvané sítě. Každý prvek (element) má určitý počet neznámých, které jsou nutné k použití aproximačních (polynomických či interpolačních) funkcí, pomocí kterých lze vyjádřit pole proměnných. [30][31][32]

5.1 MKP v mechanice pevných těles

V mechanice pevných těles se pole proměnných definuje jako pole posunutí $u(x)$, které popisuje pohyb každého bodu v tělese, používá přitom zákon minimální potenciální energie deformace soustavy (Lagrangeův princip).



Obrázek 37 Posunutí elementu $u(x)$ [30]

Známe-li pole posunutí, můžeme pomocí různých výpočetních metod zjistit také deformační pole. K určení deformačního pole v oblasti malých (lineárních) deformací je nejvhodnější použít infinitesimální tenzor deformace

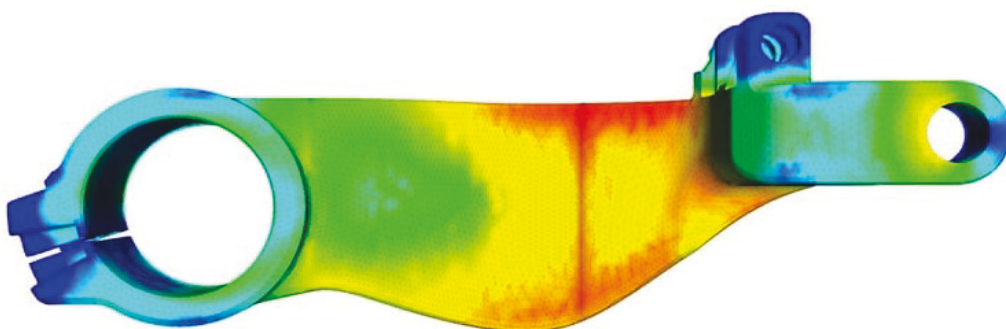
$$\varepsilon = \frac{1}{2}(u \otimes \nabla + (u \otimes \nabla)^T) \quad (38)$$

Kde $u \otimes \nabla$ je gradient tenzoru posunutí. Zavedením kartézského souřadného systému dostaneme vztah pro každou složku deformace.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (39)$$

Kde $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ je složka gradientu tenzoru posunutí, koeficienty i, j určují jeden z hlavních směrů souřadného systému. Jsou – li známy složky deformací v každém bodě, můžeme pomocí Hookova zákona $\varepsilon = S \sigma$ určit také pole napětí. [30]

V mechanice pevných těles rozeznáváme dva základní typy FEM analýzy. Ve většině případů se jedná o analýzu, která popisuje chování pevných těles, které jsou ve statické rovnováze, v tomto případě pro každý element platí rovnice silové rovnováhy $\sum F = 0$. V některých případech, například při rázech, explozích či vibracích je však nutno zjistit dynamické chování tělesa. Pro dynamické problémy se prostřednictvím FEM analýzy řeší rovnice $\sum F = ma$, přičemž přetvoření tělesa je funkcí času.[31][33]



Obrázek 38 Napěťové pole součásti [31]

5.1.1 Modální analýza

Jedním ze speciálních typu analýz, které se mohou za pomoci metody konečných prvků provádět je modální analýza. Pomocí této analýzy se určují modální vlastnosti systému, mezi které patří vlastní frekvence systému, vlastní tvary kmitů, či vlastní tlumení tvarů kmitů.

V průběhu modální analýzy pomocí MKP probíhá pro každý element výpočet místní matice hmotnosti a tuhosti, ze kterých se následně sestaví globální matice. K určení vlastních frekvencí systému slouží tzv. charakteristická matice, vycházející ze soustavy rovnic pohybu, při nichž se předpokládá, že řešení pohybu má tvar sinusoidy.

$$\det(M \cdot \omega^2 - K) = 0 \quad (40)$$

Kde M je matice hmotnosti, K je matice tuhosti a ω je vlastní úhlová frekvence. Řešení této rovnice poskytuje hodnoty ω^2 , ze kterých lze určit vlastní frekvence f pomocí vztahu:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (41)$$

Modální analýza se provádí za účelem určení nebezpečných provozních stavů, ve kterých se dané zařízení nesmí provozovat, aby nedošlo ke shodě vlastních frekvencí s frekvencemi budících sil. Shoda vlastních frekvencí systému s frekvencemi budících sil by vedla k rezonanci kmitů a došlo by k nadměrným amplitudám kmitání. Provoz zařízení v rezonanční oblasti způsobuje nadměrnou hlučnost, snižuje životnost a často může vést k poškození zařízení. [34][35]

5.1.2 Nelineární analýza

Nelineární FEM analýza nachází uplatnění v případech, kdy se chování vyhodnocované struktury neprojevuje lineárně. To znamená, že vztah mezi vstupy (zatížení) a výstupy (napětí, deformace) není lineární. Tento jev se může projevovat v různých situacích, mezi které patří:

Materiálová nelinearita – Některé materiály se po určité úrovni zatížení začnou chovat jinak – změní se jejich mechanické vlastnosti. Tento jev je typický pro hyperelastické materiály či kompozity. Řešení materiálové nelinearity spočívá v aplikaci pokročilých materiálových modelů, které umožňují simulovat nelineární chování materiálů při různých zatíženích.

Geometrická nelinearita – během působení zatížení na materiál se geometrie součástí změní natolik, že změna geometrie během deformace ovlivní výsledky analýzy. To znamená, že vztahy mezi posunutím, deformací a vnitřním napětím již nelze popisovat lineárními rovnicemi. Typicky se tento problém řeší při velkých posunutích, tenkých konstrukcích, či při ztrátách stability. Řešení geometrické nelinearity při výpočtu spočívá v konfiguraci deformačního objektu, která je iterativně upravována během výpočtu; rovnice

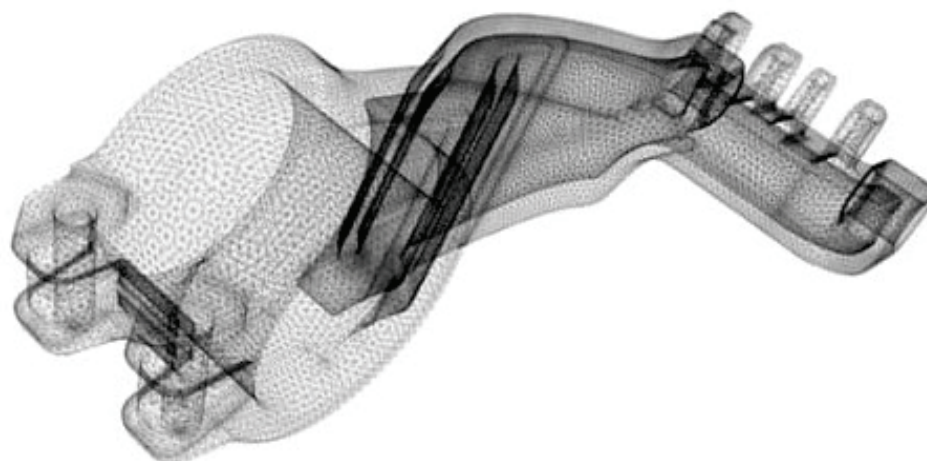
rovnováhy se vztahuje k aktuální (deformované) konfiguraci místo původní. Celková zátěž se rozdělí do několika inkrementů, což umožňuje lépe sledovat nelineární odezvu konstrukce. V každém inkrementu probíhá určitý počet iterací, což jsou opakované výpočty, které se provádějí pro nalezení rovnovážného stavu. V každé iteraci se aktualizuje geometrie elementů podle aktuálních posunů, což umožňuje správně zachytit efekt změny geometrie na napětí a deformace.

Kontaktní problémy – nelineární problémy vznikají také při kontaktu mezi různými částmi struktury, kdy je nutné simulovat interakce mezi povrchy, jako je tření či skluz, které mohou mít nelineární charakter.

Nelineární analýza poskytuje silný nástroj pro predikci a je klíčová pro realistické a přesné modelování složitých inženýrských problémů, kde chování materiálu neodpovídá jednoduchým lineárním předpokladům. Nevýhodou této analýzy je její složitost, která vede k náročným a dlouhým výpočtům. Využití nachází nelineární analýza například při návrhu budov, mostů, letadel, či automobilových součástí. [30][35]

5.2 Konečně prvková síť

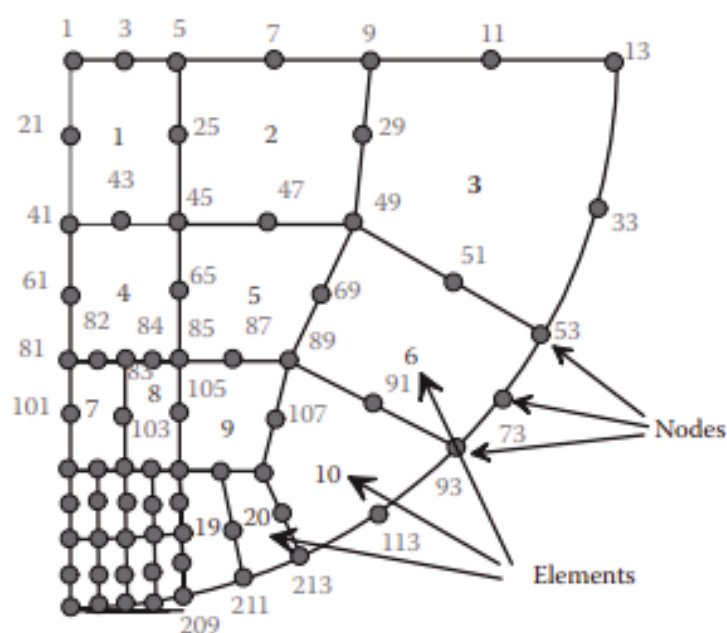
K rozdělení tělesa na konečný počet prvků se používá konečně prvková síť, která aproximuje geometrickou oblast na body (uzly), mezi jejichž spojnicemi vzniknou elementy. Parametry konečně prvkové sítě značně ovlivňují přesnost výsledků analýzy. Například pokud jsou elementy sítě příliš velké v tvarově složitých místech, může dojít k zanedbání či úplnému ignorování složité geometrie těchto míst a výsledky chování tělesa budou značně zkreslené. Síť může být v závislosti na použitých elementech buď dvojrozměrná (2D elementy), nebo trojrozměrná (3D elementy). Volba typu sítě závisí především na geometrii součásti, která je podrobena analýze. [30] [31]



Obrázek 39 3D síť tělesa [31]

5.2.1 Uzly sítě

Uzly sítě se rozumí body, na které je určitá spojitá oblast aproximována, každý uzel má přidělené identifikační číslo a souřadnice, v 3D síti má každý uzel 3 hodnoty souřadnic (x_1, x_2, x_3) , ve dvojrozměrné síti dvě (x_1, x_2) . Jakmile dojde k deformaci sítě vlivem vnějšího zatížení, každý uzel se přesune do nové pozice a je k němu zapsána další hodnota – posunutí. Hodnoty posunutí uzlů jsou zjišťovány výpočtem pomocí vhodného programu. V případě speciálních analýz mohou mít uzly přiděleny další vlastnosti – například při zjišťování teplotního pole mají uzly přiřazenu též počáteční teplotu.[30][33]

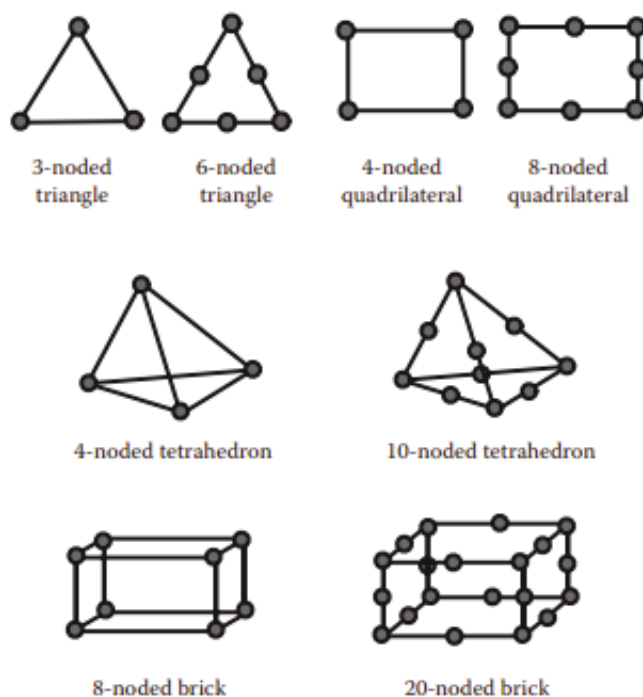


Obrázek 40 Elementy a uzly sítě [30]

5.2.2 Elementy sítě

Elementy vzniknou vytvořením spojnic mezi uzly, tím se těleso rozdělí do samostatných podoblastí. Každý element má identifikační číslo, další parametry elementu jsou:

- **Geometrie** – obvyklé elementy 2D sítě mohou být trojúhelníkového nebo obdélníkového tvaru, elementy 3D sítě mohou být ve tvaru čtyřstěnu nebo šestistěnu.
- **Sada uzlů připojených k elementu** – typické označení elementu se skládá z čísla elementu a čísel uzlů, které jsou hranicí elementu.
- **Druh Interpolace** – účelem každého elementu je interpolovat pole posunutí $u(x)$ mezi hodnotami určenými v uzlech, typ interpolace určuje výpočet tohoto posunutí, může být lineární (například čtyřuzlový čtyřstěn) nebo kvadratická (například desetiuzlový čtyřstěn). [30]



Obrázek 41 Typy elementů [30]

II PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce je vytvoření funkčního FEM modelu kompozitního vrtulového listu, pomocí kterého bude provedena numerická analýza hodnotící statické zatížení a modální vlastnosti listu.

7 3D MODEL VRTULE

Před zhotovením FEM analýzy je nejdříve nutné vytvořit samotný 3D model vrtule, který slouží jako podklad pro analýzu. Základní geometrie vrtule včetně modelu jádra a náboje byla poskytnuta firmou Mejlík Propellers s.r.o. Všechny operace týkající se tvorby a úpravy 3D modelů byly provedeny v programu Siemens NX.

7.1 Popis modelu vrtule

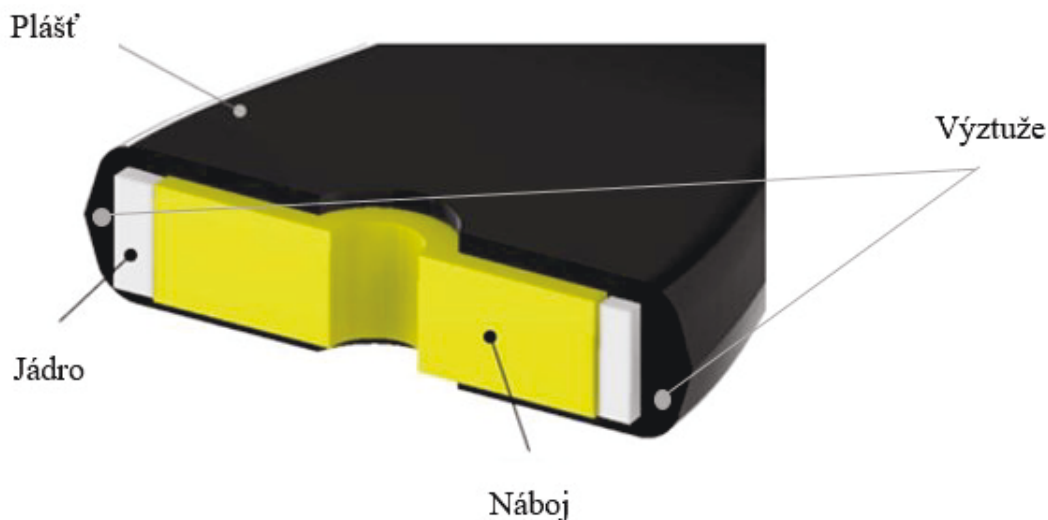
Vrtule, která byla předmětem této práce nese označení Kompozitní vrtule 28x10,1 a používá se při stavbě dronů. Číselné označení vrtule referuje na základní údaje o vrtuli, kde 28 je průměr vrtule v palcích (711,2 mm) a 10,1 (256,5 mm) je stoupání vrtule, tedy posun za jednu otáčku. Počet listů této vrtule je dva.



Obrázek 42 3D model vrtule

Uvedená kompozitní vrtule se skládá z pěti samostatných součástí, kterými jsou sklolaminátový náboj, pěnové jádro, dvě vláknové výztuže a vnější plášť vytvořený z vrstvených prepregů. Vláknové výztuže jsou prakticky dva identické díly, ovšem jelikož je vrtule symetrická a pro naše účely statické analýzy tedy lze využít symetrie, bude

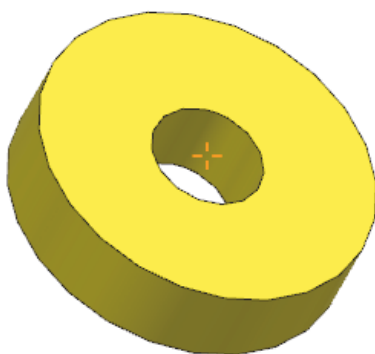
předmětem dalších úprav 3D modelu pouze jeden list, ve kterém se výztuže pro přehlednost rozdělí na výztuž na odtokové a výztuž na náběžné hraně.



Obrázek 43 Řez středem vrtule

7.1.1 Náboj

Náboj ve vrtuli slouží k přenosu kroutícího momentu ze hřídele motoru na samotnou vrtuli. S ostatními komponenty vrtule je většinou spojen lepidlem. Materiál náboje je sklolaminát, což je kompozitní materiál složený z vyztužujících skleněných vláken a epoxidové pryskyřice. Vyznačuje se vysokou pevností, tuhostí a nízkou hmotností.

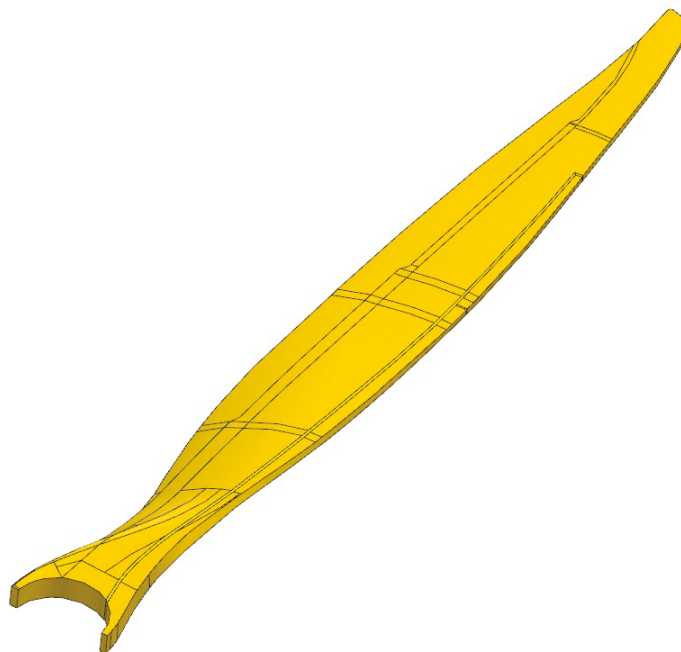


Obrázek 44 Náboj vrtule

7.1.2 Jádro

Jádro ve vrtuli slouží jako výplň a je vyrobeno z polymetakrylimidové (PMI) pěny. Vyznačuje se nízkou hmotností a vynikajícími tlumícími vlastnostmi. V kontextu pěnových materiálů má také velmi vysokou pevnost. Spojení jádra s ostatními komponenty vrtule je dáno technologií výroby vrtule, nejčastěji se však spojení zajišťuje speciálními lepidly. Jádro

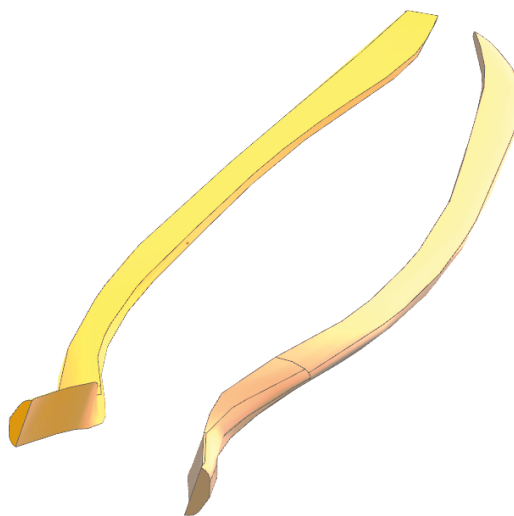
v podstatě kopíruje geometrii listu vrtule s určitým odsazením. Na plochách jádra jsou pak vyfrézovány zářezy, které odpovídají tloušťce kompozitního profilu pláště.



Obrázek 45 Jádru vrtule

7.1.3 Výztuhy

Výztuhy se při konstrukci vrtule používají pro zvýšení tuhosti a odolnosti proti nárazům. Jsou tvořeny z uhlíkových vláken, které se upěchují podélně na odtokové a náběžné hraně mezi jádro a vnější plášť vrtule. Jejich tvar je definován tvarem odtokové a náběžné hrany vrtule a plochou průřezu v určitých vzdálenostech od osy rotace vrtule.

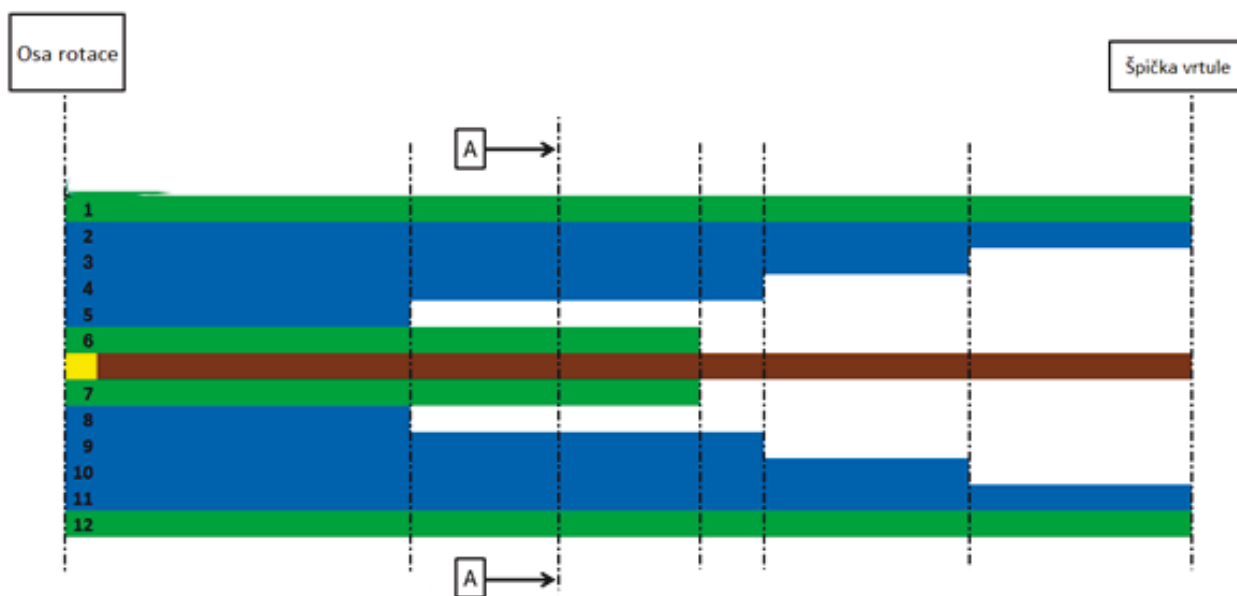


Obrázek 46 Modely výztuh

Výztuhy nemají ve skutečnosti tvar, který je zobrazen na obr. č.46, nicméně pro naše účely FEM analýzy bylo vhodné jejich model vytvořit právě takto, aby nedocházelo k chybám kvůli kontaktům při spouštění simulace, z hlediska pevnosti a tuhosti listu vrtule bude mít změna tvaru výztuh pouze malý význam, neboť velikost jejich průřezu zůstala zachována, stejně jako tvar jejich vodící čáry (odtokové a náběžné hrany).

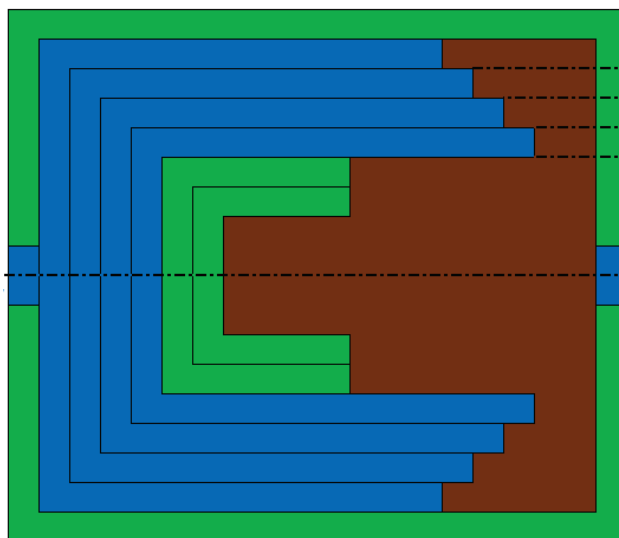
7.1.4 Vnější plášť

Vnější plášť představuje kompozitní skořepinu, která definuje finální vzhled a tvar vrtule. Materiálová struktura pláště je vytvořena z vrstev prepregů s uhlíkovými vlákny. Tloušťka pláště není v celé jeho ploše konstantní, nýbrž mění se podle vrstvení jednotlivých vrstev prepregu. Uložení vrstev prepregu v plášti definuje plán vrstvení, který je zobrazen na obrázcích 47 a 48.



Obrázek 47 Podélné zobrazení plánu vrstvení

Řez A-A



Obrázek 48 Příčné zobrazení plánu vrstvení v řezu A-A

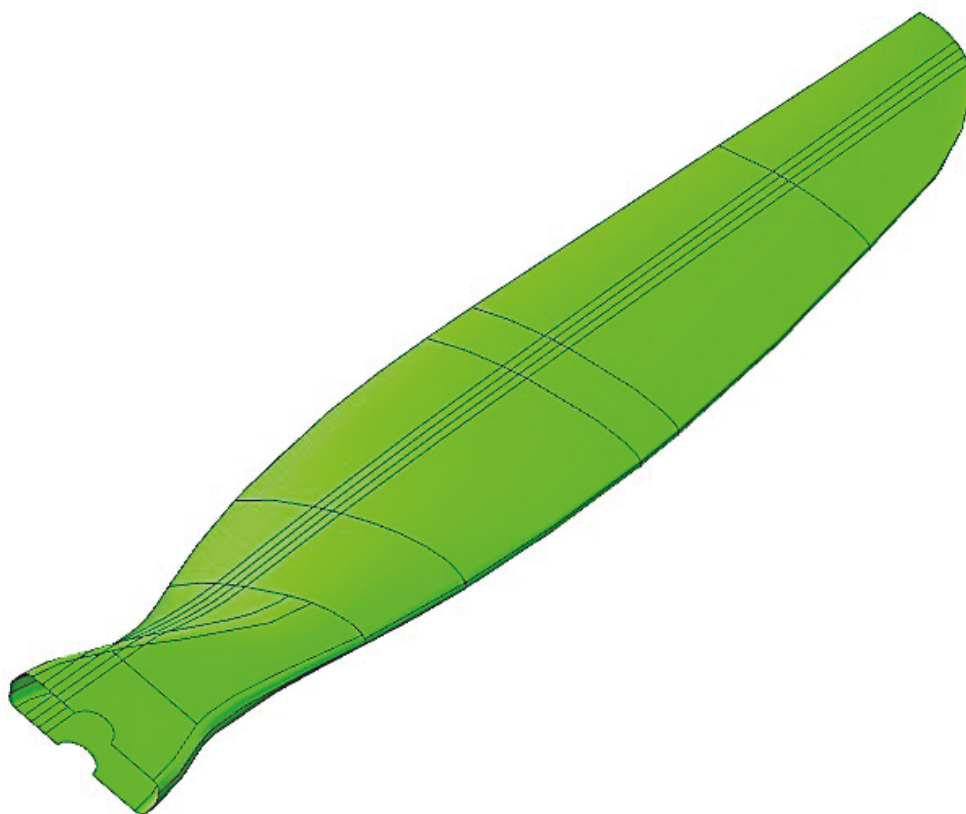
Barvy v plánu referují na materiály popsané v tabulce č.2, Jádro (hnědá) bude obaleno po celém obvodu zhruba do půlky své délky prepregem s tkaninovou vazbou. Následovat budou čtyři vrstvy s jednosměrně orientovanými vlákny, které jsou uloženy přes náběžnou hranu. Pohledovou vrstvou bude opět tkanina, která bude uložena po celém obvodu jádra i celé délce od osy rotace až po špičku vrtule.

Tabulka 2 Tabulka materiálů v plánu vrstvení.

Součást	Materiál	Kompozice vláken	Tloušťka vrstvy [mm]	Orientace [°]	Vlákna
Plášť	Uhlíkový prepreg	Tkanina	0,2	45	HT
	Uhlíkový prepreg	UD – jednosměrná vlákna	0,15	0	HT
Jádro	PMI Pěna	/	/	/	/
Náboj	Sklolaminát	/	/	/	/

CAD model pláště byl charakterizován pouhou plochou vnějšího tvaru listu vrtule, která byla vytvořena pomocí funkce *offset*. Tloušťku této plochy budou ve FEM modelu

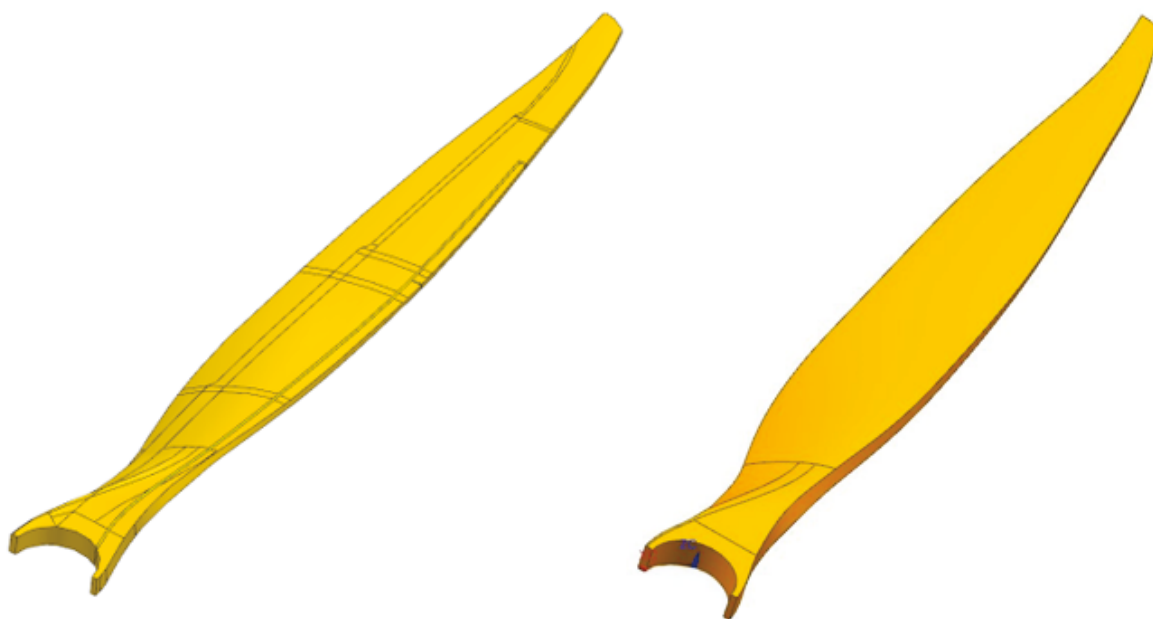
definovat tloušťky vrstev laminátů, které budou k tomuto modelu přiřazeny později. Aby bylo možné jednotlivé vrstvy laminátu definovat přesně podle plánu vrstvení zobrazenému výše, je nutné plochu pláště rozdělit dle několika rovin, jejichž umístění odpovídá konci každé z vrstev v podélném a příčném směru.



Obrázek 49 CAD model pláště listu vrtule

7.2 Úprava CAD modelů pro FEM

Před zahájením operací týkajících se FEM analýzy je nutné provést na jednotlivých CAD modelech několik změn, které jsou nutné hlavně kvůli nastavení kontaktů v pozdějších fázích simulace. Jak je patrné z obrázku č. 45, model jádra má na sobě zářezy, které slouží k uložení jednotlivých vrstev kompozitu. V důsledku toho vzniká mezi modelem jádra a pláště mezera, která by mohla způsobit problémy při nastavení kontaktů a následném výpočtu simulace.



Obrázek 50 Změna geometrie jádra

Vzhledem k tomu, že jádro listu je vyrobeno z PMI pěny, která má v poměru s materiálem výztuh či pláště velmi nízké mechanické vlastnosti, bylo rozhodnuto, že model jádra může být oproti skutečnému jádru pozměněn tak, aby zaplňoval celý prostor uvnitř pláště mezi výztuhami a nábojem, aniž by došlo k výraznému ovlivnění výsledků analýzy.

8 FEM MODEL VRTULE

Po dokončení modelování všech komponentů listu vrtule došlo k převedení geometrie do prostředí FEM, kde byly všem součástem přiděleny konečně prvkové sítě, které modely rozdělí do jednoduchých podoblastí (elementů). Velikost elementů silně ovlivňuje přesnost výpočtu. Platí, že čím menší jsou elementy, tím přesnější je výpočet, nicméně menší elementy způsobí delší dobu výpočtu a je proto vhodné najít jistou střední cestu, kdy bude výpočet dostatečně přesný, přičemž doba výpočtu nebude příliš dlouhá. K definici sítě se váže také definice materiálu a jeho mechanických vlastností, které jsou při mechanickém výpočtu klíčové. Hodnoty mechanických vlastností materiálů, které byly do programu siemens NX zadány jsou zobrazeny v tabulce č.3.

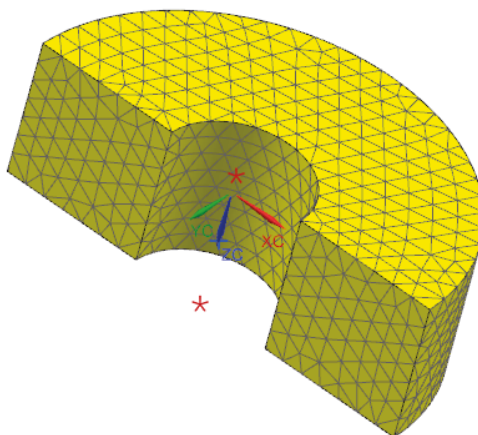
Tabulka 3 Hodnoty mechanických vlastností použitých materiálů

Mechanická vlastnost	Uhlíková vlákna 1	Uhlíková vlákna 2	Epoxid	Sklolaminát	PMI pěna
Youngův modul pružnosti E (GPa)	235	240	3	25	0,083
Poissonův poměr ν	0.2	0.2	0,30	0,25	0,30
Hustota ρ (kg/m ³)	1790	1820	1200	1850	50
Pevnost v tahu Rm_{TAH} (MPa)	4410	4900	80	370	1,68
Pevnost v tlaku Rm_{TLAK} (MPa)	1400	1600	110		0,85
Smyková pevnost Rm_{SMYK} (MPa)	85	90	20	55	0,85

8.1 Náboj

Síť náboje byla vytvořena pomocí 3D elementu typu CTETRA (4), tento element má geometrii čtyřstěnu a uzly jsou vytvořeny pouze ve vrcholech jehlanu. Jedná se o element s lineární interpolací. Kvůli jednoduché geometrii náboje, který navíc nemá příliš velký vliv

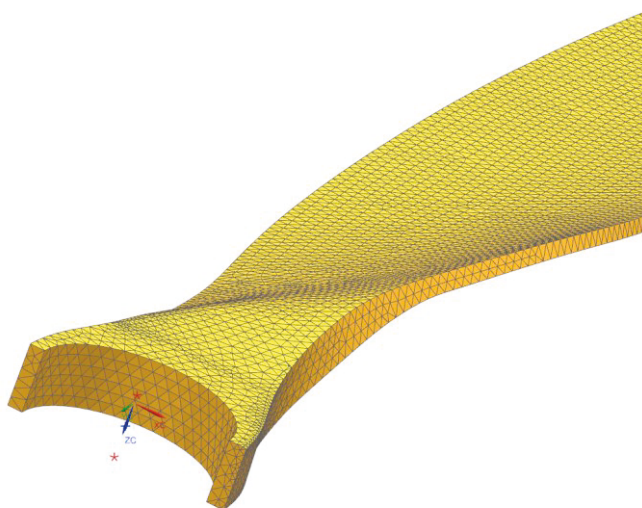
na výsledek simulace byla velikost elementu zvolena 2 mm. K síti byl přiřazen materiál s názvem sklolaminát.



Obrázek 51 FEM model náboje

8.2 Jádru

Síť jádra byla stejně jako v případě náboje tvořena 3D elementy typu CTETRA (4). Z důvodu složitější geometrie, než v případě náboje byla zvolená velikost elementu 1,5 mm. Síti jádra byl přiřazen materiál s názvem PMI.

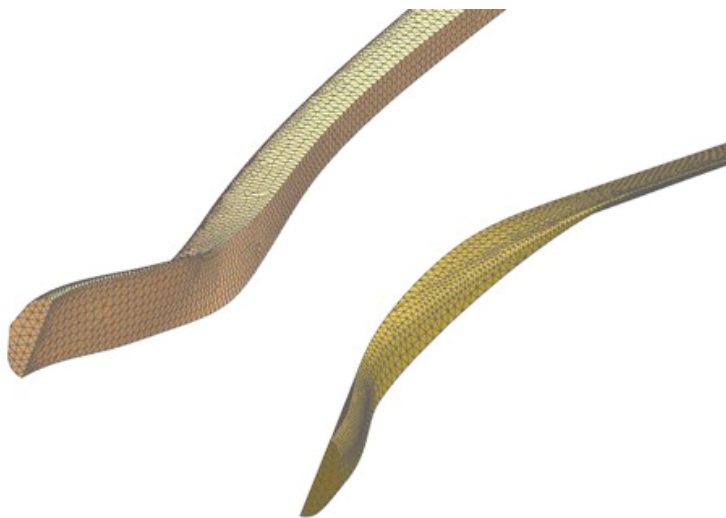


Obrázek 52 FEM model jádra

8.3 Výztuhy

Rovněž síť výztuh byla tvořena elementy typu CTETRA (4), výztuže mají však oproti předešlým dvěma komponentům zásadní vliv na tuhost listu vrtule a hrubá síť by mohla

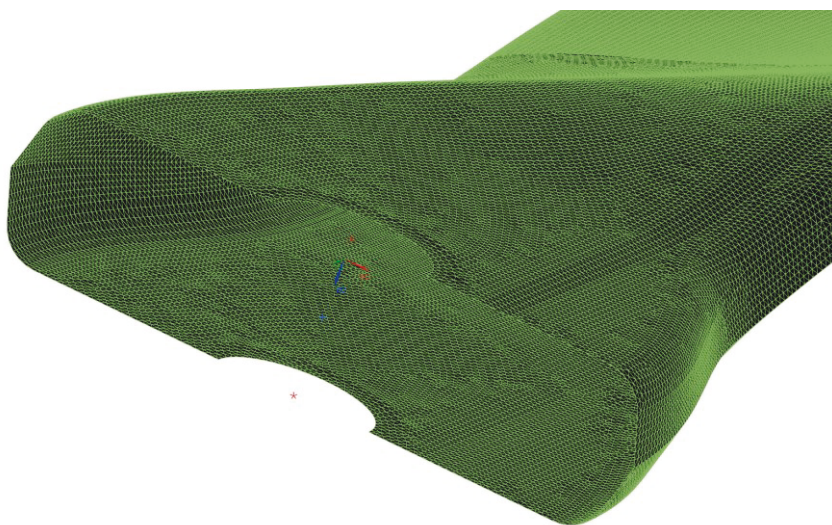
výsledky značně ovlivnit. Velikost elementů byla proto nadefinována jako 1 mm. K síti výztuh byl přiřazen materiál uhlíková vlákna 1.



Obrázek 53 FEM model výztuh

8.4 Vnější plášť

Model vnějšího pláště byl definován pouze plochou, na jeho síť tedy budou použity 2D elementy typu CTRIA3. Jedná se o trojúhelníkové elementy s uzlem v každém vrcholu. Interpolace těchto elementů je lineární. Vzhledem k tomu, že plášť je nejvíce namáhán, má složitou materiálovou strukturu a zároveň jeho geometrie je složitá, byla elementům této síť přiřazena velikost 0,5 mm. Tloušťky 2D elementů na plášti není ve všech místech stejná, a proto nemůže být obecně definována, každému elementu bude přiřazena tloušťka až v rámci ukládání vrstev kompozitní struktury.



Obrázek 54 FEM model vnějšího pláště

Jelikož je plášť vytvořen z vrstveného laminátu, je nutné v programu nejdříve vytvořit laminát, který bude odpovídat struktuře laminátu použité při výrobě pláště.

8.4.1 Tvorba materiálové struktury pláště

Materiálová struktura pláště je vytvořena z několika vrstev laminátu, který je uložen podle plánu vrstvení na obrázcích 47 a 48. Při nastavování kompozitní struktury je nutné nejdříve vytvořit materiály jednotlivých vrstev. K tomuto úkonu posloužila funkce *Laminate Ply Material Manager*, ve které se byly nejdříve vytvořeny dva typy vrstev, jedna s tkaninovou vazbou a jedna s jednosměrnými vlákny.

Laminate Ply Material Manager

Ply Material Creation

Type: Unidirectional

Name: Unidirectional1

Label: 5

Create

Ply Material List

Name	Id	Type
Uhlíkový prepreg - ...	2	Woven
Uhlíkový prepreg - j...	4	Unidirectional

Close

Obrázek 55 Laminate ply material manager

Každé z vrstev byly následně přiřazeny vlastnosti, které odpovídají vlastnostem prepregu, ze kterého byly vyrobeny. Mezi základní údaje patří materiály vláken a matrice, objemový zlomek výztuže a tloušťka vrstvy. V této funkci lze nadefinovat také pevnostní vlastnosti pro každou vrstvu. Solver by si sice vlastnosti každé z vrstev dokázal přepočítat sám jen z vlastností dílčích složek podle některého z teoretických vztahů, nicméně součástí podkladů od firmy Mejlík propellers s.r.o byly i údaje o vrstvách přímo od výrobců včetně

mechanických vlastností, které jsou výhodné pro přesnější analýzu, jelikož poskytují skutečně reálné hodnoty. Mechanické vlastnosti jednotlivých vrstev jsou uvedeny v tabulce č.4.

Tabulka 4 Pevnostní vlastnosti vrstev

Typ vrstvy	$RmT_{\parallel}$ (MPa)	$RmC_{\parallel}$ (MPa)	$RmT_{\perp}$ (MPa)	$RmC_{\perp}$ (MPa)	RmS (MPa)	$RmSI$ (MPa)
Jednosměrný pás	2080	1200	65	180	62	86
Tkanina	670	645	520	495	63,5	75,5

Kde $RmT_{\parallel}$ - pevnost v tahu ve směru vláken, $RmC_{\parallel}$ - pevnost v tlaku ve směru vláken, $RmT_{\perp}$ - pevnost v tahu v kolmém směru, $RmC_{\perp}$ - pevnost v tlaku v kolmém směru, RmS – smyková pevnost vrstvy, $RmSI$ – interlaminární smyková pevnost.

Pro výpočet kritéria selhání materiálu každé vrstvy byl vybrán model Tsai-Wu. Tento model je při hodnocení pevnosti a stability kompozitních materiálů jedním z nejpoužívanějších a poskytuje způsob, jak určit, zda kompozitní materiál vydrží dané zatížení bez selhání. Tento model dokáže predikovat poškození u vícevrstevných kompozitů s různou orientací vláken, přičemž zvládá i složitější napětíové stavy, jako jsou kombinace normálových a smykových napětí, které jsou v případě vrtule běžné, přičemž rozlišuje napětí v tahu a v tlaku. Pro zahrnutí křížových interakcí do modelu je nutné přiřadit každé vrstvě tzv. interakční kritérium F_{12} . Výpočet tohoto kritéria vychází ze vztahu:

$$F_{xy} = -\frac{\sqrt{F_{xx} \cdot F_{yy}}}{2} \quad (42)$$

$$\text{Kde } F_{xx} = \frac{1}{RmT \cdot RmC}$$

Hodnoty interakčního kritéria F_{12} byly spočítány podle hodnot z tabulky pro vrstvu s jednosměrnými vlákny:

$$F_{11} = \frac{1}{RmT_{\parallel} \cdot RmC_{\parallel}} = \frac{1}{2080 \cdot 1200} = -4,01 \cdot 10^{-7} \frac{1}{MPa^2}$$

$$F_{22} = \frac{1}{RmT_{\perp} \cdot RmC_{\perp}} = \frac{1}{65 \cdot 180} = -8,54 \cdot 10^{-5} \frac{1}{MPa^2}$$

$$F_{12} = -\frac{\sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}}{2} = -\frac{\sqrt{4,01 \cdot 10^{-7} \cdot 8,54 \cdot 10^{-5}}}{2} = -2,93 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{MPa}^2}$$

Podobně byl koeficient F_{12} spočítán také pro tkaninu. Dále byly vrstvy naskládány na sebe pomocí funkce *Global layup*, ve které se nejdříve vytvořil potřebný počet vrstev (v našem případě 6) a následně se ke každé vrstvě přiřadil materiál z *laminat ply material manageru*, dále byl přiřazen úhel natočení vláken (v případě tkaniny se uvažuje natočení vláken osnovy). Tvorba kompozitové struktury přes funkci *Global Layup* je výhodná, protože umožní definovat více vrstev do stejného místa, přičemž zároveň s tím může být každá vrstva definována pro různé plochy či elementy.

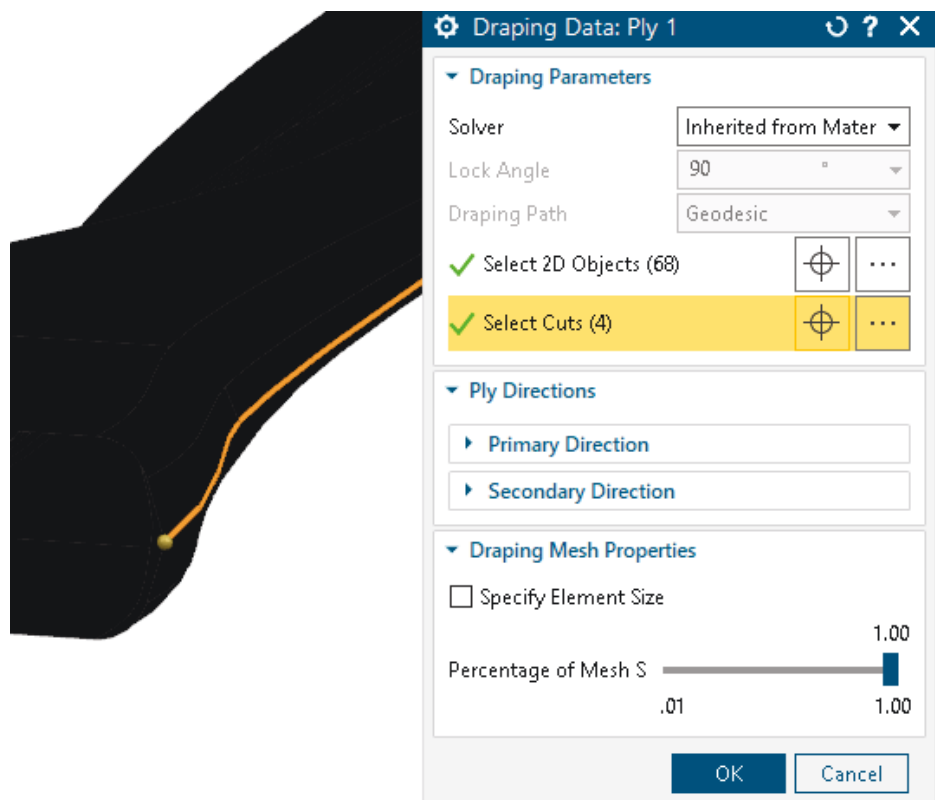
Global Ply Id	Composition	Thi...	An...	Status	Description	Active
21	Tkanina	0.2	45	Up-to-date		Yes
20	jednosmerny pas	0.15	0	Up-to-date		Yes
19	jednosmerny pas	0.15	0	Up-to-date		Yes
18	jednosmerny pas	0.15	0	Up-to-date		Yes
17	jednosmerny pas	0.15	0	Up-to-date		Yes
1	Tkanina	0.2	45	Up-to-date		Yes

Obrázek 56 Uskupení vrstev prepregu ve funkci *Global layup*

8.4.2 Ukládání vrstev prepregů a návrh nástřihů

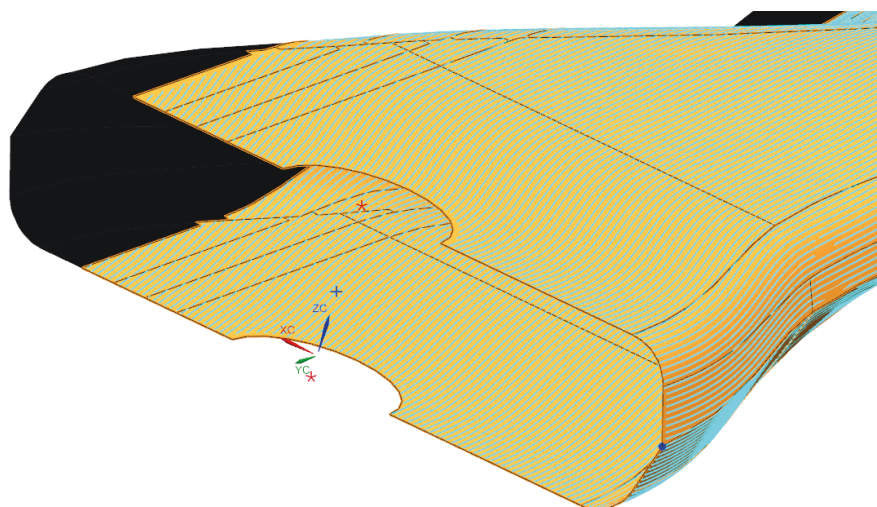
Po vytvoření layupu byly pro každou vrstvu vybrány plochy na modelu, ve kterých se bude příslušná vrstva ukládat. V okně výběru ploch pro každou z vrstev je možné vybrat typ solveru, přes který se vypočítají deformace prepregu (úhel odklonění vláken od požadovaného úhlu) v rovinné podobě při ukládání do obecné geometrie vybraných ploch. Pro zajištění přesnosti úhlu natočení vláken při ukládání každé z vrstev byl zachován typ solveru „*inherited from material*“. Jako referenční směr, který slouží jako nulový úhel vrstvy byla vybrána osa Y, která směřuje radiálně od osy otáčení ke hrotu vrtule.

Po nadefinování všeho potřebného byl spuštěn *Update*. Díky zvolenému solveru se při výpočtu každé vrstvy zobrazují místa, kde se může vrstva krčit nebo trhat, zároveň jsou ukázána také místa, ve kterých se směr vláken ve vrstvě příliš odkloňuje od požadovaného směru. Výše uvedené problémy jsou běžné také při ukládání vrstev prepregu v praxi, a dají se částečně řešit nástřihnutím prepregu tak, aby k defektům vrstvy nedocházelo. V případě modelu tomu není jinak, po spočítání každé vrstvy byly proto na součásti navrženy nástřihy, které by mohly defektům vrstvy zabránit.



Obrázek 57 Výběr ploch a návrh nástřihů pro vrstvu

S každým navrženým nástřihem byl znovu spuštěn update, který znovu vypočítal deformaci každé z vrstev. Cílem bylo dosáhnout toho, aby byly všechny vrstvy prepregu uloženy správně a v žádném místě se netrhaly, v případě trhání vrstev při ukládání by totiž došlo k výraznému ovlivnění úhlu natočení vláken, které by mělo dopad na výsledky simulace. Po dokončení tohoto kroku bude mít každý element 2D sítě přiřazen počet vrstev, a tedy i tloušťku, a také úhel natočení vláken v každé vrstvě.



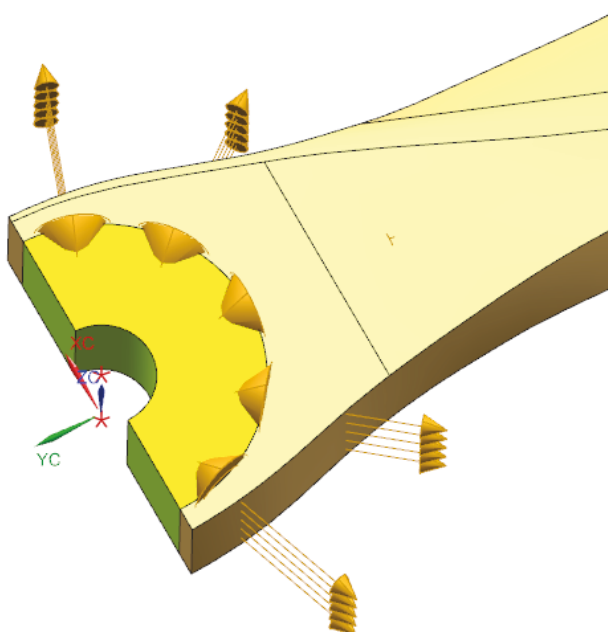
Obrázek 58 Uložení vrstvy

9 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Jakmile je FEM modelu nadefinována síť a přiřazen materiál, přechází práce do prostředí simulace, ve které je prvním krokem nadefinování okrajových podmínek. Okrajové podmínky by měly odpovídat reálným podmínkám při provozu a patří mezi ně nastavení kontaktů mezi jednotlivými tělesy, nastavení upnutí listu a také nadefinování vnějšího zatížení, které na list při provozu působí.

9.1 Nastavení kontaktů

List lopatky je složen celkem z pěti částí, nastavení kontaktů je důležité proto, aby solver dokázal správně vyhodnotit přenos zatížení a deformací z jedné součásti na druhou. Vzhledem k tomu, že součásti lopatky jsou k sobě v praxi většinou lepeny, byl pro nastavení kontaktu mezi všemi součástmi použit typ kontaktu *glued* s pomocí funkce *Surface-to surface gluing*. Po rozkliknutí této funkce se vždy vybraly dvě tělesa, mezi kterými měl vzniknout kontakt. funkce automaticky vyhledá plochy, které jsou od sebe v mezi vzdálenosti *search distance*, která byla určena jako 0,05 mm.

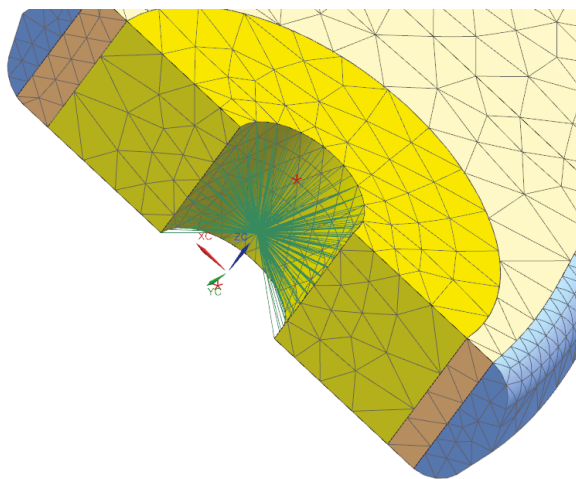


Obrázek 59 Zobrazení kontaktu mezi nábojem a jádrem

Funkce *Surface-to surface gluing* spojí dvě součásti tak, že plochy, které jsou součástí kontaktu se v podstatě spojí v jednu, součásti se tak od sebe nemohou oddělit, ani po sobě klouzat.

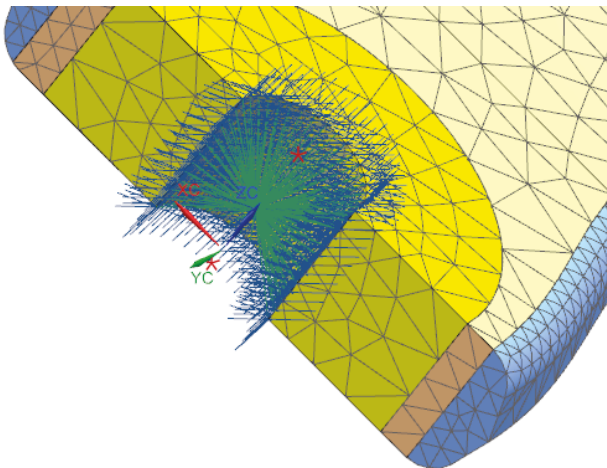
9.2 Nastavení vazeb

Další částí nastavování okrajových podmínek bylo definování vazeb. V praxi je list vrtule připevněn přes náboj ke hřídeli, která na něj převádí krouticí moment, čímž vzniká rotace vrtule. K tomu, aby došlo ke správné interpretaci tohoto uchycení ve FEM analýze, byla použita funkce *1D connection*, která propojila uzly na vnitřní rotační ploše náboje s uzlem ležícím v ose rotace. Jako typ těchto elementů byl zvolen *Constrain equal*, čímž byla zajištěna pevná vazba těchto uzlů, které se při zatížení musí pohybovat společně. Jedná se tedy o jakési zjednodušení hřídele na 1D elementy, které charakterizují zcela tuhý prvek. Tento krok je důležitý proto, aby se odstředivá síla přenášela korektně do listu vrtule.



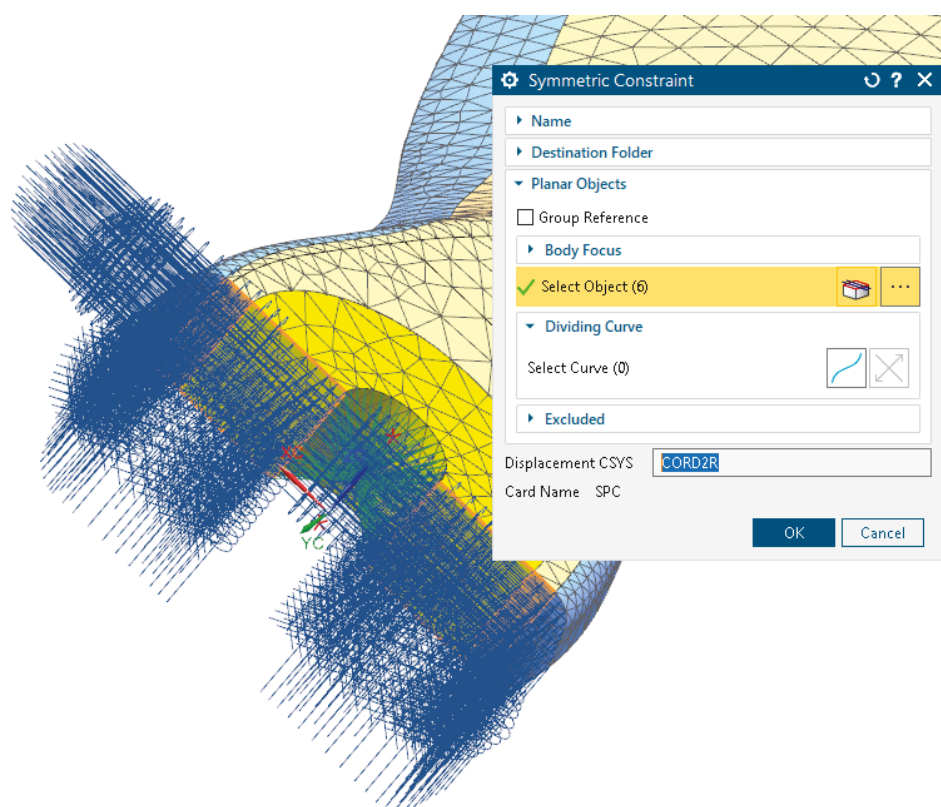
Obrázek 60 1D Connection

Dále byla elementům vytvořeným v rámci 1D connection přidělena vazba *Fixed*, která odebere všechny stupně volnosti. Tato vazba způsobí, že těleso zůstává statické a fixuje jej v prostoru.



Obrázek 61 Vazba Fixed

Další vazbou, která byla při definování okrajových podmínek použita, byla vazba symetrie, která byla vytvořena pomocí funkce *symmetric constrain*. Tato vazba se s výhodou používá k výpočtům symetrických těles kvůli nižšímu celkovému počtu elementů, a tedy kratší době výpočtu. Ve FEM tato vazba znamená, že model používá geometrickou a zatěžovací rovnováhu, takže stačí spočítat jen část modelu a zbytek solver dopočítá na základě symetrických okrajových podmínek. Pro správnou definici symetrické vazby je nutné zvolit vhodnou rovinu symetrie, která byla v našem případě shodná s rovinou řezu.



Obrázek 62 Vazba symetrie

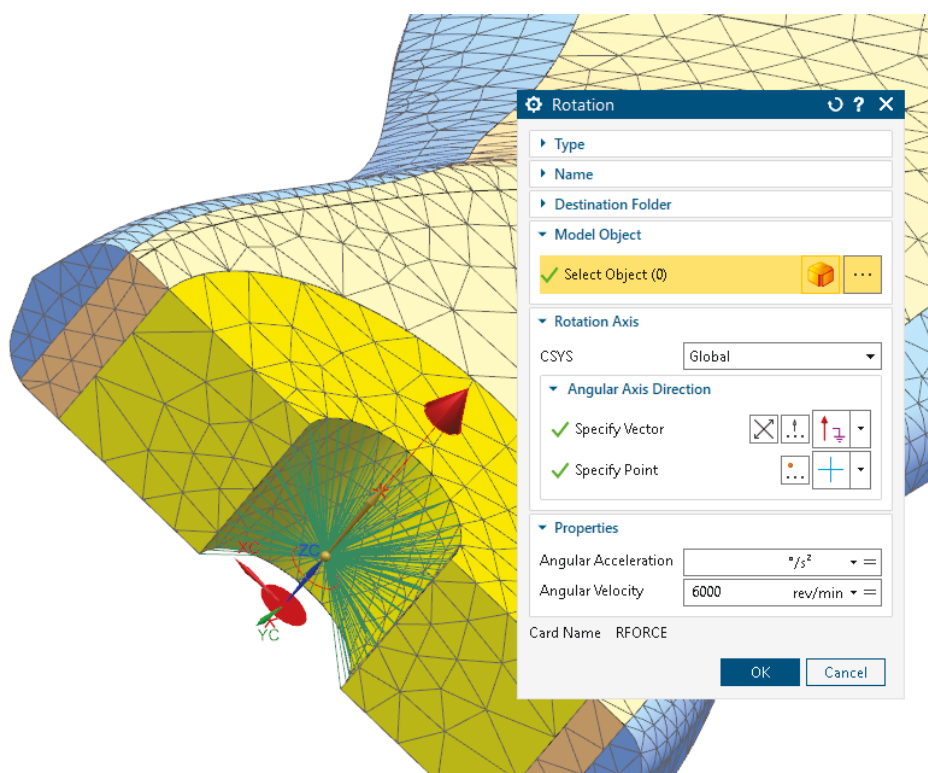
Vazba symetrie odebere v rovině symetrie jeden stupeň volnosti, a to normálovou složku posunutí – uzly se nemohou posouvat kolmo k rovině symetrie.

9.3 Nastavení zatížení

Posledním typem okrajových podmínek bylo nastavení vnějšího zatížení, které na list vrtule při provozu působí. V zásadě působí na list vrtule dvě hlavní síly, a to odstředivá síla a aerodynamická síla. Pro naše účely bylo působení aerodynamické síly zjednodušeno tak, že se působící aerodynamická síla rozdělila do dvou složek – síly působící axiálně na list vrtule (tahová složka aerodynamické síly) a síly působící ve směru proti otáčení vrtule

(momentová složka aerodynamické síly). Zatížení bylo definováno tak, aby odpovídalo zatížení při největším možném reálném zatížení vrtule (maximálních otáčkách).

Odstředivá síla byla nadefinována pomocí funkce *Rotation*, přičemž hodnota rychlosti otáčení *Angular Velocity* byla 6000 ot/min. Tento typ zatížení nezpůsobí reálnou rotaci modelu (model ani rotovat nemůže, kvůli vazbě fixed), pouze dává solveru informaci, že se model kolem zvolené osy otáčí, přičemž solver dopočítá odpovídající odstředivé síly, které by na model při otáčení působily. Kvůli tomuto zatížení musí být správně zadána hustota materiálů, protože setrvačné síly přímo závisí na hmotnosti jednotlivých částí.



Obrázek 63 Nastavení rotace

Tahová složka aerodynamické síly působí na list ve směru osy rotace (axiální zatížení). Ze statických testů vrtule vyplynulo, že tah vrtule při 6000 ot/min je přibližně 270 N. Pro interpretaci tohoto zatížení v rámci statické pevnostní analýzy byla použita funkce *pressure*, kdy se tah vrtule rozdělil na dvě poloviny pro každý list, velikost tlaku na plochu listu v axiálním směru byla určena jako:

$$P = \frac{T}{2S_{la}} = \frac{270}{2 \cdot 28000} = 0,005 \text{ MPa} \quad (43)$$

Kde T – tah vrtule [N], S_{la} – průmětná plocha listu v rovině kolmé na směr letu [mm]

Ve skutečnosti však tah není po celé průmětné ploše rozložen rovnoměrně, aerodynamické zatížení (vztlak a odpor) se mění podél délky listu, přičemž roste s rostoucím poloměrem vrtule.

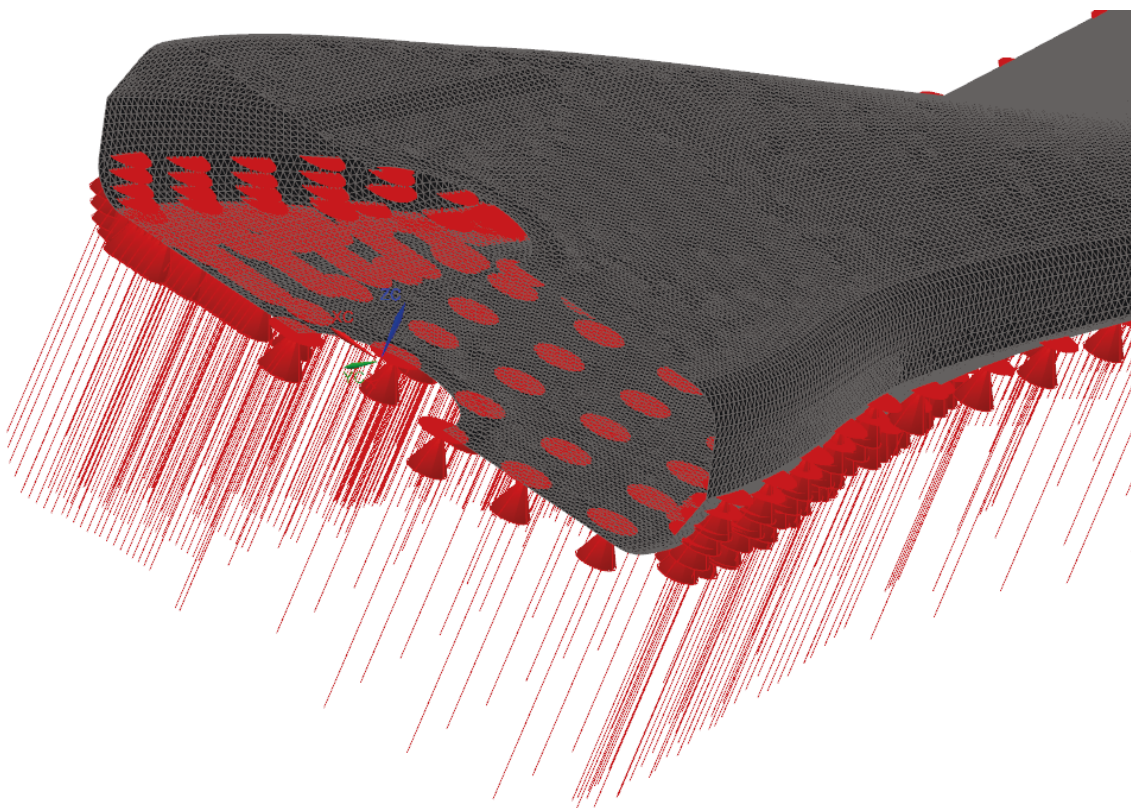
Pro zpřesnění interpretace zatížení v axiálním směru byla proto hodnota $P = 0,005 \text{ MPa}$ uvažována jako průměrná hodnota, která odpovídá hodnotě tlaku v $\frac{r}{R} = 0,5$. Následně byl tlak aplikován v segmentech podél délky listu. Pro tento účel posloužilo rozdělení plochy pláště z kapitoly 7.1.4. Velikost tlaku byla pro každý segment délky listu přepočítána:

$$P_{sn} = \frac{r_s}{R} \cdot P_{max} [\text{MPa}] \quad (44)$$

Kde P_{sn} – tlak aplikovaný v dílčím segmentu délky, r_s – průměrná vzdálenost segmentu od osy otáčení, R – celková délka listu, P_{max} – maximální tlak

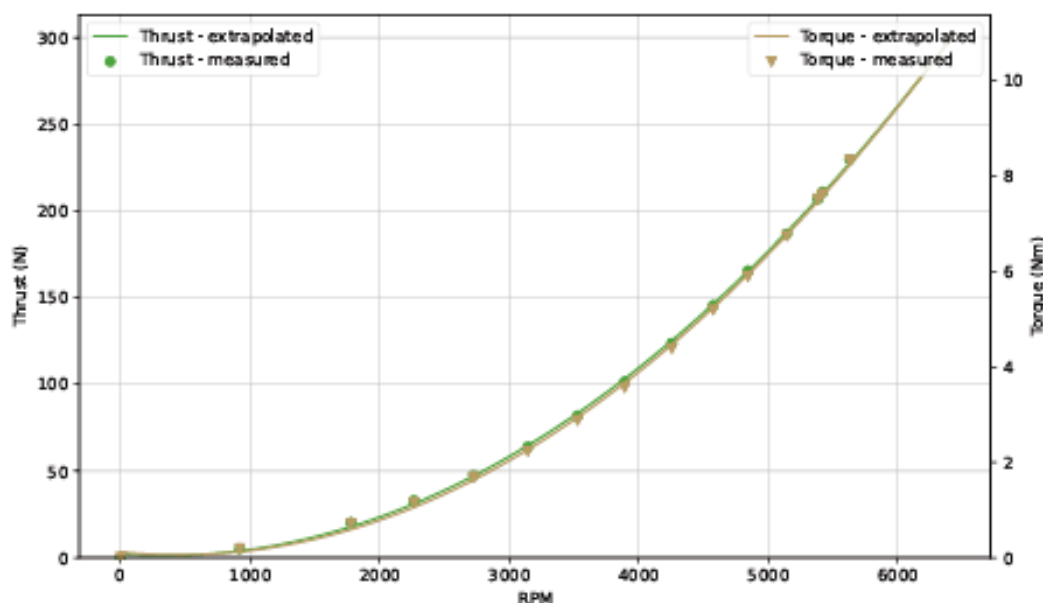
Při výpočtu bylo uvažováno lineární rozdělení tlaku, proto

$$P_{max} = 2P = 2 \cdot 0,005 = 0,01 \text{ MPa} \quad (45)$$



Obrázek 64 Zatížení tahovou složkou aerodynamické síly

Momentová složka aerodynamické síly vzniká jako důsledek překonávání odporu vzduchu, působícího na list ve směru rotace. Právě tento aerodynamický odpor způsobuje reakční kroučící moment v ose rotace. Stejně jako v případě tahové složky, i toto zatížení bylo interpretováno pomocí funkce pressure. Výstupem statických testů však v případě momentové složky nebyla síla, nýbrž moment, který působil na hřídel během otáčení, jeho hodnota byla při 6000 *ot/min* naměřena 9,7 *N · m*.



Graf 2 Průběh tahu a momentu v závislosti na otáčkách

Při uvážení rozdělení momentové složky síly se opět vycházelo z předpokladu, že je průběh rozložení lineární, přičemž se směrem ke špičce vrtule postupně zvětšuje. Představíme – li si list vrtule jako nosník, na které působí spojitě zatížení, platí pro toto zatížení funkce:

$$q(r) = \frac{q_{max} \cdot r}{R} \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (46)$$

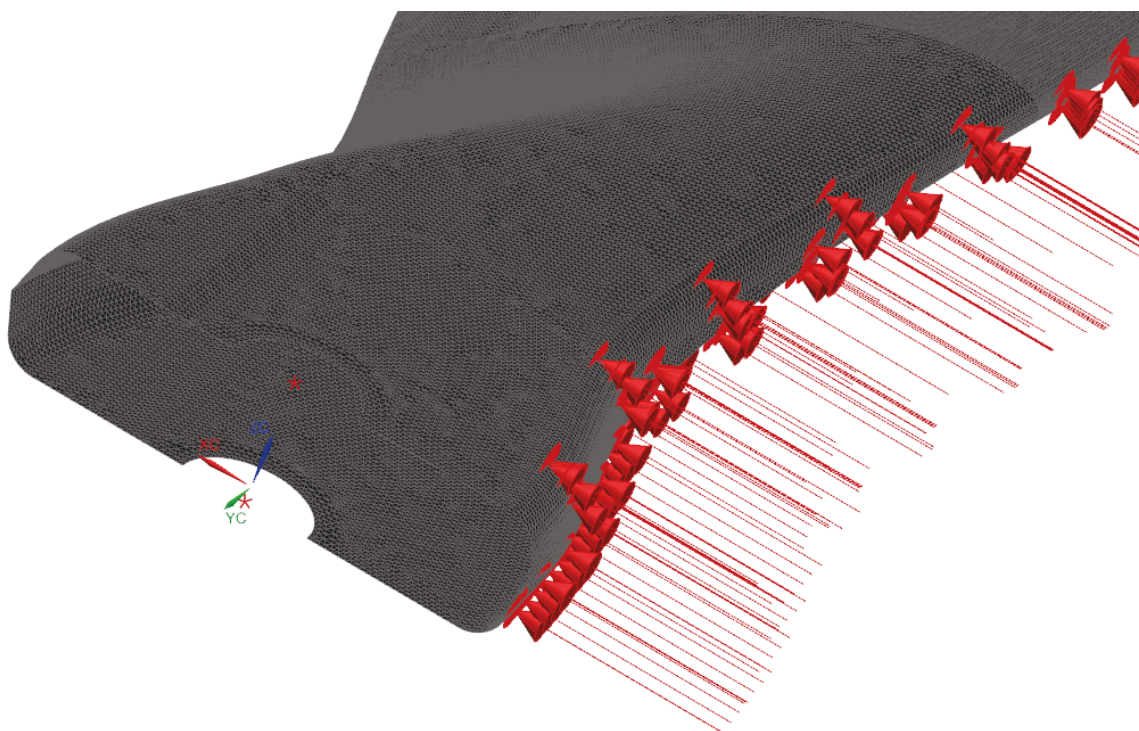
Pro výpočet q_{max} byla využita rovnice ohybového momentu při spojitěm lineárním zatížení. Hodnota momentu, která vyšla ze statických testů odpovídá momentu od dvou listů, při výpočtu je tedy nutné počítat s polovinou této hodnoty.

$$M = \frac{q_{max} \cdot R^3}{6R} \rightarrow q_{max} = \frac{6R \cdot M}{R^3} = \frac{6 \cdot 355,6 \cdot 4850}{355,6^3} = 0,23 \frac{N}{mm} \quad (47)$$

Další krok byl proveden analogicky s nastavením tahu, na každém délkovém segmentu listu bylo přepočítáno zatížení podle vztahu (46). Následně došlo k přepočtu na tlak pomocí velikosti průmětné plochy náběžné hrany ve směru rotace;

$$P_s = \frac{Q_s \cdot L_s}{S_s} [MPa] \quad (48)$$

Kde P_s – tlak na plochu segmentu, Q_s – vypočítané spojité zatížení na segmentu, L_s – délka segmentu, S_s – průmětná plocha segmentu

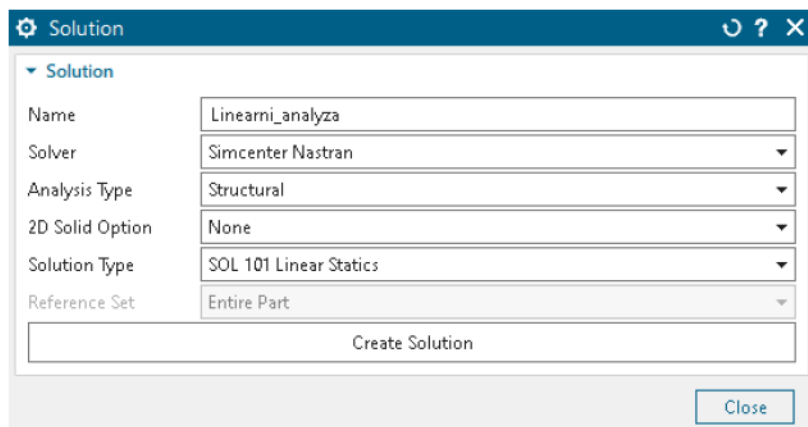


Obrázek 65 Zatížení momentovou složkou aerodynamické síly

Je zřejmé, že v případě definování průběhu tahové i momentové složky zatěžování došlo k jistému zjednodušení průběhu (průběh je uvažován jako lineární, navíc rozdělení do segmentů způsobí jistou „schodovitost“ průběhu) zatěžování. Toto zjednodušení je však v inženýrské praxi naprosto běžné (zvláště pokud není k dispozici detailní pole aerodynamického tlaku podél listu). Rozdělení tahové i momentové složky do segmentů je pro statickou analýzu dostatečně přesné.

10 LINEÁRNÍ ANALÝZA

Po nastavení FEM modelu a okrajových podmínek došlo k vytvoření lineární analýzy listu. Jako solver byl použit Simcenter Nastran, typ řešení SOL 101 Linear statics.



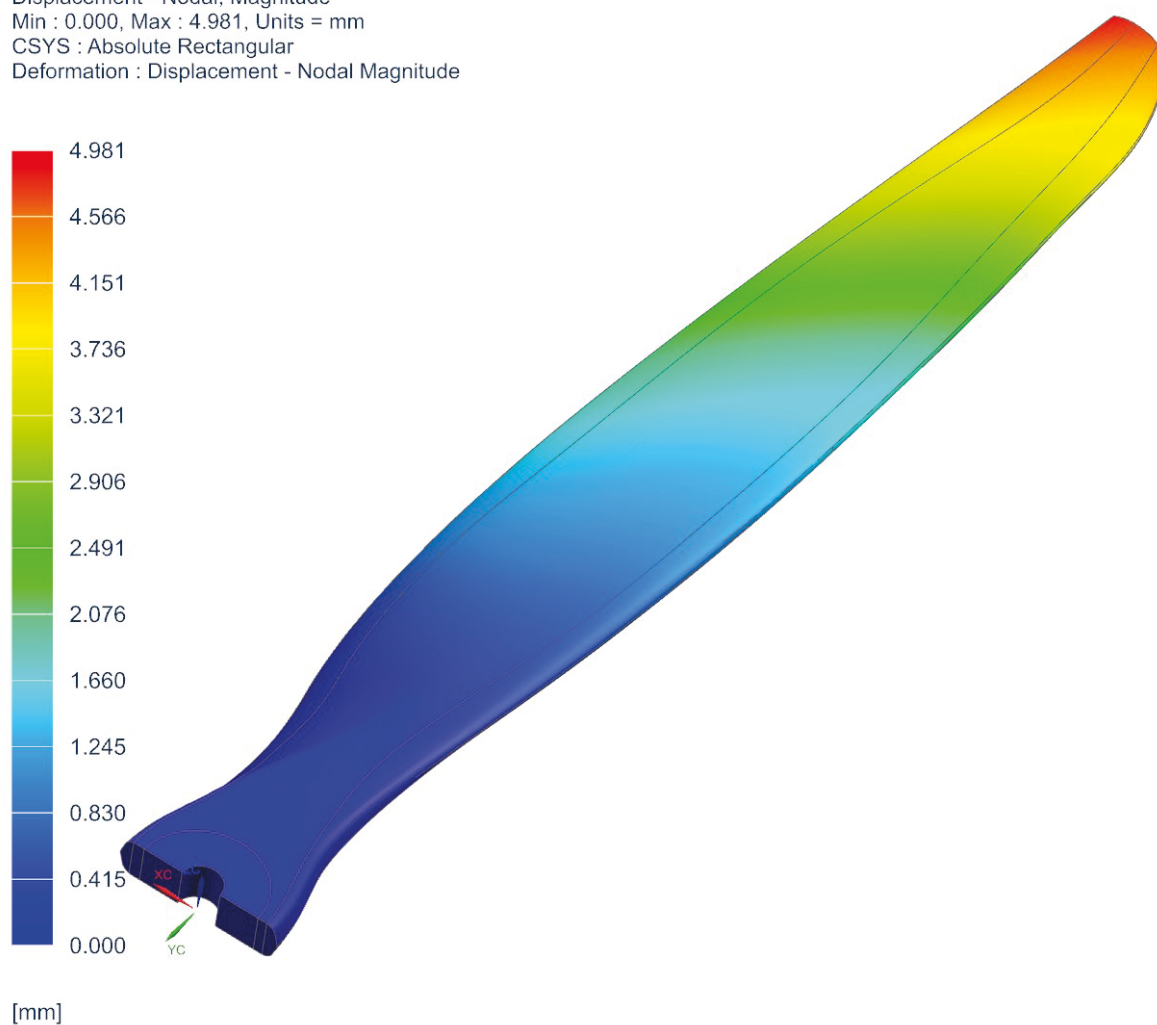
Obrázek 66 Vytvoření lineárního řešení

Lineární analýza je vhodná pro použití kvůli rychlosti výpočtu, který trvá v řádu minut. Nevýhodou lineární analýzy je však to, že není schopna zachytit jevy, které nastanou při deformacích, které zásadně ovlivní geometrii součásti, v důsledku čehož dojde k odklonu od lineární závislosti mezi zatížením, vnitřním napětím a deformací. Znamená to tedy, že referenční geometrie, pro kterou se počítají rovnovážné rovnice, zůstává v průběhu výpočtu v původním (nezatíženém) stavu, což může značně ovlivnit výsledky analýzy (přecenění, nebo podcenění deformací). Výsledky této analýzy proto poslouží pouze jako předběžný odhad, jenž bude použit při nastavování další (nelineární) analýzy se zaměřením na geometrickou nelinearitu, která bude schopna výše zmíněné nevýhody pokrýt a poskytne reálnější představu o deformacích i napětí v listu.

10.1 Výsledky deformace

Prvním výsledkem, který byl v případě lineární analýzy předmětem zájmu byla velikost deformace listu. Největší deformace vznikla na špičce (list se ohýbá). Maximální velikost deformace byla 5 mm.

tahohybyb : Solution 1 Result
Subcase - Statics 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Magnitude
Min : 0.000, Max : 4.981, Units = mm
CSYS : Absolute Rectangular
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



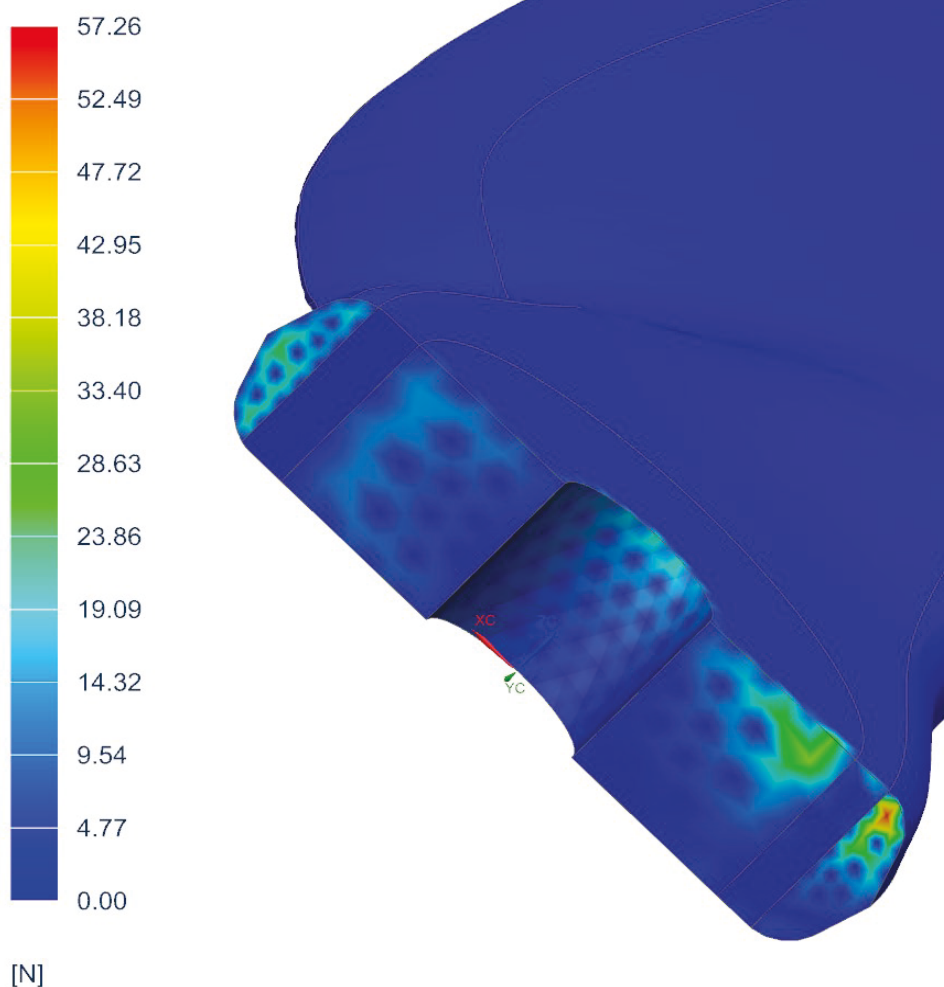
Obrázek 67 Výsledek lineární analýzy – posunutí

Informace o přibližné deformaci listu je pro další práci důležitá pro nadefinování konvergenčního kritéria zbytkového posunu, které je jedním z kritérií pro konvergenci výpočtu nelineární analýzy.

10.2 Výsledky Reakční síly

Další užitečný výstup z lineární analýzy byla reakční síla, která vzniká v místě upnutí vrtule. Největší reakční síly vznikaly podle očekávání ve výztuhách, ve kterých vzniká tahová síla v ose Y kvůli vazbě symetrie, nejvyšší hodnota reakční síly byla 57 N.

tahohyyb : Solution 1 Result
Subcase - Statics 1, Static Step 1
Reaction Force - Nodal, Magnitude
Min : 0.00, Max : 57.26, Units = N
CSYS : Absolute Rectangular
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



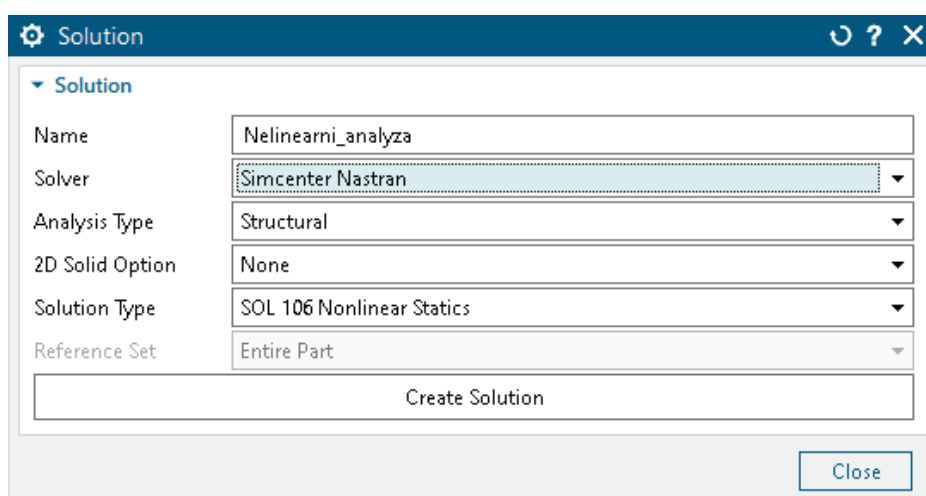
Obrázek 68 Výsledky lineární analýzy – reakční síla

Hodnota největší reakční síly je rovněž důležitá pro určení konvergenčního kritéria – v tomto případě zbytkové síly. Toto kritérium je definováno jako relativní velikost oproti nějaké referenční síle, přičemž maximální reakční síla je jako referenční síla ideální.

11 Nelineární analýza

Poté, co byla lineární analýza posouzena jako nedostatečná, přišla na řadu analýza nelineární. Tato analýza je mnohem silnější nástroj, který v průběhu výpočtu reaguje na změnu geometrie – během výpočtu dochází k aktualizaci geometrie a rovnováhových rovnic podle deformovaného stavu. Nelineární analýza je navíc schopna zachytit také ztrátu stability (vyklenutí, zborcení) a poskytuje celkově přesnější a reálnější výsledky.

Jako řešič pro nelineární analýzu byl opět použit řešič Simcenter Nastran, typ analýzy byl ponechán strukturální. Typ řešení byl však změněn na SOL 106 Nonlinear statics.



Obrázek 69 Vytvoření nelineární analýzy

Klíčovými parametry pro přesnost a předejití kolapsu výpočtu jsou počet inkrementů zatížení, počet maximálních iterací na inkrement a určení konvergenčních kritérií. Pochopení těchto parametrů a jejich vliv na průběh výpočtu je klíčové pro správné nastavení nelineární analýzy.

Počet inkrementů zatížení určuje, do kolika kroků se při výpočtu rozdělí zatížení. Tento parametr je pro stabilitu výpočtu klíčový, protože přímo určuje velikost inkrementů, je – li inkrement příliš velký, může dojít k selhání výpočtu. Obecně platí, že čím je chování modelu složitější, (geometrická nelinearita, lokální ztráta stability), tím menší jsou nutné inkrementy zatížení pro stabilní výpočet. V našem případě byl po několika nevydařených výpočtech stanoven počet inkrementů zatížení na 10.

Maximální počet iterací za inkrement definuje, kolik iterací může být během jednoho kroku použito, aniž by došlo ke konvergenci. Nedoje – li ke konvergenci během maximálního počtu iterací, může to znamenat, že výpočet je nestabilní a výsledky mohou

být nepřesné. Výpočetní algoritmus hledá iterativně rovnovážný stav konstrukce, přičemž konvergence nastane, pokud je rozdíl mezi dvěma následnými iteracemi menší než konvergenční kritéria. Pro náš výpočet byl stanoven počet maximální iterací za inkrement na 25.

Konvergenční kritéria jsou určující pro přesnost výpočtu. Určují, kdy solver zastaví iterace v jednom inkrementu, protože je řešení „dostatečně přesné“. Mezi nejčastější konvergenční kritéria patří zbytková síla, která charakterizuje rozdíl mezi vnějšími silami působícími na konstrukci a vnitřními silami. Dále sem patří zbytkový posun, nebo změna energie. Je-li některé ze zadaných kritérií po maximálním počtu iterací větší, než je požadováno, dojde k nekonvergenci, což může být důvod selhání výpočtu.

Nonlinear Parameters

▼ **Modeling Object**

Name: Nonlinear Parameters2

Label: 7

▼ **Properties**

Description: []

Card Name: NLPARM

▼ **General**

Number of Increments: 10

Time Increment for Creep: 0 s

Maximum Iterations per Load Increment: 25

Intermediate Output Flag: NO

▼ **Stiffness Updates**

Method: AUTO

Iterations Before Update: 10

▼ **Convergence Criteria**

☒ Displacement

Error Tolerance for Displacement: 5e-06

☒ Load

Error Tolerance for Load: 0.00057

☒ Work

Error Tolerance for Work: 1e-08

Obrázek 70 Nastavení parametrů nelineární analýzy

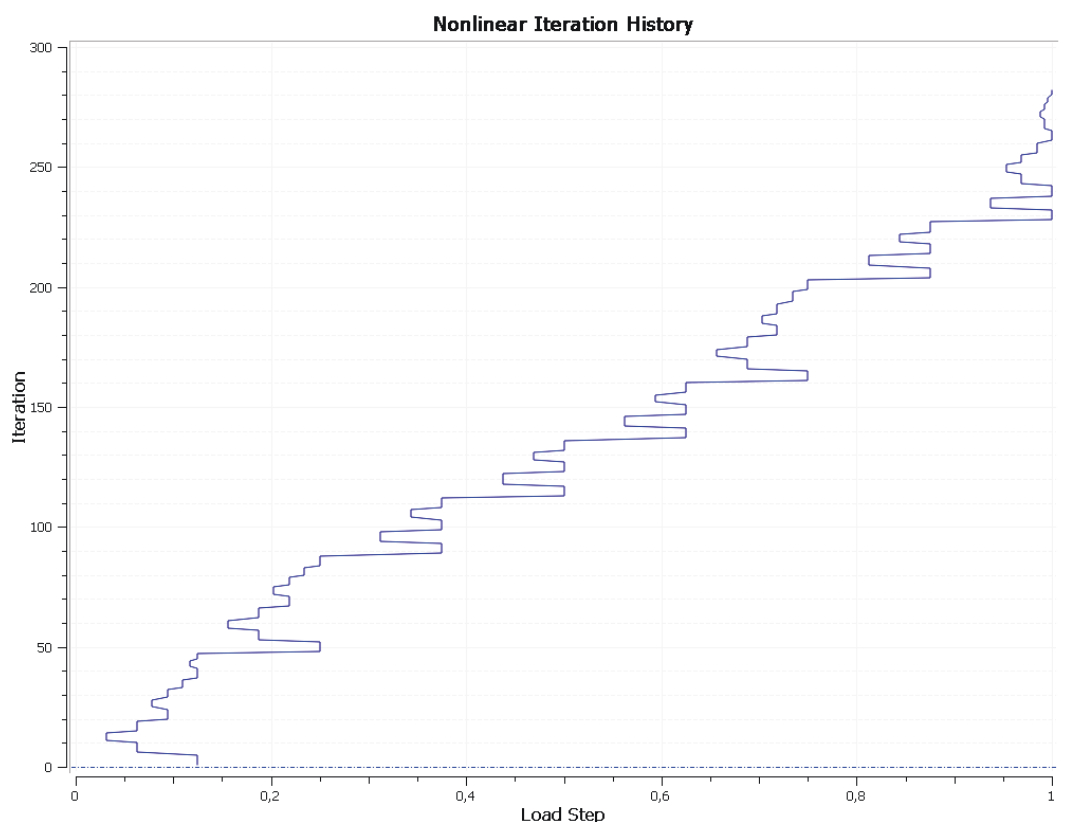
Pro určení velikosti konvergenčních kritérií byly použity výsledky lineární analýzy z předchozí kapitoly. Konvergenční kritérium změny energie mezi iteracemi bylo určeno jako $1 \cdot 10^{-8}$, pro kritérium síly a zbytkového posunu byl použit následující přepočet:

$$K_F = R_{max} \cdot 10^{-5} = 57 \cdot 10^{-5} = 0,00057$$

$$K_D = D_{max} \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-6}$$

kde K_F – kritérium zbytkové síly, R_{max} – maximální reakční síla, K_D – kritérium zbytkového posunutí, D_{max} – maximální posunutí

Po zadání všech důležitých parametrů simulace byl spuštěn samotný výpočet. Historii průběhu výpočtu popisuje počet iterací v každém kroku.



Graf 3 Průběh výpočtu nelineární analýzy

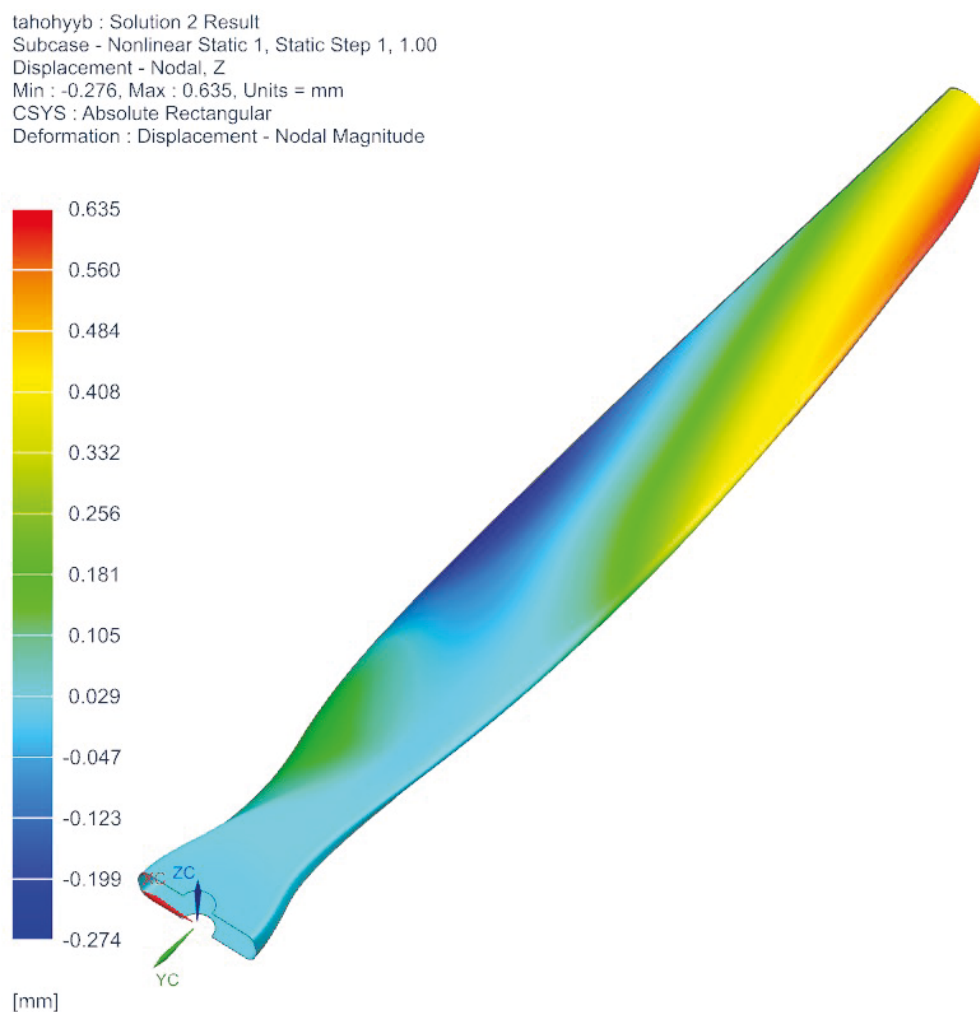
V grafu je na ose X zobrazena velikost použitého zatížení v průběhu výpočtu, na ose Y je zaznamenán celkový počet iterací. Každý „schodek“ v grafu symbolizuje konvergenci výpočtu. Vracení v rámci kroků je způsobeno tím, že když solver nedořešil daný krok v rámci stanoveného počtu iterací, došlo k automatickému zmenšení kroku a výpočet začal znovu. Toto zmenšení kroku mohlo probíhat až do dovršení maximálního počtu iterací za krok, který však v průběhu výpočtu nebyl přesážen. Výpočet tedy proběhl stabilně.

11.1 Výsledky nelineární analýzy

Po dokončení výpočtu byly zkoumány výsledky nelineární analýzy, předmětem zájmu byla deformace listu a pevnostní analýza kompozitní struktury pláště, která je z celého listu zatěžována nejvíce a představuje největší riziko z hlediska pevnostního selhání listu. pro deformaci listu vrtule je typické, že působící aerodynamické síly list vychylují, přičemž aerodynamická síla jej jistým způsobem „rovná“.

11.1.1 Výsledky deformace

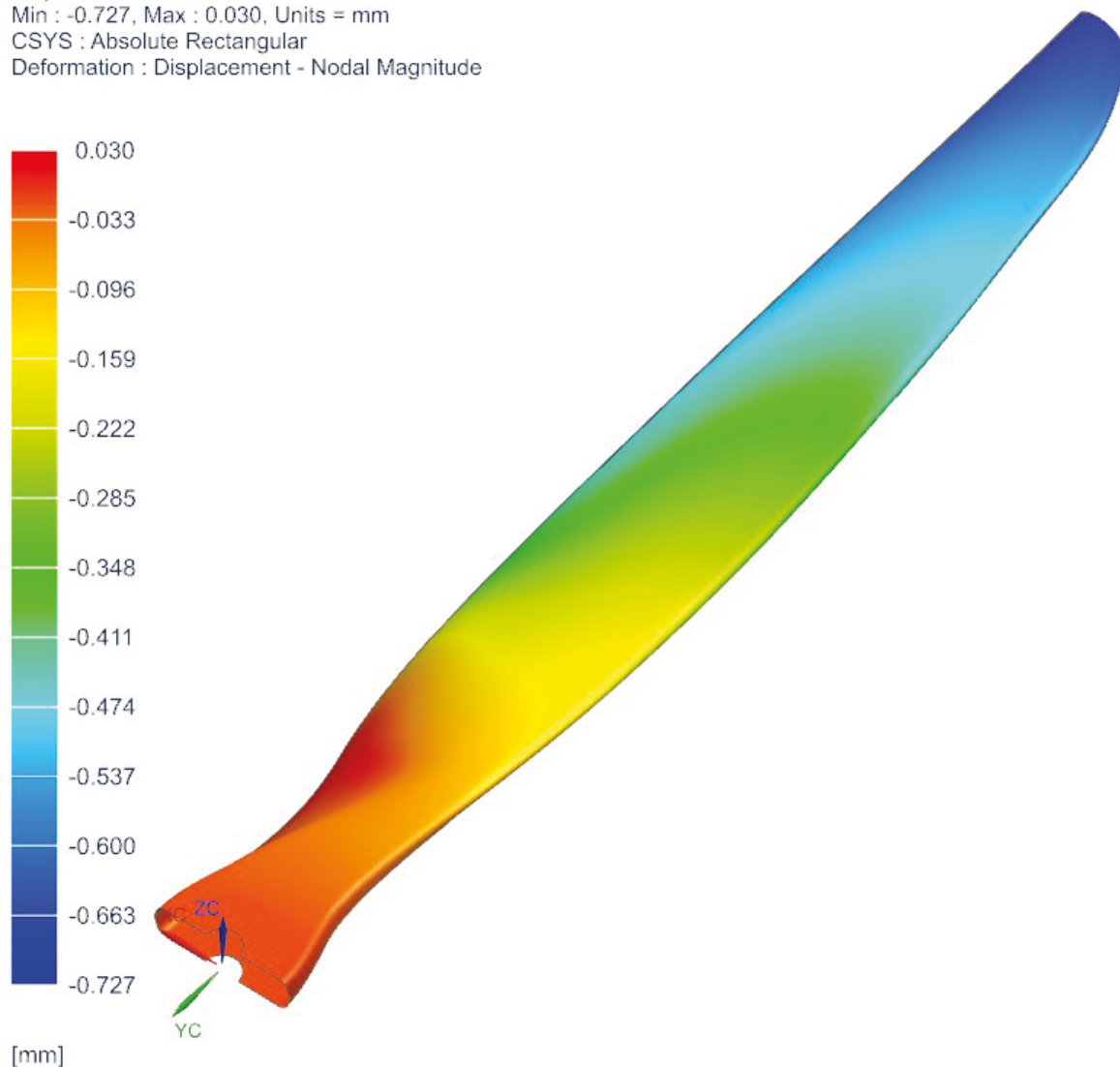
Deformaci listu je možné posoudit podle několika hledisek – důležitým údajem je složka deformace v každé ose, největší deformace se obvykle předpokládají v axiálním směru (ohyb listu), která je způsobena tahovou složkou aerodynamické síly, která špičku listu vychyluje a odstředivou silou, která špičku listu táhne šikmo zpět, přičemž je list také zkrucován (torzní napětí). Deformace listu v axiálním směru ukazuje obr. č. 71.



Obrázek 71 Výsledky nelineární analýzy – deformace v axiálním směru

Další složkou deformace je ohyb v tangenciálním směru, který bývá menší než ohyb ve směru axiálním a je způsoben ohybem od momentové složky aerodynamické síly. V tomto případě se na posunutí elementů však výrazněji projeví torzní zatížení listu. Deformace listu ve směru otáčení jsou ukázány na obr. 72.

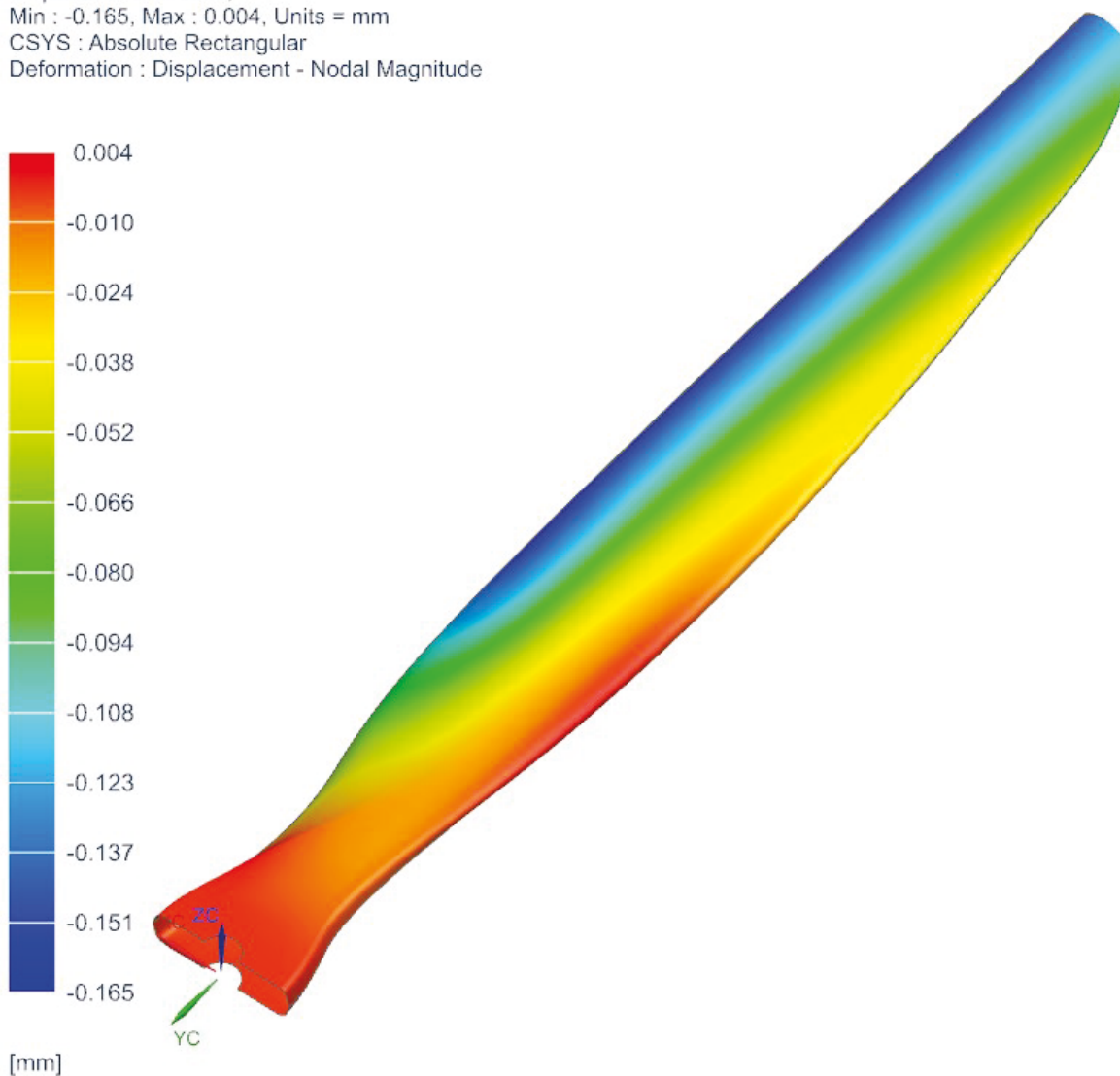
tahohyb : Solution 2 Result
Subcase - Nonlinear Static 1, Static Step 1, 1.00
Displacement - Nodal, X
Min : -0.727, Max : 0.030, Units = mm
CSYS : Absolute Rectangular
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 72 Výsledky nelineární analýzy – deformace ve směru otáčení

Poslední složkou deformace je natažení listu v radiálním směru. Toto natažení je způsobeno tahovým zatížením vyvozeným odstředivou silou. Výsledky deformace v tomto směru jsou však výrazně ovlivněny také ohybovými a torzními deformacemi. Deformace listu v radiálním směru ukazuje obrázek 73.

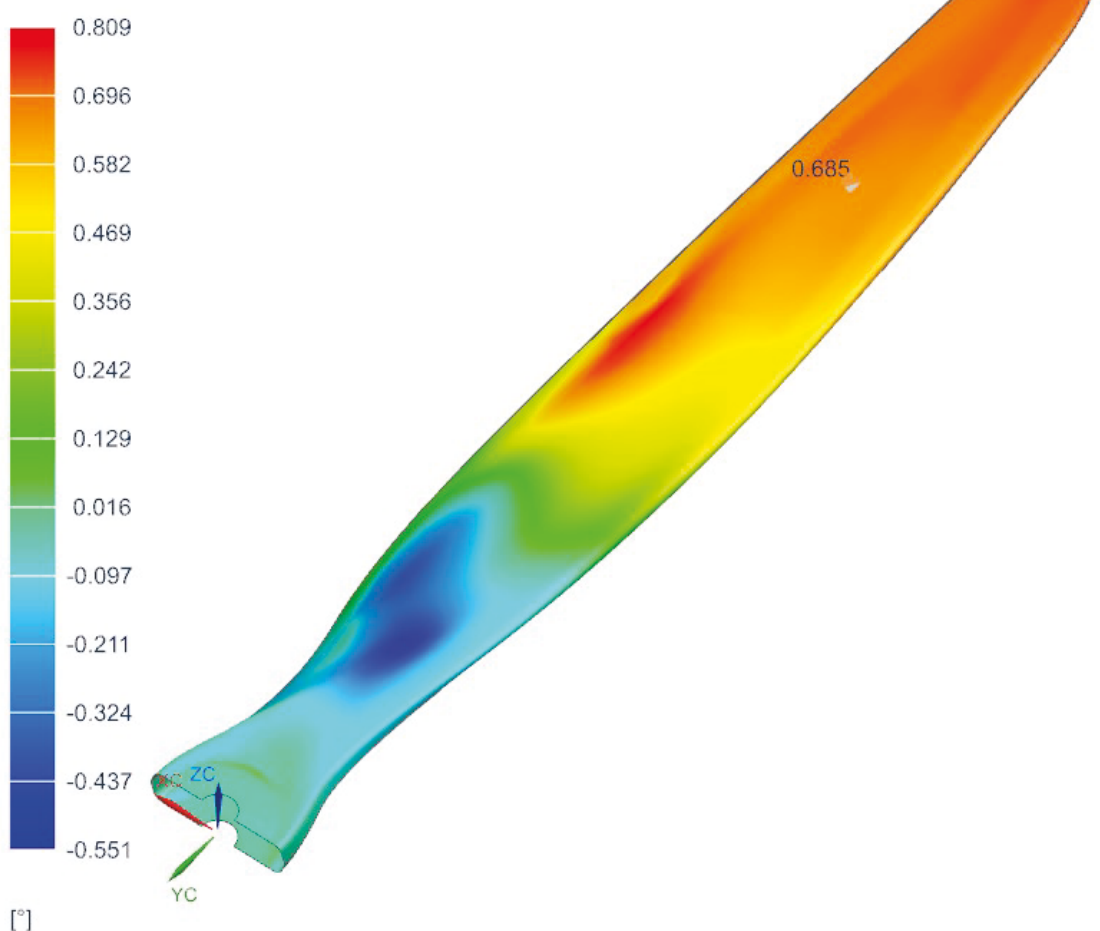
tahohyby : Solution 2 Result
Subcase - Nonlinear Static 1, Static Step 1, 1.00
Displacement - Nodal, Y
Min : -0.165, Max : 0.004, Units = mm
CSYS : Absolute Rectangular
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 73 Výsledky nelineární analýzy – deformace v radiálním směru

Velmi důležitou složkou deformace je samotná torze listu, která způsobuje natočení kolem osy listu a mění úhel nastavení listu. Ve většině případů je torze listu způsobena hlavně aerodynamickou silou, odstředivá síla působí hlavně v ose listu a list „narovnává“, přičemž zkrutu aktivně brání, mimo jiné svým působením také zvyšuje axiální tuhost listu. Změna úhlu nastavení listu má přímý vliv na aerodynamické vlastnosti vrtule. Natočení kolem osy listu je zobrazeno na obrázku 74.

tahohyby : Solution 2 Result
Subcase - Nonlinear Static 1, Static Step 1, 1.00
Rotation - Nodal, Y
Min : -0.551, Max : 0.809, Units = °
CSYS : Absolute Rectangular
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 74 Natočení kolem osy listu

Deformační analýza listu ukázala, že list se v oblasti špičky prohne přibližně o 0,64 mm. Tato deformace je způsobena hlavně tahovou složkou aerodynamické síly, která zde převážila nad deformací od odstředivé síly, jelikož se list deformuje ve směru tahové síly. Odstředivá síla se však více projevila v tangenciálním směru, kdy se list na špičce deformoval o 0,73 mm ve směru otáčení – tedy proti směru působení momentové složky

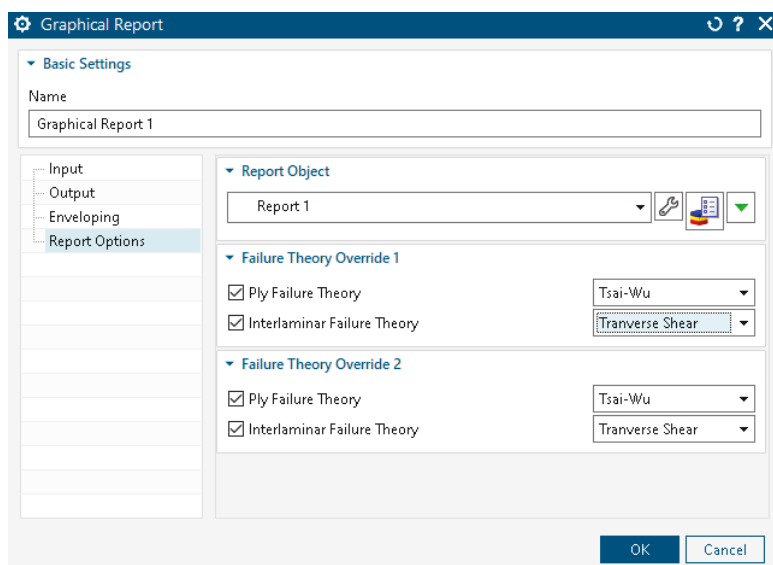
aerodynamické síly. Tento jev může být způsoben vlivem anizotropie materiálu, ale také z důvodu proměnného průřezu či zakřivení listu, kdy vlivem odstředivé síly dochází k asymetrickému ohybu a mírnému zkroucení listu. V radiálním směru došlo k natažení listu o 0,165 mm. Natažení je přímo způsobeno odstředivou silou, která list táhne směrem od osy rotace.

Zřejmě nejdůležitější z hlediska deformace je pak natočení profilu listu kolem jeho osy, které má přímý vliv na aerodynamické vlastnosti vrtule. Z obrázku 74 lze vyčíst, že profil listu se v první třetině délky nejdříve mírně natočil tak, že se zmenšil úhel nastavení vrtule, od poloviny ke špičce listu se pak profil naklopil tak, že se úhel nastavení zvětšil. Přibližně ve třech čtvrtinách listu, kde se úhel nastavení standartně určuje, se úhel nastavení zvětšil z $9,2^\circ$ o $0,7^\circ$, jeho hodnota při provozu v maximálních otáčkách tedy bude $9,9^\circ$.

11.1.2 Pevnostní analýza kompozitní struktury pláště

Pro posouzení napětíových stavů v kompozitní struktuře pláště bylo v postprocesoru vytvořeno zobrazení těchto stavů pomocí funkce *Laminate Post Report*, v rámci kterého byl vytvořen *Graphical Report*, který výsledky zobrazil pomocí barevné mapy.

Pevnostní analýza kompozitů je poměrně náročná, jelikož jde o heterogenní anizotropní materiál. Nejčastěji se pro analýzu proto používá některé z kritérií (kap. 3.4), nejpresnějším kritériem selhání kompozitní vrstvy je pravděpodobně metoda Tsai-Wu.



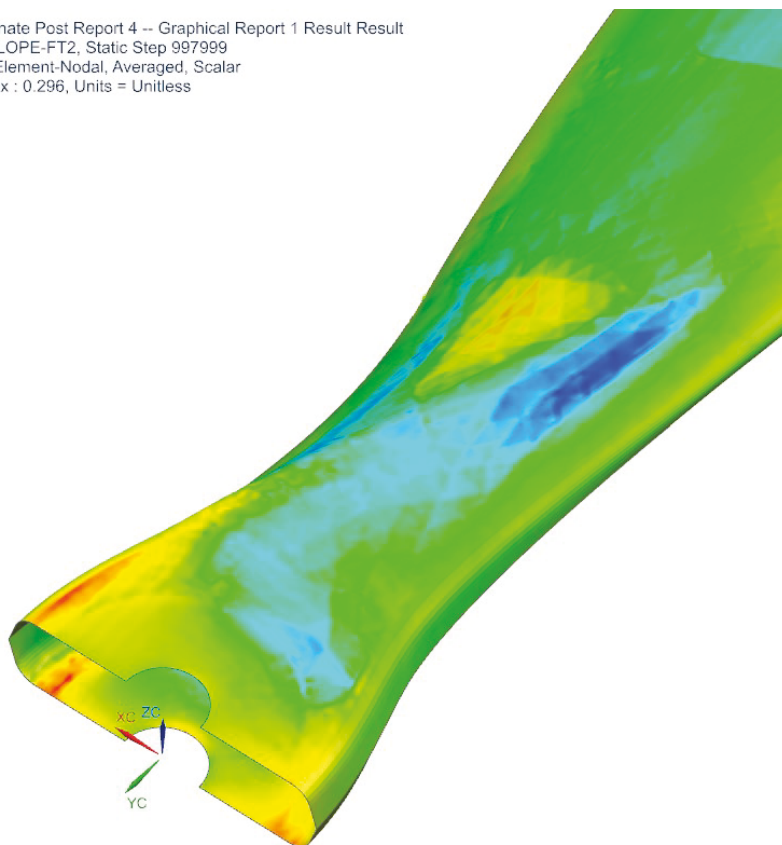
Obrázek 75 Nastavení Graphical reportu

Po vytvoření graphical reportu byla vygenerována složka s výsledky. Mapa koeficientu Tsai-Wu v kompozitní struktuře pláště jednotlivých vrstev je ukázána na obrázcích 77-82.

tahohyby : Laminate Post Report 4 -- Graphical Report 1 Result Result
GLOBAL ENVELOPE-FT2, Static Step 997999
Min FI - Ply 1 - Element-Nodal, Averaged, Scalar
Min : -0.465, Max : 0.296, Units = Unitless



[Unitless]

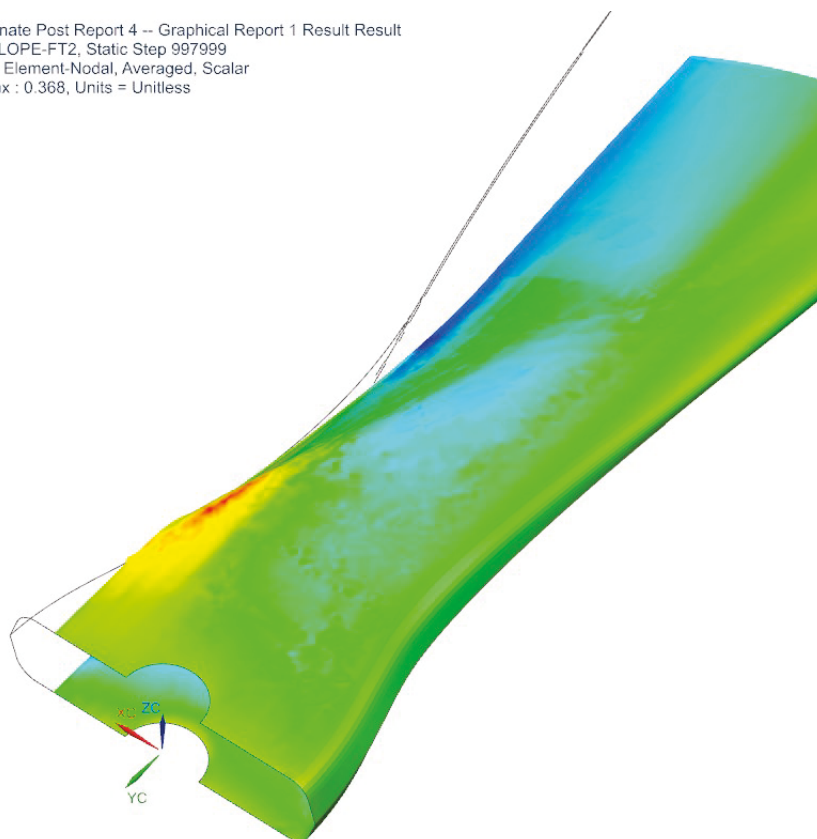


Obrázek 76 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 1

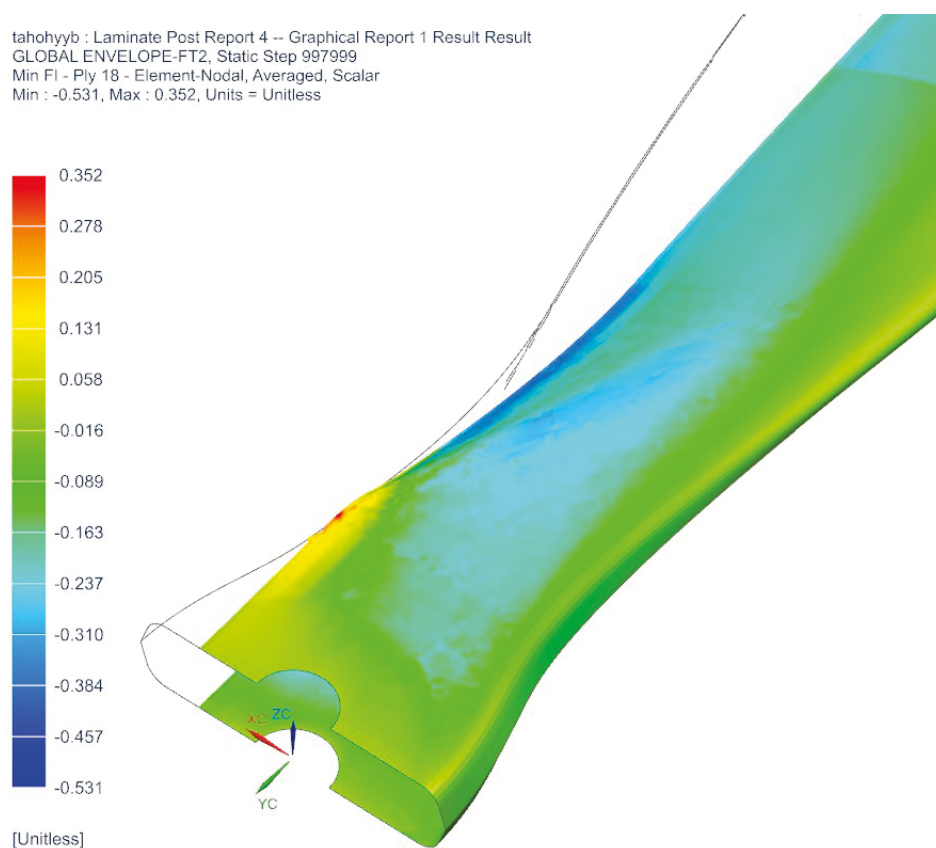
tahohyby : Laminate Post Report 4 -- Graphical Report 1 Result Result
GLOBAL ENVELOPE-FT2, Static Step 997999
Min FI - Ply 17 - Element-Nodal, Averaged, Scalar
Min : -0.505, Max : 0.368, Units = Unitless



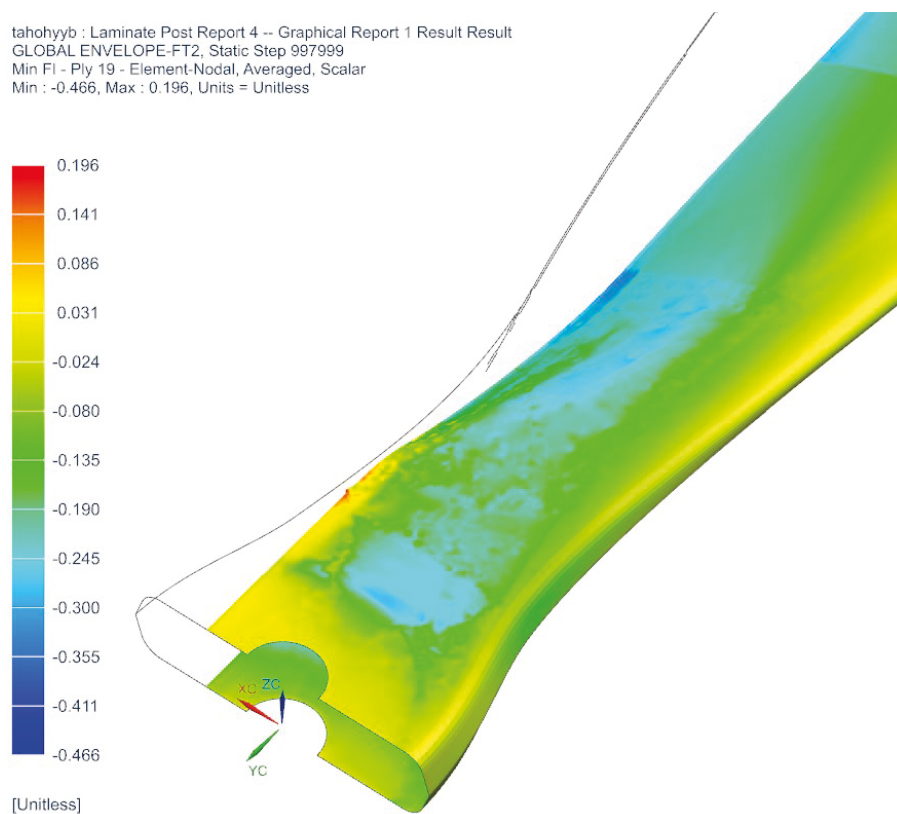
[Unitless]



Obrázek 77 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 2

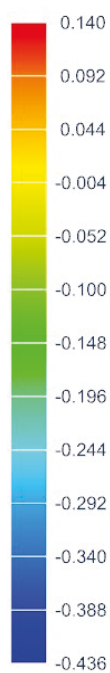


Obrázek 78 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 3

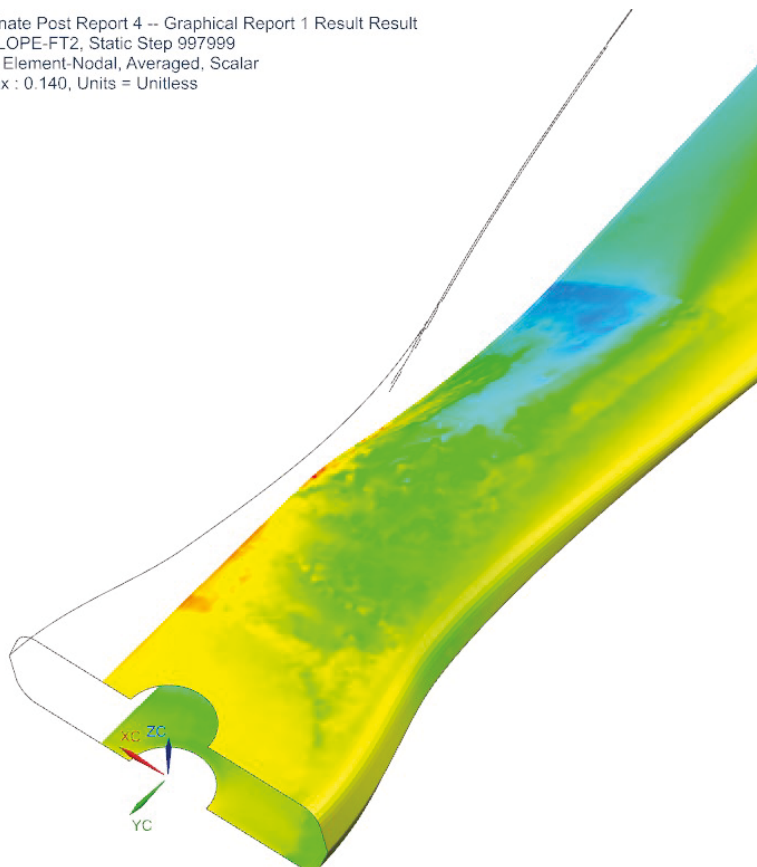


Obrázek 79 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 4

tahohyby : Laminate Post Report 4 -- Graphical Report 1 Result Result
GLOBAL ENVELOPE-FT2, Static Step 997999
Min F1 - Ply 20 - Element-Nodal, Averaged, Scalar
Min : -0.436, Max : 0.140, Units = Unitless

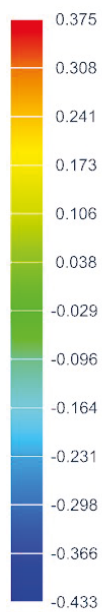


[Unitless]

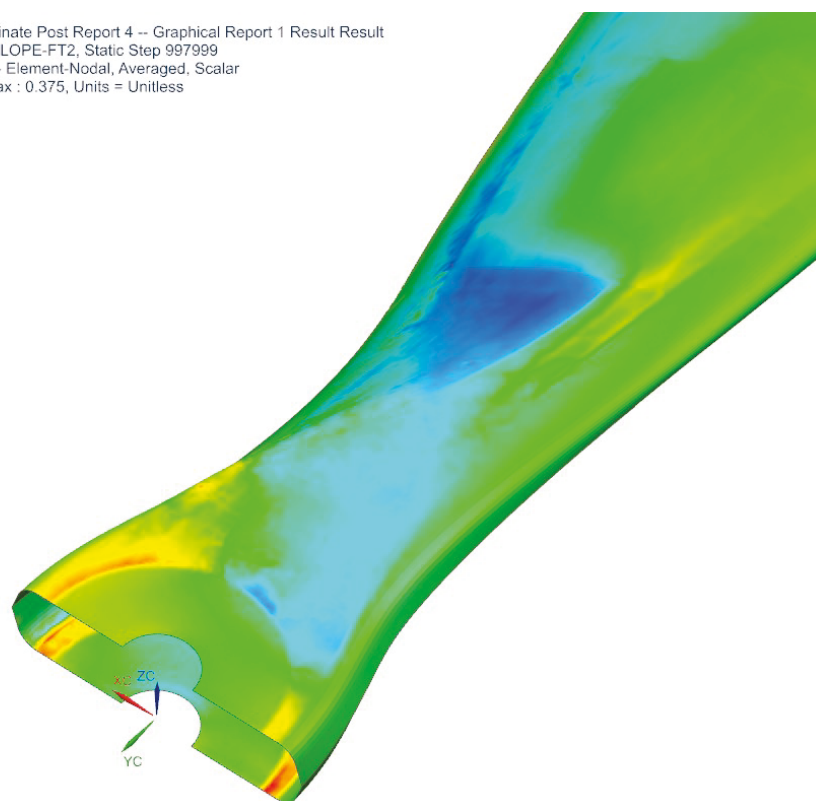


Obrázek 80 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 5

tahohyby : Laminate Post Report 4 -- Graphical Report 1 Result Result
GLOBAL ENVELOPE-FT2, Static Step 997999
Min F1 - Ply 21 - Element-Nodal, Averaged, Scalar
Min : -0.433, Max : 0.375, Units = Unitless



[Unitless]

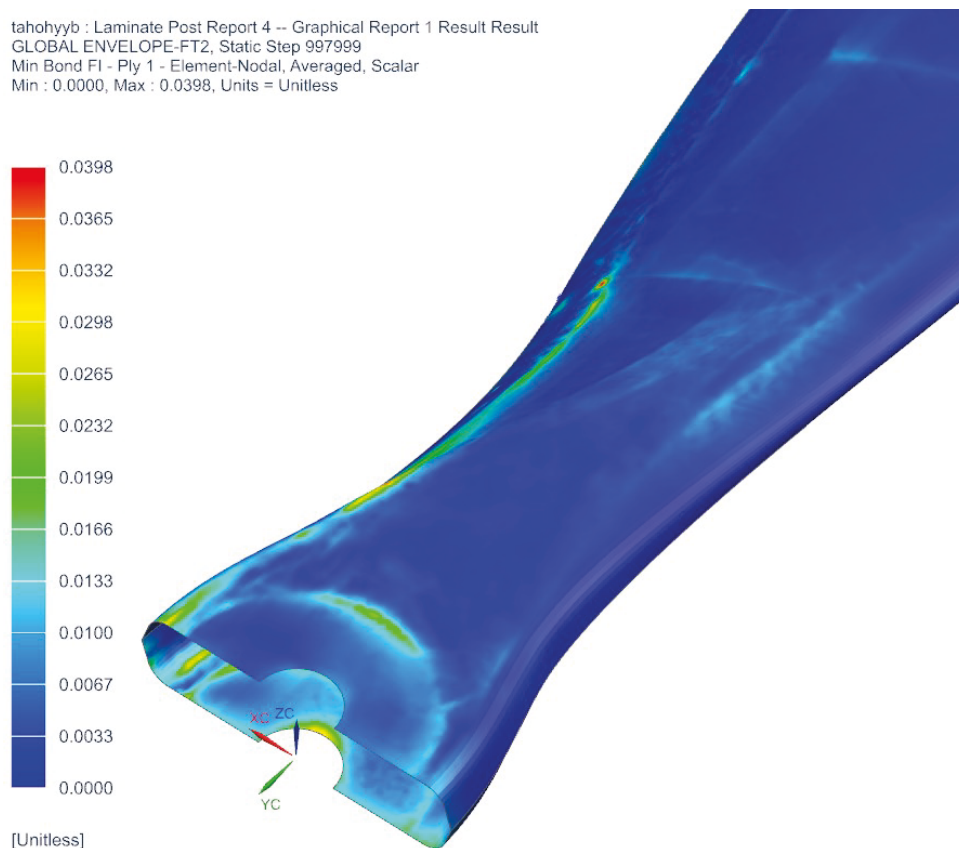


Obrázek 81 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 6

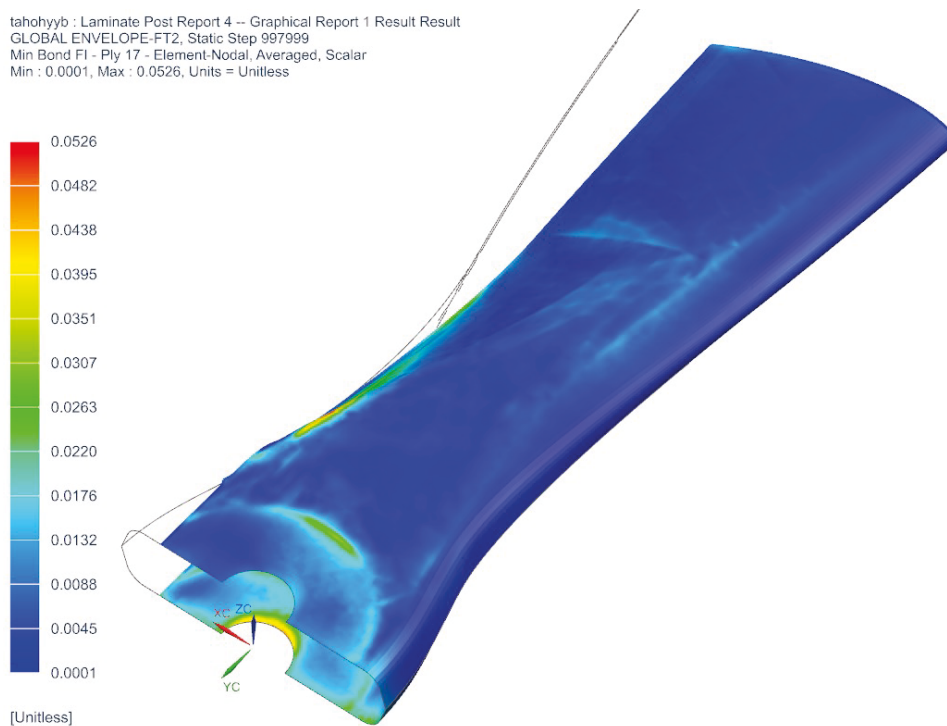
Nejvyšší hodnota koeficientu Tsai-Wu 0,375 se nacházela ve vnější vrstvě, přičemž nejvyšší hodnoty se nacházely na rozhraní mezi nábojem a pěnovým jádrem v kořenové části listu, což může být způsobeno kombinací změny tuhosti na rozhraní, které může vést ke koncentraci napětí a přenosem kroutícího momentu z náboje do pláště, který probíhá právě přes toto místo.

Mezní hodnota koeficientu Tsai-Wu je 1, reálné provozní maximum však většinou bývá z důvodu bezpečnosti v mezích hodnot 0,6 až 0,8. Je – li hodnota tohoto koeficientu menší než 0,5, jedná se o doporučené pracovní pásmo pro kompozity. Z dosažených výsledků koeficientu Tsai-Wu lze tedy prohlásit, že kompozitní struktura je z pevnostního hlediska v pořádku a selhání struktury se neočekává.

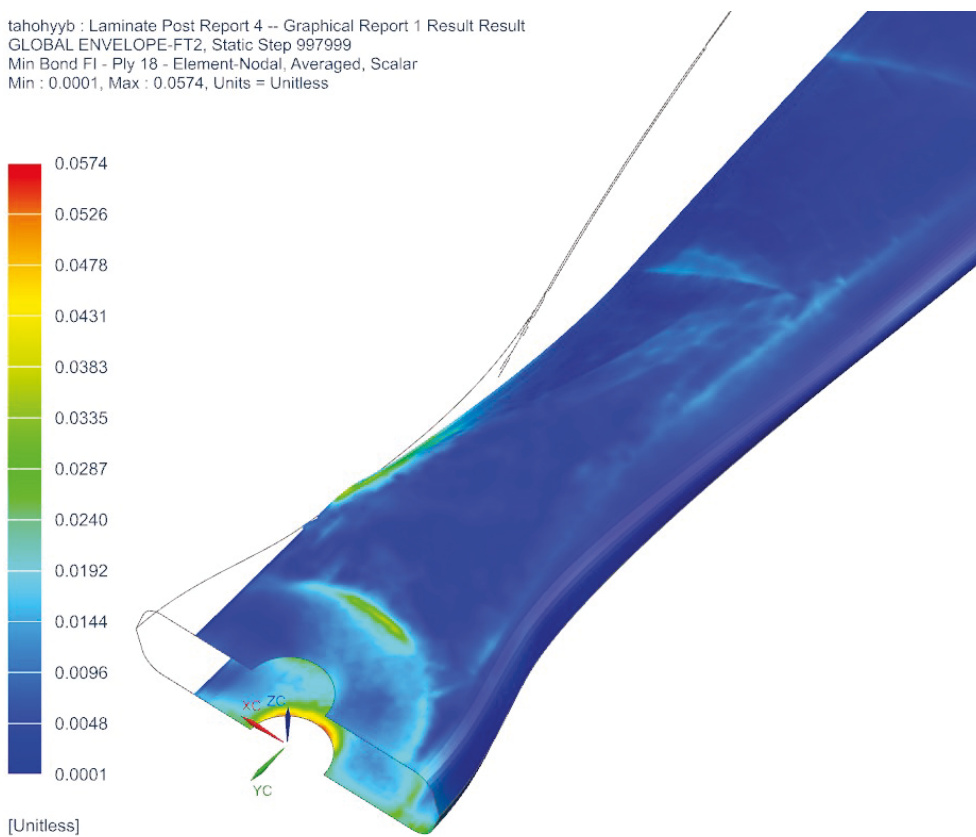
Kromě poškození samotné vrstvy je však možné též interlaminární selhání struktury, jež nejčastěji vzniká v důsledku smykových napětí mezi vrstvami. Výstupem tohoto reportu tedy bylo jak selhání každé z vrstev, tak interlaminární selhání struktury. Principem určení interlaminárního selhání struktury je výpočet smykového napětí mezi vrstvami a následné porovnání s dovolenou hodnotou. Mapa koeficientů interlaminárního selhání mezi jednotlivými vrstvami je ukázána na obrázcích 83 až 87.



Obrázek 82 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 1 a 2



Obrázek 83 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 2 a 3

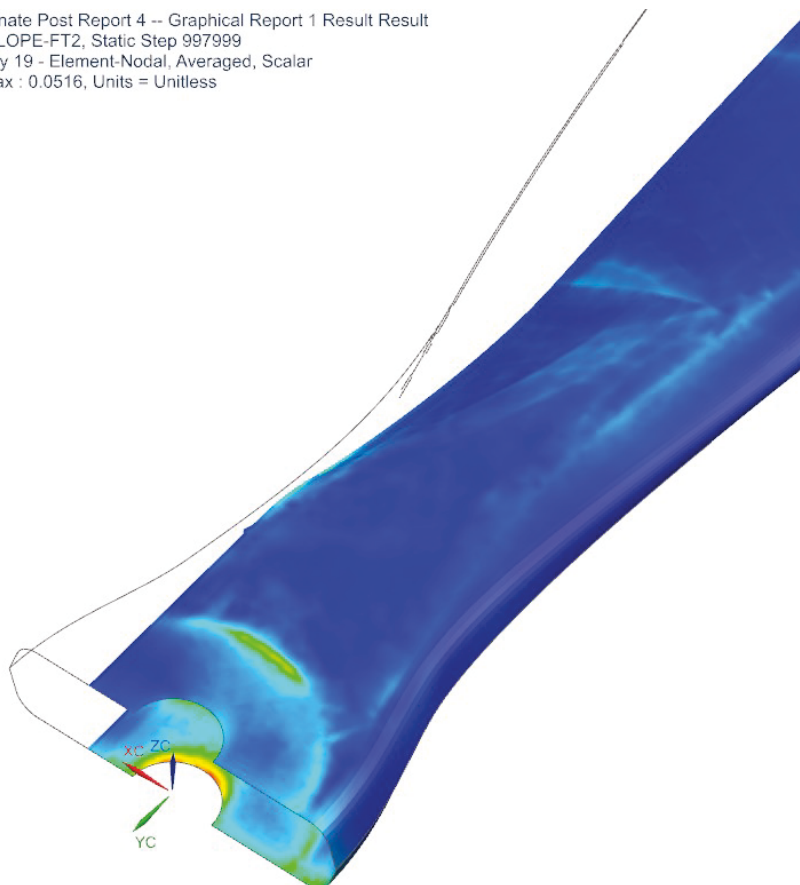


Obrázek 84 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 3 a 4

tahohyb : Laminate Post Report 4 -- Graphical Report 1 Result Result
 GLOBAL ENVELOPE-FT2, Static Step 997999
 Min Bond FI - Ply 19 - Element-Nodal, Averaged, Scalar
 Min : 0.0000, Max : 0.0516, Units = Unitless



[Unitless]

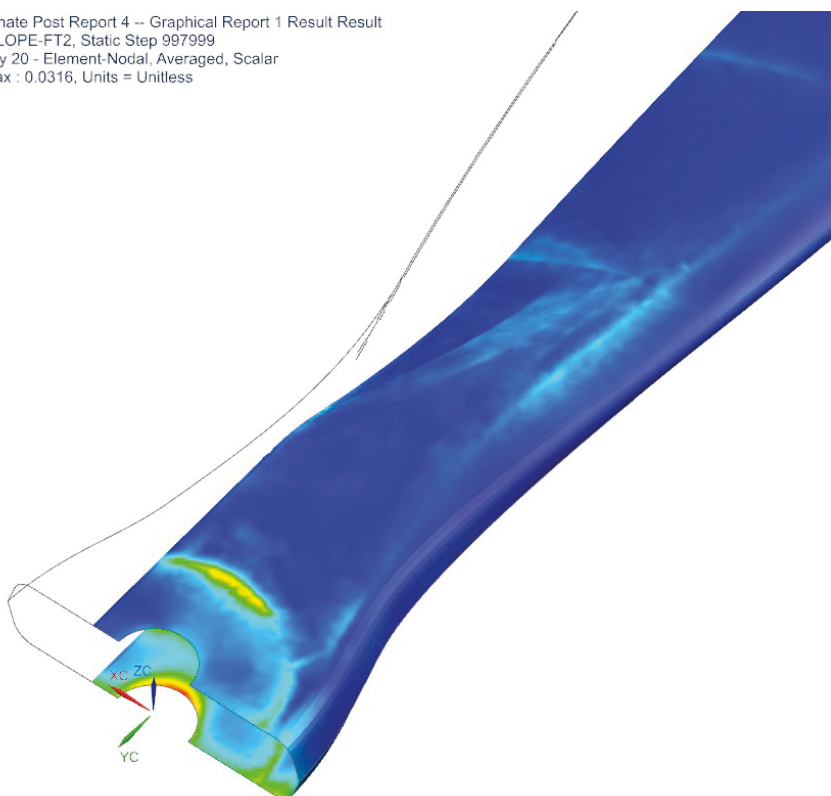


Obrázek 85 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 4 a 5

tahohyb : Laminate Post Report 4 -- Graphical Report 1 Result Result
 GLOBAL ENVELOPE-FT2, Static Step 997999
 Min Bond FI - Ply 20 - Element-Nodal, Averaged, Scalar
 Min : 0.0000, Max : 0.0316, Units = Unitless



[Unitless]

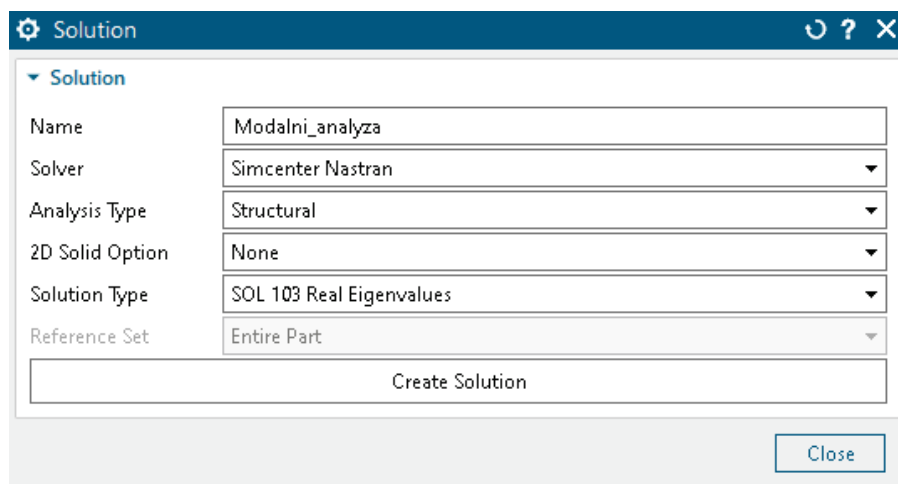


Obrázek 86 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 5 a 6

Mezní hodnota tohoto koeficientu je 1, přičemž za bezpečné se obvykle považují hodnoty menší než 0,5 vzhledem k tomu, že interlaminární selhání je častým problémem hlavně při nedokonalostech při výrobě (špatné slícování vrstev, lokální vzduchové bubliny apod.). Výsledky koeficientu interlaminárního selhání ukazují, že největší riziko delaminace je mezi vrstvou 3 a 4, hodnota koeficientu interlaminárního selhání zde dosahuje hodnoty 0,0574 a nachází se na vnitřním průměru náboje. V této části vrtule však výsledné hodnoty napětí výrazně ovlivní způsob upnutí vrtule. V dalších částech listu jsou pak hodnoty koeficientu ještě menší, proto i v tomto případě můžeme strukturu považovat za bezpečnou.

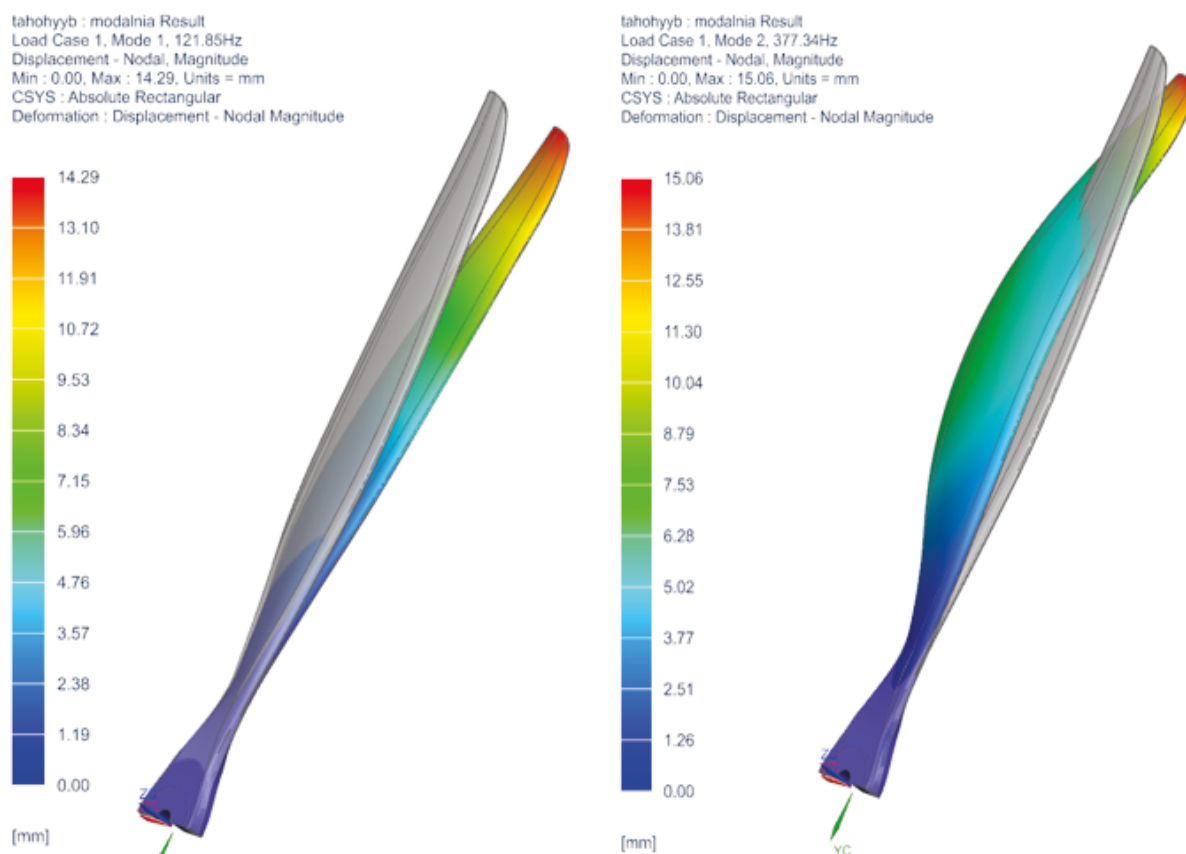
12 MODÁLNÍ ANALÝZA

Posledním typem analýzy, která byla v rámci této práce provedena, byla modální analýza listu. Modální analýza byla také realizována pomocí řešiče Simcenter Nastran, jako typ řešení byl zvolen SOL 103 Real Eigenvalues.



Obrázek 87 Vytvoření modální analýzy

Tato analýza je důležitá pro stanovení kritických frekvencí, ve kterých by vrtule neměla v žádném případě pracovat – působila by-li na vrtuli byť i jen malá periodická síla ve frekvencích blízkých vlastním frekvencím vrtule, došlo by k rezonanční odezvě, která může vést k únavě, delaminaci, či dokonce k úplné destrukci vrtule. V případě rotujících součástí se vlastní frekvence nesmí shodovat v žádném módu s frekvencí otáčení součástí. U vrtule navíc dochází k buzení kmitů od listů, protože každý list projde za otáčku přes referenční místo, což vyvolává aerodynamické či mechanické buzení, proto se kontrolují i frekvence, které jsou násobkem provozních otáček a počtu listů. Výsledky modální analýzy prvního a druhého módu je zobrazen na obr. č. 88, kde je ukázán tvar kmitu v prvním a druhém módu spolu s frekvencemi, při kterých k rezonanci dochází. Měřítko deformace listu je zde 10x zvětšeno pro lepší představu o tvaru vlastního kmitu.



Obrázek 88 Výsledky modální analýzy

Z výsledku modální analýzy lze vyčíst, že kritické frekvence prvního módu kmitu jsou 121,85 Hz. Nejvyšší frekvence otáčení vrtule jsou:

$$f = \frac{n_{max}}{60} = \frac{6000}{60} = 100 \text{ Hz}$$

První mód kmitu nastane při frekvencích větších o 21,85 Hz, než jsou maximální otáčky vrtule. Jedná – li se o stabilní provozní otáčky, doporučuje se, aby frekvence otáček byly alespoň o 5 % nižší nebo vyšší než kritické otáčky, v tomto případě je to po přepočtu rozdíl zhruba o 18 %, takže otáčky vrtule 6000 *ot/min* jsou v pořádku.

Protože je však vrtule dvojlistá, může docházet k rezonanci buzením kmitů od listů. Každý list projde přes referenční místo s frekvencí:

$$f = 2 \cdot \frac{n_{max}}{60} = \frac{2 \cdot 6000}{60} = 200 \text{ Hz}$$

Tyto frekvence jsou sice také hodně vzdáleny od rezonančních frekvencí, ale jsou vyšší než kritické frekvence, při rozběhu vrtule proto musí dojít ke vstoupení do rezonanční oblasti, k rezonanci může dojít při kritických otáčkách:

$$n_{krit} = \frac{60 \cdot f_{krit}}{2} = \frac{60 \cdot 121,85}{2} = 3655 \text{ ot/min}$$

Pohybuje – li se vrtule v rezonančním pásmu pouze krátkou dobu, není tolik času na zesílení vibrací. Při rozběhu vrtule by bylo vhodné přejít pásmo $3655 \pm 5\% \text{ ot/min}$, tedy 3470 – 3840 *ot/min* co nejrychleji.

Druhý kmitový mód má vlastní frekvenci 377,34 Hz. Na první pohled je jasné, že k přímé rezonanci v tomto případě dojít nemůže, přičemž další kmitové módy mají vlastní frekvence stále vyšší, proto nebyly předmětem zájmu.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést statickou analýzu kompozitního listu vrtule. V první části teoretického rozboru byly popsány základní informace o využití, stavbě a zpracování typických kompozitních materiálů, které se ve strojírenské praxi objevují nejčastěji. V další části byla rozebrána problematika dimenzování prvků z kompozitů, na kterou navazoval jednoduchý popis prvku, který byl předmětem našeho zájmu – tedy vrtule. Poslední kapitola teoretické části byla věnována samotné FEM analýze, kde byly popsány základní principy této metody.

V praktické části byla vytvořena nebo upravena geometrie CAD modelu, která byla posléze převedena do prostředí FEM. V této sekci došlo k definici sítě, materiálových parametrů jednotlivých dílů a stavbě kompozitní struktury pláště. Dále byly nastaveny okrajové podmínky, které zahrnovaly působení odstředivé síly, a také základní složky aerodynamických sil. Následně byl FEM model podroben celkem třem typům výpočtu.

Výstupem prvního výpočtu – tedy lineární analýzy, byly přibližné hodnoty posunutí a reakční síly. Hodnoty těchto výsledků byly využity pro nastavení typických parametrů další, nelineární analýzy se zaměřením na geometrickou nelinearitu, která byla v případě listu vrtule nutná pro získání přesnějších výsledků.

Výsledky nelineární analýzy již posloužily pro predikci chování vrtule při zatěžování v provozních podmínkách. Z hlediska deformace listu je zřejmě nejdůležitější prohnutí listu v axiálním směru, které bylo na špičce listu 0,64 mm a svědčí o dobré tuhosti listu. Další velmi důležitou složkou je rotace elementů kolem osy listu, které značí změnu úhlu nastavení vrtule při zatížení. Tento parametr je důležitý kvůli jeho vlivu na aerodynamické vlastnosti listu (s úhlem nastavení se mění též úhel náběhu) a v místě, kde se standartně udává jeho hodnota, tedy ve třech čtvrtinách délky listu od osy otáčení, se zvětšil přibližně o 0,7 °. původní úhel nastavení listu v tomto místě dosahoval hodnoty 9,2 °, při provozu v maximálních otáčkách bude tedy úhel nastavení 9,9 °.

Dále s pomocí výsledků nelineární analýzy proběhla pevnostní kontrola nejvíce zatěžovaného komponentu listu, tedy kompozitního pláště. K určení závažnosti napětíových stavů byla využita metoda Tsai-Wu, která je schopna popsat komplexní chování anizotropní heterogenní struktury. Následně byla struktura zkontrolována také z hlediska interlaminárního selhání metodou Transverse shear. V obou případech byla kompozitní struktura pláště listu při daném zatěžování vyhodnocena jako bezpečná.

Posledním typem analýzy byla analýza modální. S pomocí této analýzy byly určeny kritické otáčky vrtule. Z hlediska buzení od otáček jsou kritické otáčky nad hodnotou maximálních otáček vrtule, z hlediska buzení od listů však při rozběhu vrtule dojde ke vstoupení do oblasti kritických otáček, a při rozběhu vrtule bylo doporučeno přejít pásmo otáček 3470 – 3840 *ot/min* co nejrychleji.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LIU, Zhiheng. MAIOROVA, Kateryna. *APPLICATION OF ADVANCED COMPOSITES IN AEROSPACE FIELD*. Cambridge, United kingdom: III International Scientific and Practical Conference, 2022. DOI <https://doi.org/10.36074/logos-20.05.2022.060>
- [2] RAMAKRISHNAN, P, N. *Composite Materials, Metals, And Ceramics Used in the Boeing 787- Materials Overview*. India: Vijaybhoomi University 2024. DOI: 10.53469/jrse.2024.06(08).13
- [3] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. V ČR 1. Vyd. Brno: vysoké učení technické v Brně, chemická fakulta, 2003. ISBN 80-214-2443-5
- [4] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 9788073722791.
- [5] PEARSON, A. LIAO, W. KAZEMI, Y. DUNCAN, M. *Fiber-matrix adhesion between high-density polyethylene and carbon fiber*. Polymer testing, Volume 105, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107423>
- [6] YIN, L. YANG, J. SHAO, X. *Plasma-assisted surface functionalization of UHMWPE fiber for adhesion improvement with rubber matrix*. Polymer Volume 287, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126430>.
- [7] BUDELMANN, D. SCHMIDT, C. MEINERS, D. *Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 1: Adhesion and surface wetting*. Composites Part C, Volume 6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100204>.
- [8] PHIRI, R. RANGAPPA, M. SIENGCHUIN, S. OLADIJO, O, P. *Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review*. Heliyon, Volume 10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661>.
- [9] SONG, L. SONGHE, M. ZHANG, F. YANG, F. *Exploring the multi-scale evolution mechanism of the ultra-high-temperature mechanical behaviour of carbon/carbon composites*. Journal of alloys and compounds, Volume 1010, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177449>.
- [10] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.

- [11] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, ISBN 9788086960296G.
- [12] BISHEN, H. ABDIN, Y. *Carbon Fibers: From PAN to Asphaltene Precursors; A State-of-Art Review*. Journal of carbon research, 2023. DOI: 10.3390/c9010019
- [13] RANGAPPA, S, M. AYYAPPAN, V. MANIK, G. SINGCHIN, S. *Synthetic and Mineral Fibers, Their Composites and Applications*. Woodhead Publishing, 2024. ISBN: 978-0-443-13623-8
- [14] SIAM, S. TURJO, K. ANTU, N. HAQUE, S. *Effects of Fiber Content on the Mechanical Properties of Rice Straw/Carbon/Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites: Experimental and Numerical Analysis*. Hybrid Advances, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100402>.
- [15] REIZ, E. RIZKALLA, S. *Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels*. Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 6, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.023>.
- [16] JIA, C. ZHANG, Z. WANG, Q. *Preparation and performance analysis of a novel double-layer sandwich composite structure*. European Journal of Mechanics – A/Solids, Volume 111, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105545>.
- [17] MCCONNELL, K. *CDI – prepreg technology partner*. Reinforced Plastics, Volume 56, Issue 4, 2012, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(12\)70082-6](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(12)70082-6).
- [18] LENDSFIELD, H., FABRIS, F. W., KHAMER, J., LACALLE, J., & ALSTADT, V. *Composite Technologies*. Hanser Publishers, Munich 2016 ISBN: 978-1-56990-600-2
- [19] CAROSELLA, S. HÜGLE, S. HELBER, F. MIDDENDORF, P. *A short review on recent advances in automated fiber placement and filament winding technologies*. Composites Part B: Engineering, Volume 287, 2024 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111843>.
- [20] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Třetí vydání. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, Zlín, 2019. ISBN 978-80-7318-948-8
- [21] BARBERO, E. J. *Introduction to composite materials design*. Third edition, CRC Press, 2018. ISBN-13: 978-1138196803

- [22] ŠUBA, O. *Mechanické chování těles*. Třetí vydání. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, Zlín, 2018. ISBN 978-80-7318-792-7.
- [23] JONES, R, M. *Mechanics of Composite Materials*. Boca Raton, eBook, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781498711067> eBook ISBN: 9781315272986
- [24] TSAI, Z. WU, E, M. *A Progressive Failure Criterion for Composite Materials*. Journal of Composite Materials, 1971. vol. 5, no. 1
- [25] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, U.S. Department of Transportation. *Aviation Maintenance Technician, Handbook–Powerplant*, Newcastle, Washington, 2023. ISBN: 978-1-64425-353-3
- [26] SFORZA, M. *Theory of Aerospace Propulsion*. USA, Elsevier Inc, 2017. ISBN 978-0-12-809326-9
- [27] DANĚK, M. *Aerodynamika a mechanika letu pro piloty a techniky*. Naše Vojsko, 1958.
- [28] USUBAMATOV, R. ZHUAMEV, T. *Inertial Forces Acting on a Propeller of Aircraft*. Kyrgyz State Technical University, 66 Aitmatov Avenue, Kyrgyzstan, 2018. DOI: [10.2174/1874146001807010001](https://doi.org/10.2174/1874146001807010001)
- [29] HORECKÝ, R. *Distanční texty pro výuku vrtulových jednotek I*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1639-5.
- [30] Bower, A. F. *Applied Mechanics of Solids*. In CRC Press eBooks. Informa. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781439802489>
- [31] HARISH, A. *How can i Learn Finite Element Analysis?* Simscale Blog, 2023. Dostupné z: Learn Finite Element Analysis | The Guide for FEA | SimScale
- [32] ZIENKIEWICZ, O, C. TAYLOR, R, L. *The Finite Element Methods: Vol. Volume 1 – The basis*. 5th ed, 2000. ISBN 0 7506 5049 4
- [33] BHAVIKATTI S. *Finite Element Analysis*. New Age International Publishers, 2005. ISBN: 978-81-224-2524-6
- [34] CHOPRA, Anil, K. *Dynamics of Structures*. Fifth Edition in SI Units. University of California at Berkeley. Pearson Education, 2016. ISBN: 0134555120
- [35] MOAVENI, S *Finite element analysis: theory and application with ANSYS*. 4th Edition. Pearson Education, 2014 ISBN: 0273774301

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Materiálové složení Komerčního letadla Boeing 787 Dreamliner [2]	13
Obrázek 2 Mechanického zaklínění [4]	15
Obrázek 3 Základní schéma smáčivosti. S – pevná látka, L – kapalná látka G – okolní plynné prostředí [4].....	16
Obrázek 4 Synergický efekt.....	17
Obrázek 5 Rozdělení kompozitů podle tvaru disperze [11].....	19
Obrázek 6 Struktura aramid – hliníkového hybridního kompozitu (Arral)	22
Obrázek 7 Označení orientace vrstev kompozitu [10].....	23
Obrázek 8 Druhy tkaninových vazeb – a) plátňová, b) keprová, c) atlasová vazba [11]	24
Obrázek 9 Výroba skelných vláken [11].....	25
Obrázek 10 Schéma výroby uhlíkového vlákna z PAN [12]	26
Obrázek 11 Oblast využití uhlíkových vláken za rok 2020 [12]	27
Obrázek 12 Vlákná z rýžové slámy zalitá v pryskyřici [14].....	28
Obrázek 13 sendvičový kompozit s voštinou A) vnější vrstva, B) adhezní vrstva, C) jádro	29
Obrázek 14 Sendvičový kompozit s polymerní pěnou [15].....	29
Obrázek 15 Postup ručního kladení [11].....	30
Obrázek 16 Prepregové polotovary [18].....	31
Obrázek 17 Ruční tvarování prepregových vrstev.....	32
Obrázek 18 Nástroje pro CNC řezání prepregů	32
Obrázek 19 Ruční formování prepregu [18]	33
Obrázek 20 Kladecí hlava [19]	33
Obrázek 21 Laminátový Trup letadla vyrobený navíjením [18].....	34
Obrázek 22 Autokláv [18].....	35
Obrázek 23 Převod heterogenního prvku na homogenní [21]	36
Obrázek 24 Zobrazení elastických konstant jednosměrně vyztužené vrstvy [11]	37
Obrázek 25 rovinná napjatost [22].....	39
Obrázek 26 Zatížení jednosměrně vyztužené vrstvy [11].....	40
Obrázek 27 přetvoření jednosměrně vyztuženého elementu při normálovém zatížení pod úhlem ω [11].....	42
Obrázek 28 křížně vyztužený kompozit [11].....	43
Obrázek 29 Systém souřadnic a označení vrstveného kompozitu [11]	44
Obrázek 30 Základní části vrtule [25].....	48
Obrázek 31 Profil listu vrtule [25]	48
Obrázek 32 Rychlosti a síly působící na element průřezu [25]	49

Obrázek 33 Působení aerodynamické síly [27]	50
Obrázek 34 Zobrazení hlavních sil působících na vrtuli [25].....	52
Obrázek 35 Kroutící síly působící na list vrtule	53
Obrázek 36 Příklad konstrukce kompozitního vrtulového listu [29].....	54
Obrázek 37 Posunutí elementu $u(x)$ [30]	55
Obrázek 38 Napěťové pole součásti [31].....	56
Obrázek 39 3D síť tělesa [31]	59
Obrázek 40 Elementy a uzly sítě [30].....	59
Obrázek 41 Typy elementů [30]	60
Obrázek 42 3D model vrtule.....	63
Obrázek 43 Řez středem vrtule.....	64
Obrázek 44 Náboj vrtule.....	64
Obrázek 45 Jádru vrtule	65
Obrázek 46 Modely výztuh.....	65
Obrázek 47 Podélné zobrazení plánu vrstvení.....	66
Obrázek 48 Příčné zobrazení plánu vrstvení v řezu A-A	67
Obrázek 49 CAD model pláště listu vrtule	68
Obrázek 50 Změna geometrie jádra.....	69
Obrázek 51 FEM model náboje	71
Obrázek 52 FEM model jádra.....	71
Obrázek 53 FEM model výztuh.....	72
Obrázek 54 FEM model vnějšího pláště.....	72
Obrázek 55 Laminate ply material manager.....	73
Obrázek 56 Uskupení vrstev prepregu ve funkci <i>Global layup</i>	75
Obrázek 57 Výběr ploch a návrh nástřihů pro vrstvu	76
Obrázek 58 Uložení vrstvy	76
Obrázek 59 Zobrazení kontaktu mezi nábojem a jádrem	77
Obrázek 60 1D Connection.....	78
Obrázek 61 Vazba Fixed.....	78
Obrázek 62 Vazba symetrie	79
Obrázek 63 Nastavení rotace	80
Obrázek 64 Zatížení tahovou složkou aerodynamické síly	81
Obrázek 65 Zatížení momentovou složkou aerodynamické síly	83
Obrázek 66 Vytvoření lineárního řešení.....	84
Obrázek 67 Výsledek lineární analýzy – posunutí	85

Obrázek 68 Výsledky lineární analýzy – reakční síla.....	86
Obrázek 69 Vytvoření nelineární analýzy	87
Obrázek 70 Nastavení parametrů nelineární analýzy	88
Obrázek 71 Výsledky nelineární analýzy – deformace v axiálním směru.....	90
Obrázek 72 Výsledky nelineární analýzy – deformace ve směru otáčení	91
Obrázek 73 Výsledky nelineární analýzy – deformace v radiálním směru	92
Obrázek 74 Natočení kolem osy listu	93
Obrázek 75 Nastavení Graphical reportu.....	94
Obrázek 76 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 1	95
Obrázek 77 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 2	95
Obrázek 78 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 3	96
Obrázek 79 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 4	96
Obrázek 80 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 5	97
Obrázek 81 Mapa koeficientu Tsai-Wu, vrstva 6	97
Obrázek 82 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 1 a 2	98
Obrázek 83 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 2 a 3	99
Obrázek 84 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 3 a 4	99
Obrázek 85 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 4 a 5	100
Obrázek 86 Mapa koeficientu interlaminárního selhání mezi vrstvou 5 a 6	100
Obrázek 87 Vytvoření modální analýzy	102
Obrázek 88 Výsledky modální analýzy	103

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Teoretické a experimentálně naměřené mechanické hodnoty vybraných materiálů [11].....	20
Tabulka 2 Tabulka materiálů v plánu vrstvení.	67
Tabulka 3 Hodnoty mechanických vlastností použitých materiálů	70
Tabulka 4 Pevnostní vlastnosti vrstev	74

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Vliv průměru skelného vlákna na jeho pevnost [11]	20
Graf 2 Průběh tahu a momentu v závislosti na otáčkách	82
Graf 3 Průběh výpočtu nelineární analýzy	89