

Návrh a analýza konstrukce součásti z laminátu

Daniel Čech

Bakalářská práce
2023

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Daniel Čech**
Osobní číslo: **T20287**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Návrh a analýza konstrukce součásti z laminátu**

Zásady pro vypracování

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

Forma zpracování bakalářské 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 bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou součástí z laminátu. Součásti podrobené analýze představovaly dva plošné výrobky, které měly v praxi sloužit jako kryty na kolo kamionu a užitkového vozidla.

První tři kapitoly teoretické části práce pojednávají o základních poznatcích v oblasti kompozitních materiálů, včetně jejich výroby a zpracování v podobě prepregů. V další kapitole jsou uvedeny základní vztahy pro výpočet mechanických vlastností vrstvených laminátů. Poslední kapitola je věnována numerické analýze metodou konečných prvků. Praktická část práce je věnována tvorbě konečně prvkových modelů zkoumaných součástí s rozdílnou strukturou stavby materiálu, jejichž následnou analýzou se zjišťovala deformace a napětí ve vrstvách. Z výsledků analýzy se následně zvolila vhodná struktura pro tvorbu těchto součástí.

Klíčová slova: kompozit, vrstvený kompozit, prepreg, deformace, napětí, mechanické vlastnosti, konečně prvková analýza

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the analysis of laminate components. Two flat products, which were supposed to serve as truck and utility vehicle wheel covers, were part of the analysis.

First three chapters of the theoretical part discuss basic knowledge in the field of composite materials, including their production and processing in the form of prepregs. In the next chapter, basic relationships for calculating the mechanical properties of layered laminates are presented. The last chapter is devoted to numerical analysis using the finite element method. Practical part of this work is devoted to the creation of finite element models of the investigated components with different types of material structure, subsequent analysis revealed deformation and stress in the layers. From the results of analysis, a suitable structure was chosen for the creation of these components.

Keywords: composite, layered composite, prepreg, stress, strain, mechanical features, finite element analysis.

Rád bych touto formou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D. za konzultace a cenné rady, které mi při realizaci této práce věnoval. Dále bych rád poděkoval svým blízkým, kteří mi byli v průběhu studia oporou.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITOVÉ MATERIÁLY	11
1.1 HISTORIE KOMPOZITŮ	11
1.2 VŠEOBECNÉ ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	12
1.2.1 Rozdělení podle disperzní fáze	12
1.2.2 Rozdělení podle tvaru disperze	12
1.3 VLASTNOSTI KOMPOZITOVÝCH STRUKTUR.....	13
1.3.1 Adhezní síly	13
1.3.2 Synergický efekt.....	15
1.3.3 Izotropie a anizotropie.....	16
1.4 POUŽITÍ VLÁKEN JAKO KONSTRUKČNÍHO PRVKU.....	17
1.4.1 Paradox pevného materiálu	17
1.4.2 Paradox vláknité struktury	17
1.4.3 Paradox délky zatížení	18
1.4.4 Paradox kompozitního materiálu	18
2 VRSTVENÉ KOMPOZITY	19
2.1 VÝZTUŽNÝ SYSTÉM.....	20
2.1.1 Vybrané druhy vláknových materiálů	20
2.1.2 Kompozice vláken.....	23
2.2 MATRICE	25
2.2.1 Termosetické matrice	25
2.2.2 Termoplastické matrice	26
3 PREPREGY	27
3.1 PREPREGY S TERMOSETICKOU MATRICÍ.....	27
3.1.1 Výroba prepregu s termosetickou matricí	28
3.1.2 SMC prepregy	29
3.2 ZPRACOVÁNÍ PREPREGŮ	30
3.2.1 Řezání prepregů	30
3.2.2 Vrstvení prepregů.....	31
3.2.3 Vytvrzování prepregů.....	33
4 MECHANIKA VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ	37
4.1 MIKROMECHANIKA VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÉHO MATERIÁLU	37
4.2 JEDNOSMĚRNĚ VYZTUŽENÁ VRSTVA	38
4.2.1 Vztahy mezi napětím a deformací.....	39
4.2.2 Přetvoření matice tuhosti v závislosti na pootočení směru zatížení.....	41
4.3 KLASICKÁ LAMINÁTOVÁ TEORIE	43

5	NUMERICKÁ ANALÝZA.....	45
5.1	KONEČNĚ PRVKOVÁ ANALÝZA	45
5.1.1	Konečně prvková síť	47
5.1.2	Postup při tvorbě konečně prvkové analýzy	49
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	51
6	CÍLE	52
7	KONSTRUKCE KOMPOZITOVÉHO PROFILU	53
8	TVORBA FEM MODELU	54
8.1	ÚPRAVA FEM MODELU PŘED TVORBOU SÍTĚ	55
8.2	TVORBA SÍTĚ	56
8.3	DEFINICE MATERIÁLU	57
8.4	TVORBA SKLADBY KOMPOZITU	59
8.4.1	Definice uložení vrstev	59
8.4.2	Problematická místa kladených vrstev	60
8.5	NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK	66
9	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	67
9.1	VÝSLEDKY DEFORMACE	67
9.2	NAPĚTÍ VE VRSTVÁCH	70
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ	77
	SEZNAM TABULEK.....	79

ÚVOD

Kompozity představují spojení dvou nebo více zcela odlišných materiálů, což vede k rozsáhlým možnostem spojování látek za účelem dosažení materiálu s požadovanými vlastnostmi. V dnešní době jsou nejvíce rozšířené kompozity tvořeny organickou maticí a výztuží v podobě vláknových kompozic. Kompozity se pak často vyrábějí s maticí předimpregnovanou ve výztužném systému, takto vyrobené kompozity se označují jako prepregy.

S rozvojem technologických zařízení v minulém století přišlo také urychlení a zkvalitnění výrobních procesů, které se však stávaly stále složitější a nákladnější, to vedlo k nutnosti urychlení předvýrobních procesů, které zahrnovaly návrh výrobku, tvorbu prototypu a zkoušení v reálných podmínkách. Tento proces značně urychlil a zjednodušil nástup moderních výpočetních technologií, které umožňovaly provádět numerickou analýzu navrženého výrobku před tvorbou samotného prototypu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITOVÉ MATERIÁLY

Kompozity představují kvalitativní změnu v řešení rozporů mezi požadovanými vlastnostmi a možnostmi homogenních materiálů. Častokrát jsou totiž tyto požadavky na materiálové vlastnosti protichůdné a nesplnitelné vlastnostmi jednoho homogenního materiálu. [1]

Kompozitní materiál je makroskopická kombinace dvou nebo více odlišných materiálů, které mezi sebou mají rozpoznatelné rozhraní a svým spojením vytváří modifikovaný produkt. Výsledné vlastnosti takového materiálu jsou vyšší než poměrný součet vlastností dílčích složek. Vzhledem k široké škále materiálů, které mohou být považované za kompozity, je poměrně obtížné se dohodnout na jednoduché definici kompozitního materiálu jako takové. Nicméně běžná a praktická definice představuje pod pojmem kompozitní ty materiály, které obsahují souvislou matricovou složku, která se váže dohromady a poskytuje pole pro silnější a tužší výztužnou složku. Objemový podíl výztužné složky musí být vyšší než 5 %.[1] [2]

1.1 Historie kompozitů

Kompozitní materiály byly používány již ve starověku, jedním z příkladů mohou být cihly naplněné slámou, které se v Mezopotámii používaly již v 2. tisíciletí př.n.l. ke stavbě příbytků. Za zmínku stojí také tzv. damascénská ocel, která se vyráběla systematickým skováním vysokouhlíkové a nízkouhlíkové oceli. Takto vyrobená ocel měla vysokou tvrdost, a zároveň velkou houževnatost. Velký rozmach zažily kompozitní materiály během druhé světové války, kdy vznikly kompozity s organickou matricí. Tyto materiály se vyvinuly díky leteckému průmyslu, který vyvinul potřebu vyrábět materiál s hodnotami specifické pevnosti a tuhosti, které byly výrazně vyšší než u stávajících konstrukčních materiálů. Kromě toho kompozity s organickou matricí na rozdíl od stávajících konstrukčních materiálů v letectví, jako byly např. slitiny na bázi hliníku, nepodléhaly korozi ani únavovému poškození. Do konce války se plasty vyztužené skelnými vlákny úspěšně používaly také například v konstrukci raketových motorů.

V 50. letech 20. století byly kompozity s organickou matricí dány do širšího využití a postupem času pronikly do téměř všech strojírenských odvětví. [3] [4]

1.2 Všeobecné rozdělení kompozitních materiálů

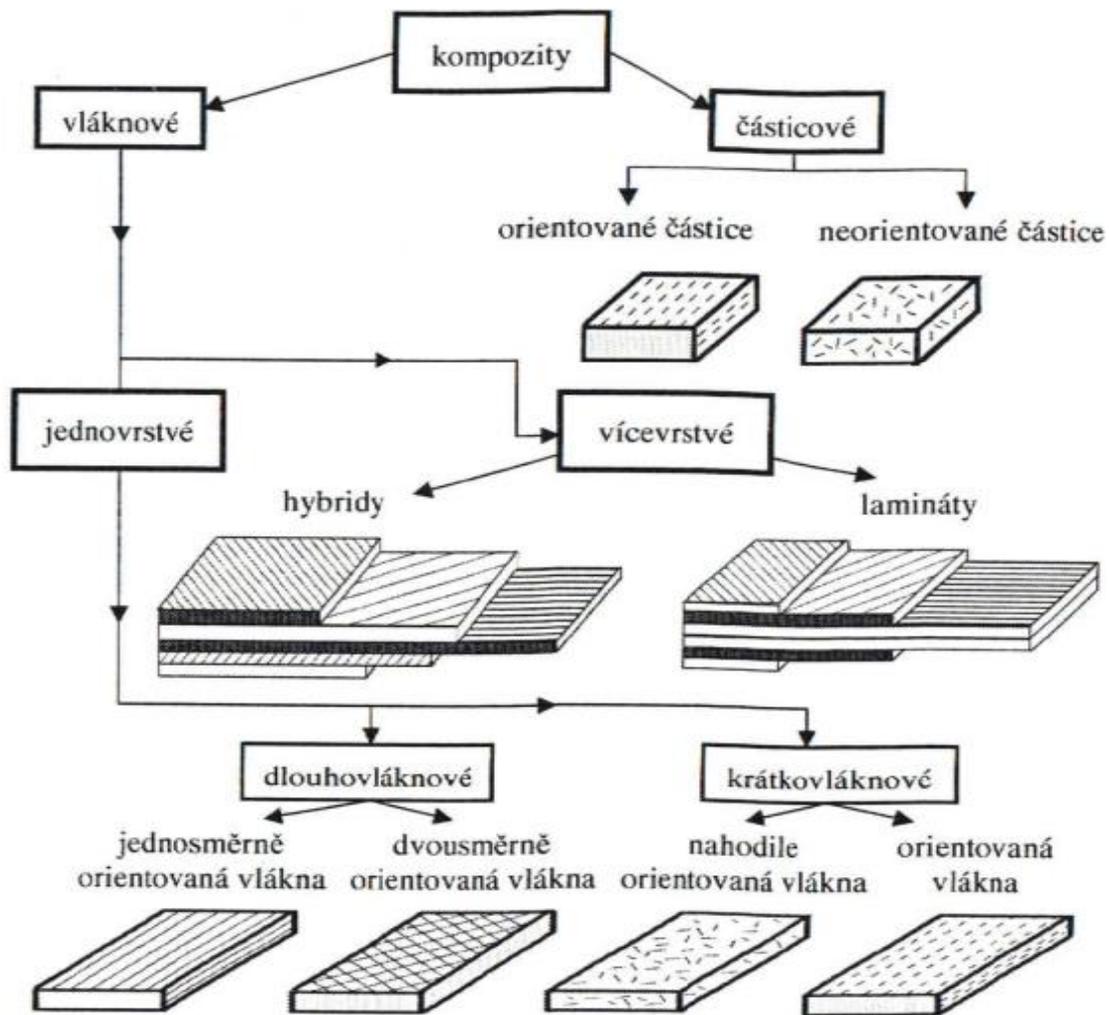
Kompozitní materiál musí obsahovat nejméně jednu spojitou fázi, která jej drží pohromadě. Této fázi se říká matrice. Další fáze, které by měly být v kompozitu rovnoměrně rozptýlené jsou nespojitě, a proto nesou označení disperze. [5]

1.2.1 Rozdělení podle disperzní fáze

- Kompozity třetího druhu – disperzní složka je složena z plynné fáze. Patří sem různé pěnové hmoty, jako např. pěnový polystyren, hliníková pěna apod.
- Kompozity druhého druhu – disperzní složka je složena z kapalně fáze. Jsou poměrně málo časté, patří sem např. spékané kovy pro ložiska vodních strojů (např. čerpadel, která musí pracovat pod vodou), nebo některé materiály samomazných ložisek (spékaný kov s disperzí oleje).
- Kompozity prvního druhu – disperzní složka je složena z pevné fáze. V technické praxi jsou nejdůležitější, lze je dále dělit podle tvaru disperze. [5]

1.2.2 Rozdělení podle tvaru disperze

- Částicové kompozity – tvar disperze je definován jako nevláknový útvar, který nemá dlouhý rozměr. Mohou být ve tvaru koule, krychle, kvádrů, popř. jiného tvaru. Částice se podílejí na přenosu namáhání pouze v omezeném měřítku. Hlavní význam částic je zlepšení vlastností materiálů, např. úprava elektrické a tepelné vodivosti, zvýšení odolnosti proti opotřebení a snížení koeficientu tření. Částice mohou mít v matici náhodnou orientaci, nebo mohou být orientovány z důvodu dosažení požadovaných mechanických vlastností.
- Vlákňové kompozity – jsou vyztuženy vlákny, která mají délkové rozměry podstatně větší než průřezové. Dále se rozdělují na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé vlákňové kompozity s dlouhými vlákny mají většinou vlákna orientována v jednom nebo ve dvou směrech. Jednovrstvé kompozity s krátkými vlákny se většinou vyrábí vstříkáním, kdy jsou vlákna obsažena již v tekutém stavu matrice (taveniny) a jejich uspořádání ve výsledném výrobku je nahodilé. Vícevrstvé vlákňové kompozity jsou složeny z více jednovrstvých vlákňových kompozitů a rozdělují se na lamináty a hybridy. [6]



Obrázek 1 Rozdělení kompozitních materiálů podle tvaru disperze [6]

1.3 Vlastnosti kompozitových struktur

Vlastnosti kompozitových struktur ovlivňují kromě druhů a poměru použitých základních materiálů (matric, disperzí a různých aditiv) také adhezní síly na jejich rozhraní, synergický efekt, izotropie a anizotropie. [5]

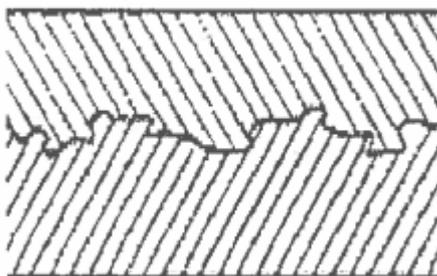
1.3.1 Adhezní síly

Schopnost adheze mezi spojitou maticí a nespojitou výztuží je jednou z vlastností rozhodující o pevnosti kompozitu a zajišťuje přenášení napětí mezi maticí a výztuží. Adhezi tvoří několik mechanismů, jako absorpce a smáčení, elektrostatická interakce, kovalentní vázání povrchu, reakční vazby a nevázané interakce. Jednotlivé vrstvy mají nejen odlišné mechanické vlastnosti, ale i různé hodnoty teplotní roztažnosti, je proto potřeba, aby spojení vnitřních povrchů splňovalo alespoň podmínku pevnosti ve smyku

fyzikálních a chemických vazeb. Adhezní síly se mohou z hlediska původce působení dělit na mechanické, fyzikální a chemické. [7]

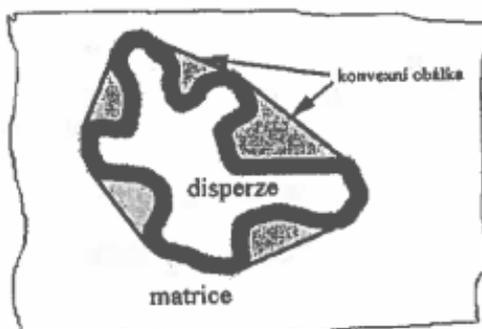
1.3.1.1 Mechanické zaklínění

Styková plocha mezi maticí a disperzí není nikdy zcela rovná, vždy jsou na ní různé výstupky a prohloubeniny, při dokonalém styku je možné ji znázornit následujícím schématem:



Obrázek 2 Vzájemné zaklínění matrice a disperze na společném rozhraní [5]

Při zatížení brání tyto nerovnosti ve vzájemném pohybu matrice a disperze, muselo by dojít k jejich usmýknutí. Toto zaklínění je tím větší, čím je hranice mezi maticí a disperzí drsnější a jejich styk je dokonalejší. Je-li třeba posoudit schopnost mechanického zaklínění částice disperze, je možné použít koeficient, který je roven podílu povrchu částice a její konvexní obálky. [5]

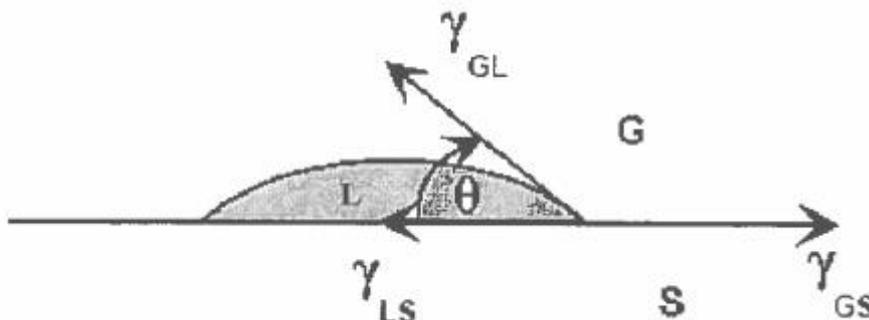


Obrázek 3 Konvexní obálka částice disperze [5]

1.3.1.2 Fyzikální adheze

Fyzikální adheze souvisí s tzv. Van der Vaalsovou vazbou 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. [5]



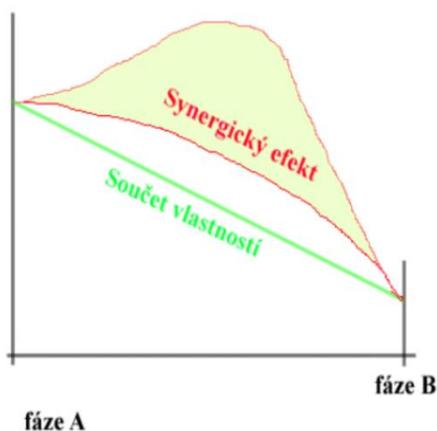
Obrázek 4 Základní schéma smáčivosti. S – pevná látka, L – kapalná látka G – okolní plynné prostředí. [5]

1.3.1.3 Chemická adheze

Může-li dojít na rozhraní matrice-disperze ke vzniku chemických vazeb, jsou příslušné adhezní síly daleko větší, chemické vazby mohou působit na vzdálenost 0,1 až 0,3 nm a jejich velikost odpovídá teoretické pevnosti 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 disperze do matrice nebo chemické reakci může dojít ke značnému úbytku disperze. V takových případech se mezi matricí a disperzí často aplikuje mezivrstva, která působí jako difuzní bariéra. Příkladem mohou být borová vlákna s difuzní bariérou SiC – označována jako Borsic. [5]

1.3.2 Synergický efekt

O synergickém (spolupracujícím) efektu mluvíme tehdy, jsou-li výsledné vlastnosti větší než vlastnosti poměrného součtu vlastností jednotlivých složek v materiálu. Při návrhu a výrobě kompozitního materiálu je snaha, aby byl synergický efekt co největší. [5]



Obrázek 5 Schéma synergického efektu [5]

1.3.3 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. Například u kompozitu s plastovou maticí a uspořádanými uhlíkovými vlákny se jeho tuhost a pevnost ve směru vláken výrazně liší oproti tuhosti a pevnosti ve směru kolmém na vlákna. Z hlediska symetrie vlastností můžeme 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.
- Pseudoizotropní materiál – má stejné vlastnosti ve směru tří kolmých základních os a jsou symetrické podle tří rovin tvořených těmito osami.
- 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.

1.4 Použití vláken jako konstrukčního prvku

Důvody použití vláken jako konstrukčního prvku vycházejí ze čtyř paradoxů materiálů.

1.4.1 Paradox pevného materiálu

Experimentálně stanovené hodnoty pevnosti, stejně jako modulu pružnosti v tahu (E-modulu) plastových materiálů v kompaktní formě jsou, jak lze vidět v tabulce, řádově mnohem nižší než hodnoty teoreticky možné, v případě vláken vyrobených z těchto materiálů jsou hodnoty pevnosti v tahu a E-modulu mnohem příznivější. U klasických konstrukčních materiálů, jako ocel či hliník, jsou přitom tyto hodnoty pevnosti v tahu řádově mnohem příznivější a mezi teoretickou a experimentálně stanovenou hodnotou E-modulu není takřka žádný rozdíl. [9]

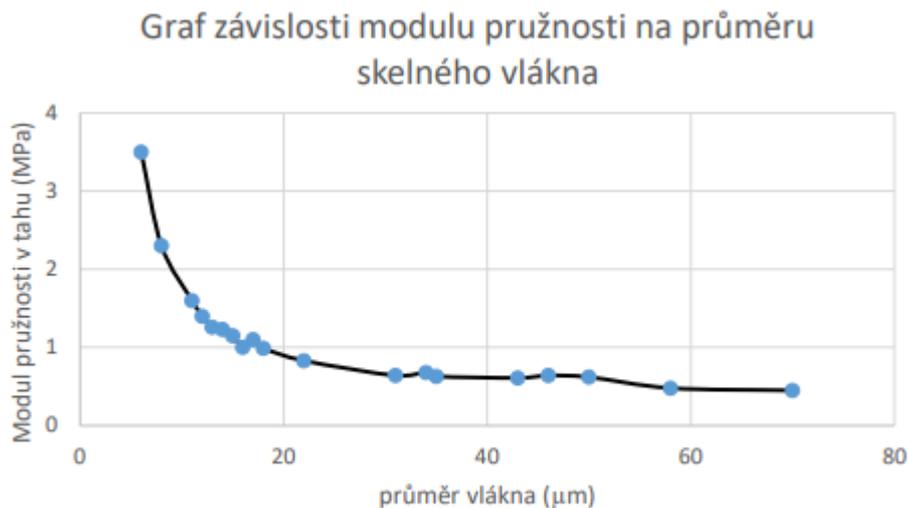
Tabulka 1 Teoretické a experimentálně naměřené mechanické hodnoty vybraných materiálů [9]

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 %)

1.4.2 Paradox vláknité struktury

Pevnost plastů ve formě vlákna je řádově vyšší než ve formě kompaktní hmoty. Závislost pevnosti skleněného vlákna na jeho průřezu je zřejmá z grafu. Většina vláken se vyrábí o průměru cca 14 μm . Další zmenšování průměru vlákna pro dosažení vyšších pevností není

vhodné, protože tenčí vlákna pronikají do plic (jsou karcinogenní). Silnější vlákna působí kladně svou tuhostí ve vzpěru při zatížení tlakem. [9]



Graf 1 Závislost modulu pružnosti na průměru skelných vláken

1.4.3 Paradox délky zatížení

S rostoucí délkou zatíženého vlákna výrazně klesá jeho pevnost. Přírůstek pevnosti – jak se zmenšujícím se průměrem vlákna, tak i s jeho kratší zatěžovanou délkou lze vysvětlit tím, že výskyt poruch a jejich vliv je o to menší, o co tenčí jsou vlákna a o co kratší je jejich zatěžovaná délka. Výhodou kompozitů je, že rovnoměrným uložením 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. [9]

1.4.4 Paradox kompozitního materiálu

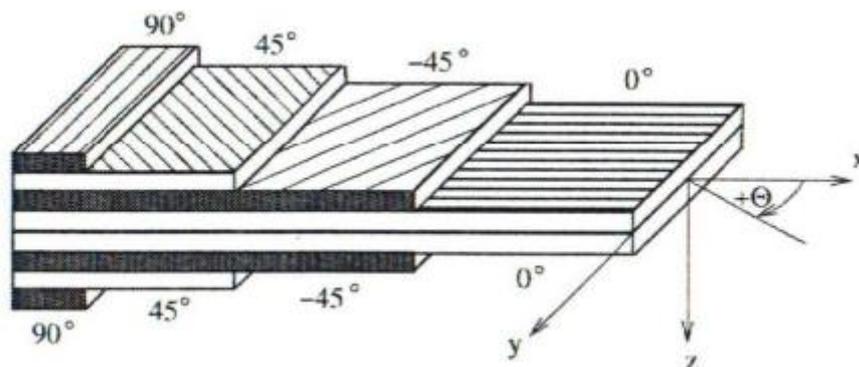
Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně.

Paradox kompozitů platí při působení zatížení jednotlivých složek, resp. celého kompozitu tahem. Při zatížení tlakem, ohybem nebo smykem nemohou často jednotlivé složky kompozitu samy o sobě převzít svůj podíl na přenosu porušujících sil, zejména pokud nemohou zachovat při zatížení své geometrické uspořádání, jako např. vlákna svoji vzpřímenost. [9]

2 VRSTVENÉ KOMPOZITY

U jednovrstvých kompozitů s dlouhými, jednosměrně orientovanými vlákny jsou vlastnosti v podélném směru řízeny vlastnostmi vláken, zatímco v příčném směru jsou rozhodující vlastnosti matrice. Ve většině konkrétních technických aplikací jsou vlastnosti v příčném směru posuzovány jako neuspokojivé. Z toho vyplývá značné omezení využívání čistě jednosměrných kompozitů. [6]

V praxi se proto nejčastěji používají vícevrstvé kompozity, které se skládají z několika tenkých, různě orientovaných, jednovrstvých vláknových kompozitů – lamin. Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, nazývá se tento kompozit laminát. Tloušťky jednotlivých vrstev v laminátu by měly mít stejnou šířku a měla by být zachována symetrie vrstev ke střední rovině stěny. V případě, že jsou vrstvy vyrobeny z různých materiálů, například jedna je vyztužena skelnými vlákny a druhá uhlíkovými vlákny, jedná se o tzv. hybridní lamináty. Různým natočením jednotlivých vrstev laminátu lze zvyšovat stupeň izotropie kompozitu. Úhel orientace vrstev v laminátu se zapisuje kódem, v němž úhel pootočení vláken vůči zvolenému hlavnímu směru je označen příslušným znaménkem a číslem udávajícím počet stupňů úhlu, viz obr.6 [6][8][10]



Obrázek 6 Uspořádání vláknového laminátu [6]

Výhodou laminátů oproti běžným materiálům je výrazně nižší hmotnost, velká pružnost při deformaci, vysoká tuhost a pevnost, kterou lze přizpůsobit směru a druhu zatížení. Nízký součinitel teplotní délkové roztažnosti, vysoká odolnost proti stárnutí a korozi, výhodou je také díky široké škále použitelných materiálů a uskupení laminátů velký rozsah vlastností, a tedy i použití. Vlastnosti laminátu lze navíc cíleně ovlivňovat a v podstatě tak lze vyrobit „materiál na míru“ [9]

Mezi nevýhody může patřit třeba to, že kvůli velkému množství variant materiálového složení prakticky neexistuje standartní kompozit, obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu, nebo také neobvyklé chování materiálu (vlastnosti kompozitu nelze jednoduše odvodit součtem vlastností jeho složek).[9]

2.1 Výztužný systém

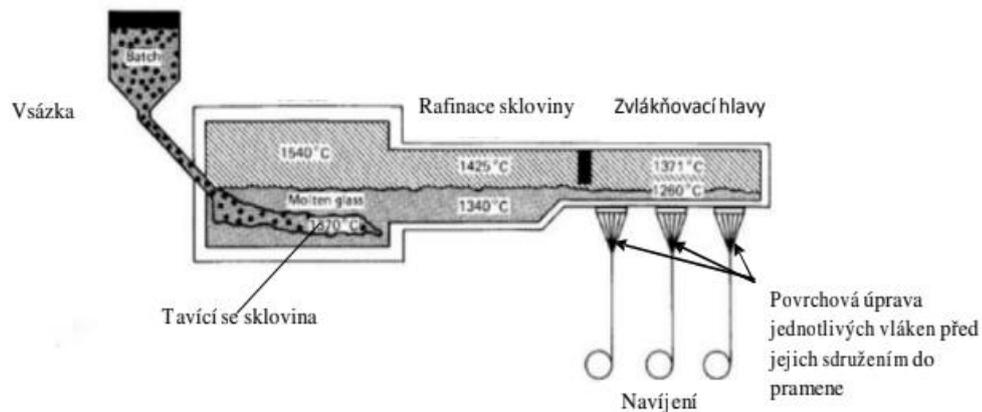
Výztužným systémem se u laminátových kompozitů rozumí různé typy vyztužujících vláken. Tato vlákna lze rozdělit z hlediska druhu materiálu nebo podle jejich konstrukce (uspořádání) ve vrstvě. Profil výztužných vláken má obvykle kruhový tvar a lze je dále rozdělit podle velikosti jejich průměru. Vlákna, jejichž průměr se pohybuje do 100 nanometrů, označujeme jako nanovlákna. Vlákna s průměrem v rozmezí od 0,1 do 1 mikrometru nesou označení mikrovlákna. Vlákna s průměrem 1 až 10 mikrometrů se nazývají střední a patří mezi ně například skelná vlákna, nebo také vlákna uhlíková či textilní. Vlákna jejichž průměr přesahuje 10 mikrometrů se nazývají hrubá vlákna.

2.1.1 Vybrané druhy vláknových materiálů

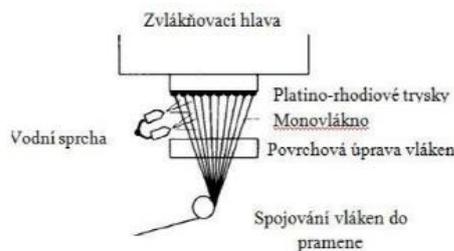
Z důvodu široké škály vláknových materiálů zde budou blíže popsány pouze základní vláknové materiály, se kterými se lze v praxi setkat nejčastěji.

2.1.1.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů sodíku a draslíku. Výroba probíhá ve sklářských pecích při teplotě okolo 1400 °C. Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla tekoucího platino rhodiovými tryskami (průměr trysky je 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna se po povrchové úpravě sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving (pramenec). [10]



Obrázek 7 Výroba skelného vlákna [10]



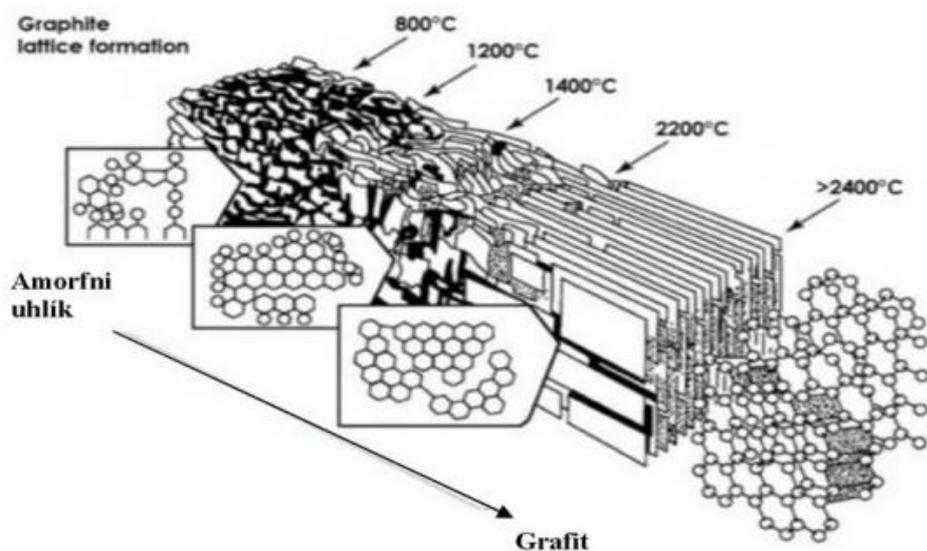
Obrázek 8 Zvláknovací hlava [10]

Tato vlákna jsou nejrozšířenějším materiálem pro výrobu kompozitu. Používají se na běžné aplikace, kde není vyžadována vysoká pevnost, ale je potřeba snížit hmotnost výrobku. Většinou se používají v kombinaci s nějakou povrchovou úpravou, protože po nasycení jsou transparentní s jemným odstínem zelené až žluté barvy (podle pojiva). Sklená vlákna jsou nehořlavá, nerozkládají se a vyznačují se dobrou chemickou stabilitou a jsou dobrým elektrickým izolantem. Byla to první vlákna, která byla použita na přípravu kompozitu s polymerní matricí. Používají se například na výrobu různých krytů. Mechanické vlastnosti skelných vláken jsou v porovnání s jinými kompozitními materiály horší. [11][12]

2.1.1.2 uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se v dnešní době vyrábějí hlavně z polyakrylonitrilových vláken (PAN) (asi 80% světové výroby), novoloidu, sulfonovaného lineárního nízkohustotního polyethylenu (PE-LLD) a z ligninu. Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN je možno rozdělit do tří etap:

- Stabilizace-při teplotách 200 až 300 °C, za působení tahového napětí a v oxidačním prostředí je PAN vlákno stabilizováno. Vlákno při této etapě ztmavne a stane se netavitelným.
 - Karbonizace-při teplotách od 1000 do 1800 °C v inertním prostředí (velice čistý dusík) ve vláknu proběhne karbonizace (odstraní se vodík a sníží obsah dusíku a kyslíku, 80 až 95 % hmoty tvoří uhlík). Vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu.
 - Grafitizace-při teplotách do 3000 °C v prostředí argonu. Ještě více se zvětší obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokrystalů. Vyvinutější mikrokrystaly vedou k zvětšení tuhosti vlákna. U vláken z PAN je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokrystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi.
- [10]



Obrázek 9 Změna struktury PAN vlákna [10]

Uhlíkové vlákno je jedno z nejdůležitějších vláken pro výrobu vláknových kompozitů. Kromě výborné pevnosti v tahu, která dosahuje až 3000 Mpa, a vysokému modulu pružnosti mají uhlíková vlákna také vysokou odolnost proti chemické korozi, vysokou teplotní stálost a teplotní odolnost, jsou odolné proti radiaci a mají dobrou elektrickou vodivost. Používají se v leteckém a zbrojním průmyslu, ale také v profesionálním sportovním vybavení, medicíně, automobilovém průmyslu a spoustě dalších strojních odvětvích. Jednou z mála nevýhod uhlíkového vlákna je to, že ve styku s méně ušlechtilými kovy vytváří galvanický člunek a dochází k elektrochemické korozi, při níž koroduje kov, kompozit s uhlíkovými vlákny musí proto být od kovu oddělen nevodivým materiálem. [10][11][13]

2.1.1.3 Aramidová vlákna

Tento materiál je také známý pod názvem Kevlar. Jedná se o pevný a tepelně odolný materiál ze syntetických polymerních vláken. S hustotou $1,45 \text{ g/cm}^3$ patří mezi nejlehčí vyztužná vlákna. Jeho hlavní nevýhodou je, že se nedá jednoduše dělit. Ke stříhání kevlarových pláten slouží speciální nůžky, které mají na ostří vybroušeny mikro zoubky, které nedovolují klouzání jednotlivých vláken po ostří a dochází ke stříhu. Kevlarová vlákna se nedají řezat nožem. Po vytvrzení se velmi špatně obrábí a jediným efektivním způsobem dělení je řezání vodním paprskem. Využití kevlaru nalezneme například na přilby pro paragliding, kde chrání hlavu před vniknutím cizího tělesa. Při silnějších vrstvách se používá v přilbách a vestách pro speciální jednotky policie a pro stavební účely. Dále se používá na výrobu kapotáže závodních vozů (přední nárazníky z kevlarové tkaniny) pro jeho odolnost vůči průrazu. [11]

2.1.1.4 Keramická vlákna

Keramická vlákna jsou vyráběna především z nekovových oxidů a nitridů hliníku, korundu, křemene nebo spinelu. Mají vysokou teplotní stabilitu, odolnost proti oxidaci, odolnost proti erozi, odolnost proti opotřebení a vysokou tvrdost. Nejčastěji jsou součástí kompozitů s kovovou nebo keramickou maticí. Příkladem použití mohou být mechanické ucpávky, keramická ložiska a rezné nástroje.

2.1.2 Kompozice vláken

Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů se většinou aplikují upravené produkty. Tyto produkty se rozdělují podle uspořádání vláken, mezi základní polotovary zhotovené z elementárních vláken patří:

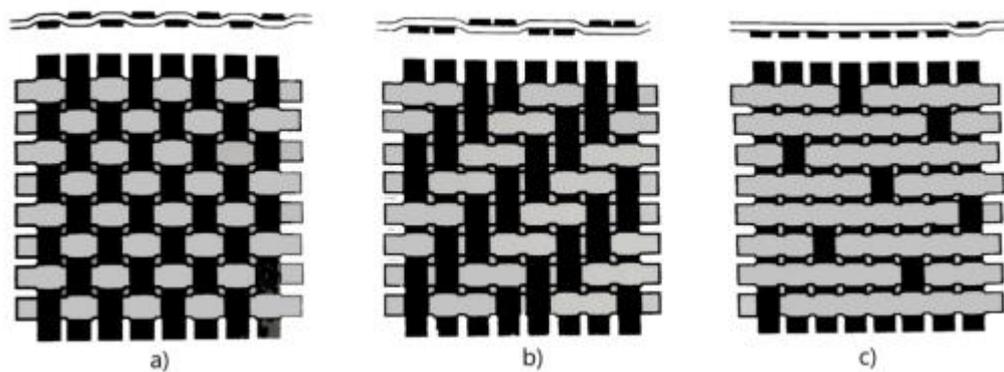
- Příze – vyrábí se spřádáním vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky.
- Nitě – vyrábí se jedno-nebo víceštruhově, skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny. Zpracovávají se dále podobně jako příze.
- Roving (pramenec) – skládá se ze sdružených, rovnoběžně uložených, nestočených vláken, nebo vláken tažených přímo z taveniny (skelná vlákna). Zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.

- Rohože – představují netkané, plošné výrobky mohou být složené ze sekaných vláken, která jsou uložena do vrstev a postříkána pojivem, nebo z dlouhých kontinuálních vláken, která jsou uložena nepravidelně, bez jakékoliv orientace, ve smyčkách a jsou vzájemně spojena pojivem.
- Jednosměrné pásy – textilní pásy z jedné nebo více rovnoběžně uložených vrstev přímých, nezvlněných netkaných vláken, které jsou spojeny příčnou tenkou vrstvou lepící rohože. Na rozdíl od tkanin se mohou pásy navzájem ukládat pod libovolným úhlem.
- Úplety – textilní plošné výrobky, které se vyrábějí z jednoho nebo více druhů vláken pletením, umožňujícím volbu nejrůznějších geometrických tvarů.
- Pleteniny – 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.
- Tkaniny – 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. Tkaniny jsou v porovnání s jednosměrně orientovanou výztuží snáze zpracovatelné. [14][11]

2.1.2.1 Druhy vazeb tkaninových výztuží

- Plátňová vazba – jednoduchá základní vazba která se vyznačuje vysokou pevností, ale je hůře tvarovatelná. Vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému otřepu při řezání se dobře zpracovává. Tato tkanina je nejrozšířenější, používá se ve většině laminovaných dílech. Jedinou nevýhodou je, že se nedá použít na tvarově složité díly. Tkaniny s touto vazbou jsou tkány tak, aby prameny útky procházely pokaždé pod a nad prameny osnovy.

- Keprová vazba – jedná se o tkaninu která je v poměru s plátňovou vazbou ohebnější, a dá se proto používat pro tvarově složitější díly. Zároveň dosahuje dobrých mechanických vlastností díky menšímu zvlnění vláken. Pro strukturu keprové vazby je charakteristický diagonální vzor.
- Atlasová (saténová) vazba – má menší vychýlení vláken než keprový vazba, velmi dobrou řasitelnost a z toho vyplývající vhodnost pro prostorově složité prvky. Pomocí tkanin s atlasovou vazbou lze dosáhnout velmi hladký povrch. [14][11]



Obrázek 10 Druhy vazeb (a) plátňová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová vazba) [14]

2.2 Matrice

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Hlavním úkolem matrice je zaručení geometricky stálého tvaru výrobku a polohy vláken. Zajišťuje také přenos namáhání mezi vlákny a chrání vlákna před vlivy okolí. Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Matrice proto musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákna smočila úplně a bez bublin. [14]

U polymerních kompozitů se matrice dělí na termosety (reaktoplasty) a termoplasty.

2.2.1 Termosetické matrice

Termosetické matrice se v dnešní době používají pro výrobu polymerních kompozitních materiálů nejčastěji. Mají tu přednost, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a při normální teplotě v tekutém stavu, a proto se také snadněji zpracovávají. Vytvrzují polyadicií, nebo polymerací bez štěpení těkavých složek přidávkem katalyzátoru a urychlovače, případně dodáním energie (teplo, záření) – tak získá kompozit své konečné vlastnosti. Tyto trojrozměrně zesíťované materiály dosahují vysokých hodnot pevnosti a

tuhosti, ale jsou často křehké a jejich tažnost se pohybuje v řádu procent. Mezi nejdůležitější typy reaktivních pryskyřic patří například epoxidové pryskyřice, vinylesterové pryskyřice či polyesterové pryskyřice.

Při vytvrzování reaktivních pryskyřic dochází ke vzniku trojrozměrně zesíťované hmoty, s tím však souvisí několik specifík, které je nutno vzít v úvahu při zpracování. Mezi tyto specifika patří zmenšení objemu (smrštění), exotermní reakce a všeobecné zvýšení viskozity. [14]

2.2.2 Termoplastické matrice

Termoplasty jsou za normální teploty pevné látky a teprve po zahřátí na teplotu většinou nad 200 °C jsou dostatečně tekuté, což značnou měrou ovlivňuje finanční náročnost technologického postupu při výrobě kompozitního materiálu. Nevýhodou oproti termosetům je také to, že se jedná o makromolekulární látky, takže i ve formě taveniny mají řádově vyšší viskozitu, což má za následek horší smáčení a horší prosycování vláken, další nevýhodou jsou také menší hodnoty E-modulu, nižší teplotní odolnost a nižší odolnost proti chemickým vlivům. Výhodou termoplastů je naopak vyšší houževnatost a tažnost. [14]

3 PREPREGY

Prepregy (předimpregnovaná vlákna) jsou polotovary skládající se z vysoce viskózní matrice a kontinuálních výztužných vláken, většinou se dodávají v podobě navinutých rolí či kotoučů. Jednotlivé vrstvy prepregu jsou z obou stran opatřené fólií, aby během navíjení nedošlo k vzájemnému spojení vrstev a postupné degradaci pojiva. Výhodou prepregů je 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. 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, rohoží nebo jednosměrných rovingů.

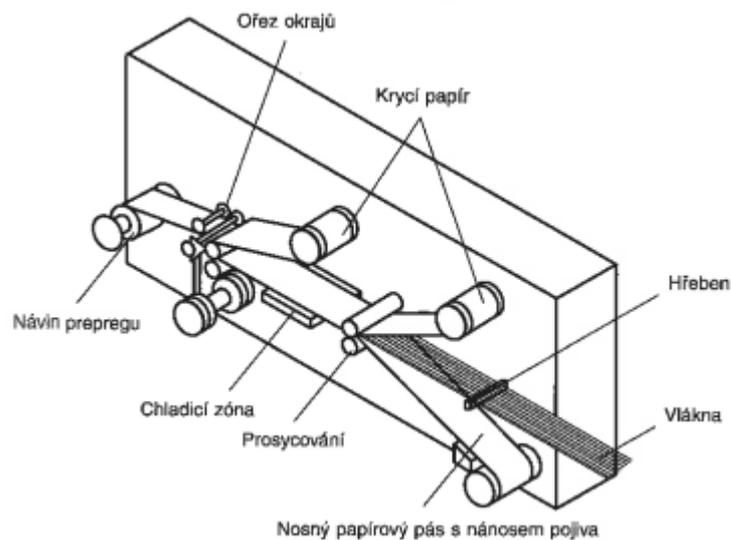
Za posledních 70 let prepregy významně ovlivnily technologii výroby komponentů vyztužených vláken. Dnes jsou tyto materiály celosvětově rozšířené a používají se k výrobě kompozitních dílů v leteckém průmyslu, lodním průmyslu, výrobě vysokorychlostních vlaků a v mnoha dalších aplikacích. Z hlediska typu materiálu matrice se prepregy dělí na prepregy s termosetickou matricí a prepregy s termoplastickou matricí. V dalším textu bude popsán pouze prepreg s termosetickou matricí. [14][15]

3.1 Prepregy s termosetickou matricí

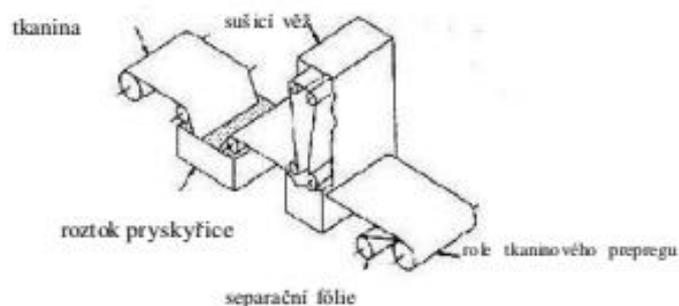
Prepregy s termosetickou matricí představují systém výztuže, nejčastěji vyrobený ze skelných, uhlíkových nebo aramidových vláken, předimpregnovaný vysoce viskózní reaktoplastickou matricí. Kromě prepregů s dlouhovláknovou výztuží zde patří také tzv. SMC prepregy, které obsahují pramence vláken sekané na délku 25-50 mm. Prepregy s reaktivním termosetickým pojivem se musí od své výroby až do dalšího zpracování skladovat za chladu asi -20 °C, přesto jsou však skladovatelné po dobu nejvýše 6 měsíců (v závislosti na reaktivitě použitého pojiva. Přibližně 6 hodin před vlastním zpracováním se prepreg rozmrazí bez přítomnosti vzduchu (aby nedošlo ke kondenzaci vzdušné vlhkosti na povrchu prepregu) a připraví se z něj podle stříhového a pokládacího plánu potřebné přířezy pro laminaci. [14]

3.1.1 Výroba prepregu s termosetickou matricí

Při výrobě prepregu s termosetickou matricí se odvíjejí pramence vláken ze stojanu s cívkami a vedou se rovnoběžně vyrovnány v rovině přes stavitelný hřeben. Takto připravený pás vláken se ukládá na papírový nosič opatřený silikonovou vrstvou, na který byla předem nanesena vrstva pryskyřice. Pás je veden na vytápěný válec kalandru, kde pod tlakem dochází k prosycení výztuže pojivem. Pás prepregu, prosycený pryskyřicí a oboustranně chráněný nosným papírovým pásem, prochází chladicí zónou, kde se zastaví vytvrzovací reakce. Dále již hotový prepreg projde přes ořezávací zařízení na odvíjecí zařízení. Při výrobě tkaninových prepregů je preferován tzv. mokrý způsob, kdy je výztužný systém namáčen do roztoku pryskyřice. [14]



Obrázek 11 Výroba jednosměrně orientovaného prepregu [14]

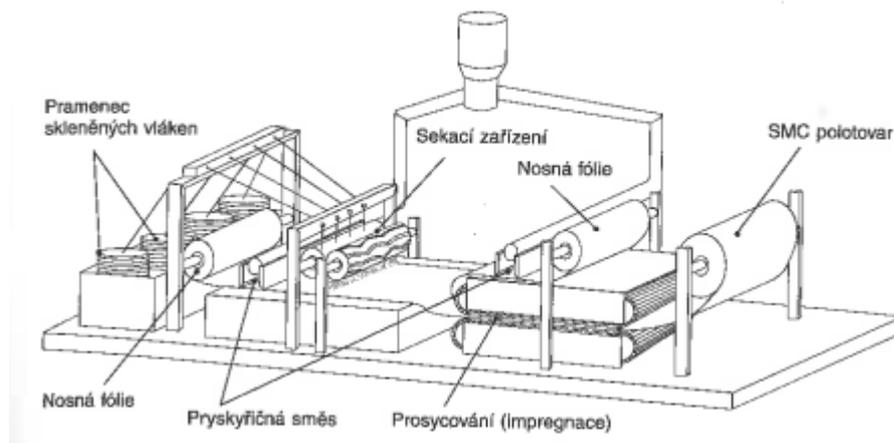


Obrázek 12 Výroba tkaninového prepregu metodou mokrou metodou [14]

3.1.2 SMC prepregy

Prepregy typu SMC (sheet moulding compound) se připravují kontinuálním procesem, při kterém se nejdříve smíšením všech přísad (nenasycená polyesterová pryskyřice, styren, iniciátor, inhibitor, plniva, mazivo, separátor, zahušťovací složka, kompenzátor smrštění) připraví várka pojiva. Ta je dále potrubím přes říditelné čerpadla dopravována a dávkována ve správném poměru s iniciátorem do míchačky, ve které dojde k promísení. Namíchaná směs prochází přes síto, kde se pročistí od případných nečistot.

Pastovitá směs se dále nanáší pomocí přesně seřízeného stíracího nože na nosnou fólii, která se vede k sekacímu zařízení skelných vláken. Po průchodu hnětací zónou, v níž je skelná výztuž pomocí prosycovacích válečků zcela prosycena pojivem se polotovar dále navíjí do rolí. Jako výztuž se používají vlákna o délce 25 až 50 mm. Delší vlákna zhoršují zatékavost směsi a zvyšují možnost orientace. [14]



Obrázek 13 Výroba SMC prepregu [14]

SMC prepregy se dále rozlišují podle struktury vláken

- SMC – R – obsahuje pouze náhodně uložená krátká sekaná vlákna o délce 25-50 mm nebo jejich směs (izotropní uložení vláken).
- SMC – C – obsahuje náhodně uložená krátká sekaná vlákna společně s jednosměrně uloženými skleněnými pramenci (anizotropní uložení vláken).
- SMC – D obsahuje náhodně uložená krátká sekaná vlákna spolu s částí orientovaně uložených sekaných vláken o délce 75 až 200 mm (anizotropní uložení vláken).

Výrobky z SMC patří vzhledem ke svým dobrým mechanickým vlastnostem a relativně příznivé ceně mezi nejčastěji používané termosetické kompozity. Při poměrně vysokých hodnotách meze pevnosti v tahu, ohybu a rázové houževnatosti vykazují také dobré elektrické vlastnosti a vysokou tepelnou odolnost s nízkou absorpcí vlhkosti. Mezi hlavní oblasti použití patří různé aplikace v elektrotechnice (skříně rozvaděčů, kryty svítidel), jsou také levnou, konstrukčně jednoduchou a nekorodující alternativou pro hlubokotažné ocelové plechy používané v automobilovém průmyslu. [14]

3.2 Zpracování prepregů

V této podkapitole bude rozebráno zpracování prepregů, tedy ten proces, ve kterém se z polotovaru ve formě v roli navinutého nevytvrzeného prepregu stane hotový výrobek.

3.2.1 Řezání prepregů

Prepregy jsou většinou do zpracovacího procesu dodávány ve formě rolí o různé tloušťce, která se pro neorientované výztuže pohybuje v rozmezí od 150 do 1200 mm a pro výztuže ve formě tkaniny od 1000 do 1270 mm. Před zpracováním hotového výrobku je potřeba tento materiál nařezat na požadovanou geometrii podle nástřihového plánu. V případě orientovaných prepregů je nutno materiál řezat podle požadované orientace vrstev ve výsledném výrobku. Jednotlivé vrstvy se poté označují podle ukládacího plánu. [16]

3.2.1.1 Ruční řezání prepregů

K manuálnímu řezání prepregů se používá ocelový nůž nebo nůžky. K dosažení přesně vedených řezů se používají ocelová pravítka nebo šablony. Typicky se ruční řezání používá pro geometricky jednoduché tvary nebo malosériovou výrobu. Nevýhodou této metody může být, že kvalita a přesnost nástřihů závisí na zkušenostech a zručnosti pracovníků. [16]



Obrázek 14 Ruční stříhání prepregů [16]

3.2.1.2 Strojní řezání prepregů

V dnešní době se pro řezání tvarově složitých profilů z prepregů používají převážně počítačově řízené řezací stroje. Tyto stroje jsou vybaveny řezacím stolem, na kterém je připevněna řezací plocha vyrobená z plsti, plastu nebo bloků štětin, což umožňuje řezacímu noži lehce proniknout do řezné plochy, což umožňuje čistý řez. Řezací hlava je vybavena snímačem pro neustálou kontrolu polohy souřadnic, ve které se nachází. Nástrojem pro řezání jsou řezací nože, které mají čepel ve tvaru jehlanu, a často bývají vybaveny ultrazvukovým kmitáním, aby se zabránilo přilepení čepele k předimpregnovanému materiálu. [16]



Obrázek 15 Řezací CNC stroje [16]



Obrázek 16 Řezací nástroje pro řezání prepregů [16]

3.2.2 Vrstvení prepregů

Vrstvením prepregů se rozumí ukládání jednotlivých vrstev nastříhaného prepregu do prostoru formy. Do otevřené formy se nejdříve nanese vrstva separátoru nebo neporézní fólie, které zajistí snadné vyjmutí z formy po vytvrzení. Dále je vložena odtrhová fólie, která má za úkol zamezit šíření nečistot z povrchu formy na povrch výrobku. Jednotlivé orientované vrstvy vůči sobě bývají různě natočené, čímž se zvyšuje jejich stupeň izotropie

a také mechanická odolnost vůči rozličně orientovaným zatížením. Mezi základní způsoby vrstvení prepregů patří například ruční vrstvení, strojní vrstvení a navíjení prepregů. [14]

3.2.2.1 *Ruční vrstvení prepregů*

Ruční kladení je nejjednodušší pracovní postup, který je vhodný pro malé série, prototypy a velkoplošné díly. Pracovní nástroje a potřebné pomůcky jsou jednoduché a levné. Tato technologie je však jakožto ruční práce náročná na mzdové prostředky. Jakost vyrobeného dílu závisí na znalostech a zkušenostech pracovníka. Vrstva prepregu je zbavena ochranné fólie a podle ukládacího plánu ručně vrstvena do prostoru formy. Prepreg lze před vrstvením nahřát cca na 50-60 °C, aby se snížila viskozita matrice a také aby matrice nelepila. Každá vrstva by měla být nanášena rovnoměrným odvalováním, aby se zabránilo vniknutí většího množství vzduchu mezi vrstvy prepregu. Odvalování může probíhat ručně, či za použití válečku, které vede k rovnoměrnějšímu zpevnění. Vzduch zachycený mezi vrstvami může být vytlačen za pomoci plastového nože nebo opatrným poklepáním jehlou. [10][14][16]



Obrázek 17 Ruční vrstvení prepregu [16]

3.2.2.2 *Strojní vrstvení prepregů*

Pro strojní kladení prepregů se používá počítačově řízených kladečích strojů. Kladečí stroje jsou vybaveny kladečí hlavou, která se pohybuje nad otevřenou formou a má dostatečný počet stupňů volnosti. Kladečí hlava sejme separační fólii, předejde prepreg a kladkou jej přitiskne k předchozím vrstvám. Pro reaktoplastické matrice, zpracovávané při mírně zvýšených teplotách, vyhovuje kladka tvořená polyethylenovými disky, na které se pryskyřice nelepí. Na konci jedné položené stopy kladečí hlava prepreg odřízne. Proces strojního kladení je v porovnání s ručním kladením značně rychlejší a vylučuje selhání lidského faktoru (zvolená orientace vrstev je zaručena). Mezi základní typy kladečích

strojů patří CTLM (Contour Tape Layer Machine) a FTML (Flat Tape Layer Machine). [10]



Obrázek 18 Robotický systém pro výrobu kompozitů [10]

3.2.2.3 Navíjení prepregů

Technologií navíjení se vyrábějí dutá tělesa symetrická k ose otáčení. Jsou to např. roury, nádrže, tlakové zásobníky a jiné tvarově jednoduché prvky. Jedná se o mechanizovanou tvářecí technologii s vysokou přesností a reprodukovatelností. Při navíjení se vzájemně spojují rotační pohyb trnu s dopředným a zpětným pohybem suportu, což umožňuje ukládat prepregy na trn podle určitého navíjecího vzoru. Kvůli smrštění se pro velké nádoby používají zvláštní trny, které před snímáním výrobku sklopí dovnitř segmenty. U menších průměru lze trn z výrobku vytlačit pomocí lisu. [10] [14]



Obrázek 19 Nos letadla vyrobený z prepregu s uhlíkovými vlákny metodou navíjení [10]

3.2.3 Vytvrzování prepregů

Vytvrzování je podstatným faktorem při zpracování reaktivních pryskyřic. Teoreticky je pryskyřice zcela vytvrzena teprve tehdy, když zreagují všechny reaktivní skupiny.

K vytvrzování se váže pojem stupně vytvrzení, který v podstatě udává, kolik procent chemických vazeb již v materiálu vzniklo v poměru s tím, kolik jich může vzniknout celkově. Stupeň vytvrzení se měří například metodou DSC (diferenciální snímací kalorimetrie), kdy se stupeň vytvrzení stanoví ze zbytkové entalpie a celkové reakční entalpie, pro aplikace je potom zajímavější údaj o nejvyšší možné teplotě skelného přechodu, který roste společně se stupněm vytvrzení a nejvyšších hodnot nabírá právě při úplném vytvrzení. Nedostatečné vytvrzení působí negativně na téměř všechny vlastnosti, zejména na odolnost proti stárnutí, povětrnosti a chemickým vlivům. I když je známo, že pryskyřice částečně vytvrzují i za pokojové teploty, téměř neexistují pryskyřice, které by se daly úplně vytvrdit pouze za studena. Z tohoto důvodu je potřeba prepregy s termosetickou matricí vytvrzovat za tepla. V zásadě platí, že vytvrzovací teplota musí být přibližně o 10 až 20° nižší, než je maximální teplota skelného přechodu. [14]

3.2.3.1 Vytvrzování v autoklávu

Autoklávy jsou tlakové nádoby obsahující stlačený vzduch, používají se pro výrobu vysoce kvalitních, tvarově složitých dílů, je také vhodný pro vytvrzování rozměrově velkých součástí. Při této technologii je nejdříve provedeno vakuování dílu. Po odsátí vzduchu z vaku přitlačuje jednotlivé vrstvy laminátu atmosférický tlak. Po ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu nastane vytvrzování pryskyřice. Vyvozením přetlaku v autoklávu se ještě lépe přitlačí vrstvy prepregů k sobě a je tak zaručen minimální obsah pryskyřice. (přetlak je v desetinách MPA). Doba působení teploty a přetlaku se volí podle rychlosti vytvrzování pryskyřice. Chladnutí dílu musí být pomalé, aby mohla relaxovat vnitřní pnutí v laminátu, vzniklá rozdílnou tepelnou roztažností složek kompozitu i různou orientací vrstev. [10] [16]



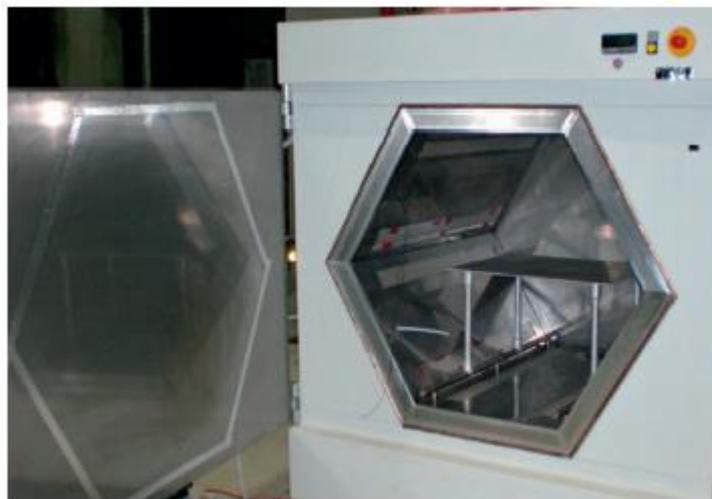
Obrázek 20 Autokláv na vytvrzování malých výrobků [16]

3.2.3.2 Vytvrzování v peci

V peci v podstatě probíhá stejný cyklus jako v autoklávu, jediným rozdílem je, že pec nemůže vytvořit podtlak, takže díly vytvrzené v peci mají zpravidla kvůli vyššímu obsahu pryskyřice horší mechanické vlastnosti. Pece se pro vytvrzování dílů z prepregu používají hlavně kvůli nízké pořizovací ceně, stejně jako nižším nákladům na provoz a údržbu. [16]

3.2.3.3 Vytvrzování v mikrovlnné peci

Mikrovlnný ohřev umožňuje lepší kontrolu teploty při menší spotřebě energie (až o 80 % menší spotřeba oproti autoklávu). Proces vytvrzování pryskyřice je i rychlejší (až o 40 % kratší cyklus než u autoklávu). Zařízení pro mikrovlnný ohřev by proto mohlo nahradit dražší autoklávy. Některé výztužné materiály se mikrovlnným zářením neohřívají (např. sklo a skelná vlákna), je proto možné vytvořit nástroj, v němž se mikrovlny soustředí pouze na ohřev pryskyřice kompozitu. Nevýhodou mikrovlnného ohřevu může být fakt, že běžné těsnicí vaky a odvzdušňovací vrstvy mikrovlny absorbují, což vyžaduje použití speciálních vaků z polyimidu (PI), které je tepelně stabilnější a navíc absorbuje poměrně malé množství energie. [10][16]

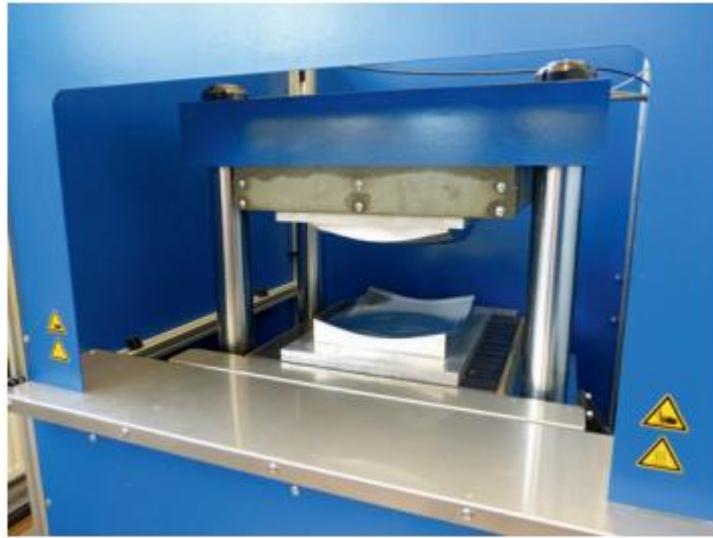


Obrázek 21 Mikrovlnná pec [16]

3.2.3.4 Vytvrzování v lisu

Vytvrzování v lisu probíhá za působení teploty a tlaku převážně ve vytápěných ocelových formách. Lisovací tlaky se pohybují podle složení a požadované zatékavosti v rozmezí 30 až 140 barů. Ocelová forma se při lisování skládá ze dvou částí – tvárníku a tvárnice. Vzhledem k tomu, že laminát je při lisování v přímém kontaktu s vyhřívanou částí nástroje, je přestup tepla a tím pádem také vytvrzovací cyklus rychlejší než v případě použití

autoklávu či pece. Díly vyrobené lisováním mají malou pórovitost a dobré mechanické vlastnosti. Kvůli značným nákladům na formu pro výrobek se lisování používá pouze v sériových a hromadných výroбах. [10][16]



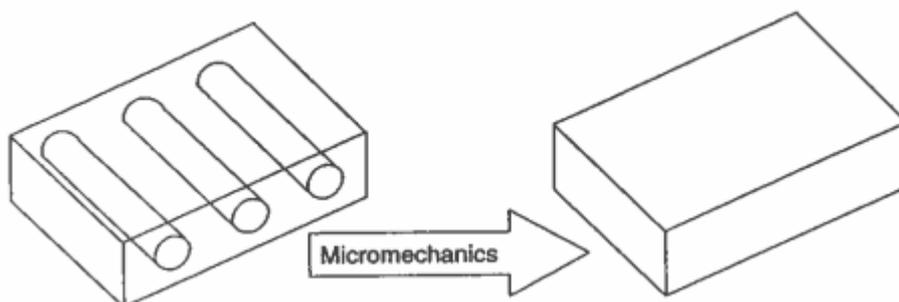
Obrázek 22 Vyhřívaný hydraulický lis [16]

4 MECHANIKA VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ

Při výrobě kovových materiálů lze jejich mechanické vlastnosti ovlivnit pouze přidáním legujících prvků, výrobou jejich slitin nebo tepelným zpracováním. Kompozitní materiály oproti tomu nabízí širokou škálu možností variace mechanických vlastností změnou objemových podílů dílčích prvků, či použitím různých typů výztuže. Jak již bylo uvedeno v přechozích kapitolách, vrstvené kompozity se mohou lišit také uspořádáním vláken ve vrstvách, ve kterých mohou být vlákna uspořádána nahodile nebo orientovaně. V této kapitole bude popsán případ, kdy jsou vlákna ve vrstvě orientována, toho lze docílit buď použitím jednosměrně orientovaných vláken, či tkaniny nebo rohože. Nicméně, tkanina i rohož jsou také tvořeny pramenci jednosměrných vláken. Tato skutečnost umožňuje pohlížet na takové výztuže rovněž jako na část jednosměrně vyztužené vrstvy. Dá se tedy říci, že jednosměrně vyztužený element tvoří základ výztuže z kontinuálních vláken. [17][18]

4.1 Mikromechanika vláknově vyztuženého materiálu

Mikromechanika pohlíží na kompozitní materiály v detailu a bere do úvahy interakci mezi maticí a výztuží. Použití mikromechanických výpočtů umožňuje reprezentovat heterogenní (různorodé) materiály jako homogenní (stejnorodé) materiály s anizotropními vlastnostmi na základě známých (naměřených) vlastností a objemových zlomků obou složek, které jsou samy osobě brány jako homogenní. Při výpočtech se pro zjednodušení předpokládá dokonale tuhý spoj na rozhraní mezi dílčími složkami. [17]



Obrázek 23 a) heterogenní materiál b) homogenní materiál s anizotropními vlastnostmi [17]

4.1.1 Objemové a hmotnostní zlomky

Vlastnosti kompozitu jsou kromě vlastností dílčích složek dány také objemovým zlomkem matrice a výztuže, objemový zlomek zlomek výztuže lze zapsat jako:

$$V_f = \frac{\text{objem výztuže}}{\text{celkový objem}} \quad (1)$$

Objemový zlomek matrice je definován jako:

$$V_m = \frac{\text{objem matrice}}{\text{celkový objem}} \quad (2)$$

Celkový objem je součtem objemů matrice a výztuže, takže:

$$V_f + V_m = 1 \quad (3)$$

Dále lze definovat celkovou hustotu kompozitu, která závisí na hustotě jednotlivých složek a jejich objemových zlomcích, obecně pro n složek zapsáno jako:

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (4)$$

Pomocí celkové hustoty kompozitu lze dále definovat jednotlivé hmotnostní zlomky dílčích složek: [17]

$$\begin{aligned} W_f &= \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \\ W_m &= \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \end{aligned} \quad (5)$$

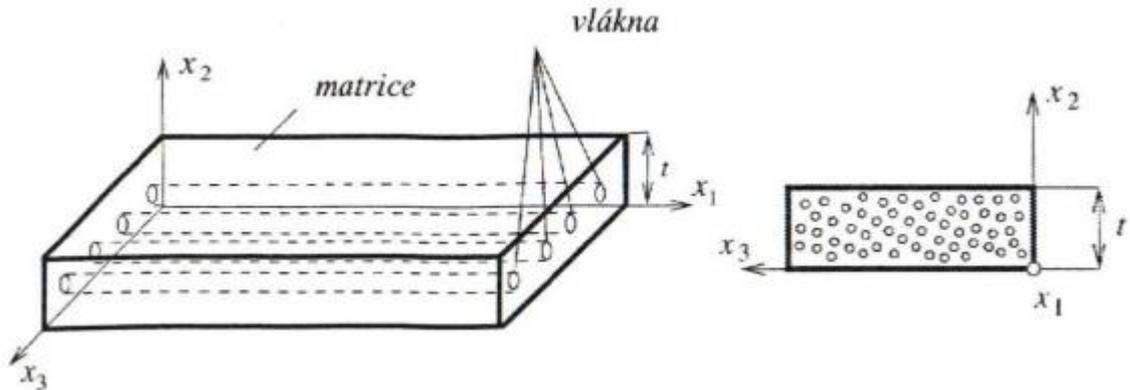
4.1.2 Reprezentativní objemový element

Při odvozování rovnic pro výpočet elastických konstant se pro zjednodušení, kdy se do úvahy nemusí brát každé jedno vlákno v materiálu používá tzv. RVE (Representative Volume Element), který představuje nejmenší možnou částici materiálu (element) s anizotropními vlastnostmi závislými na vlastnostech dílčích složek a jejich poměrech. [17]

4.2 Jednosměrně vyztužená vrstva

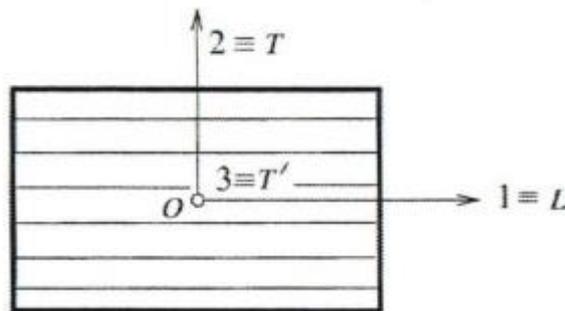
Tuhost jednosměrových kompozitů se vyjadřuje stejnými vztahy napětí – deformace, které jsou užívány u konvenčních materiálů (ocel), pouze počet nezávislých materiálových konstant je větší. Protože tloušťka jednosměrně vyztužené vrstvy (laminy) je mnohem

menší než její délka nebo šířka, je možno vztahy vyjadřující závislost mezi napětím a deformací uvést pro případ rovinné napjatosti. Na tento kompozit lze nahlížet jako na ortotropní nebo příčně izotropní materiál. [6]



Obrázek 24 Jednosměrový kompozit [6]

Velmi často se pro případ jednosměrně vyztužené vrstvy zavádí souřadnicový systém $O(L, T, T')$ kde L (longitudinal) je podélný směr, T (trasverse) příčný směr a T' je směr kolmý na rovinu laminy. [6]



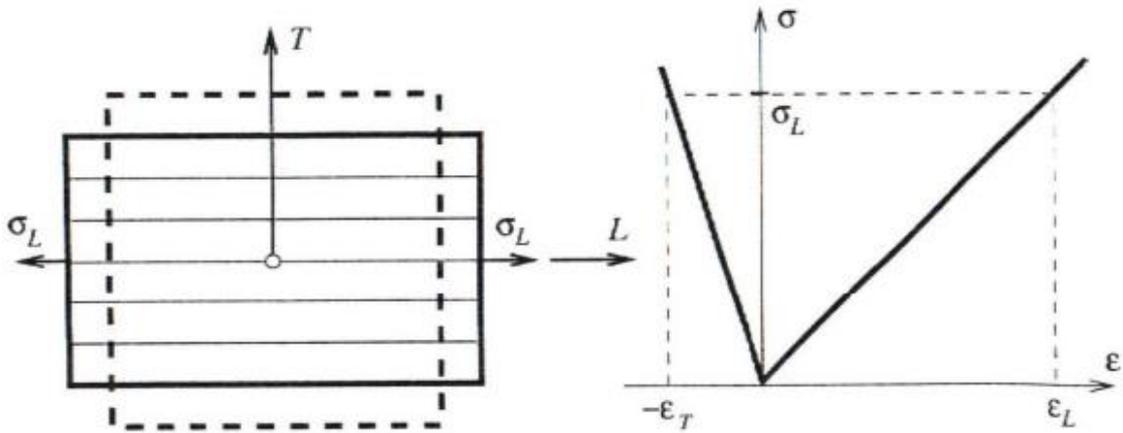
Obrázek 25 Souřadnicový systém jednosměrně vyztuženého kompozitu [6]

4.2.1 Vztahy mezi napětím a deformací

Vztahy mezi napětí a deformací budou odvozeny za předpokladu, že lamina je lineárně elastický materiál, tedy že napětí a deformace se mění lineárně až do okamžiku porušení a platí princip superpozice. [6]

Uvažujeme ortotropní laminu namáhanou napětím σ_L ve směru vláken. Deformace jsou

$$\varepsilon_L = \frac{1}{E_L} \sigma_L \quad \varepsilon_T = -\frac{\nu_{LT}}{E_L} \sigma_L = -\nu_{LT} \varepsilon_L. \quad (6)$$



Obrázek 26 Zatížení laminy ve směru vláken [6]

V případě laminy namáhané v příčném směru platí obdobné výrazy

$$\varepsilon_L = \frac{1}{E_T} \sigma_T \quad \varepsilon_T = -\frac{\nu_{TL}}{E_T} \sigma_L = -\nu_{TL} \varepsilon_T. \quad (7)$$

Při namáhání smykovým napětím

$$\varepsilon_{LT} = \frac{1}{G_{LT}} \sigma_{LT}. \quad (8)$$

Pro případ rovinné napjatosti lze použít princip superpozice a je možno psát

$$\varepsilon_L = \frac{1}{E_L} \sigma_L - \frac{\nu_{TL}}{E_T} \sigma_T, \quad \varepsilon_T = \frac{1}{E_T} \sigma_T - \frac{\nu_{LT}}{E_L} \sigma_L, \quad \varepsilon_{LT} = \frac{1}{G_{LT}} \sigma_{LT}. \quad (9)$$

Jelikož se jedná o případ rovinné napjatosti je složka deformace ve směru T'

$$\varepsilon_{T'} = -\frac{\nu_{LT'}}{E_L} \sigma_L - \frac{\nu_{TT'}}{E_T} \sigma_T. \quad (10)$$

Výše uvedené vztahy je také možno přepsat do maticového tvaru, rozeznáváme matici poddajnosti, která má pro ortotropní materiál tvar [6]

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Podle Hookeova zákona $\varepsilon = S \sigma$ lze matici poddajnosti zapsat jako

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{T'} \\ 0 \\ 0 \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{T'L}}{E_T'} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{T'T}}{E_T'} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT'}}{E_L} & -\frac{\nu_{T'T'}}{E_T} & \frac{1}{E_T'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TT'}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT'}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Vzhledem k tomu, že se jedná o případ rovinné napjatosti, ve které vektor napětí obsahuje pouze tři nenulové složky, je možno výraz (11) přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{a} \quad \varepsilon_{T'} = S_{31}\sigma_L + S_{32}\sigma_T.$$

Protože je matice poddajnosti je symetrická, platí $S_{12} = S_{21}$, $S_{23} = S_{32}$, $S_{13} = S_{31}$

A tudíž po dosazení z (12):

$$\frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}, \quad \frac{\nu_{LT'}}{E_L} = \frac{\nu_{T'L}}{E_T'}, \quad \frac{\nu_{TT'}}{E_T} = \frac{\nu_{T'T}}{E_T'} \quad (14)$$

Pro výpočet deformace jsou proto v případě rovinné napjatosti dostačující pouze čtyři nezávislé konstanty pružnosti ($E_L, E_T, \nu_{LT}, G_{LT}$).

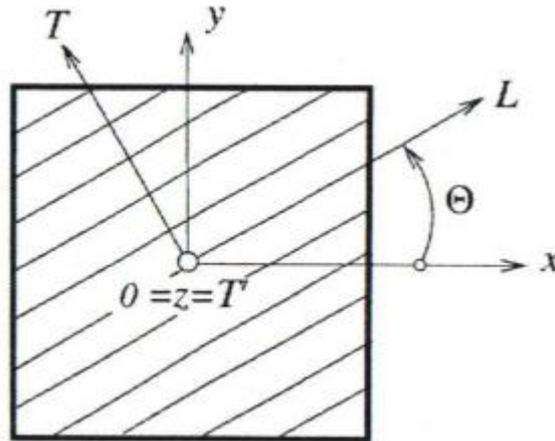
Hookeův zákon je možno rovněž vyjádřit ve vztahu $\sigma = C \varepsilon$, kde C je matice tuhosti a platí $\bar{C} = \bar{S}^{-1}$, pro případ rovinné napjatosti má Hookeův zákon tvar [6]

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix} \quad (15)$$

4.2.2 Přetvoření matice tuhosti v závislosti na pootočení směru zatížení

Protože se v praxi většinou jedná o vícevrstvé kompozity s různě vzájemně pootočenými vrstvami a každá vrstva přebírá pouze zatížení odpovídající její tuhosti ve směru zatížení, konstrukční díl má systém souřadnic, do jehož směru musí být promítnuty vlastnosti

jednosměrně vyztužené vrstvy s cílem umožnit výpočet podílu tuhosti této pootočené vrstvy na celém laminátu. [6]



Obrázek 27 Pootočený souřadný systém [6]

Příčemž pomocí tenzorového počtu lze odvodit vzorce pro tuhosti v pootočeném systému souřadnic. [14]

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= C_{110}m^4 + 2(C_{120} + 2C_{660})m^2n^2 + C_{220}n^4 \\
 C_{22} &= C_{110}n^4 + 2(C_{120} + 2C_{660})m^2n^2 + C_{220}m^4 \\
 C_{12} = C_{21} &= C_{120}(n^4 + m^4) + (C_{110} + C_{220} - 4C_{660})m^2n^2 \\
 C_{66} &= C_{660}(n^4 + m^4) + (C_{110} + C_{220} - 2C_{120} - 2C_{660})m^2n^2 \\
 C_{16} = C_{61} &= (C_{110} - C_{120} - 2C_{660})m^3n - (C_{220} - C_{120} - 2C_{660})mn^3 \\
 C_{26} = C_{62} &= (C_{110} - C_{120} - 2C_{660})mn^3 - (C_{220} - C_{120} - 2C_{660})m^3n
 \end{aligned} \tag{16}$$

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

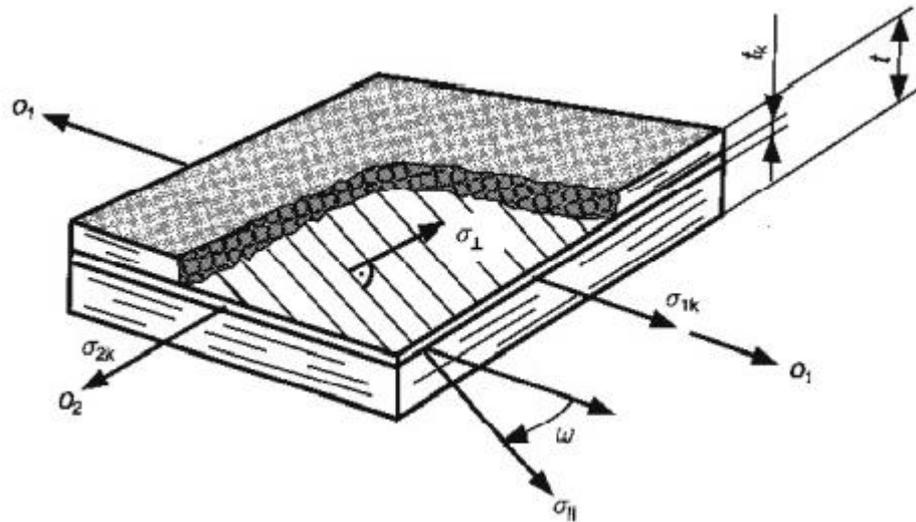
Tuhosti s indexem 0 jsou prvky matice jednosměrně vyztužené vrstvy v hlavním směru.

Jak lze vidět, prvky C_{16} a C_{26} jsou rovny nule pouze v případě, že $\Theta = 0^\circ$, nebo $\Theta = 90^\circ$, což odpovídá matici (15) [14]

4.3 Klasická laminátová teorie

Pomocí klasické laminátové teorie lze stanovit napětí $\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT}$ a příslušná přetvoření $\varepsilon_L, \varepsilon_T, \varepsilon_{LT}$ v každé jednotlivé vrstvě kompozitu. Pro laminátovou teorii 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
- závislost mezi napětím a deformací bude lineární
- vrstvy laminátu jsou symetrické vzhledem ke geometrické rovině souměrnosti [14]



Obrázek 28 Systém souřadnic a označení [14]

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

$$\varepsilon_{Lk} = \bar{\varepsilon}_L, \quad \varepsilon_{Tk} = \bar{\varepsilon}_T, \quad \varepsilon_{LTk} = \bar{\varepsilon}_{LT} \quad (17)$$

Kde hodnoty s pruhem označují přetvoření celého laminátu.

Napětí v každé jednotlivé vrstvě lze stanovit pomocí tuhosti C příslušné vrstvy ($k = 1$ až n) [14]

$$\begin{aligned} \sigma_{Lk} &= C_{11k} \bar{\varepsilon}_L + C_{12k} \bar{\varepsilon}_T + C_{16k} \bar{\varepsilon}_{LT} \\ \sigma_{Lk} &= C_{12k} \bar{\varepsilon}_L + C_{22k} \bar{\varepsilon}_T + C_{26k} \bar{\varepsilon}_{LT} \\ \sigma_{Lk} &= C_{16k} \bar{\varepsilon}_L + C_{16k} \bar{\varepsilon}_T + C_{66k} \bar{\varepsilon}_{LT} \end{aligned} \quad (18)$$

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

$$\begin{aligned}
 f_L &= \overline{\sigma}_L \cdot t = \sum_{k=1}^n \sigma_{Lk} t_k \\
 f_T &= \overline{\sigma}_T \cdot t = \sum_{k=1}^n \sigma_{Tk} t_k \\
 f_{LT} &= \overline{\sigma}_{LT} \cdot t = \sum_{k=1}^n \sigma_{LTk} t_k
 \end{aligned} \tag{19}$$

kde f_L, f_T, f_{LT} jsou síly na jednotku délky, t_k je tloušťka jednotlivé vrstvy a $\overline{\sigma}_L, \overline{\sigma}_T, \overline{\sigma}_{LT}$ představují střední napětí v kompozitu.

Dosažením vztahu 19 do vztahu 20 obdržíme Hookeův zákon vícevrstvého elementu: [14]

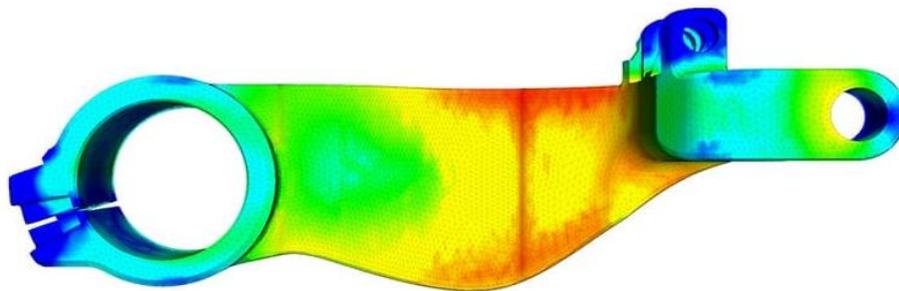
$$\begin{aligned}
 \overline{\sigma}_L &= \bar{\varepsilon}_L \sum_{k=1}^n C_{11k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_T \sum_{k=1}^n C_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_{LT} \sum_{k=1}^n C_{16k} \frac{t_k}{t} \\
 \overline{\sigma}_T &= \bar{\varepsilon}_L \sum_{k=1}^n C_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_T \sum_{k=1}^n C_{22k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_{LT} \sum_{k=1}^n C_{26k} \frac{t_k}{t} \\
 \overline{\sigma}_{LT} &= \bar{\varepsilon}_L \sum_{k=1}^n C_{16k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_T \sum_{k=1}^n C_{26k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_{LT} \sum_{k=1}^n C_{66k} \frac{t_k}{t}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Součinitelé u složek poměrné deformace představují tuhost celého laminátu, z toho plyne tzv. zákon spolupůsobení:

Hodnota každého prvku matice tuhosti vícevrstvého kompozitu je rovna součtu tuhostí jednotlivých vrstev. [14]

5 NUMERICKÁ ANALÝZA

Moderní technologický pokrok umožňuje vyrábět stále komplexnější a tvarově složitější součásti, ke správnému porozumění chování těchto součástí při provozních podmínkách byly ve 40. letech minulého století vyvinuty nové výpočetní metody mechanického chování, které znamenaly zvrát v postupu řešení mnoha fyzikálních problémů, kdy výpočty pomocí klasických matematických metod nahradila analýza pomocí počítačové simulace. V 50. letech se z těchto prvotních výpočetních metod vyvinula numerická analýza pomocí metody konečných prvků. Tato metoda se ve intenzivním výzkumem zdokonalené formě používá dodnes a představuje nejpoužívanější metodu k popisu chování fyzikálních systémů. (mechanika pevných látek a kapalin, termodynamika atd.). [20] [21]



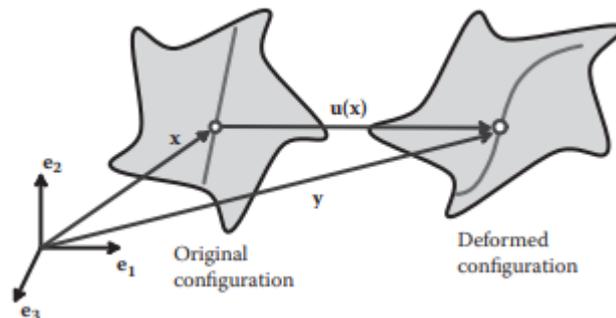
Obrázek 29 Součást podrobena numerické analýze [20]

5.1 Konečně prvková analýza

Konečně prvková analýza, zkráceně FEA z anglického Finite Element Analysis, je v dnešní době široce používána v mnoha průmyslových odvětvích pro kontrolu a optimalizaci navrhovaných zařízení či součástí před zahájením samotného výrobního procesu, odpadá tak často složité a finančně nákladné testování součástí v reálných podmínkách, což má mimo jiné za následek také značné zkrácení předvýrobního procesu.

V mechanice pevných těles existují dva základní typy konečně prvkové analýzy. Ve většině případů se jedná o analýzu, která popisuje chování pevných těles, jež jsou ve statické rovnováze, to znamená, že součet vnitřních a vnějších sil je roven nule. V tomto případě tedy FEM řeší rovnice silové rovnováhy a platí $\sum F = 0$, přetvoření tělesa při statické rovnováze není funkcí času. V některých případech, například při rázech, explozích či vibracích je však nutno zjistit dynamické chování tělesa. Pro dynamické problémy se prostřednictvím FEM analýzy řeší pohybové rovnice, platí $\sum F = ma$ a přetvoření tělesa je funkcí času.

Základní princip konečně prvkové analýzy spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, z důvodu určení konečného počtu neznámých, které je nutné k použití aproximačních (polynomických či interpolačních) funkcí, pomocí kterých lze vyjádřit pole proměnných. V mechanice pevných těles lze toto pole definovat jako pole posunutí $u(x)$, které popisuje pohyb každého bodu v tělese, používá přitom zákon minimální potenciální energie deformace soustavy. [19] [21] [22]



Obrázek 30 Vektor posunutí $u(x)$ charakterizující deformaci tělesa [19]

Známe-li pole posunutí, lze pomocí různých výpočetních metod zjistit také deformační pole, k určení deformačního pole v oblasti malých (lineárních) deformací je nejvýhodnější použít infinitesimální tenzor deformace, který je definován jako

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

Kde $u \otimes \nabla$ je gradient tenzoru posunutí, obsahující složky $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, koeficienty i,j charakterizují jeden z hlavních směrů souřadného systému, infinitesimální tenzor deformace lze tedy zapsat také jako

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

Vypsáno pro každou složku deformace:

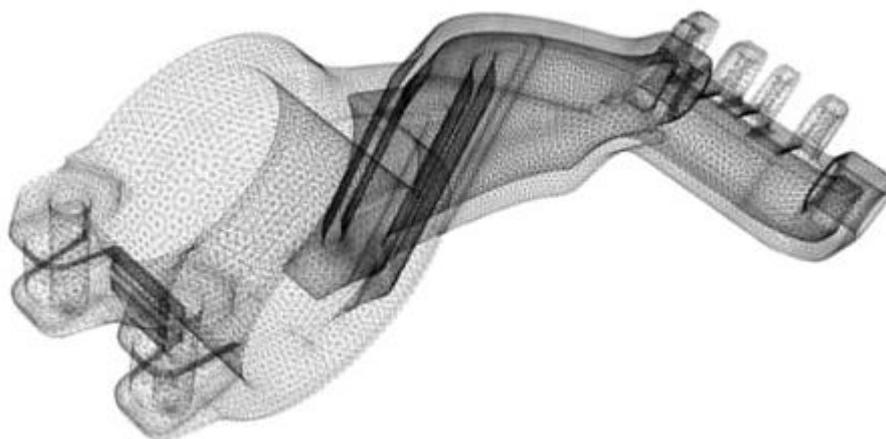
$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

Známe-li složky deformací v každém bodě, lze dále pomocí Hookova zákona $\varepsilon = S \sigma$ určit také napěťové pole. [19]

5.1.1 Konečně prvková síť

K rozdělení tělesa na konečný počet prvků je zapotřebí provést tvorbu konečně prvkové sítě, která aproximuje geometrickou oblast na body, mezi jejichž spojnicemi vzniknou elementy. Tvorbě konečně prvkové sítě je nutné věnovat dostatečnou pozornost, jelikož její parametry značně ovlivňují výsledky analýzy, například, jsou-li elementy sítě příliš velké v tvarově složitých místech, může to znamenat, že budou tato místa zanedbána či úplně ignorována a výsledky chování tělesa v těchto místech budou značně zkreslené. Síť můžeme v zásadě rozdělit do třech skupin:

- 1D síť – s výhodou se používá pro nosníky, vazníky nebo osově symetrické skořepiny, pro elementy této sítě je nutné zadat parametry průřezu.
- 2D síť – používá se pro plošné výrobky nebo rotačně symetrická trojrozměrná tělesa, u plošných součástí je nutné zadat tloušťku elementu, doporučuje se používat pro součásti, jejichž tloušťka je alespoň 20x menší než délka nebo šířka.
- 3D síť [19] [20]

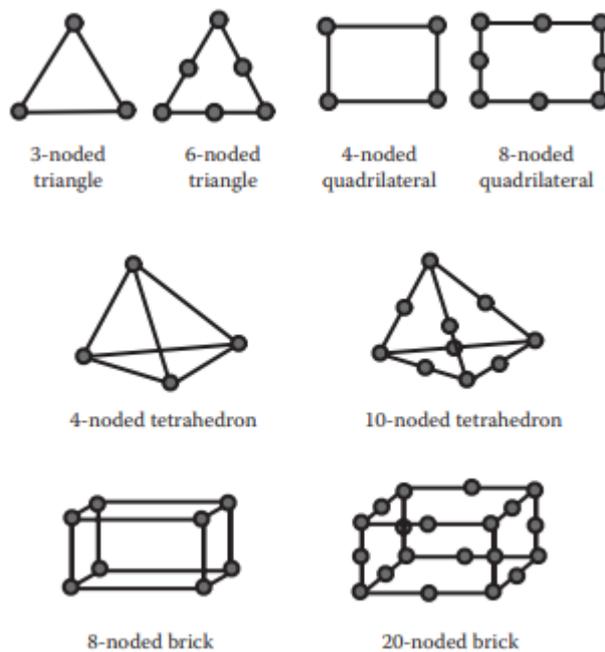


Obrázek 31 3D síť kyvného ramena motorčky [20]

5.1.1.1 Elementy sítě

Elementy rozdělují těleso do samostatných podoblastí, mají následující parametry:

- Číslo elementu – slouží k identifikaci elementu
- Geometrie – obvyklé elementy 2D sítě mohou být trojúhelníkového nebo obdélníkového tvaru, elementy 3D sítě mohou být ve tvaru čtyřstěnu nebo šestistěnu, kromě tvaru také záleží na počtu uzlů (uzly mohou pouze v každém rohu, nebo také uprostřed každé hrany)



Obrázek 32 Schéma základních elementů 2D a 3D sítě [19]

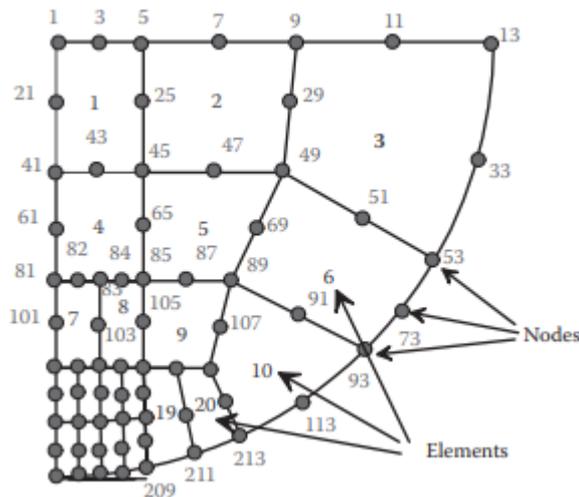
- Sada uzlů připojených k elementu – typické označení elementu sestává z čísla elementu a čísel uzlů připojených k elementu.
- Interpolace – účelem konečného prvku je interpolovat pole posunutí $u(x)$ mezi hodnotami určenými v uzlech, na typu interpolace závisí výpočet tohoto posunutí, může být lineární (např. čtyřuzlový čtyřstěn) nebo kvadratická (např. desetiuzlový čtyřstěn). [19]

5.1.1.2 Uzly sítě

Uzly sítě jsou množinou oddělených bodů v tělese, mají následující parametry:

- Číslo uzlu – slouží k identifikaci uzlu

- Souřadnice uzlu – každý uzel v 3D síti má 3 hodnoty souřadnic (x_1, x_2, x_3) . Ve dvojrozměrné síti jsou hodnoty souřadnic pouze dvě (x_1, x_2) .
- Posunutí uzlu – jakmile se síť vlivem vnějšího zatížení zdeformuje, každý uzel se přesune do nové pozice, pro 3D síť jsou tři hodnoty pole posunutí $u(x)$ pro každý uzel, (u_1, u_2, u_3) , pro 2D síť jsou hodnoty pole posunutí dvě (u_1, u_2) . Hodnoty posunutí uzlů jsou na začátku analýzy neznámé – jsou zjišťovány výpočtem pomocí vhodného programu.
- Další stupně volnosti uzlů – v případě speciálních analýz jsou uzlům přiřazovány další vlastnosti – například při zjišťování teplotního pole jsou na začátku analýzy uzlům přiřazeny počáteční teploty. [19]



Obrázek 33 Elementy a uzly v konečně prvkové síti [19]

5.1.2 Postup při tvorbě konečně prvkové analýzy

K úspěšnému analyzování reálných stavů při počítačových simulacích je v první řadě nutné stanovit si cíle, které rozhodují o volbě typu analýzy a požadovaných výsledcích. Dalším krokem je tvorba geometrie a její převedení do formátu FEM. V prostředí FEM modelu dochází k následujícím úkonům:

- Tvorba vhodné konečně prvkové sítě
- Definice materiálových vlastností
- Nastavení okrajových podmínek

Následně je FEM model podroben výpočtu, jehož výsledky se zobrazují v podobě hledaného chování (napětí, deformace atd.). Po dokončení analýzy následuje zhodnocení výsledků, jejichž správnost by se měla vždy zvážit podle zkušeností a očekávání výpočtáře. Jsou-li výsledky v pořádku, dochází k výrobě prototypu nebo případným úpravám.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit numerický model pro dva plošné výrobky, které byly navrženy a vyrobeny z prepregu s uhlíkovými vlákny a termosetickou matricí ve dvou variantách stavby laminátové struktury. Následnou analýzou výsledků napětí v nejvíce namáhané vrstvě prepregu a deformací se mělo rozhodnout, která z variant laminátové struktury je z hlediska mechanických vlastností pro tyto součásti vhodnější.

7 KONSTRUKCE KOMPOZITOVÉHO PROFILU

Pro zadané součásti byly navrženy dvě varianty skladby kompozitové struktury, kdy celková tloušťka kompozitu činila při obou variantách 1,6 mm. První varianta obsahovala 8 vrstev prepregu, přičemž každá vrstva byla tvořena prepregem s tloušťkou 0,2 mm. Druhá varianta obsahovala 4 vrstvy prepregu s krajními vrstvami prepregu o tloušťce 0,2 mm a vnitřními vrstvami prepregu s tloušťkou 0,6 mm. Jednotlivé vrstvy byly od sebe v obou případech natočeny pod úhlem 45°. Oba prepregy byly tvořeny uhlíkovými vlákny a termosetickou matricí. Materiálové složení obou typů prepregu je zobrazeno v tabulce č.2, mechanické vlastnosti jednotlivých dílčích materiálů, ze kterých se prepregy skládají zobrazuje tabulka č.3.

Tabulka 2 Materiálové složení jednotlivých prepregů

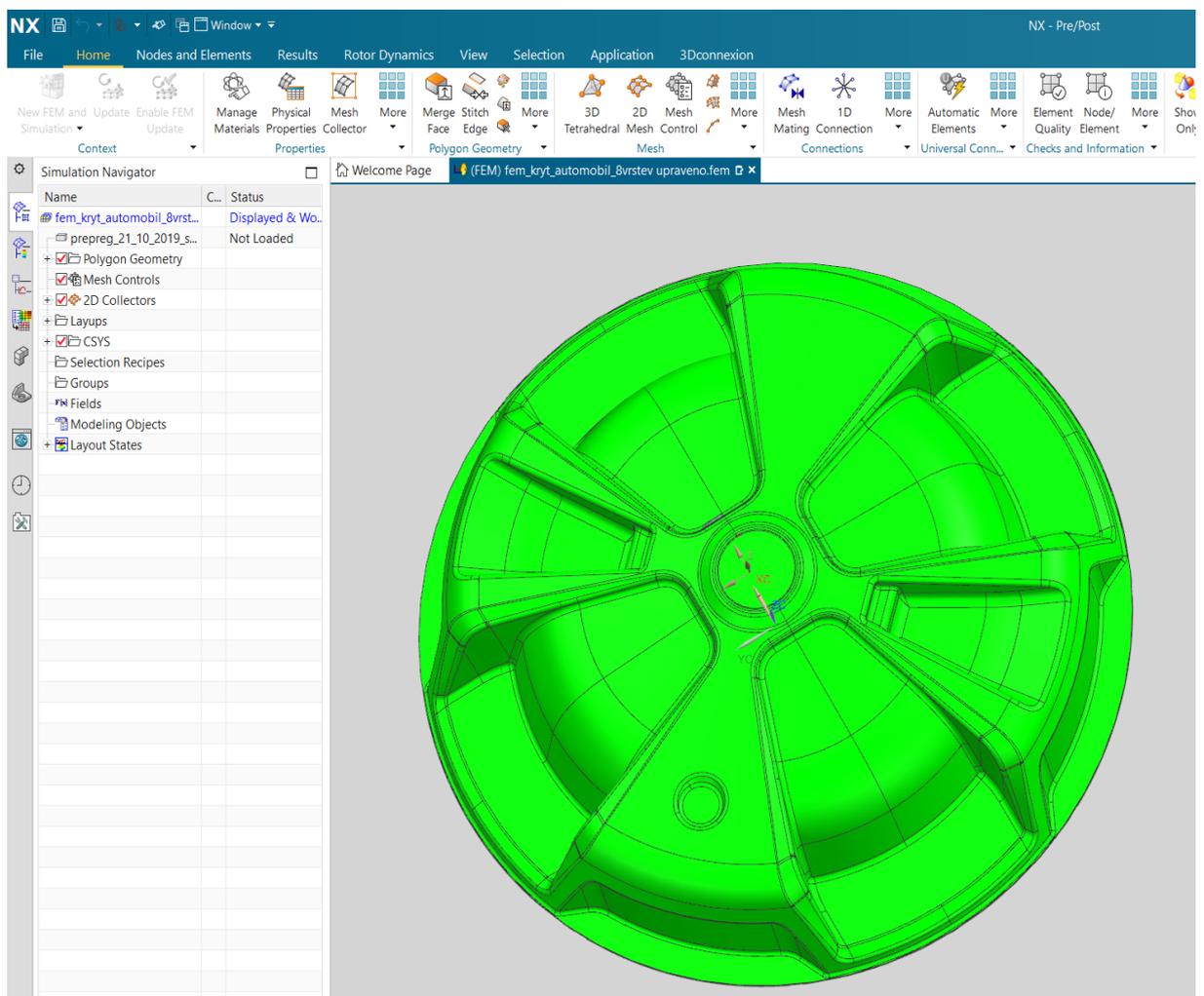
Prepreg GG-204 T IMPZ503Z 40 %	
výztuž	Uhlíkové vlákno GG-204 T
matrice	Epoxid IMP 503Z
tloušťka	0,2 mm
hmotnostní zlomek výztuže	0,6
PREPREG GG-630 T IMPZ503Z 37 %	
výztuž	uhlíkové vlákno HTS 45 E23-12K
matrice	Epoxid IMP 503Z
tloušťka	0,6 mm
hmotnostní zlomek výztuže	0,63

Tabulka 3 Vlastnosti vyztužujících vláken a matrice

	E (Gpa)	ν	ρ (g/cm³)	R_m (Mpa)
Uhlíkové vlákno HTS 45 E23-12K	240	0,2	1,76	4500
Uhlíkové vlákno GG-204 T	238	0,2	1,76	3675
Epoxid IMP 503Z	4,5	0,4	1,2	70

8 TVORBA FEM MODELU

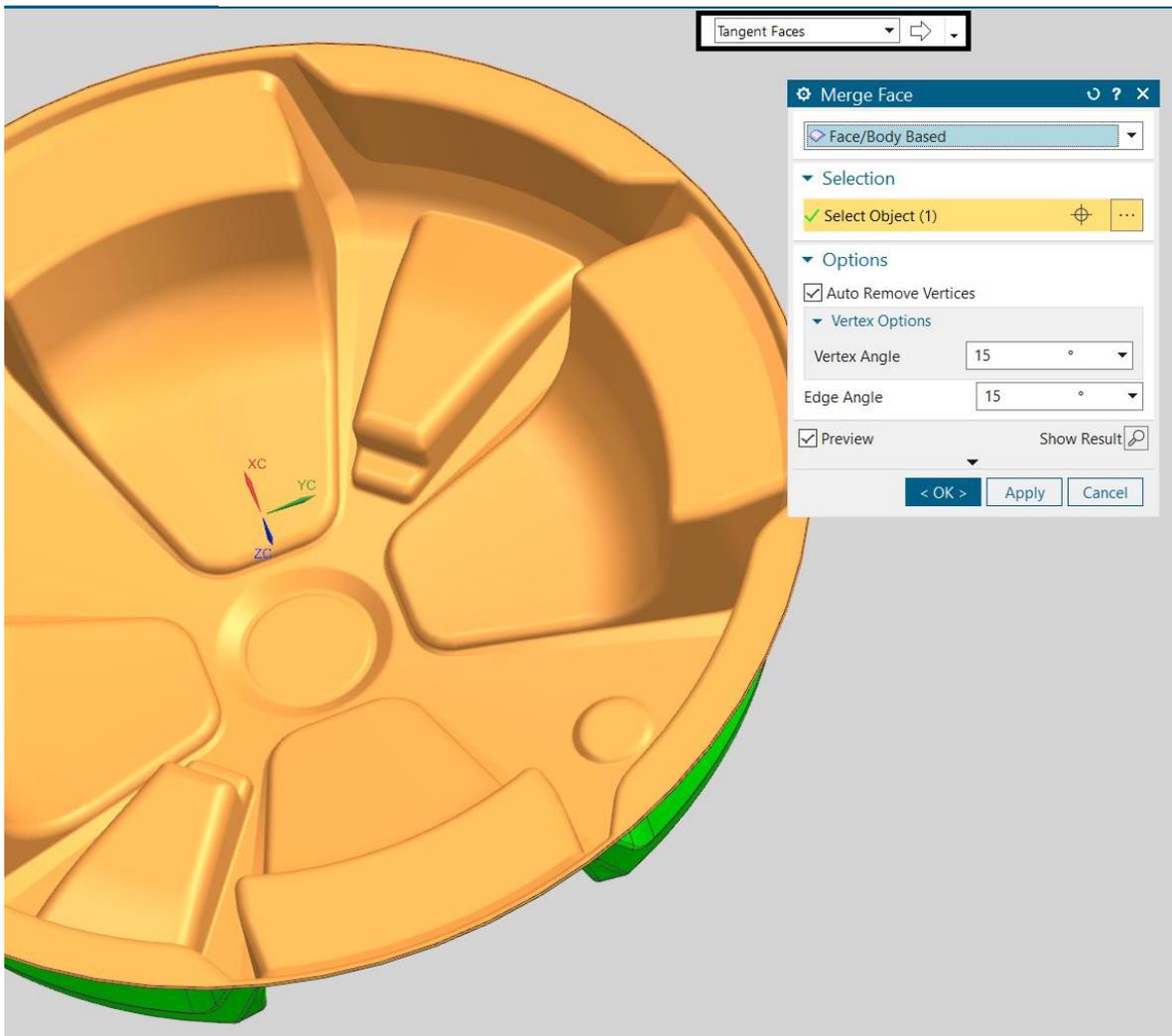
Na rozdíl od modelu v prostředí CAD, který dává uživateli programu informaci o tvaru a rozměru výrobku, v prostředí modeláře FEM dochází k tvorbě vhodné konečné prvkové sítě, která bude vzhledem ke geometrii výrobku tvořena skořepinovými elementy. Dalším důležitým krokem je správné nadefinování materiálových vlastností a v případě kompozitních materiálů také vhodné struktury a uložení jednotlivých vrstev. Posledním krokem pro úspěšné vytvoření FEM modelu je nadefinování okrajových podmínek a zatěžujících sil. Pomocí správně vytvořeného FEM modelu je možné přejít k simulaci napěťových stavů, deformací zatížených součástí a jiných specifik mechanického chování. Všechny operace byly provedeny v prostředí Siemens NX.



Obrázek 34 Prostředí FEM modeláře v programu Siemens NX

8.1 Úprava FEM modelu před tvorbou sítě

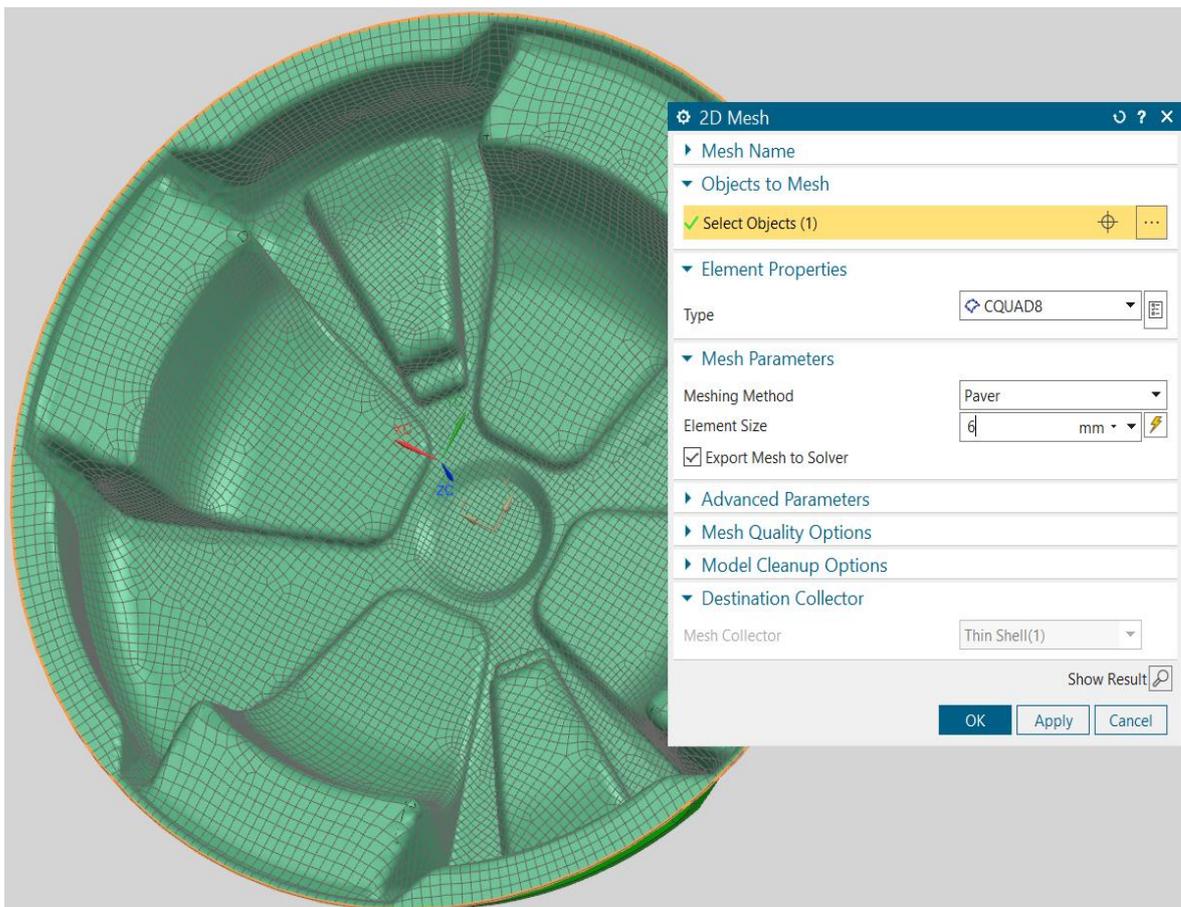
Po vytvoření FEM modelu je u modelů zadaných součástí nejdříve nutno kvůli velkému počtu ploch součástí spojit tyto plochy v jednu, aby se zabránilo případným vadám v síti nebo v následném uložení vrstev kompozitu. Práci při vybírání jednotlivých ploch výrazně usnadní výběr všech tangenciálně navazujících ploch.



Obrázek 35 Spojení ploch součástí

8.2 Tvorba sítě

Sít slouží k rozdělení tělesa na konečný počet prvků, důležitým faktorem při tvorbě sítě je typ elementů (geometrie, interpolace) a také jejich velikost, od které se odvíjí počet uzlů. Obecně platí že čím menší je velikost elementů, tím přesnějších výsledků analýzy lze dosáhnout. Vzhledem k typu analýzy a velikosti výrobku byl s ohledem na přesnost výsledků a doby trvání výpočtu zvolen skořepinový čtyřúhelníkový element typu CQUAD8 o velikosti 10 mm pro kryt kola kamionu a 6 mm pro kryt kola automobilu.



Obrázek 36 Tvorba 2D sítě

Sít byla vzhledem k malé tloušťce výrobku, kdy je rozdíl v geometrii na protilehlých plochách minimální, vytvořena na vnitřní ploše výrobku.

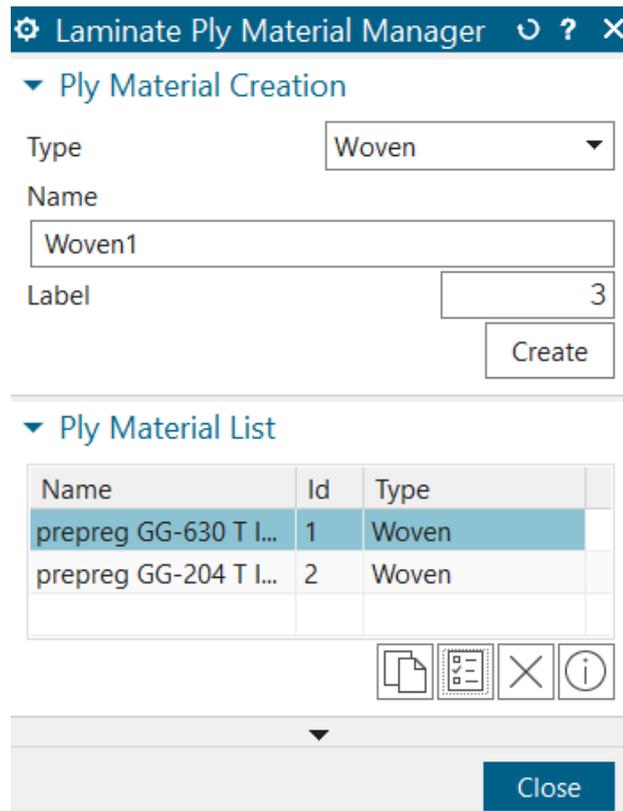
8.3 Definice materiálu

Základními stavebními prvky zvoleného materiálu – uhlíkového prepregu je výztuž a matrice, v první řadě je tedy nutné nadefinovat vlastnosti materiálů těchto složek. V prostředí programu siemens NX k tomuto úkonu slouží příkaz *Create Material* v záložce *Properties*. Ke zdárnému nadefinování mechanických vlastností materiálu matrice a výztuže je nutné znát Youngův modul pružnosti, Poissonovu konstantu a hustotu materiálu. Na obrázku 37 je zobrazen příklad definice materiálu výztuže prepregu GG-204 T IMPZ503Z 40 %.

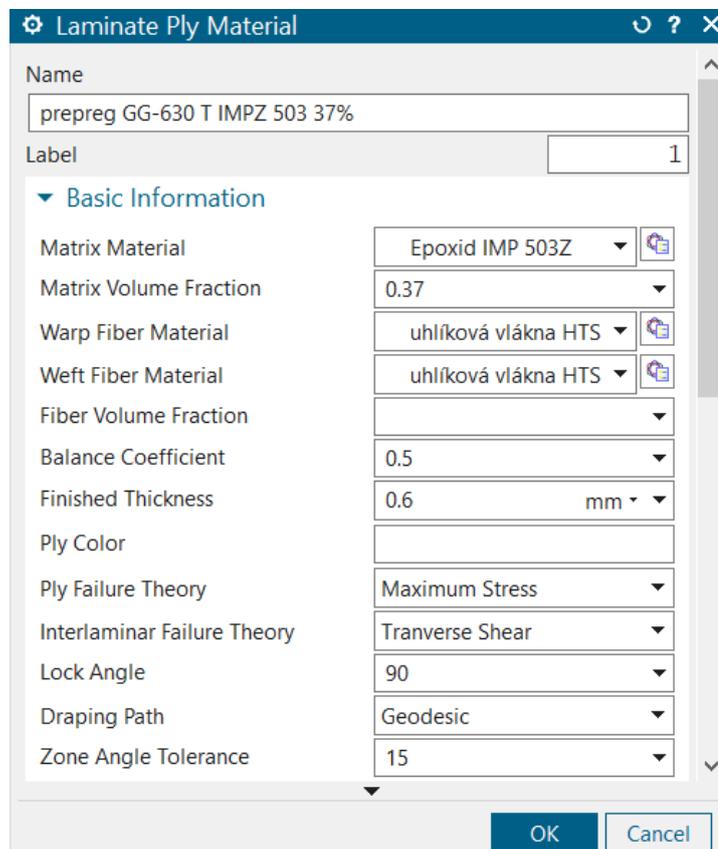
The screenshot shows the 'Isotropic Material' dialog box in Siemens NX. The 'Name - Description' section contains the name 'Uhlíkové vlákno GG-204 T IMPZ503Z 40 %' and a label '1'. The 'Properties' section shows 'Material Property Dependency' set to 'Constant' and 'Mass Density (RHO)' set to 1.44 g/cm³. The 'Elastic Constants' section is expanded, showing 'Young's Modulus (E)' set to 238000 MPa, 'Major Poisson's Ratio' set to 0.2, and 'Poisson's Ratio (NU)' set to 0.2. There are also fields for 'Shear Modulus (G)' and 'Structural Damping Coefficient (GE)'. The 'Card Name' is 'MAT1'. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Obrázek 37 Nastavení vlastností uhlíkových vláken

Další postup v definování kompozitního materiálu spočívá ve „spojení“ matrice a výztuže do jednoho celku. K tomu v prostředí siemens NX 12 slouží funkce *Laminate Ply Material Manager*, kterou je možno najít v záložce *Laminates*. V oknu této funkce se nejdříve zvolí kompozice vláken výztuže, kterým je v našem případě *Woven* – tkanina. Dále se v tabulce nadefinují parametry prepregu – materiál matrice, kterým je již předem nadefinovaný izotropní materiál Epoxid IMP 503Z, objemový podíl matrice, materiál útku a osnovy – příslušná uhlíková vlákna, úhel mezi útkem a osnovou a v neposlední řadě také samotná tloušťka prepregu.



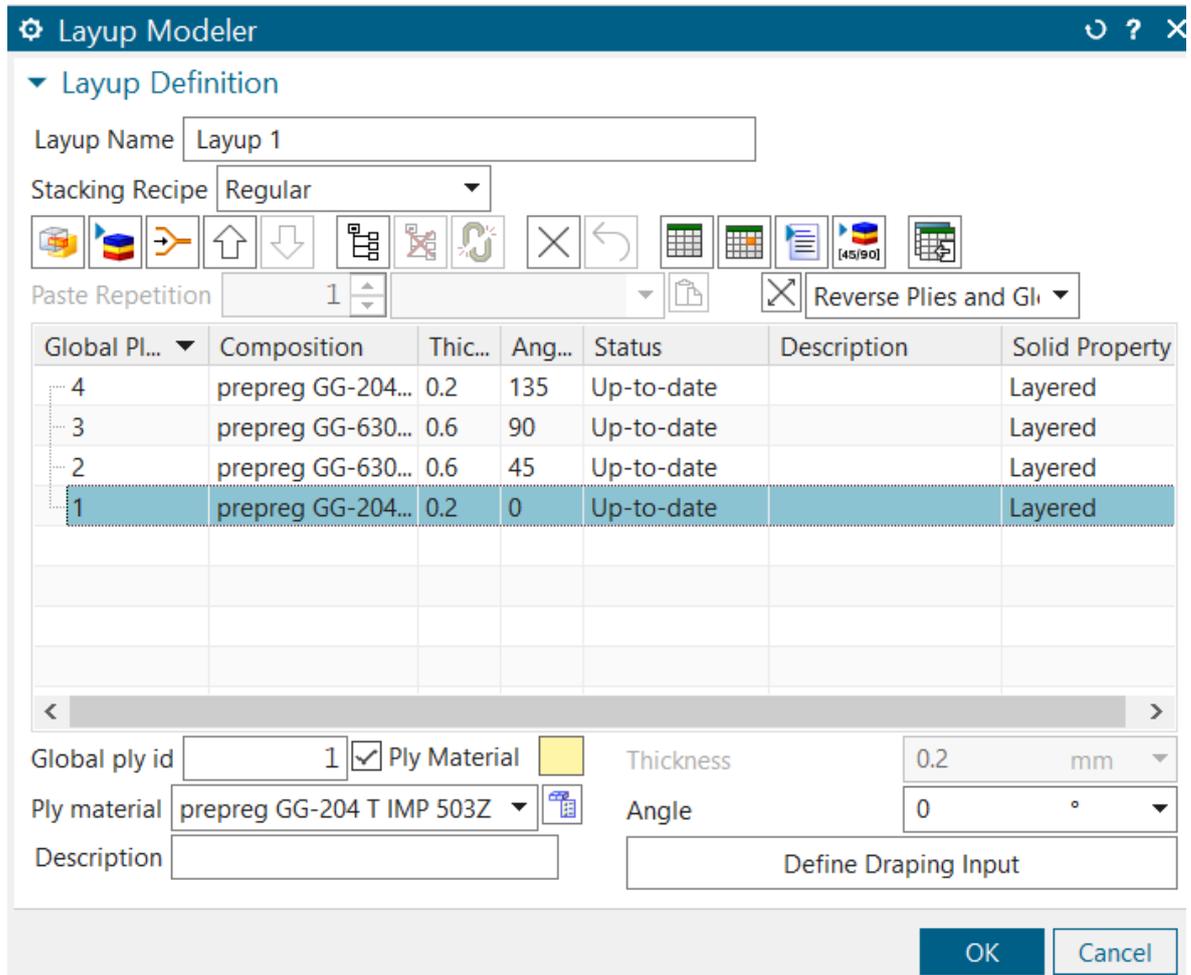
Obrázek 38 Inventář vytvořených laminátů



Obrázek 39 Tvorba prepregu GG-630 T IMPZ 503 37%

8.4 Tvorba skladby kompozitu

Po vytvoření materiálu jednotlivých prepregů je dalším krokem pro úspěšné vytvoření FEM modelu z kompozitu tvorba skladby kompozitové struktury s využitím funkce *Global Layup*. Nejdříve se pomocí příkazu *Create New Ply* vytvoří požadovaný počet vrstev, následně se jednotlivým vrstvám přiřadí příslušný materiál a nadefinuje se úhel, pod kterým budou vrstvy do plochy výrobku vzhledem k orientaci vláken kladeny.



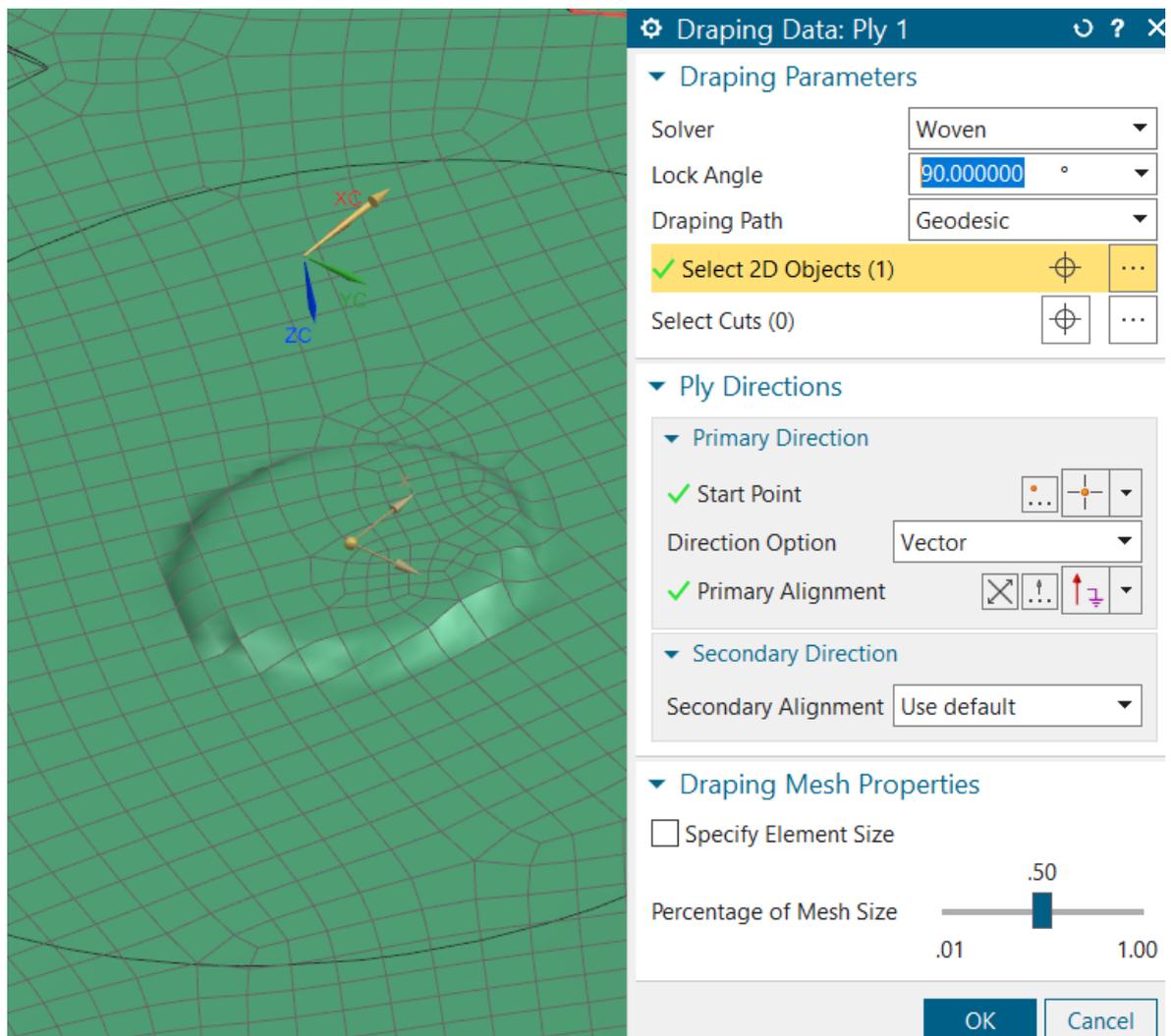
Obrázek 40 Tvorba kompozitového profilu

Na obrázku 40 je demonstrována tvorba kompozitového profilu se čtyřmi vrstvami, podobným způsobem byl vytvořen také profil s osmi vrstvami.

8.4.1 Definice uložení vrstev

Dalším krokem je nadefinování počátečního bodu a základního úhlu kladených vrstev v ploše modelu pomocí příkazu *Define Draping Input*. Po otevření příkazu se nejdříve nadefinuje počáteční bod kladení vrstev, v tomto případě je vhodné zadat bod, který

odpovídá počátečnímu bodu kladení při výrobě reálných součástí, který je v obou případech umístěn přesně ve středu součásti. Dále se definuje vektor pro určení směru kladení první vrstvy s kladečím úhlem 0° . Po úspěšném nadefinování těchto parametrů spustíme příkaz *update* a začne výpočet kladené vrstvy, po kterém se v ploše FEM modelu zobrazí orientace vláken a struktura vrstev prepregu.

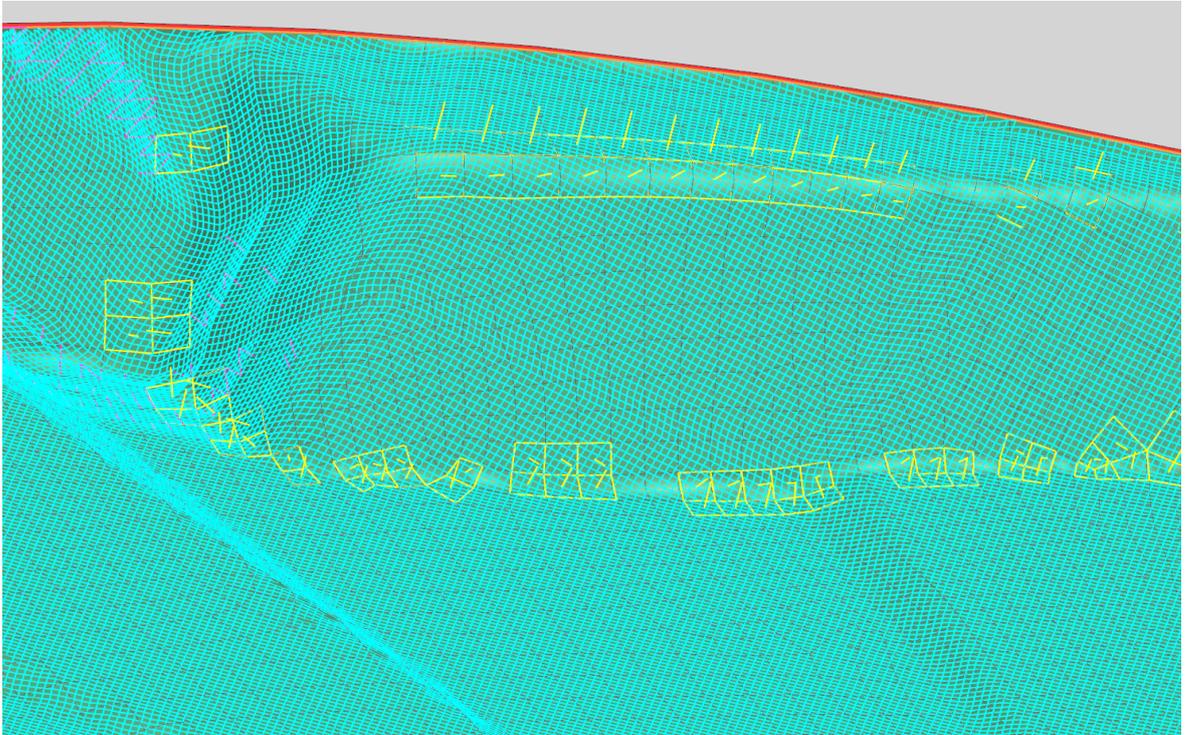


Obrázek 41 Definování počátečního bodu a směru kladení vrstev

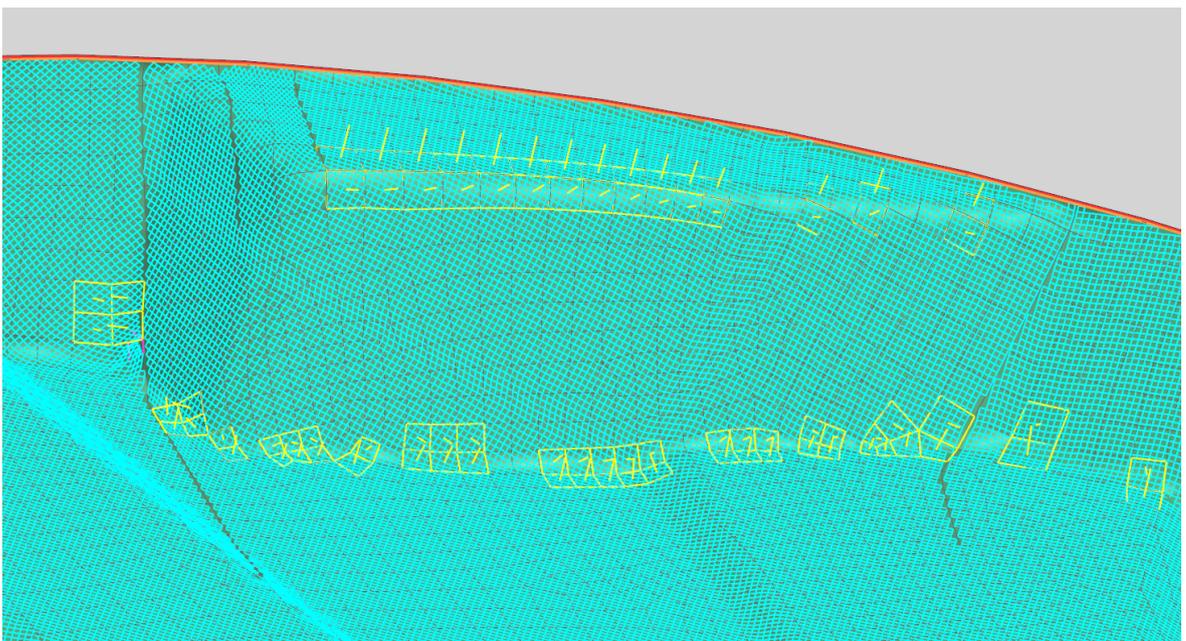
8.4.2 Problematická místa kladených vrstev

V případě kladení vrstev do prostoru modelu se jistou překážkou stávají složité tvarové prvky, v jejichž záhybech se může kladená vrstva krčit, překrývat nebo dokonce trhat, je proto vhodné pro jednotlivé vrstvy prepregu před začátkem kladení v problematických místech navrhnout stříhy. Místa, kde dochází ke krčení a trhání jsou po uložení vrstev v prostoru výrobku zobrazeny růžovou barvou. Pro odstranění těchto míst je tedy zapotřebí provést stříhy tkaniny. K zadání stříhů v prostředí NX slouží příkaz *Select Cuts* v okně

Draping Data. Na obr. 42 je zobrazeno uložení nenastříhané vrstvy v části modelu krytu kola kamionu, v levé části obrázku si lze všimnout míst, kde se tkanina krčí a trhá. Na obr.43 je zobrazeno uložení této vrstvy ve stejném místě, jen s rozdílem, že na ní byly provedeny řezy, které tyto vady odstranily.

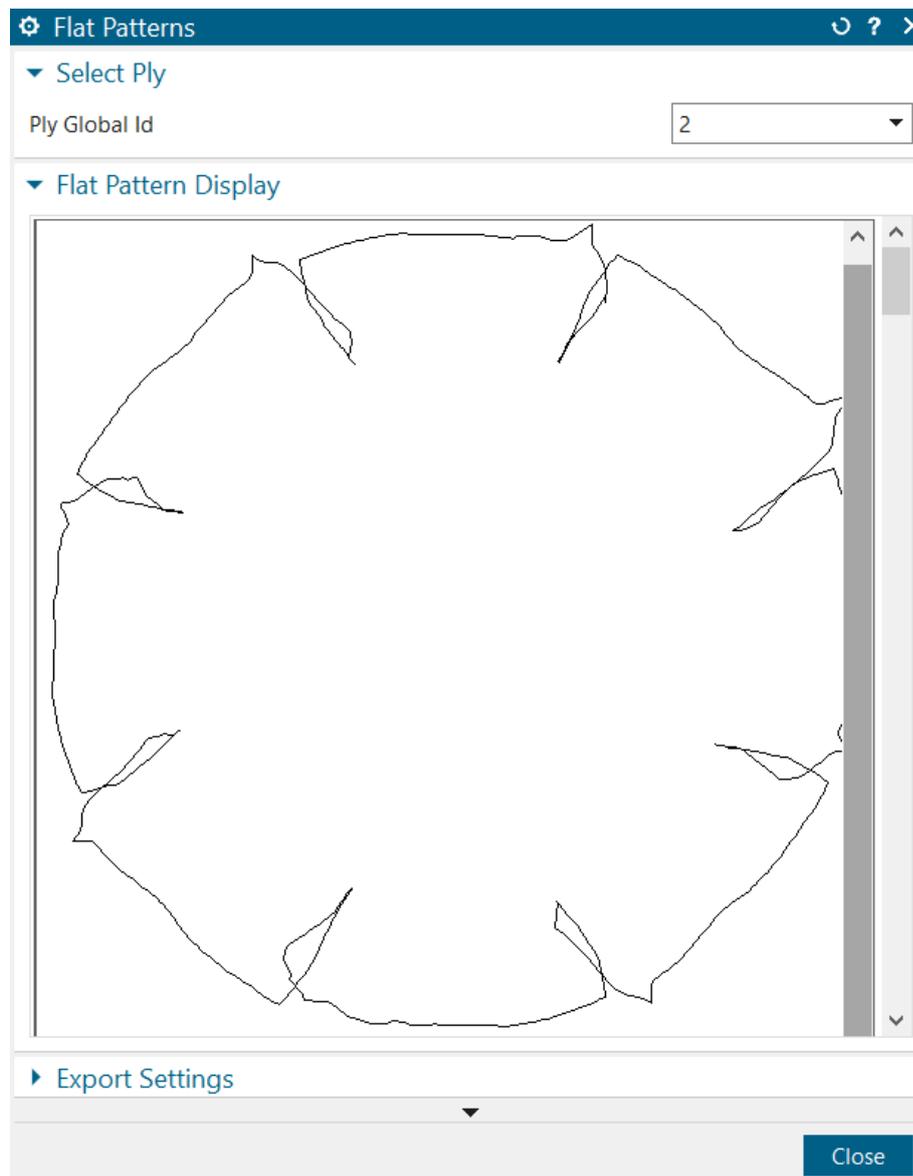


Obrázek 42 Uložení nenastříhané tkaniny



Obrázek 43 Uložení nastříhané tkaniny

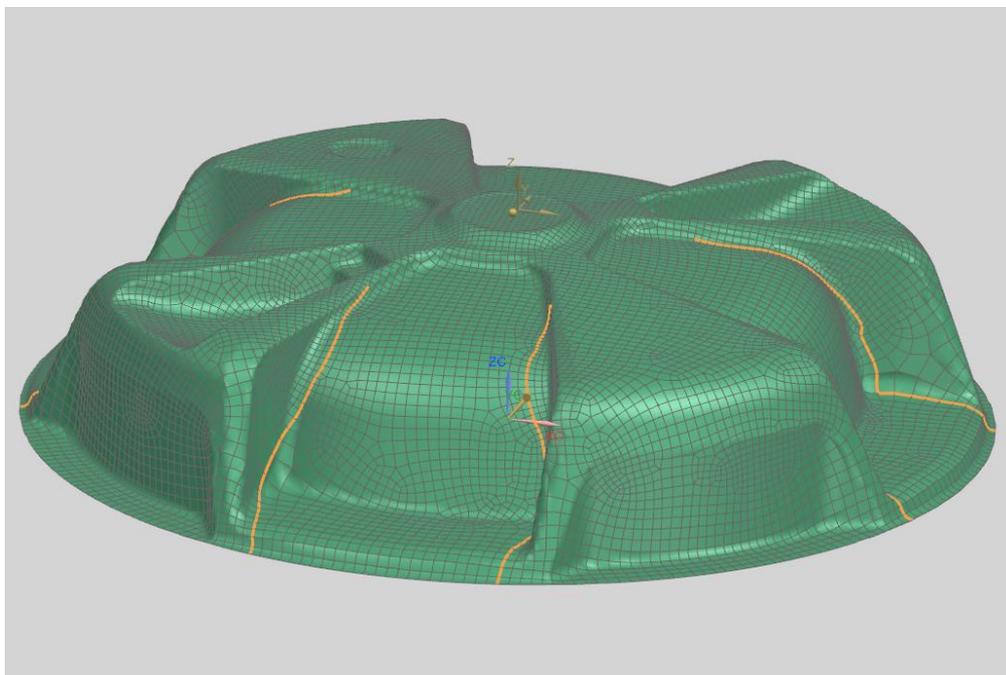
Tento úkon je důležitý hlavně z technologického hlediska, protože s jeho pomocí je možné nadefinovat stříhy tkaniny pro reálnou součást a zamezit tak trhání tkaniny při ukládání do prostoru formy. Po nadefinování všech stříhů lze navíc zobrazit nástřihový vzor vrstvy, která se bude do formy nanášet, včetně stříhů na této vrstvě. Ten je možný dále upravit a zakótovat.



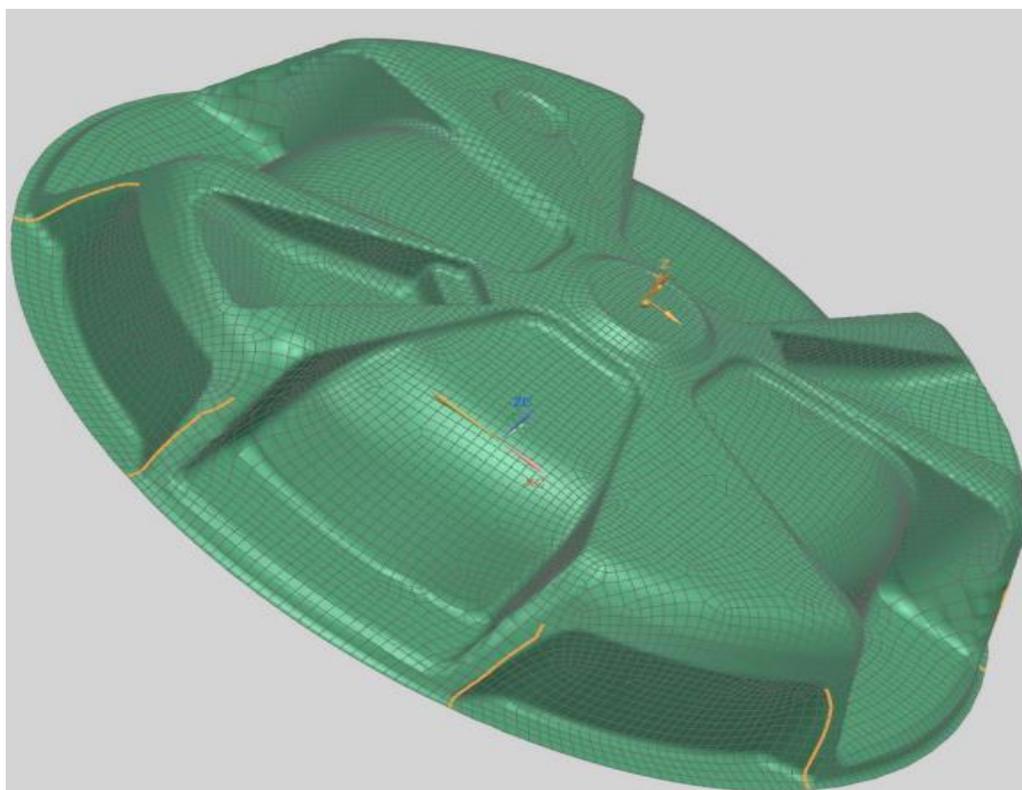
Obrázek 44 Náhled nástřihového vzoru vrstvy krytu kola kamionu

Z hlediska FEM analýzy je však správná definice stříhů také důležitá, jelikož stříhy tkaniny mohou ovlivnit konečné rozložení napětí v jednotlivých vrstvách. Z toho důvodu byla snaha nadefinovat stříhy ve vrstvách tak, aby co nejvíce usnadnily kladení vrstev do plochy výrobku, ale také aby se zredukovaly napěťové špičky, které ve vrstvách vlivem vnějšího

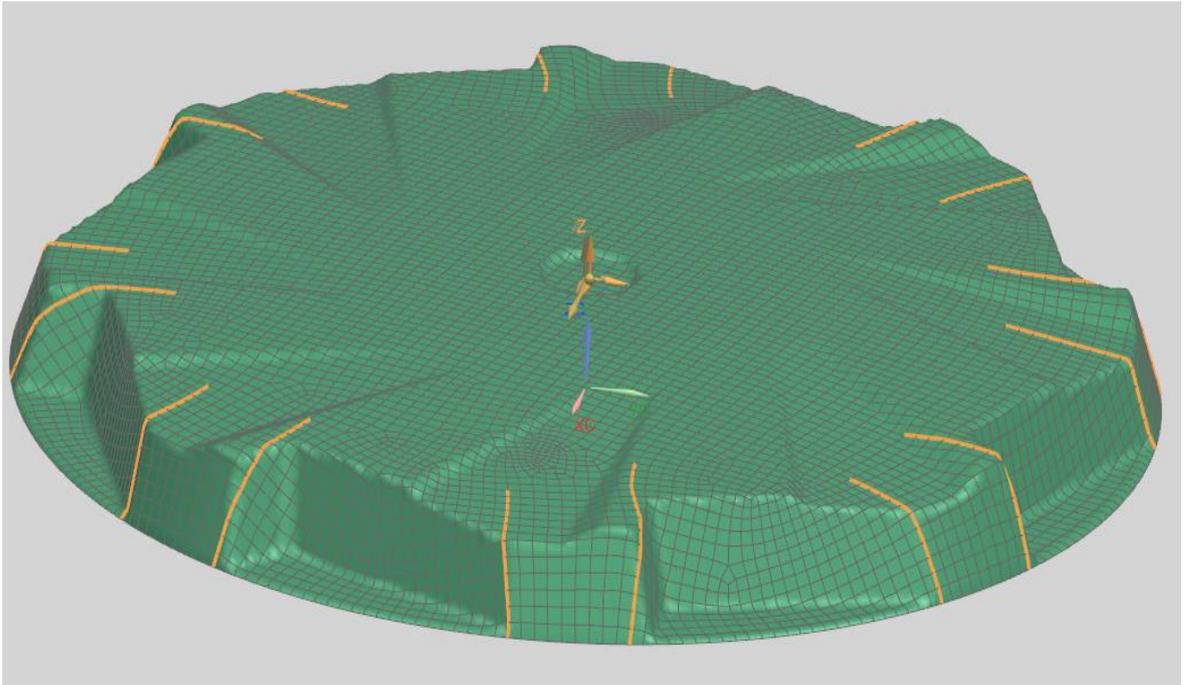
zatížení vznikaly. Byly vytvořeny dvě varianty stříhů, přičemž každá varianta odpovídala různým úhlům natočení vrstev. Stříhy tkaniny jednotlivých vrstev u obou součástí jsou zobrazeny na obrázku 45 až 48.



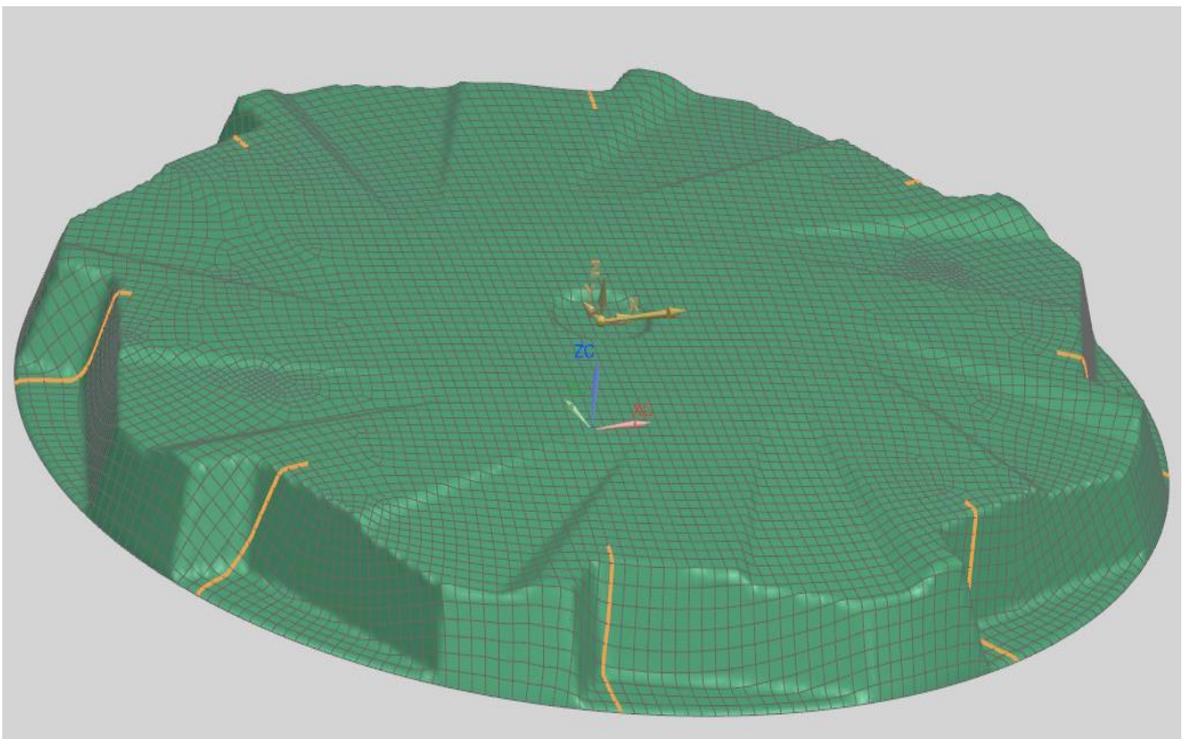
Obrázek 45 Stříhy vrstvy s úhlem kladení 0° a 90° v ploše krytu kola automobilu



Obrázek 46 Stříhy vrstvy s úhlem kladení 45° a 135° v ploše krytu kola automobilu

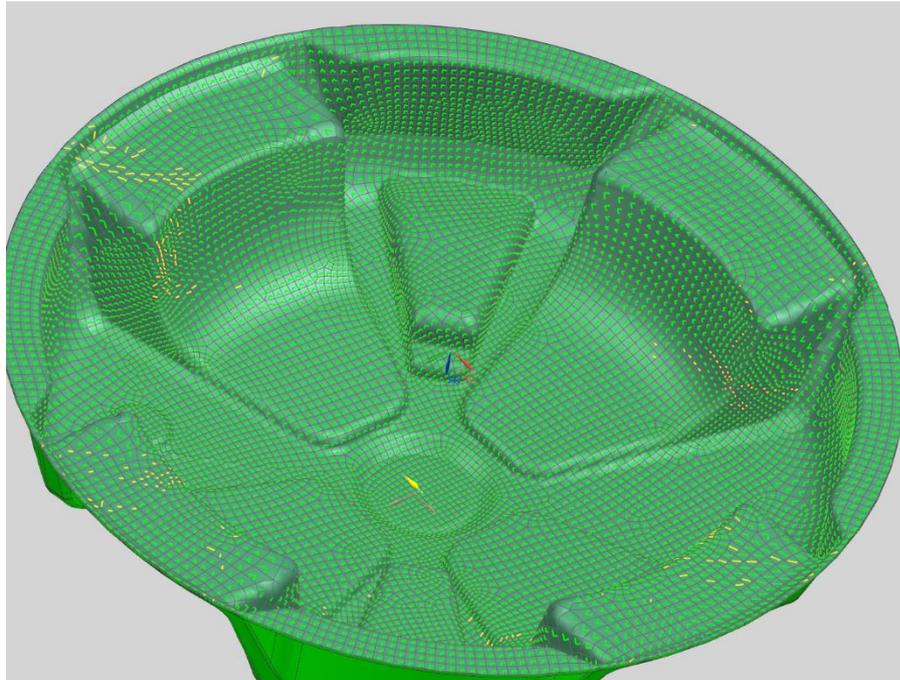


Obrázek 47 Stříhy vrstvy s úhlem kladení 0° a 90° v ploše krytu kola kamionu



Obrázek 48 Stříhy vrstvy s úhlem kladení 45° a 135° v ploše krytu kola kamionu

Po nadefinování všeho potřebného je možná kontrola uložení každé vrstvy pomocí příkazu *Wiew Fiber Orientations* – je-li vrstva uložena správně a deformace tkaniny nepřesahuje kritický úhel, jsou elementy vybarveny zeleně.



Obrázek 49 Zobrazení orientace vláken v prostoru modelu

Dále je možná kontrola pomocí příkazu *Wiew Laminate*, který provede grafické zobrazení všech vrstev a určí úhel vláken osnovy jednotlivých vrstev kladením zdeformované tkaniny vzhledem k zadanému počátečnímu bodu a vektoru v místě vybraného elementu.

ID	Material	Thickness	Primary Angle	Yam Angle
8	Prepeg 2	0.200	35.2	-
7	Prepeg 2	0.200	-88.6	-
6	Prepeg 2	0.200	-44.6	-
5	Prepeg 2	0.200	-0.2	-
4	Prepeg 2	0.200	35.2	-
3	Prepeg 2	0.200	-88.6	-
2	Prepeg 2	0.200	-44.6	-
1	Prepeg 2	0.200	-0.3	-

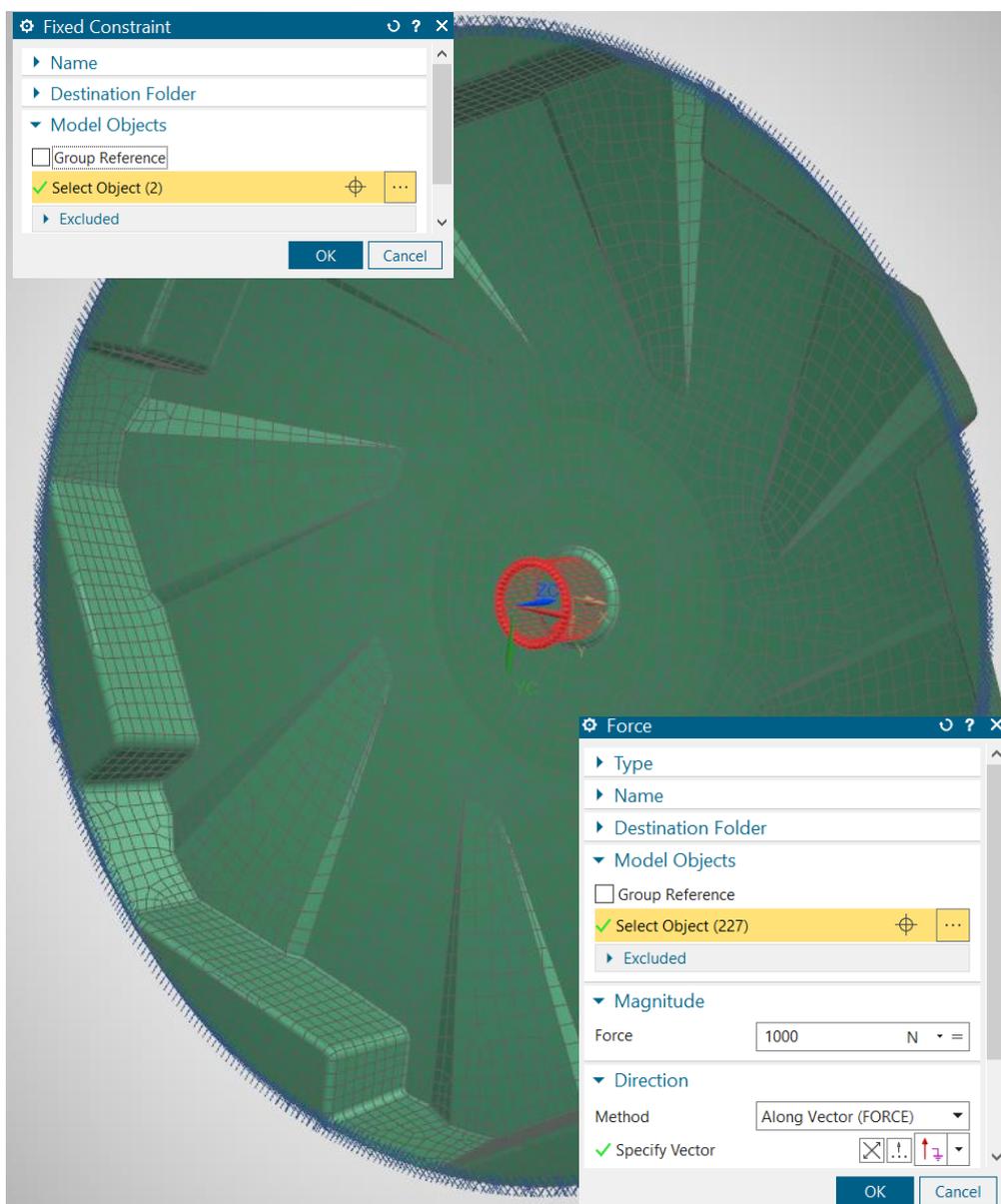
Obrázek 50 Schéma osmivrstvé kompozitové skladby

ID	Material	Thickness	Primary Angle	Yam Angle
8	PREPEG 2	0.200	0.0	-
7	PREPEG GG-630 T IMP503Z ...	0.600	44.7	-
6	PREPEG GG-630 T IMP503Z ...	0.600	88.8	-
5	PREPEG 2	0.200	-45.3	-

Obrázek 51 Schéma čtyřvrstvé kompozitové skladby

8.5 Nastavení okrajových podmínek

Po vytvoření materiálu přechází práce na FEM modelu do fáze nastavení okrajových podmínek, tedy nastavení uchycení tělesa a velikosti, směru a místa zatížení. Tyto faktory byly nastaveny tak, aby odpovídaly situaci při zátěžovém testu reálné součásti. Pro všechny modely součástí tedy byla nadefinována zatěžující síla o velikosti 1000 N působící kolmo na plochu součásti v jejím středu. Součásti byly při testu uchyceny za vnější hranu po celém obvodu, toho v prostředí siemens NX dosáhneme příkazem *Fixed Constraint*, který odebrá všechny stupně volnosti.



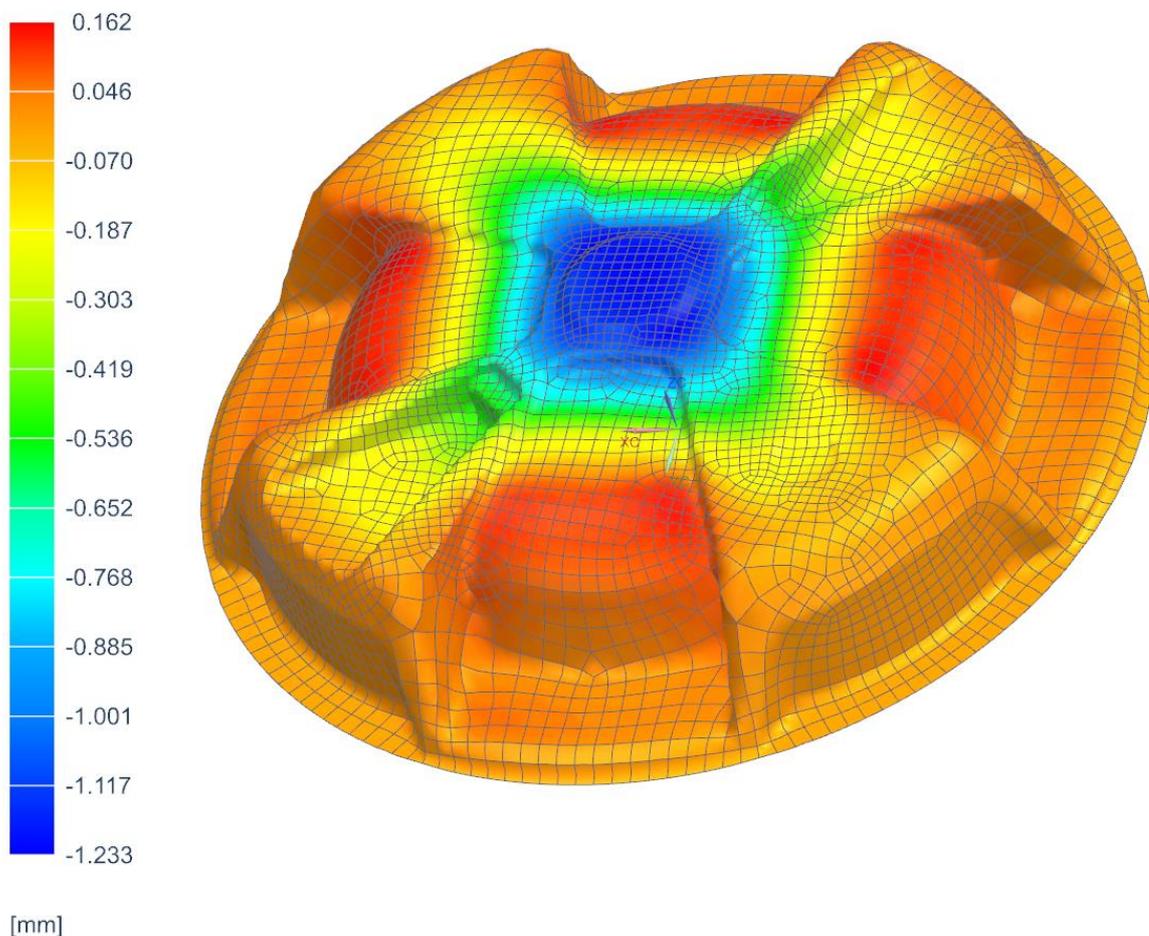
Obrázek 52 Nastavení okrajových podmínek

9 VÝSLEDKY A DISKUZE

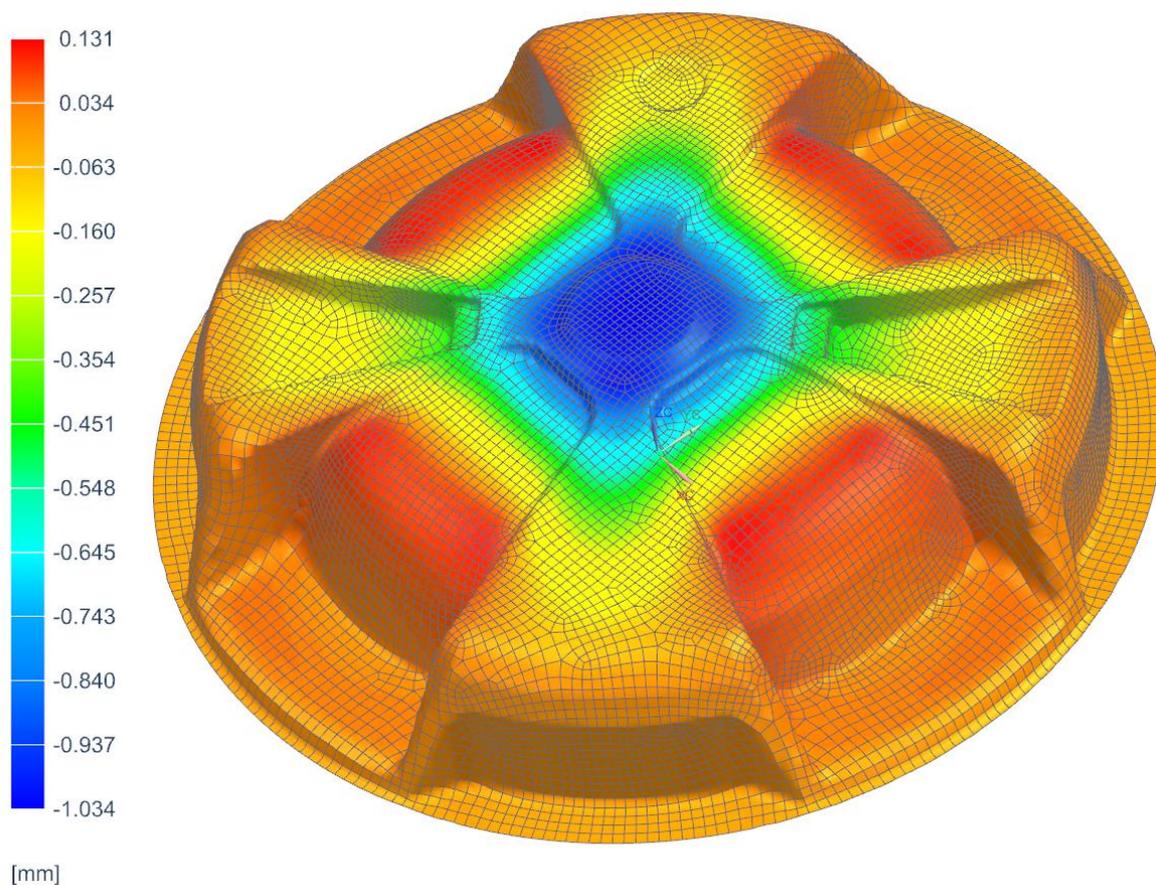
Po nastavení všech FEM modelů byla v prostředí *Simulation* vykonána analýza. Výpočet byl realizován pomocí řešiče NX Nastran. Cílem analýzy výsledků bylo určení největšího napětí v tahu a tlaku ve vláknech nejnamáhanější vrstvy kompozitu a určení deformace ve směru zatěžující síly. Následně byly získané hodnoty výsledků napětí a deformace u obou struktur jednotlivých součástí porovnány a zvolila se vhodná skladba kompozitové struktury.

9.1 Výsledky deformace

Při analýze bylo zjišťováno posunutí ve směru zatěžující síly o velikosti 1000 N. Po realizaci výpočtu lze deformaci v ose působící síly, tedy v ose Z zobrazit v záložce *postprocessing navigator – structural – strain – Z*. Na obrázku 53 a 54 je zobrazeno grafické zobrazení výsledků posunutí v ose Z u modelů krytů na kolo automobilu.



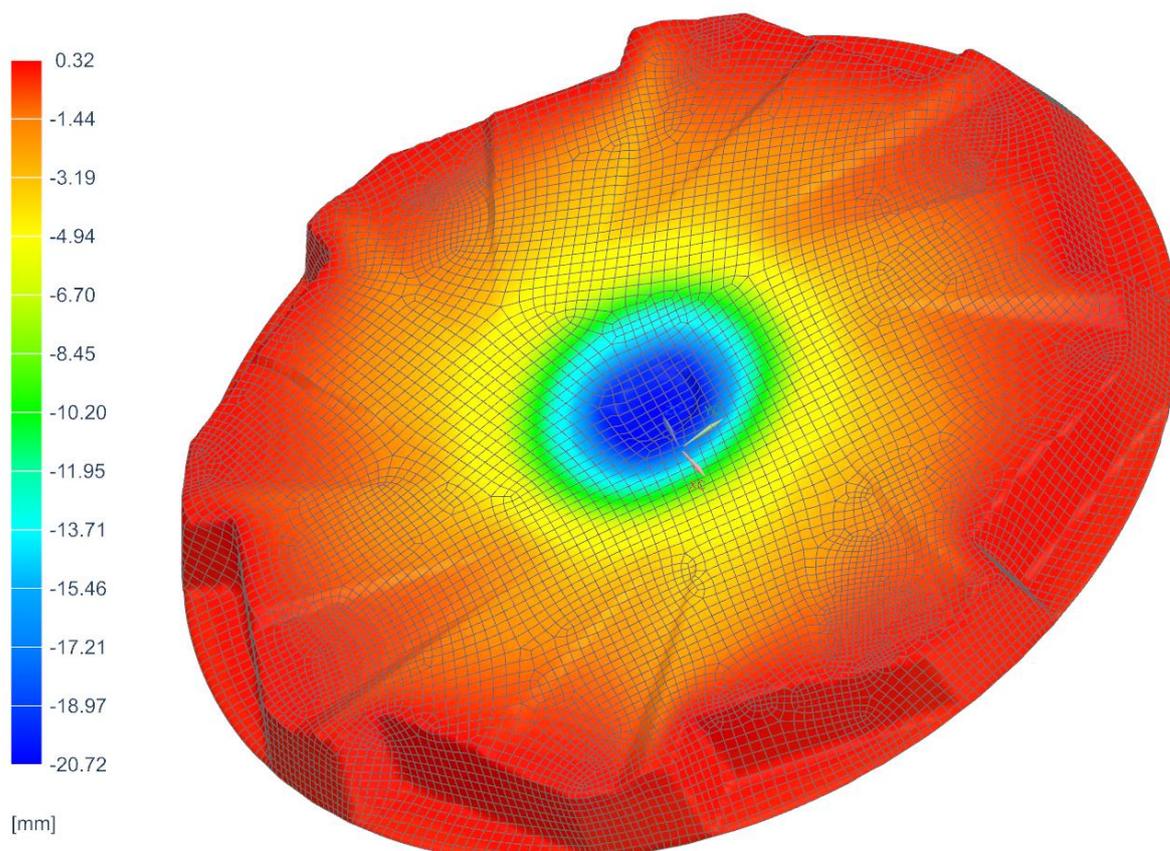
Obrázek 53 Výsledky posunutí v ose Z krytu kola automobilu s osmivrstevným profilem



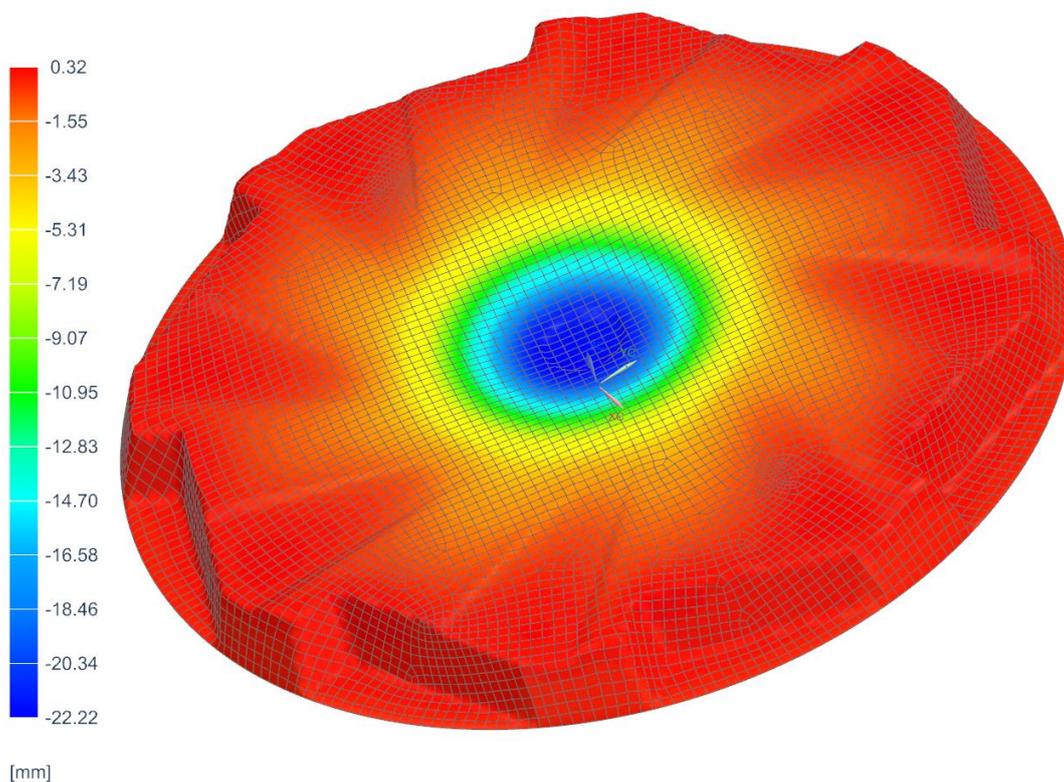
Obrázek 54 Výsledky posunutí v ose Z krytu kola automobilu se čtyřvrstevným profilem

Barevné spektrum v levé části obrázků 53 a 54 znázorňuje hodnoty posunutí, jehož hodnota je na modelu reprezentována příslušnou barvou. Z obrázků lze odečíst největší posunutí od zatěžující síly v ose Z, které je 1,23 mm u modelu tvořeného kompozitovou skladbou s osmi vrstvami a 1,03 mm u modelu tvořeného čtyřvrstvou skladbou. Z toho tedy vyplývá, že model se čtyřmi vrstvami má při stejné tloušťce laminátu a v podstatě stejné hmotnosti větší tuhost o téměř 20 %.

Výsledky krytu kola kamionu zobrazují obrázky 55 a 56. Hodnoty posunutí zde byly kvůli odlišné geometrii mnohem větší, ale také zde si lze všimnout menšího posunutí v ose Z u modelu tvořeného čtyřmi vrstvami, konkrétně 20,72 mm, oproti modelu s osmivrstvou skladbou, kde posunutí dosahovalo hodnoty 22,22 mm a model součásti se čtyřmi vrstvami měl tedy o 7,2 % větší tuhost.



Obrázek 55 Výsledky posunutí v ose Z krytu kola kamionu se čtyřvrstevným profilem

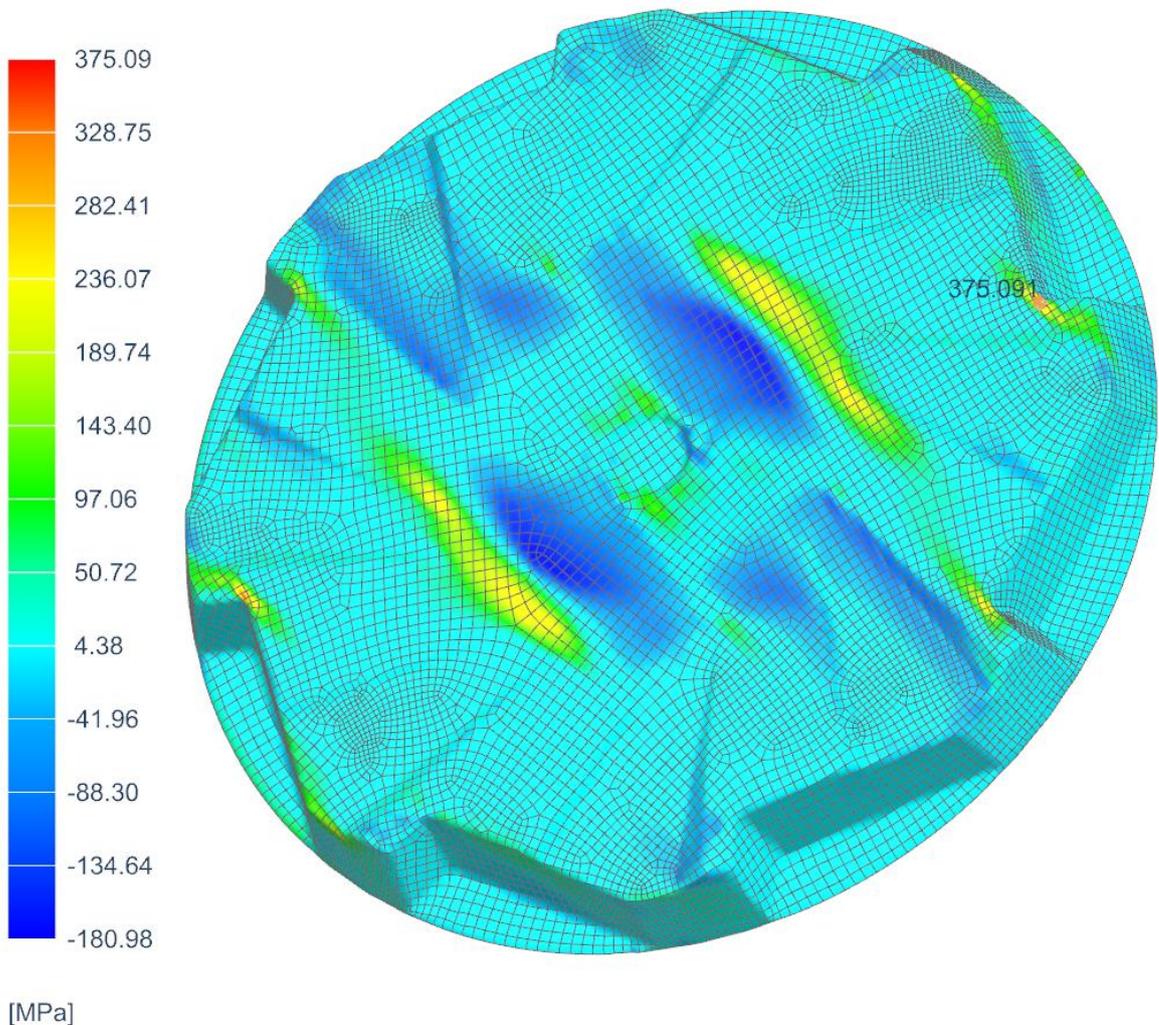


Obrázek 56 Výsledky posunutí v ose Z krytu kola automobilu s osmivrstevným profilem

9.2 Napětí ve vrstvách

Další částí analýzy bylo určení kritické vrstvy kompozitu, tedy vrstvy, v jejichž vláknech vzniká maximální napětí a určení největší velikosti tohoto napětí. Maximální napětí ve vrstvách obou součástí bylo zkoumáno při zatížení 1000 N. Tato analýza je důležitá hlavně proto, aby se zjistilo, zda se vlákna v kritické vrstvě nezačnou trhat a nezpůsobí tak selhání součástí.

kryt kamion 4 vrstvy upraveno_sim2 : Solution 1 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Stress - Elemental, Averaged, YY, Ply 2 Mid
Min : -180.98, Max : 375.09, Units = MPa
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 57 Grafické zobrazení napětí v tahu a tlaku

Na obrázku 57 je zobrazeno rozložení napětí v kritické vrstvě krytu kola kamionu tvořeného čtyřmi vrstvami prepregu. Kladné hodnoty na obrázku představují napětí v tahu, záporné hodnoty znamenají napětí v tlaku. Hodnota v pravé části obrázku zobrazuje místo,

ve kterém vzniká největší napětí ve vrstvě. Po prozkoumání napěťových stavů u všech modelů byla určena kritická vrstva (vrstva laminátu, v jejíchž vláknech vzniká největší napětí) a hodnoty maximálních napětí v tahu a tlaku v kritických vrstvách. Hodnoty těchto napětí u jednotlivých staveb kompozitní struktury obou součástí jsou zobrazeny v tabulce 4 až 7.

Tabulka 4 Výsledky maximálního napětí v tahu krytu kola kamionu

Kryt kola kamionu		
Skladba kompozitu	Maximální napětí v tahu (MPa)	Číslo kritické vrstvy
osmivrstvá	534,41	1
čtyřvrstvá	375,09	2

Tabulka 5 Výsledky maximálního napětí v tlaku krytu kola kamionu

Kryt kola kamionu		
Skladba kompozitu	Maximální napětí v tlaku (MPa)	Číslo kritické vrstvy
osmivrstvá	417,76	8
čtyřvrstvá	224,71	1

Tabulka 6 Výsledky maximálního napětí v tahu krytu kola automobilu

Kryt kola automobilu		
Skladba kompozitu	maximální napětí v tahu (MPa)	Číslo kritické vrstvy
osmivrstvá	97,93	1
čtyřvrstvá	76,15	1

Tabulka 7 Výsledky maximálního napětí v tlaku krytu kola automobilu

Kryt kola automobilu		
Skladba kompozitu	maximální napětí v tlaku (Mpa)	Číslo kritické vrstvy
osmivrstvá	187,38	8
čtyřvrstvá	161,76	3

Z hodnot maximálních napětí ve vláknech kritických vrstev krytu kola kamionu vyplývá, že obě součásti vzhledem k pevnosti vláken v tahu, jejichž hodnota je uvedena v tabulce 3, zatížení definovanou vnější silou vydrží a u žádné z nich se vlákna trhat nezačnou, menší

hodnoty maximálního napětí v tahu i v tlaku však dosáhla součást tvořena čtyřmi vrstvami. V případě krytu kola automobilu tomu bylo podobně.

Výše byly prezentovány výsledky numerické analýzy pro zkoumané součásti ve dvou různých provedeních, které se lišily skladbou kompozitové struktury. S jejich pomocí bylo vyhodnoceno, že vhodnější provedení představuje v obou případech skladba tvořena čtyřmi vrstvami, která dosahovala lepších výsledků jak z hlediska napěťových stavů, tak z hlediska deformace. V případě krytu kola automobilu dosahovala čtyřvrstvá struktura o 20 % větší tuhosti, než skladba tvořena osmi vrstvami, v případě krytu kola kamionu potom byla tuhost součásti tvořené čtyřmi vrstvami větší o 7,2 %.

Z výsledků deformace a maximálního napětí ve vláknech kritických vrstev dále vyplynulo, že u součásti krytu kola automobilu byla zaznamenána mnohem menší deformace i výsledné maximální napětí ve vrstvách než u krytu na kolo kamionu, což bylo dáno především geometrickou odlišností těchto součástí.

Dále bylo zjištěno, že maximální napětí ve vláknech v kritických vrstvách u krytu na kolo automobilu bylo v případě obou zvolených kompozitových struktur mnohem menší, než jaká je jejich maximální pevnost v tahu, a v případě výroby této součásti by tedy bylo možné počet vrstev prepregu v závislosti na požadované tuhosti součásti zmenšit.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vyhotovit numerický model součástí krytů na kolo, které byly tvořeny vrstveným kompozitem z uhlíkového prepregu a vybrat strukturu kompozitního materiálu, která by byla z hlediska mechanických vlastností pro tvorbu těchto součástí vhodnější.

V teoretické části byly popsány základní poznatky o kompozitních materiálech, včetně jejich výroby a zpracování v podobě prepregů. Dále byly rozebrány základní vztahy pro výpočet napětí a deformací ve vrstvených kompozitech, poslední kapitola byla věnována samotné numerické analýze.

V praktické části byly nejdříve vytvořeny FEM modely obou součástí, pro které byla následně nadefinována síť tvořena skořepinovými elementy typu CQUAD8. Dále se pro FEM modely vytvořila kompozitní struktura, složená z několika vrstev uhlíkového prepregu s termosetickou maticí, nastavily se požadované okrajové podmínky a nakonec došlo k samotné simulaci deformačních a napěťových stavů.

Z výsledků analýzy deformace vyplynulo, že z hlediska tuhosti je v případě obou součástí vhodnější kompozitní struktura tvořena čtyřmi vrstvami, z výsledků maximálního napětí v tahu a v tlaku se ukázalo, že menší maximální napětí v kritické vrstvě vzniká rovněž v součástech tvořených čtyřmi vrstvami. S ohledem na tyto fakta byla čtyřvrstvá struktura zvolena jako vhodnější. Dále bylo z výsledků napětí ve vláknech kritické vrstvy zjištěno, že počet vrstev prepregu v případě krytu na kolo automobilu lze pro malé hodnoty maximálního napětí zmenšit s ohledem na požadovanou tuhost součásti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SKOČOVSKÝ, Petr, Peter PALČEK, Radomila KONEČNÁ a Ladislav VÁRKOLY. *Konštrukčné materiály*. v Žiline: Žilinská univerzita, 2000. ISBN 80-7100-608-4.
- [2] Carl Zweben, *Composite Materials and Mechanical Design*, Mechanical Engineer's Handbook, 2nd ed., Myer Kutz, Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [3] Damascénská ocel. Tercik [online]. 2019 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://www.tercik.cz/damascenska-ocel/>.
- [4] A.P. Divecha, S.G. Fishman, and S.D. Karmarkar, Silicon Carbide Reinforced Aluminum—A Formable Composite, JOM, Vol 33 (No. 9), 1981
- [5] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 9788073722791.
- [6] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [7] Zhang, W, YQ Yang, GM Zhao, ZQ Feng, B Huang, X Luo, MH Li and YX Chen, Interfacial reaction studies of B4C-coated and C-coated SiC fiber reinforced Ti-43Al-9V composites. Intermetallics 2014.
- [8] Yi XS (2004) Challenges and innovations of advanced composite materials. Aeronaut Manuf Technol 7:24–30 (in Chinese)
- [10] Kompozity - Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. [online]. ©2016, [cit. 28.10.2020]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>.
- [11] DVOŘÁK, Zdeněk, Romana LAMBOROVÁ. *Základy výrobních procesů díl 1 ve Zlíně*: Universita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012
- [12] Editorial B (1993) Introduction to high technology materials. China Science Press, Beijing (in Chinese)
- [13] Morgan P (ed) (2005) Carbon fibers and their composites. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York
- [14] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 9788086960296G.

- [15] e, K. Timmermanns, R. Reuscher. Beschichtungs- und Verarbeitungstechnologien zur Herstellung von Prepreg-Produkten. Technische Textilien. 2008.
- [16] Lendsfield, H., Fabris, F. W., Krämer, J., Lacalle, J., & Altstädt, V. (2016). *Composite Technologies*. Hanser Publishers, Munich.
- [17] Mechanika kompozitů: Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340.
- [18] BARBERO, E. J. *Introduction to composite materials design*. Third edition, CRC Press, 2018. ISBN-13: 978-1138196803.
- [19] Bower, A. F. (2009). Applied Mechanics of Solids. In *CRC Press eBooks*. Informa. <https://doi.org/10.1201/9781439802489>
- [20] How Can I Learn Finite Element Analysis? The Complete Guide (2022) Dostupné z: [Learn Finite Element Analysis | The Guide for FEA | SimScale](#)
- [21] *Finite Element Analysis*. (2005). [New Age International Publishers]. BHAVIKATTI S.S ISBN (13) :978-81-224-2524-6
- [22] *The Finite Element Methods: Vol. Volume 1 –The basis* (5th ed.). (2000). ZIENKIEWICZ O.C. TAYLOR R.L. IBSN 0 7506 5049 4

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

θ	Kontaktní úhel smáčivosti	[°]
V_f	Objemový podíl vláken	[-]
V_m	Objemový podíl matrice	[-]
W_f	Hmotnostní podíl vláken	[-]
W_m	Hmotnostní podíl matrice	[-]
ρ_f	Hustota vláken	[kg/m ³]
ρ_m	Hustota matrice	[kg/m ³]
ε	Poměrná deformace	[-]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
G	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
σ	Normálové napětí	[MPa]
ν	Poissonovo číslo	[-]
C	Tuhost	[MPa]
S	Poddajnost	[$\frac{1}{\text{MPa}}$]
Θ	Úhel natočení vrstvy	[°]
f	Síla na jednotu délky	[N]
$\bar{\sigma}$	Střední napětí ve vrstvě	[MPa]
t_k	Tloušťka jedné vrstvy	[mm]
t	Celková tloušťka laminátu	[mm]
$u \otimes \nabla$	Gradient tenzoru posunutí	[-]
u	Posunutí	[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozdělení kompozitních materiálů podle tvaru disperze [6]	13
Obrázek 2 Vzájemné zaklínění matrice a disperze na společném rozhraní [5]	14
Obrázek 3 Konvexní obálka částice disperze [5].....	14
Obrázek 4 Základní schéma smáčivosti.....	15
Obrázek 5 Schéma synergického efektu [5]	16
Obrázek 6 Uspořádání vláknového laminátu [6]	19
Obrázek 7 Výroba skelného vlákna [10]	21
Obrázek 8 Zvlákňovací hlava [10].....	21
Obrázek 9 Změna struktury PAN vlákna [10]	22
Obrázek 10 Druhy tkaninových vazeb.....	25
Obrázek 11 Výroba jednosměrně orientovaného prepregu [14].....	28
Obrázek 12 Výroba tkaninového prepregu metodou mokrou metodou [14].....	28
Obrázek 13 Výroba SMC prepregu [14].....	29
Obrázek 14 Ruční stříhání prepregů [16]	30
Obrázek 15 Řezací CNC stroje [16]	31
Obrázek 16 Řezací nástroje pro řezání prepregů [16]	31
Obrázek 17 Ruční vrstvení prepregu [16].....	32
Obrázek 18 Robotický systém pro výrobu kompozitů [10].....	33
Obrázek 19 Nos letadla vyrobený z prepregu s uhlíkovými vlákny metodou navíjení [10]	33
Obrázek 20 Autokláv na vytvrzování malých výrobků [16]	34
Obrázek 21 Mikrovlnná pec [16].....	35
Obrázek 22 Vyhřívaný hydraulický lis [16]	36
Obrázek 23 a) heterogenní materiál b) homogenní materiál s anizotropními vlastnostmi [17].....	37
Obrázek 24 Jednosměrový kompozit [6]	39
Obrázek 25 Souřadnicový systém jednosměrně vyztuženého kompozitu [6]	39
Obrázek 26 Zatížení laminy ve směru vláken [6].....	40
Obrázek 27 Pootočený souřadný systém [6].....	42
Obrázek 28 Systém souřadnic a označení [14]	43
Obrázek 29 Součást podrobena numerické analýze [20].....	45
Obrázek 30 Vektor posunutí $u(x)$ charakterizující deformaci tělesa [19]	46
Obrázek 31 3D síť kyvného ramena motorčky [20].....	47
Obrázek 32 Schéma základních elementů 2D a 3D sítě [19]	48
Obrázek 33 Elementy a uzly v konečně prvkové síti [19].....	49

Obrázek 34	Prostředí FEM modeláře v programu Siemens NX	54
Obrázek 35	Spojení ploch součástí	55
Obrázek 36	Tvorba 2D sítě	56
Obrázek 37	Nastavení vlastností uhlíkových vláken	57
Obrázek 38	Inventář vytvořených laminátů.....	58
Obrázek 39	Tvorba prepregu GG-630 T IMPZ 503 37%	58
Obrázek 40	Tvorba kompozitového profilu.....	59
Obrázek 41	Definování počátečního bodu a směru kladení vrstev	60
Obrázek 42	Uložení nenastříhané tkaniny	61
Obrázek 43	Uložení nastříhané tkaniny	61
Obrázek 44	Náhled nástřihového vzoru vrstvy krytu kola kamionu	62
Obrázek 45	Střihy vrstvy s úhlem kladení 0° a 90° v ploše krytu kola automobilu.....	63
Obrázek 46	Střihy vrstvy s úhlem kladení 45° a 135° v ploše krytu kola automobilu.....	63
Obrázek 47	Střihy vrstvy s úhlem kladení 0° a 90° v ploše krytu kola kamionu	64
Obrázek 48	Střihy vrstvy s úhlem kladení 45° a 135° v ploše krytu kola kamionu	64
Obrázek 49	Zobrazení orientace vláken v prostoru modelu	65
Obrázek 50	Schéma osmivrstvé kompozitové skladby	65
Obrázek 51	Schéma čtyřvrstvé kompozitové skladby	65
Obrázek 52	Nastavení okrajových podmínek	66
Obrázek 53	Výsledky posunutí v ose Z krytu kola automobilu s osmivrstvým profilem ...	67
Obrázek 54	Výsledky posunutí v ose Z krytu kola automobilu se čtyřvrstvým profilem ...	68
Obrázek 55	Výsledky posunutí v ose Z krytu kola kamionu se čtyřvrstvým profilem	69
Obrázek 56	Výsledky posunutí v ose Z krytu kola automobilu s osmivrstvým profilem ...	69
Obrázek 57	Grafické zobrazení napětí v tahu a tlaku	70

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Teoretické a experimentálně naměřené mechanické hodnoty vybraných materiálů [9].....	17
Tabulka 2 Materiálové složení jednotlivých prepregů	53
Tabulka 3 Vlastnosti vyztužujících vláken a matrice	53
Tabulka 4 Výsledky maximálního napětí v tahu krytu kola kamionu	71
Tabulka 5 Výsledky maximálního napětí v tlaku krytu kola kamionu.....	71
Tabulka 6 Výsledky maximálního napětí v tahu krytu kola automobilu.....	71
Tabulka 7 Výsledky maximálního napětí v tlaku krytu kola automobilu.....	71