

Numerický model vrstveného kompozitového profilu

Petr Novák

Bakalářská práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Petr Novák
Osobní číslo:	T18208
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Numerický model vrstveného kompozitového profilu

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.

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

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

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 užít 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, považuji 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 numerického modelu vrstveného kompozitu. Model výrobku je v tomto případě tenkostěnný profil z uhlíkového prepregu.

Teoretická část pojednává o kompozitových materiálech, jejich mechanickém chování a problematice konečně prvkové analýzy. Podstatou praktické části je návrh konečně prvkových modelů s různým uspořádáním vrstev a zkoumání jejich mechanického chování. Z výsledků analýzy je nakonec vyhodnocen optimální úhel, pod kterým se na sebe kladou jednotlivé vrstvy materiálu.

Klíčová slova: kompozit, vrstvený kompozit, laminát, prepreg, mechanické vlastnosti, metoda konečných prvků, NX Siemens

ABSTRACT

This Bachelor Thesis presents an analysis of a numerical model of a layered composite. In this case of the product, model is a thin-walled profile made of carbon prepreg.

The theoretical part of the thesis deals with the topics of composite materials and their mechanical behavior; and the finite element structural analysis. Furthermore, the practical part of the thesis contains the design of finite element models with different layer arrangements, as well as the examination of their mechanical behaviour. As a result of the analysis, an optimal angle for the layers placement is determined.

Keywords: composite, layered composite, laminate, prepreg, mechanical features, finite element method, NX Siemens

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D. za cenné rady a čas, který mi věnoval při vedení této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým blízkým, kteří mi byli oporou při studiu.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITOVÉ MATERIÁLY	11
1.1 HISTORICKÝ VÝZNAM KOMPOZITU	11
1.2 VŠEOBECNÉ ROZDĚLENÍ KOMPOZITOVÝCH MATERIÁLŮ	13
1.2.1 Rozdělení podle disperzní fáze	13
1.2.2 Rozdělení podle tvaru disperze	13
1.3 VLASTNOSTI KOMPOZITOVÝCH STRUKTUR	14
1.3.1 Pevnost styku vnitřních povrchů	14
1.3.2 Izotropie a anizotropie	16
2 VRSTVENÉ KOMPOZITY	17
2.1 VÝZTUŽNÉ SYSTÉMY	18
2.1.1 Vybrané druhy vláknových materiálů	18
2.1.2 Kompozice elementárních vláken	22
2.2 MATRICE	24
2.2.1 Termoplastické matrice	24
2.2.2 Reaktoplastické matrice	25
2.3 VÝVOJ VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ	26
3 PREPREGY	27
3.1 TERMOPLASTICKÉ PREPREGY	28
3.2 TERMOSETICKÉ PREPREGY	28
3.3 TECHNOLOGIE VÝROBY	28
3.3.1 Výroba termosetických prepregů	29
3.3.2 Výroba SMC	29
3.3.3 Výroba termoplastických prepregů	30
3.4 ZPRACOVÁNÍ PREPREGŮ	32
3.4.1 Metody vrstvení	32
3.4.2 Metody vytvrzování	34
3.4.3 Povrchové úpravy	36
4 MECHANIKA VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ	37
4.1 JEDNOSMĚRNĚ VYZTUŽENÁ VRSTVA	37
4.2 LAMINÁTOVÁ TEORIE	40
5 NUMERICKÁ ANALÝZA	42
5.1 ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ – FEA	42
5.1.1 Elementy a uzly sítě	44
5.1.2 Běžné vady sítě	45

5.2	POSTUP ANALÝZY KONEČNÝCH PRVKŮ	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
6	CÍLE	47
7	KONSTRUKCE KOMPOZITOVÉHO PROFILU	48
8	TVORBA 3D MODELU	49
9	NÁVRH FEM MODELU V PROGRAMU SIEMENS NX 12.....	50
9.1	TVORBA SÍTĚ	51
9.2	NASTAVENÍ MATERIÁLU.....	52
9.3	TVORBA KOMPOZITOVÉ STRUKTURY	54
9.3.1	Variace stříhů	56
9.3.2	Problematická místa kladených vrstev	56
9.4	ÚHLY KLADENÝCH VRSTEV	58
9.4.1	Proměnná orientace vrstev	58
9.4.2	Stálá orientace vrstev	58
9.5	ZATÍŽENÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY.....	59
10	VÝSLEDKY	60
10.1	DEFORMACE.....	60
10.1.1	Proměnná orientace vrstev	61
10.1.2	Stálá orientace vrstev	62
10.1.3	Vliv stříhů na posunutí	62
10.1.4	Shrnutí výsledků posunutí.....	63
10.2	TVAROVÁ STABILITA.....	64
10.2.1	Vliv orientace vrstev na tvarovou stabilitu	65
10.2.2	Vliv stříhů na tvarovou stabilitu.....	65
10.2.3	Shrnutí výsledků tvarové stability.....	66
10.3	MAXIMÁLNÍ NAPĚTÍ VE VRSTVÁCH	67
10.3.1	Vliv orientace vrstev na průběh napětí.....	68
10.3.2	Shrnutí výsledků maximálního napětí.....	69
10.4	SOUHRNNÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	70
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM GRAFŮ	78
	SEZNAM TABULEK.....	79

ÚVOD

Snahou materiálových inženýrů vždy bylo hledání takového materiálu, který by disponoval vysokou pevností, dostatečnou pružností a zároveň nízkou hmotností. Těmto podmínkám se podařilo vyhovět kombinací již známých a běžně dostupných látek, jež se svými mechanickými vlastnostmi liší a zároveň skvěle doplňují. Zmíněné spojení výrazně rozdílných hmot mělo za následek vznik nové kategorie materiálů, jimiž jsou dnes dobře známé kompozity. Ačkoli by se mohlo zdát, že jsou kompozity nevšední druh materiálu, můžeme se s nimi setkat jak v přírodě, tak u výrobků z dávné minulosti.

S nástupem znalostí v problematice fyzikálního chování materiálů nastala ve výrobě doba téměř neomezených možností. Plynulý vývoj zapříčinil výrobu výkonnějších a modernějších strojů i výrobků. Čím se ovšem výroba stávala objemnější, složitější a nákladnější, tím vzrůstala také potřeba zpřesňovat a urychlovat návrhy budoucích produktů. Aby mohly být splněny dané požadavky spojené s výrobou, je hojně využíváno pokrokových výpočetních technologií. V souvislosti se zkoumáním vlastností výrobků lze výpočetní technologie uplatnit například k analýze numerických modelů, kterým bude v dalších kapitolách věnována patřičná pozornost.

Záměrem této práce bylo zhotovení numerického modelu, jenž by se shodoval s vlastnostmi vrstveného kompozitu, a provedení analýzy jeho vlastností v závislosti na uspořádání vrstev. Numerický model výrobku představuje tenkostěnný profil z uhlíkového prepregu a jeho simulované zatížení vycházelo z využití u ortopedických pomůcek ve zdravotnictví. Analýza zahrnovala vyšetření mechanického chování modelu a vyhodnocení optimálního úhlu kladení jednotlivých vrstev.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITOVÉ MATERIÁLY

Kompozity se z hlediska vnitřní struktury skládají ze dvou a více odlišných materiálů, které svým spojením vytvoří modifikovaný produkt. Výsledné vlastnosti takového materiálu převyšují poměrný součet vlastností dílčích složek. Daný účinek, kdy dochází k celkovému zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností spojením více rozdílných fází, se nazývá synergický efekt. Dílčí složky, vyskytující se ve struktuře kompozitu, se rozdělují na výztuž a matici. Výztuž je určitý druh materiálu s vysokou pevností, jenž je vázán pomocí matrice v jeden celek. Matrice plní funkci pojiva čili spojuje vlákna a přenáší na ně zatížení přes rozhraní obou fází. [1]

V praxi se běžně vyskytuje značné množství materiálů skládajících se z vícero látek, které však nemohou být považovány za kompozity. Patří mezi ně například různé příměsi slitin nebo plasty s malým obsahem plniv. Slitiny se sice také řadí mezi heterogenní materiály, ale rozdíl mezi nimi a kompozity je patrný při mísení jednotlivých složek. Zatímco u slitin dochází působením tepla ke vzniku pevného roztoku, při výrobě kompozitů dochází k čistě mechanickému mísení s patrným přechodem mezi fázemi. [2] [3]

Obecně se mezi kompozity řadí materiály, které splňují tato kritéria [1]:

- musí obsahovat dvě či více chemicky odlišných složek;
- jednotlivé složky mají výrazně rozdílné vlastnosti;
- objemový podíl výztuže je vyšší než 5 %;
- alespoň jedna z fází je v pevném skupenství;
- po spojení složek se uplatňují pouze jejich kladné vlastnosti a potlačují jejich nedostatky;
- po spojení složek nemůže být dosaženo stejných mechanických vlastností, které by měly jednotlivé fáze samostatně.

1.1 Historický význam kompozitu

Historie kompozitních materiálů používaných v lidské civilizaci je spojena se starověkými národy jako je Čína, Egypt a Izrael. V těchto kulturách byl masivně využit právě kompozitový materiál v podobě cihel, které byly plněny suchou slámou. Sláma ve zmíněném případě fungovala jakožto výztuž v podobě volně ložených stébel, které byly spojené jílem.

V Číně se kvůli výborným vlastnostem a dostupnosti využíval také bambus, který je v podstatě přírodním vláknovým kompozitem. [4]

Dalším starověkým kompozitním materiálem, který se využíval převážně v oblasti chladných zbraní, byla tzv. damascéská ocel. Jednalo se o materiál původem z Indie a sloužil k výrobě šavlí, nožů a mečů. Tajemství damascéské oceli spočívalo v systematickém skování vysokouhlíkové a nízkouhlíkové oceli, což mělo za následek vysokou tvrdost a zároveň houževnatost, která se hodila k proseknutí nepřátelské zbroje. Bohužel přesný postup k výrobě původní damascéské oceli byl po dlouhá staletí tajemstvím kovářů a nedochoval se. Postupem času se návod k její výrobě sice vytratil, ale mnoho lidí se pokoušelo daný materiál napodobit, což dalo vzniknout tzv. nepravému damašku. Tato napodobenina, která se dodnes používá, již nedosahuje takových kvalit jako její originál. Tento materiál lze snadno poznat podle vzorované struktury připomínající mramor, viz obrázek (obr. 1). V historickém kontextu zbraní a kompozitů lze taktéž uvést Mongolský luk. Tento nástroj, jehož dostřel byl až 300 metrů, používaly mongolské kmeny po staletí pro svůj jedinečný výkon a dostupné suroviny k jeho výrobě. Lze o něm hovořit jako o kompozitovém výrobku, jelikož se skládal z více vrstev různorodých materiálů, jako jsou dřevo, šlachy a rohovina. [2] [5]



Obrázek 1 Příklad výrobku z damascéské oceli [20]

Princip kompozitů může být nalezen taktéž u přírodních látek. Například dřevo se skládá z vláken celulózy spojených ligninovou maticí v poměru 2:1. Další ukázkou přírodního kompozitu mohou být také kosti nebo schránky mořských živočichů. [4] [6]

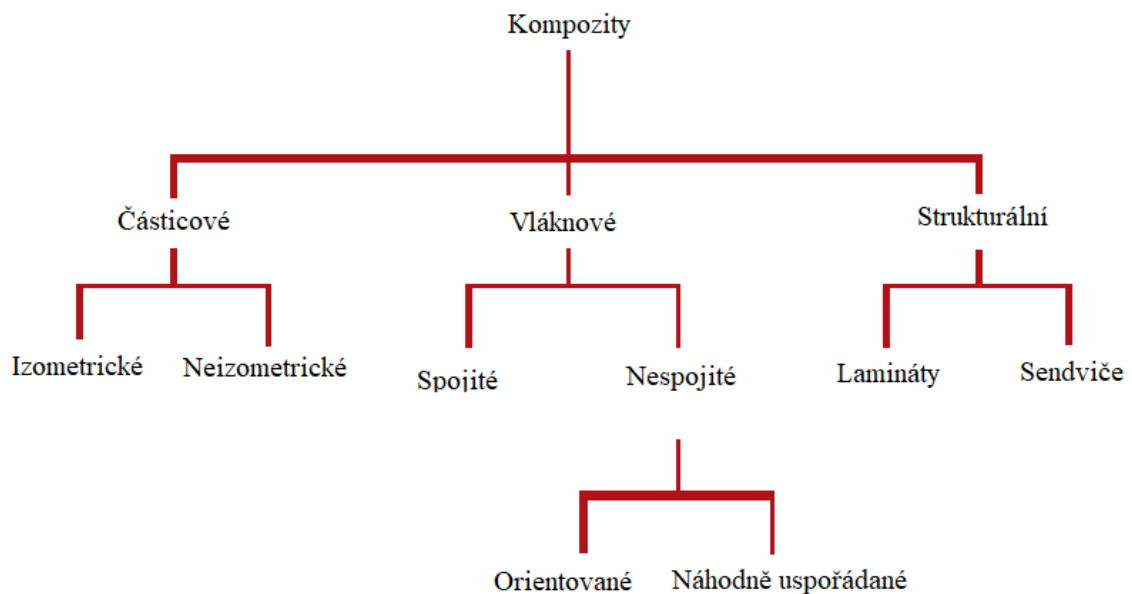
1.2 Všeobecné rozdělení kompozitových materiálů

Kompozity rozdělujeme podle složek, ze kterých jsou utvořeny. Kompozit musí zpravidla obsahovat materiál, jenž drží pohromadě celý systém tzv. matrici. Všechny ostatní prvky, které kompozit obsahuje, bývají v matrici určitým způsobem rozptýleny, což vedlo k jeho označení disperze. [2]

1.2.1 Rozdělení podle disperzní fáze

- Kompozity prvního typu (nejběžnější případ) – disperze složená z pevné fáze.
- Kompozity druhého typu – disperze složená z kapalně fáze, jedná se například o pórovitě struktury vyplněné kapalinou.
- Kompozity třetího druhu – jedná se převážně o pěnové materiály s disperzí v plynné fázi. [2]

1.2.2 Rozdělení podle tvaru disperze



Obrázek 2 Rozdělení kompozitů dle tvaru disperze [9] [2]

1.3 Vlastnosti kompozitových struktur

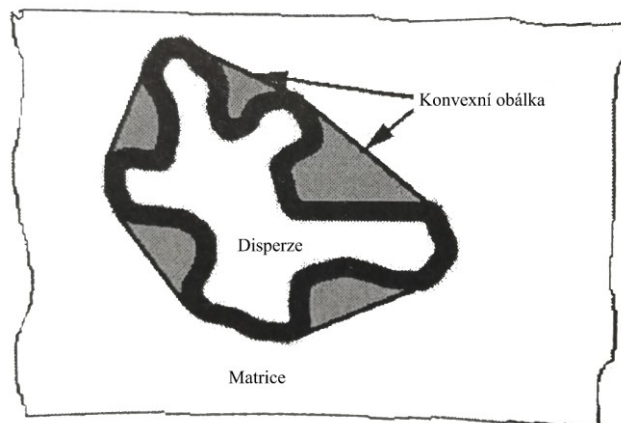
Rozhodujícími vlastnostmi kompozitových materiálů, kromě již zmíněného synergického efektu, jsou také izotropie, anizotropie a pevnost styku vnitřních povrchů. Tyto vlastnosti významně ovlivňují výsledné chování kompozitové struktury. [1]

1.3.1 Pevnost styku vnitřních povrchů

Charakteristickým chováním kompozitního materiálu při zatížení je přenášení silového působení přes matrici na výztuž skrze rozhraní obou fází. Soudržnost této spojitě matrice a nespojitě disperze zajišťují adhezní síly, které působí na jejich rozmezí. Jelikož materiály matrice a výztuže dosahují rozdílných hodnot teplotní roztažnosti a objemového smrštění, je potřeba, aby spojení vnitřních povrchů splňovalo alespoň podmínku pevnosti ve smyku fyzikálních a chemických vazeb. Schopnost adheze je jednou z vlastností rozhodující o pevnosti kompozitu a člení se podle původce působení na mechanickou, fyzikální a fyzikálně chemickou. [2] [1]

1.3.1.1 Mechanické působení:

Mechanickým působením rozumíme zaklesnutí nerovností jednotlivých fází. Tyto nerovnosti jsou způsobeny rozdílnými drsnostmi povrchů, které mezi sebou interagují. Pro posouzení schopnosti mechanického působení na styku vnitřních povrchů je využíváno koeficientu, jenž je roven podílu povrchu částice a její konvexní obálky. [2]



Obrázek 3 Grafické znázornění disperzní částice [2]

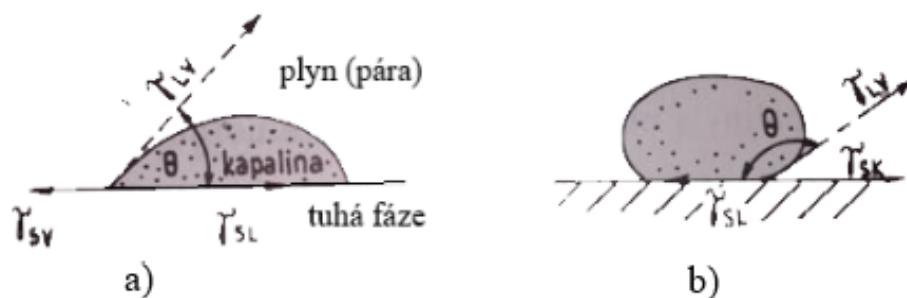
1.3.1.2 Chemické působení:

Chemická adheze na styku vnitřních povrchů je zapříčiněna působením chemických meziatomových vazeb. K chemickému působení na rozhraní může dojít, jestliže mezi matricí

a výztuží vzniká difúzní vrstva nebo pokud mezi sebou jednotlivé složky matrice a disperze reagují. Chemické vazby mají vliv na vzdálenost od 0,1 po 0,3 nm a jejich teoretická pevnost dosahuje hodnot od 7 po 70 GPa. Ačkoli chemické vazby mezi materiály tvoří silná spojení, jejich výskyt má v několika případech negativní vliv. V prvé řadě se jedná o křehkou povahu difúzních a chemických mezivrstev, díky kterým může dojít v tomto místě k poruchám materiálu. Dále při silné difúzi nebo chemické reakci může nastat úbytek disperze. Tomuto jevu lze zabránit mezivrstvou, která vytvoří difúzní bariéru. [1] [2] [1]

1.3.1.3 Fyzikální působení:

Při fyzikálním působení dochází ke vzniku Van der Waalsových vazeb, jež jsou doprovázeny teoretickou pevností mezi povrchy v rozmezí od 0,7 až 7 GPa na vzdálenost 0,3-0,5 nm. Mezi Van der Waalsovy vazby patří například elektrostatické a induktivní interakce mezi náboji, dipóly a multipóly v sousedních molekulách. Fyzikální adheze je taktéž spjatá s termínem označovaným jako smáčivost, což je kontakt pevných a tekutých složek kompozitu. Míra smáčivosti se určuje pomocí kontaktního úhlu θ , který se stýká mezi kapkou kapaliny a povrchem tuhé fáze v plynném prostředí. Na levé straně obrázku (obr. 4) je zobrazen úhel θ mezi tuhou fází smáčivého povrchu a kapalinou, který se pohybuje v rozmezí 0 až 90 stupni. Na pravé straně obrázku lze naopak vidět průběh napětí u nesmáčivého povrchu, jehož hodnota kontaktního úhlu je vždy větší než 90°.

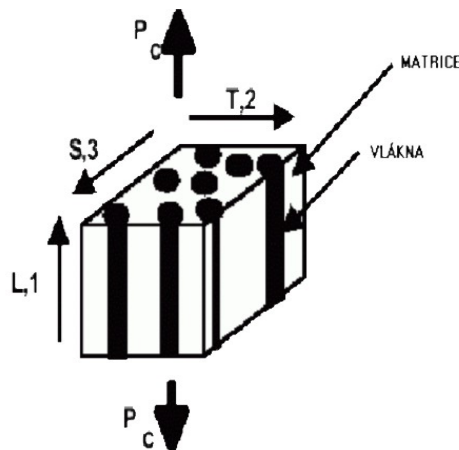


Obrázek 4 Kontaktní úhel θ mezi kapalinou a tuhou fází [1]

Výše uvedený kontaktní úhel závisí nejen na smáčivosti jednotlivých povrchů, ale taktéž na jejich drsnosti. Drsnost povrchu u smáčivých látek kontaktní úhel zmenšuje, čímž zlepšuje adhezi, zatímco u látek nesmáčivých se adheze s drsností zhoršuje. [2] [1]

1.3.2 Izotropie a anizotropie

Izotropní jsou takové materiály, které mají identické fyzikální, tepelné a elektrické vlastnosti v jakémkoli směru. Ostatní materiály, jejichž vlastnosti se v různých směrech liší, nazýváme anizotropní. Některé materiály se skládají z malých jednotek, krystalů, které jsou ve své podstatě anizotropní, avšak z důvodu náhodného rozmístění v materiálu se uvažuje celý systém za izotropní. Z izotropního materiálu je možné dále zhotovit makroskopicky anizotropní celek pomocí určitých technologických operací, například kování nebo válcováním za studena. Mezi přírodně anizotropní materiály patří jakékoli vláknové a orientované látky, jako je dřevo, bambus aj. V souvislosti s izotropií a anizotropií se můžeme setkat také s pojmem příčná izotropie. Příčně izotropní materiály mají vlastnosti symetrické k určité rovině. Materiály s příčně izotropní strukturou, například jednosměrné vláknové kompozity, mají hlavní osu ve směru vláken a rovinu izotropie kolmou na směr vláken. [6] [2] [4]

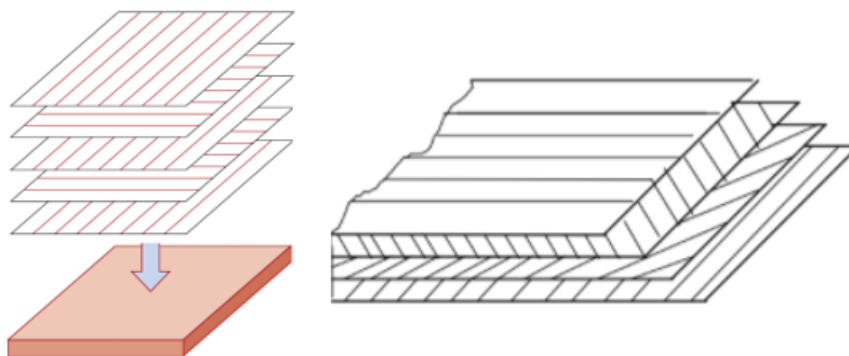


Obrázek 5 Příčně izotropní materiál z jednosměrných vláken [6]

Kompozity jsou vnitřně nehomogenní materiály, nicméně makroskopicky je kompozit považován za homogenní, jelikož se s ním počítá jako s celkem. Typickou vlastností kompozitů je anizotropie a příčná izotropie, od čehož se následně odvíjí jejich rozličné chování. [6] [2]

2 VRSTVENÉ KOMPOZITY

Charakteristickými vrstvenými kompozity jsou vláknové lamináty. Vlastnosti laminátů závisí na orientaci a počtu jednotlivých vrstev, konstrukci výztužného systému a druhu matrice. Jednotlivé vrstvy se nazývají lamina a tvoří základní stavební bloky celé stavby vrstvených kompozitů. V souvislosti s vrstvenými kompozity se můžeme setkat s termínem hybridní lamináty. Tento typ laminátů se, na rozdíl od těch klasických, skládá z vrstev s rozdílným látkovým složením. Takovýto hybridní laminát může být tvořen například z vrstev, kde je jedna vyztužena skelnými a druhá uhlíkovými vlákny. Taktéž se může jednat o kombinaci materiálů obsažených v jedné vrstvě, kdy jsou dílčí materiály zakomponovány do tkaniny či jiné kompozice. [7]



Obrázek 6 Vnitřní uspořádání vláknového laminátu [9] [3]

Lamináty patří mezi nejvíce aplikované kompozitní materiály a jejich používání se týká široké škály průmyslových odvětví. Při tvoření technického rozvržení tohoto materiálu jsou uplatňována určitá doporučení [8]:

- jednotlivé vrstvy shodného či podobného materiálu by měly mít totožnou tloušťku;
- vrstvy by měly být kladeny tak, aby se zachoval stejný počet vrstev se záporným i kladným úhlem;
- pro zabránění vzniku defektů, by soustava neměla obsahovat mnoho vrstev se stejnou orientací;
- minimálně 10 % vrstev by mělo být orientováno do čtyř hlavních směrů (0° , 45° , 90° , -45°) pro snížení zatížení matrice;
- měla by být zachována symetrie vrstev ke střední rovině stěny.

Výhodou laminátů oproti běžným materiálům je nízká hmotnost, dobrá pružnost, vysoká pevnost, tuhost a odolnost vůči korozi. Některé vlastnosti jako pevnost a tuhost lze modifikovat pomocí orientování výztuže a použitím rozličných kombinací materiálů matrice a výztuže. Toto úskalí, kdy je na výběr spousta materiálových možností se však mnohdy stává i jistou nevýhodou, jelikož neexistuje standardní kompozit. Další z nevýhod jsou také obtížné nedestruktivní zkoušky či nízká mez pevnosti kolmo na směr vláken. [8]

2.1 Výztužné systémy

Výztužnými systémy se u laminátových kompozitů rozumí různé typy vyztužujících vláken. Tato vlákna rozdělujeme do několika skupin podle druhu materiálu nebo skladby vláken ve vrstvě. Profil výztužných vláken má obvykle kruhový tvar a dle velikosti jejich průměrů se vláknové kompozity řadí buď mezi mikrokompozity, nebo nanokompozity. Vlákna, jejichž průměr se pohybuje do 100 nanometrů, označujeme jako nanovlákna. Vlákna od průměru 0,1 do 1 mikrometru označujeme coby mikrovlákna. Vlákna o velikosti 1 až 10 mikrometrů jsou nazývány střední a patří mezi ně například vlákna uhlíková, skleněná nebo textilní. U průměrů vláken větší než 10 mikrometrů se setkáváme s označením hrubá vlákna. [3] [2]

Vlákna při použití v kompozitu dosahují v zásadě vyšší pevnosti než při použití samotného materiálu v kompaktní podobě. Toto chování je způsobeno právě malými průměry vláken, jelikož se zmenšováním rozměrů nastává zároveň zmenšování lokálních poruch. Dochází tedy ke vniku submikroskopických až mikroskopických trhlin. [3] [2]

Existuje široká škála materiálů, jež plní funkci výztužných systémů, a proto bude dílčímu rozdělení podrobena pouze vybraná část těch nejrozšířenějších druhů.

2.1.1 Vybrané druhy vláknových materiálů

- Přírodní vlákna
- Uhlíková vlákna
- Skleněná vlákna
- Aramidová vlákna
- Keramická vlákna
- Kovová vlákna [3] [2]

2.1.1.1 Přírodní vlákna

Přírodní nebo také organická vlákna se hojně používají pro svoji příznivou dostupnost z pěstovaných rostlin. Základní stavební složkou přírodních vláken je celulóza. Význačnými rysy těchto materiálů je nízká hustota, dobrá zpracovatelnost, recyklovatelnost a schopnost výborně tlumit vibrace. Zároveň nepůsobí, na rozdíl od výztuží z tvrdších materiálů, výrazným abrazivním efektem při kombinaci s jinými zpracovatelskými nástroji (šnek, forma atd.). Organických vláken se na trhu objevuje velké množství, mohou být třeba bavlněná, lněná, jutová, konopná, kokosová nebo bambusová. Přírodní vlákna získala dobré využití při kombinaci s termoplastickou matricí. Pro zlepšení adheze je možná úprava plazmou, ethery nebo estery. Díky své výhodné ceně a uspokojivým vlastnostem našla tato eko-vlákna široké uplatnění při výrobě dílů osobních automobilů, jako jsou autokoberce nebo zvuková izolace. [3] [2] [8]

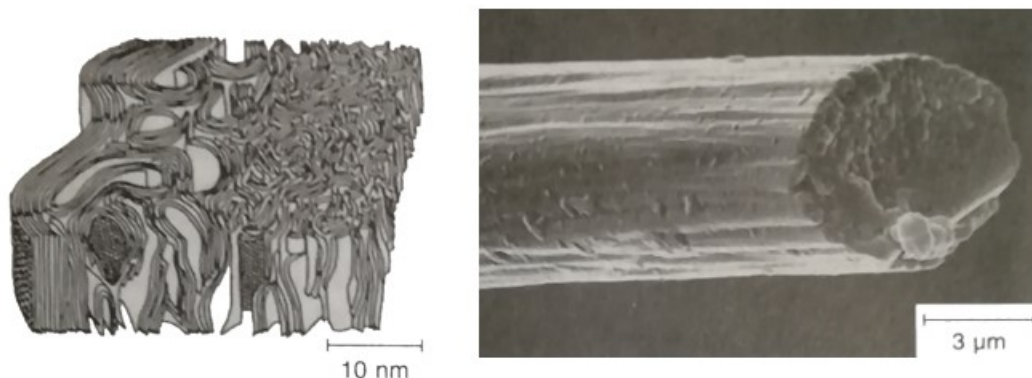
2.1.1.2 Uhlíková vlákna (CF-Carbon Fiber)

Uhlík v podobě vláken je jedním z nejpoužívanějších výztužných materiálů v polymer-matricových kompozitech. Důvodem, proč se využívá převážně u polymerních matric, je vznik elektrochemické koroze na styku s méně ušlechtilými kovy. Nicméně, pokud je spojení s kovovou matricí vyžadováno, musí být uhlíková výztuž od kovu oddělena nevodivým materiálem. Uhlíková vlákna mají v porovnání se skelnými vlákny přibližně desetinásobnou tuhost a o polovinu nižší hustotu. Zachovávají si vysokou pevnost a tuhost i při zvýšených teplotách a při pokojové teplotě nebývají ovlivňovány vlhkostí. Dále dobře odolávají různým druhům rozpouštědel, kyselinám a zásadám. Hustota uhlíkových vláken se pohybuje v rozmezí od 1,8 až 2 g/cm³. Z důvodu špatné adheze k pojivu je nutná povrchová úprava pro zvýšení přilnavosti. Oproti skleněným vláknům jsou uhlíková vlákna vysoce anizotropní, což značnou měrou ovlivňuje součinitele teplotní roztažnosti. Podle obsahu grafitu jsou vlákna členěna na uhlíková a grafitová. Uhlíková vlákna mají ve své struktuře převahu amorfního uhlíku, zatímco grafitová mají převahu krystalického grafitu. [8]

K výrobě uhlíkových vláken jsou využívány převážně tři typy materiálů, těmi jsou polyakrylonitril (PAN), smola a umělé hedvábí (rayon). Nejpoužívanějším typem je PAN, což je termoplast, ze kterého jsou vlákna vyráběna tažením taveniny. Zpracování polyakrylonitrilu do podoby uhlíkových vláken rozdělujeme do tří fází [8]:

- stabilizace – působení tahového napětí při teplotách 200 až 300 °C zapříčiňuje vznik chemických vazeb, kdy se vlákno stává netavitelné, tento proces je doprovázen ztmavnutím;
- karbonizace – odstranění vodíku, snížení obsahu dusíku a kyslíku působením teplot od 1000 do 1800 °C v inertním prostředí, vyvolává zvýšení pevnosti v tahu;
- grafitizace – zvýšení obsahu uhlíku při teplotách do 3000 °C v prostředí argonu.

Při grafitizaci dále dochází ke vzniku dokonalejších mikrokrystalů, jež přispívají ke zvýšení tuhosti, avšak za cenu zhoršení pevnosti. Pro dosažení, co nejvyšší tuhosti se v praxi využívá dlužení vláken při grafitizaci. Dloužením vláken se zmenšuje úhel odklonu mikrokrystalů od osy vlákna, což vyvolá zhutnění a zvýšení tuhosti. Z toho vyplývá, že můžeme vyrábět grafitová vlákna s vysokou pevností nebo tuhostí. Polymerní kompozity s výztuží z uhlíkových vláken se v současné době ve velké míře využívají v odvětvích sportovního, rekreačního a leteckého průmyslu. [9] [3] [2] [8]



Obrázek 7 Mikrostruktura uhlíkového vlákna [8]

2.1.1.3 Skleněná vlákna (GF-Glass Fiber)

Skleněná vlákna pro účely výztuží, označována také jako textilní skleněná vlákna, mívají pravidelný kruhový průřez a jsou vyráběna nejčastěji o průměru v rozmezí od 3,5 do 24 mikrometrů. Tato vlákna mají strukturu založenou na bázi silikátů (SiO_2) a jejich význačné vlastnosti se odvíjejí od chemického složení skloviny. Podle původu zpracovávaného materiálu rozdělujeme sklovinu na [8]:

- E-sklovina – nejpoužívanější druh z bezalkalické skloviny, který je charakteristický svými izolačními vlastnostmi a prostupností záření;
- C-sklovina – vyšší podíl alkálií, nižší pevnost, odolná vůči kyselinám;

- S-sklovina – vyšší podíl SiO_2 , Al_2O_3 , lepší mechanické vlastnosti oproti E-vláknům, využívá se nejčastěji v kombinaci s epoxidovou matricí;
- AR-sklovina – vysoká odolnost proti alkáliím, výroba střešních krytin a vyztužování betonu.

Jednotlivých druhů s určitým označením je mnoho a každý typ lze uplatnit v různých aplikacích.

Skleněná vlákna jsou vyráběna tažením taveniny rychlostí až 400 m/min. K této aplikaci se používá sklářská pec, jež je vyzděna žáruvzdornou keramikou. Celý proces se provádí při teplotách okolo 1400 °C, kdy se po roztavení jednotlivých surovin přivádí tavenina do platinových trysek. Tyto trysky jsou umístěny na spodní straně pece a mohou se nacházet v počtu 200 až 4000 kusů. Při výstupu taveniny z trysek dochází ke tvorbě vláken o průměru okolo 2 mm, které jsou následně dluženy na požadovaný průměr a délku. Odváděná vlákna jsou navíjena na cívku, během čehož zároveň probíhá jejich lubrikace pomocí vodní emulze. Tato lubrikace usnadňuje následné textilní zpracování a zároveň chrání citlivý a křehký povrch proti abrazivním účinkům. Tuhost běžných skelných vláken dosahuje podobných hodnot jako například hliník a tepelná vodivost je o polovinu nižší než u oceli. Všeobecná charakteristika jejich mechanického chování je však ovlivňována mnoha faktory, jako je jejich průměr, chemická úprava povrchu či adsorpce vody. Jednou z nevýhod skelných vláken je malá odolnost vůči únavě během dlouhodobých operací. [8] [1] [3] [2]

2.1.1.4 Aramidová vlákna

Aramid, aromatický polyamid, je typickým zástupcem polymerních kompozitových výztuží v podobě vysokopevnostních vláken. Tento typ vláken dosahuje modulu pružnosti 130 GPa, pevnosti až 3 GPa a zároveň patří mezi nejlehčí vyztužující vlákna s hustotou 1,45 g/cm³. Aramid, nesoucí obchodní označení kevlar, se stal v oblasti výroby kompozitů oblíbený pro své výborné mechanické vlastnosti, převážně pak měrnou pevnost a tuhost. Mezi jeho další přednosti patří také dobrá odolnost vůči abrazi a kyselinám. Aramidová vlákna lze kombinovat se všemi běžně používanými reaktivními pryskyřicemi a reaktoplasty. Mezi nedostatky týkající se samotného materiálu vláken patří absorbování vlhkosti a nízká odolnost vůči vysokým teplotám. Nicméně, v podobě kompozitu odolává teplotám až 300 °C, čímž se hodí například na protipožární ochranné obleky a brzdové obložení. Využití kevlarových vláken můžeme najít též u lehkých konstrukcí, na které působí převážně tahová namáhání, dále u výztuží pneumatik a balistických aplikací. [8] [1] [3]

2.1.1.5 Keramická vlákna

Keramická vlákna mají oproti již zmíněným materiálům vyšší hustotu a zároveň i větší tlakovou výdrž. Dále je pro ně typická vysoká teplotní odolnost, stabilita a tuhost. Tato vlákna bývají většinou ve formě krátkých jehliček nebo tyčinek a nejčastěji jsou součástí kompozitů s kovovou nebo keramickou maticí. Vyskytuje se široké spektrum druhů keramických vláken odlišujících se na základě surovin, ze kterých jsou vyráběna. Mezi základní typy patří například keramická vlákna z korundu, křemene nebo spinelu. Speciálním odvětvím keramických vláken jsou piezoelektrická vlákna. Tento druh vláken se vyrábí z oxidů olova, zirkonia a titanu a nachází uplatnění při výrobě tzv. chytrých kompozitů, u nichž dochází při mechanickém namáhání ke tvorbě elektrického náboje. [2] [3] [1]

2.1.1.6 Kovová vlákna

Mezi základní materiály, ze kterých jsou kovová vlákna zhotovována, se řadí wolfram, molybden, ocel, hliník nebo slitiny titanu. Wolframová vlákna se nejčastěji používají k vyztužování žáruvzdorných materiálů. Ocelovými vlákny bývají vyztužovány slitiny hliníku. Zmíněná ocelová vlákna jsou využívána převážně pro svoji výhodnou cenu, avšak na úkor znatelného nárůstu hmotnosti. V současné době se výzkum kovových vláken zaměřil na zpracování skelných (amorfních) kovů, které by do budoucna mohly znamenat velký pokrok v produkci kompozitových materiálů. [1] [2]

2.1.2 Kompozice elementárních vláken

Samostatně se vyskytující vlákna se u kompozitů objevují jen zřídka. Nejčastější podobou vyztužujících vláken bývá jejich uskupení, ze kterých jsou zhotovovány standardizované polotovary. Těmito polotovary mohou být [8]:

- prameny – vznikají spojením přibližně 200 elementárních vláken a vyskytují se v podobách se zákruty, bez zákrutů, sekané nebo nesekané;
- rovingy – říká se jim také pramence a skládají se ze sdružených pramenů s minimálním počtem zákrutů. Bývají zpracovávány buď tkaním, navíjením, sekáním, nebo tažením nekonečného pramene;
- příze – jsou vyráběny spřádáním vláken, bývají kroucená nebo nekroucená a využívají se k výrobě tkanin nebo pásů;

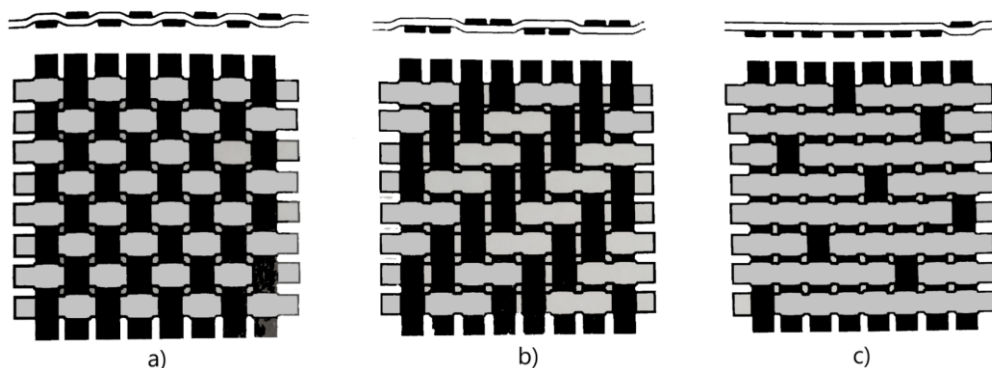
- rohože – jedná se o netkané plošné výrobky, které se skládají buď ze sekaných, nebo kontinuálních pramenů;
- tkaniny – skládají se z tkaných vláken, rovingů nebo přízí, jež jsou uloženy pravoúhle v útku a osnově. Jejich mechanické vlastnosti, krom použitých materiálů, závisí též na skladbě vláken a typu textilní vazby. Oproti jednosměrným výztužím jsou tkaniny lépe zpracovatelné.

Poslední zmíněný druh polotovaru je nutno blíže specifikovat, jelikož se tkaniny rozlišují podle své skladby a druhu vazeb na vícero typů. [8] [3]

2.1.2.1 Druhy vazeb tkaninových výztuží

- Plátňová vazba – vyznačuje se vysokou pevností, ale zároveň je hůře tvarovatelná. Tkaniny s plátňovou vazbou jsou tkány tak, aby prameny útky procházely pokaždé pod a nad prameny osnovy.
- Keprová vazba – oproti tkaninám s plátňovou vazbou se lépe tvaruje a zároveň dosahuje dobrých mechanických vlastností díky menšímu zvlnění vláken. Pro strukturu keprové vazby je charakteristický diagonální vzor, jenž je způsoben křížením útkového pramene s více prameny osnovy (nejméně dvou).
- Atlasová (saténová) vazba – je využívána pro prostorově složitější aplikace zásluhou výborné tvarovatelnosti. Avšak řadí se mezi nejméně pevné tkaninové vazby. U tohoto spojení je ze svrchní strany pramen osnovy překryt čtyřmi a více prameny útku a jedním pramenem útku ze spodní strany. Pro zmíněnou tkaninu bývá typický hladký a lesklý povrch. [3] [8]

Na přiloženém obrázku (obr. 8) jsou zobrazeny jednotlivé typy vazeb: a) plátňová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová vazba.



Obrázek 8 Druhy textilních vazeb [8]

2.1.2.2 Druhy tkanin dle skladby vláken

- Jednosměrná tkanina – jedná se o typ tkaniny určený k jednosměrnému namáhání. Roviny osnovy mívají zpravidla více vláken než v útku. Vlákná v útkovém směru slouží převážně k udržení kompaktní struktury vláken v osnově.
- Hybridní tkanina – tkanina je složená z vláken s různým materiálovým charakterem. Zmíněná tkanina může obsahovat ve své struktuře v útkovém směru například vlákna skleněná, zatímco v osnovním směru zase vlákna aramidová. Touto kombinací jsme schopni modifikovat celkové mechanické vlastnosti kompozitu.
- Směsná tkanina – vzniká mísením například skleněných vláken s vlákny termoplastickými. Použitá termoplastická vlákna, díky svým plastickým schopnostem při zvýšených teplotách, plní ve směsných tkaninách funkci matrice.
- Pletenina – jedná se o spojování různých vláknových systémů metodou pletení, čím mezi vrstvami vzniká prostorová vazba. Pleteninami různých tkanin lze zhotovit prostorové prvky, které se následně prosycují maticí. [3] [8]

2.2 Matrice

Matrice slouží v první řadě ke spojení výztuže v jeden kompaktní celek. Dále zaručuje geometrický tvar výrobku a chrání křehká vlákna před porušením vnějšími vlivy. Vrstvené kompozity složené z kontinuálních vláken, ať už ve formě tkanin nebo jiných systémů, jsou nejčastěji spojovány polymerními maticemi, jejichž rozdělení a uplatnění bude hlavním tématem této kapitoly. [1]

Polymerní matrice mají ve výrobě moderních kompozitů dlouhou tradici. První patentově doložený kompozit s polymerní maticí se objevil už v roce 1916. Během následného rozvoje polymerních materiálů nastalo rozdělení těchto matic do dvou skupin na termoplastické a reaktoplastické (termosety). [1] [8] [21]

2.2.1 Termoplastické matrice

Uplatnění termoplastů při výrobě kompozitových matic se v poslední době rychle rozšiřuje. Nejznámějšími typy používaných termoplastů jsou například polyamid, polyethylen, polypropylen, polykarbonát nebo také polystyren. Jako výztuž uvedených matic se běžně používají vlákna skleněná, uhlíková, aramidová nebo jejich spojení v podobě hybridních kompozitů. Zároveň se může jednat o vlákna krátká (do 0,2 mm), dlouhá (do 25 mm) nebo

kontinuální ve formě tkanin a rohoží. První dvě skupiny, vlákna krátká a dlouhá, se často využívají u vstříkovaných výrobků, jelikož mohou být přítomna buď přímo ve zpracovávaném granulátu, nebo se mohou dávkovat v plastifikačním extrudéru přímo do formy. Na vlastnostech kompozitu s termoplastickou maticí markantně závisí postup výroby, jenž definuje, jakým způsobem jsou vlákna v matici uspořádána. Taktéž povrchová úprava výztuže, jež ovlivňuje adhezi dílčích fází, je rozhodujícím faktorem, jak se bude kompozitový výrobek v praxi chovat. Oproti termosetickým maticím, jsou termoplasty za běžných podmínek pevné. Pro přeměnu skupenství do viskózní podoby je potřeba materiál zahřát nad teplotu tání, která se většinou pohybuje okolo 200 °C. Ačkoli jsou termoplasty ve formě taveniny dostatečně tekuté, jejich viskozita je v porovnání s termosety vyšší, což způsobuje horší smáčivost a prosycování výztuže. Mezi výhodné vlastnosti termoplastických matic patří jejich houževnatost, cena a možnost tvarování za tepla, což usnadňuje případné opravy. Houževnatost termoplastů má však i negativní dopad, především pak způsobuje náchylnost ke kríčovému chování. [1] [8] [4] [2]

2.2.2 Reaktoplastické matrice

Tento typ matrice patří k nejstarším a zároveň v současné době nejrozšířenějším materiálům ve výrobě kompozitů. Nespornou výhodou reaktoplastických pryskyřic je jejich tekutost za běžných podmínek, která má za následek lepší smáčivost a prosycování výztuže. Viskozita zmíněných pryskyřic se při zpracovatelských podmínkách pohybuje v řádech stovek mPa·s. Tento fakt ovlivňuje nejen smáčivost, ale i celkové nároky na zpracovávání. Vytvrzování termosetů probíhá za přítomnosti katalyzátorů a urychlovačů. Dále je proces vytvrzování ovlivněn také dodáváním energie ve formě tepla či záření. Během vytvrzování dochází k síťování makromolekul, což zapříčiňuje stálost za vysokých teplot, tuhost a pevnost výsledného materiálu. Vedlejším efektem síťované struktury makromolekul je křehkost, kterou lze však modifikovat dodáním přísad ke zvýšení houževnatosti. Reaktoplastické pryskyřice mohou být kombinovány se širokou škálou vyráběných vláken, jako jsou vlákna uhlíková, skleněná, borová, keramická, aramidová aj. Výztuž se u termosetů vyskytuje převážně v podobě spojitých nebo dlouhých vláken různých konstrukcí, jejichž zastoupení v matici bývá 40 až 75 %. [8] [3] [1] [21]

Nejrozšířenější pryskyřice k výrobě kompozitových matic jsou [8]:

- Polyesterové pryskyřice – nejčastější typ, dobré mechanické, elektrické i chemické vlastnosti. Existuje vícero druhů lišící se podle základní molekuly.

- Epoxidové pryskyřice – mají vysokou rozměrovou stálost a dobré mechanické vlastnosti. Dále odolávají vodě, roztokům alkálií a kyselinám. Zároveň mají výhodné elektroizolační vlastnosti, díky čemuž se významně podílí na výrobě zalévacích hmot pro elektroniku.
- Fenolické pryskyřice – využívají se v konstrukcích elektrospotřebičů, díky vysoké tepelné odolnosti. Nachází dále uplatnění ve výrobě brusných nástrojů, brzdových obložení a ve zpracování dřeva (desky odolné povětrnostním podmínkám).

Během procesu vytvrzování reaktoplastů dochází ke speciálnímu chování, které je nutné při jejich zpracování brát v potaz. Mezi výrazný doprovodný jev při sítování makromolekul patří exotermická reakce, jež se projevuje značným vývinem tepla. Dalším efektem je tzv. želatinace, při níž se viskózní pryskyřice mění v elastickou hmotu s kaučukovitým chováním. Celý proces výroby pak je nutno zmíněným efektům technologicky přizpůsobit. [8] [3]

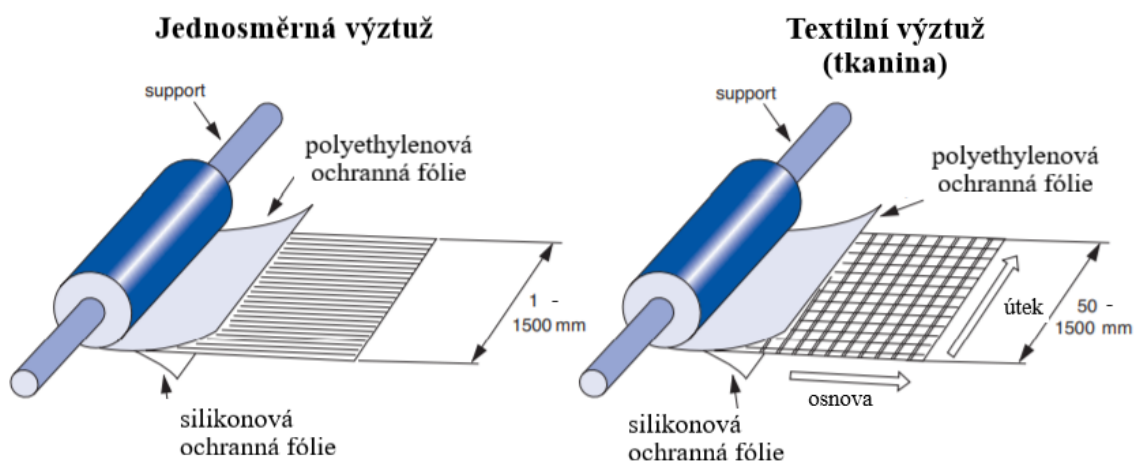
2.3 Vývoj vrstvených kompozitů

Za první úspěšný pokus o masivní zavedení kompozitového materiálu je považována výroba radarových ochranných krytů, známých pod názvem radomy. Aplikací skelného laminátu se v daném případě nahrazovaly kryty z překližek. Na konstrukci těchto radomů byly kladeny přísné požadavky. Materiál musel odolávat zvýšenému zatížení, teplotním změnám a současně musel být propustný pro elektromagnetické vlny. Od začátku nasazení kompozitových krytů se vláknové lamináty začaly používat také k výrobě lodí a letadel. V padesátých letech dvacátého století, díky všestranným vlastnostem, našel tento materiál využití v začínajícím kosmickém průmyslu, kde nahradil těžké kovové díly. Výzkum a vývoj kompozitů v průběhu dvacátého století rozšířil uplatnění tohoto materiálu téměř do všech odvětví. Můžeme se s ním setkat u sportu, letectví, automobilovém nebo vojenském průmyslu. [4]

Jednou z nesporných výhod při zpracování vrstvených kompozitů sehrála také role již předchystaných polotovarů. Jednalo se o předimpregnovaná vlákna, tzv. prepregy, které umožnily výrobu složitějších dílů a zjednodušily proces kladení vrstev.

3 PREPREGY

Prepregy jsou částečně vytvrzené předimpregnované kompozitové polotovary. Setkat se s nimi můžeme například v podobě navinutých rolí či kotoučů, ze kterých je odebráno množství vrstev dle potřeby výroby. Jednotlivé vrstvy prepregu jsou z obou stran opatřené fólií, aby během navíjení či skládání na sebe nedošlo k jejich vzájemnému spojení a postupné degradaci pojiva. Použití prepregů poskytuje, oproti klasické tvorbě laminátů, výhodu v zaručeném přesném obsahu výztuže a její rozložení. Zároveň nedochází k přímému kontaktu pracovníků s reaktivními pryskyřicemi. Částečně vytvrzené prepregy jsou lépe manipulovatelné, avšak jejich skladování nese určitá úskalí. Skladování takto zpracovaných polotovarů musí být prováděno za kontrolovaných podmínek, jež jsou závislé na použitých materiálech. Prepregy, které obsahují reaktoplastickou matrici, je nutno skladovat při nižších teplotách okolo $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ z důvodu samovolného procesu vytvrzování při pokojové teplotě. Po jejich vyjmutí z chladného prostředí by měly být následně temperovány na pokojovou teplotu, aby nedošlo ke znehodnocení matrice i výztuže vlivem orosení. Výztuží prepregů bývají převážně systémy vláken, jejichž konstrukce může být ve formě tkanin, rohoží nebo jednosměrných rovinů (*UD-unidirectional prepreg*). [3] [10] [21]



Obrázek 9 Výztuže prepregu [13]

Podstatným faktorem, jenž ovlivňuje, jakým způsobem se bude daný polotovar zpracovávat, jaká bude cena finálního výrobku a jakých vlastností bude tento výrobek dosahovat, je materiálová skladba, resp. druh materiálu matrice a výztuže. Všeobecně se prepregy dělí buď na termoplastické, nebo reaktoplastické dle použitého pojiva. [3] [10] [21]

3.1 Termoplastické prepregy

Termoplastické prepregy obsahují výztuž převážně ze skelných, aramidových nebo uhlíkových vláken, jež jsou napuštěny termoplastickou matricí. Nejpoužívanějšími materiály termoplastických matric jsou PP, PA, PET. Spojování výztuže s termoplasty může probíhat nanášením polymeru ve formě taveniny, termoplastického roztoku nebo prášku. Při nanášení termoplastu na vlákna v podobě prášku je nutné následné slinování, čímž se zajistí tvorba polymerního filmu. Dalším způsobem, jak může dojít ke spojení termoplastu a výztuže, je zakomponování polymeru do systému vláken, kdy jsou vlákna termoplastu navázána v tkanině výztuže. Po vložení takovéto směsné tkaniny do prostředí vyhřívaného lisu či autoklávu dojde k roztavení termoplastických vláken, čímž se jednotlivé fáze spojí v jeden kompaktní celek. Mezi výhody termoplastických prepregů patří zejména jejich stálost za běžných podmínek a možnost provádět dodatečné úpravy a opravy výrobků díky tavitelnému pojivu. [3] [10] [11]

3.2 Termosetické prepregy

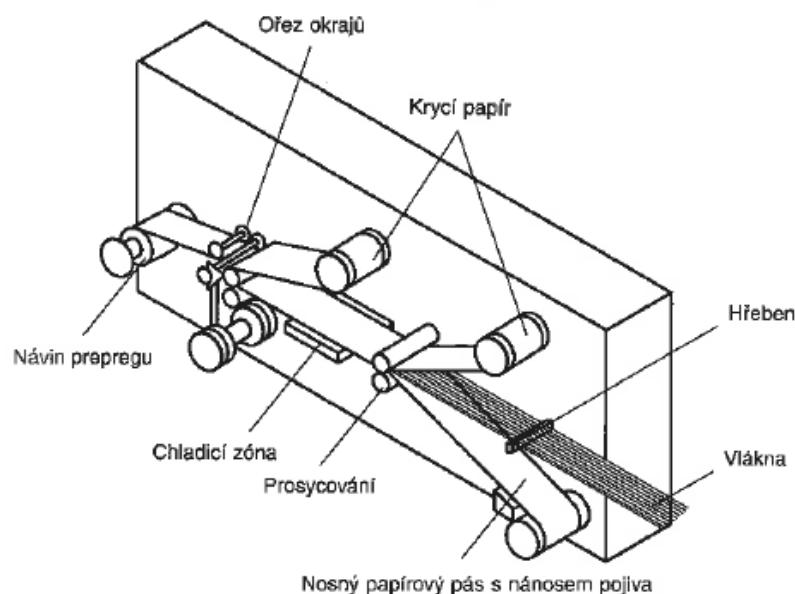
Jedná se o nejrozšířenější a nejstarší typ prepregů. Nejvhodnějšími matricemi se jeví pryskyřice epoxidové, fenolické nebo polyesterové. Reaktoplastické pryskyřice se vyskytují ve stavu A-tekuté, B-částečně vytvrzené, C-plně vytvrzené. Při zpracování prepregů se pryskyřice nachází v částečně vytvrzeném stavu B. Taková pryskyřice má síťovanou strukturu s nízkou hustotou, čímž dosahuje konzistence lepivého gelu. Pro dosažení lepšího prosycení se pryskyřice může krátkodobě zahřát na teplotu okolo 50 °C. Běžně jsou reaktoplastické prepregy vyztužovány uhlíkovými, skleněnými nebo aramidovými vlákny. Termosetické prepregy se vytvrzují působením tepla a tlaku, buď ve vyhřívaných lisech nebo autoklávu. [8] [12] [3]

3.3 Technologie výroby

Technologií výroby se rozumí příprava samostatných polotovarů ve formě pásů. Takové způsoby výroby se liší od použitých výztuží a druhu matrice. Jednotlivé linky pro přípravu prepregů se skládají převážně ze zásobovacích ústrojí, prosycovacích ústrojí, dopravních pásů a navíjecích válců. Firmy zabývající se výrobou prepregů jsou například – HEXCEL, BOKATECH, FORM s.r.o. nebo SCHÜTZ CORMASTER®. [13]

3.3.1 Výroba termosetických prepregů

Textilní prepregy s výztuží tvořenou buď jednosměrnými vlákny, nebo tkaninou jsou vyráběny na speciálních linkách, ve kterých jsou vrstvy výztuže dopravovány do prosycovacích zařízení. Prosycovací zařízení je tvořeno převážně vyhřívaným válcem kalandru, na kterém dochází k prosycování výztuže pojivem za zvýšeného tlaku. Prosycené vrstvy jsou během procesu oboustranně pokryty separační fólií. Takto připravené pásy prochází chladicí zónou, ve které se zastavuje proces vytvrzování a prochází přes ořezávací nože do navíjecího ústrojí. [8]



Obrázek 10 Výroba textilního prepregu [8]

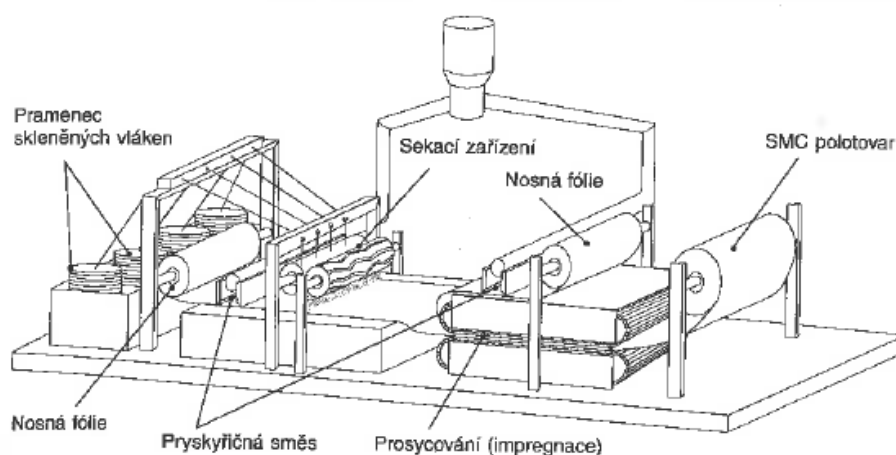
U polotovarů s výztuží ve formě tkaniny se můžeme setkat také s tzv. mokrým způsobem výroby, kdy pásy tkaniny procházejí lázní s roztokem pryskyřice, odkud jsou vedeny do sušárny a následně do zásobníku. [3] [13]

3.3.2 Výroba SMC

SMC zkratka anglického názvu *Sheet Moulding Compound*. Jedná se o plošné lisovací polotovary reaktoplastických prepregů s výztuží v podobě sekaných vláken. Zmíněné polotovary se vyrábí na speciálních zařízeních, které obsahují samostatný přívod již namíchané směsi pojiva a vláken. Při procesu prosycování je matrice ve formě pastovité směsi nanášena na nosnou folii pomocí stíracího nože. Takto připravená folie dále putuje do sekacího zařízení vybraných vláken, po čemž následuje prosycování výztuže pomocí prosycovacích válečků. Výsledný pás putuje do navíjecího zařízení. U SMC polotovarů se

jako výztuž nejvíce používají skleněná vlákna o délce 25 až 50 mm. Alternativou krátkých sekaných vláken bývají rohože ze sekaných pramenců. Dle orientace a struktury vláken rozdělujeme SMC polotovary na:

- SMC-R – obsahují náhodně uložená sekaná vlákna (izotropní uložení vláken);
- SMC-C – jedná se o kombinaci náhodně ložených sekaných vláken a jednosměrných skleněných pramenců (anizotropní uložení);
- SMC-D – kombinace náhodných a orientovaných sekaných vláken o délce 75 až 100 mm (anizotropní uložení). [8]



Obrázek 11 Výroba SMC polotovarů [8]

3.3.3 Výroba termoplastických prepregů

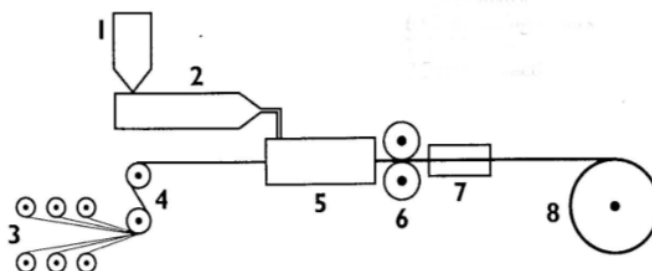
U termoplastických prepregů, na rozdíl od termosetických, odpadá proces částečného vytvrzování. Problematickou záležitostí u termoplastů ve formě matric je zejména vyšší viskozita taveniny, čímž se spojování výztuže a matrice stává složitější. Nejpoužívanější způsoby výroby prepregů s termoplastickou matricí jsou:

- extruze (vytlačování), pultruze (protlačování) taveniny nebo lisování;
- slinování suchého prášku polymeru;
- mísení vláken.

Navázání spojení mezi fázemi může probíhat také metodou prosycování pomocí lázně s termoplastickým roztokem. Uvedená technologie byla již zmíněna u výroby termosetických prepregů, kde místo termoplastického roztoku byla použita reaktoplastická

pryskyřice. Této metody se však příliš nevyužívá, jelikož stále neexistují vhodné roztoky pro všechny typy termoplastů. [8] [3]

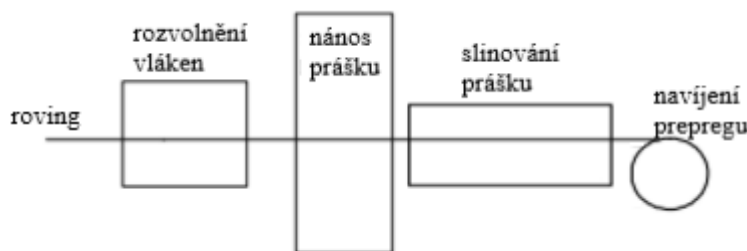
Při procesu vytlačování, protlačování a lisování je tavenina polymeru vtlačena do systému vláken. Tento proces může být konstruován i způsobem, že je výztuž zalísována do termoplastické fólie. Mezi nevýhody zmíněných technologií se řadí nízká tvarovatelnost výsledného produktu, což zapříčiňuje tuhost polotovaru za pokojových teplot. Nicméně se tato metoda stále využívá pro svoji vysokou produktivitu. [8] [3]



1- zásobník granulí termoplastu, 2-vytlačovací stroj se štěrbinovou hubicí, 3-cívky rovingů, 4- napínací kladky, 5-prosycování rovingů taveninou termoplastu, 6- válcování prepregu, 7- chlazení prepregu, 8-navíjení prepregu

Obrázek 12 Vytlačovací proces při výrobě termoplastického prepregu [3]

Slinování termoplastického prášku na výztuži je realizováno jeho rozptřením po fluidním loži, kde je prášek uchycen díky elektrostatickým silám. Slinováním vznikne na vláknech výztuže polymerní film, čímž si výsledný prepreg zachová dobrou tvarovatelnost. Tento proces bývá velice nákladný a je stále ve stádiu vývoje. [3]



Obrázek 13 Výroby prepregu slinováním termoplastického prášku [3]

Směsné tkaniny vzniklé mísením termoplastických a vyztužujících vláken se vyznačují dobrou tvárností, čímž zajišťují možnost výroby složitějších výrobků v tvarových vyhřívaných formách. Směsné tkaniny se vyrábí buď metodou commingling, kdy jsou spojovány směsné příze vláken v plošné útvary, nebo metodou coweaving, což je vzájemné tkaní různých druhů vláken, například osnova-termoplast, útek-výztuž. [8] [3]

3.4 Zpracování prepregů

Předimpregnované kompozitové polotovary jsou při zpracování v podobě tenkých vrstev o tloušťce 0,1-0,5 mm. Tyto vrstvy se na sebe nanášejí dle technologického předpisu a vyplňují prostor formy. Orientace, tloušťka a materiálové složení vrstev souvisí s výslednými vlastnostmi, metodou zpracování a náklady na výrobu. Zpracování prepregů s termoplastickou a termosetickou maticí je podobné, avšak s tím rozdílem, že termoplastické prepregy není třeba po vytvarování za tepla dále vytvrzovat, čímž se zkracuje výrobní proces a zvyšuje produktivita. Způsob zpracování prepregových výrobků se člení dle metod vrstvení a vytvrzování. [14] [13]

3.4.1 Metody vrstvení

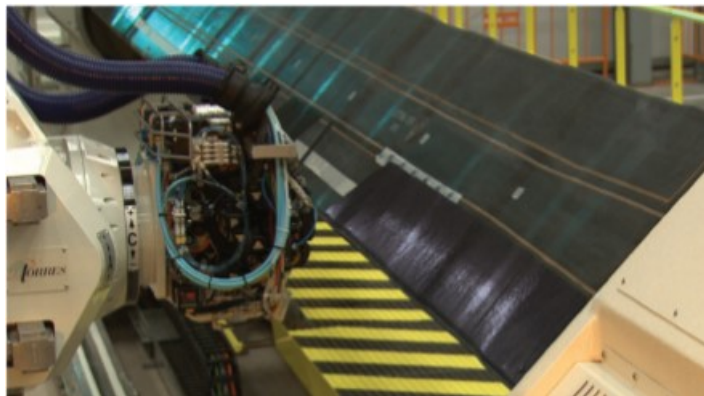
Během nanášení vrstev se povrch formy nejprve opatří vrstvou separátoru, který umožňuje snadné vyjmutí výrobku z formy. Na vrstvu separátoru se následně pokládá odtrhová fólie ze skleněné nebo polymerní tkaniny. Odtrhová fólie slouží k zamezení šíření nečistot z povrchu formy na povrch výrobku. Jakmile je kompozitový výrobek vytvrzený a vyjmutý z formy, dojde k odstranění odtrhové fólie, po čemž může následovat povrchová úprava dílu. Vrstvené prepregy mívají vůči sobě vrstvy různě pootočené, například o 45 nebo 90 stupňů, čímž se zvyšuje jejich mechanická odolnost vůči rozličně orientovaným zatížením.

Kladení vrstev prepregu se rozděluje dle automatizace a smyslu nanášení na:

- ruční kladení;
- strojní kladení;
- navíjení.

Ruční kladení se jeví jako nejpracnější metoda vrstvení prepregu, jež se hodí převážně pro kusovou výrobu v malých sériích nebo výrobu prototypů. Kvalita výrobku, jenž byl zpracováván metodou ručního kladení, závisí zejména na zručnosti a znalosti pracovníků, kteří vrstvy prepregu nejen ručně nanášejí, ale i měří a stříhají. Tento princip lze použít pro všechny typy prepregů, nezáleží tudíž na druhu výztuže nebo na její kompozici ve vrstvě. Aby se zvýšila lepidlost vrstev prepregu, je vhodné jednotlivé vrstvy nahřívat horkým vzduchem. Pro vytvrzování ručně kladený kompozitů se nejčastěji používá metoda vytvrzování v peci nebo autoklávu. [13] [3] [8] [4]

Strojní kladení (*ATL-Automated Tape Laying*) je typické hlavně pro výrobu ve velkých sériích, jelikož pořizovací ceny kladečích strojů jsou v porovnání s ručním kladením značně vysoké. Výhodou automatizace nanášených vrstev je časová úspora a zároveň nedochází k chybám způsobeným lidským faktorem. Celý proces strojního kladení je realizován pomocí počítačově řízené kladečí hlavy, jež má dostatečný počet stupňů volnosti, aby byla schopna nanášet vrstvy v různých směrech. Během výrobního cyklu kladečí hlava odstraňuje v prostoru formy separační fólii, nahřívá prepreg a následně lepí na předchozí vrstvu. Je možné použít jednosměrné i tkaninové prepregy o různých rozměrech pásů. Ke strojnímu kladení se používá vícero zařízení, jimiž jsou například: CTLM (*Contour Tape Layer Machine*) nebo FTLM (*Flat Tape Layer Machine*). [13] [3] [21]



Obrázek 14 Strojní kladení prepregu [13]

Navíjení prepregů, známé také pod názvem suché navíjení, je proces kladení vrstev na otáčející se jádro, za účelem výroby rotačních či jinak tvarovaných dutých dílů, které jsou symetrické k ose otáčení. Při této metodě lze použít jednosměrné rovingy, tkaniny a rohože s různým materiálovým složením. Taktéž se může jednat o prepregy termoplastické nebo reaktoplastické. Postupné navíjení vrstev je uskutečňováno pomocí kombinace podélného posunu suportu a rotačního pohybu jádra. Jádra mohou být z jednoho nebo více kusů a bývají mírně zkosená, kvůli snazšímu odformování. Vyjímatelná jádra, nazývaná také linery, mohou být kovová nebo polymerní. V případě výroby uzavřených nádob se používají jádra tzv. ztracená, která bývají z dobře rozpustných materiálů, jako jsou soli, pěny nebo sádra. Procesem navíjení prepregů můžeme vyrábět: tlakové nádoby, palivové nádrže, kardanové hřídele, listová pera nebo nosy letadel, viz obrázek (obr. 15, str. 34). [8] [13] [4] [12]



Obrázek 15 Výroba nosu letadla metodou navíjení prepregu [3]

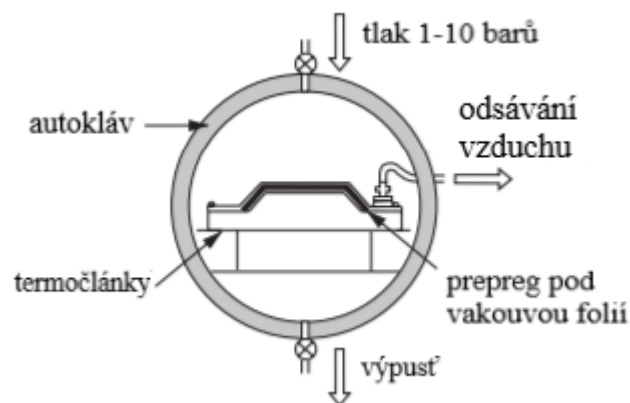
3.4.2 Metody vytvrzování

Vytvrzování kompozitu je proces, při kterém dochází ke vzniku spojitě struktury, čímž výrobek získá finální a obvykle nevratný tvar. Danému procesu předchází přichystání materiálu do formy, tzn. jeho vrstvení, čemuž byla věnována pozornost v minulé kapitole. Jakmile je prepreg navrstven a vytvarován, přikládá se na něj již zmíněná odtrhová tkanina a podle následovné metody vytvrzování také vakuová fólie. Nejčastější typy vytvrzovacích metod prepregu jsou [12]:

- lisování prepregu za tepla;
- vytvrzování v autoklávu;
- vytvrzování v peci.

Lisování prepregu za tepla je vysoce produktivní metoda zpracování kompozitových polotovarů. Polotovary k tomuto účelu jsou zejména lisovací SMC prepregy, ale mohou to být také prepregy s kontinuálními vlákny ve formě tkaniny nebo jednosměrných rovingů. Přístroje k lisování prepregů bývají zpravidla hydraulické lisovací formy s vyhřívanou ocelovou formou, jejichž povrch bývá pochromován nebo vyleštěn. Pracovní teplota formy se liší od použitých druhů matric obsažených ve vrstvě. U polyesterových to bývá od 130 °C do 160 °C. Epoxidové pryskyřice se zpracovávají při teplotě 125 až 200 °C. Lisovací forma může být vyhřívána parou, olejem nebo elektrickými prvky. S ohledem na konstrukci lisovacích forem by měla být respektována uvedená základní pravidla. Lisovací forma musí obsahovat úkosy nejméně 1° pro snadné vyjmutí výrobku z formy a tloušťka stěny vylisku musí být minimálně 1,5 mm, aby nedocházelo k porušení vrstev. [8] [14]

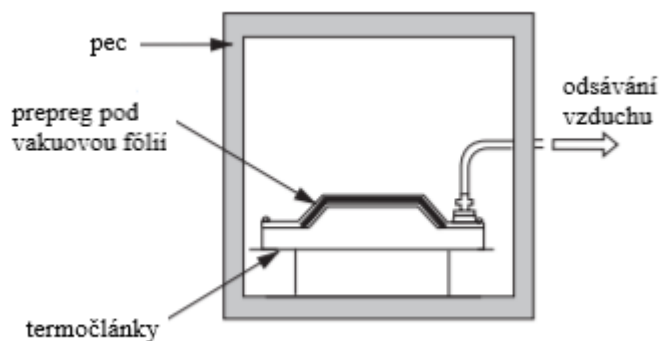
Vytvrzování v autoklávu má mnoho výhod, nejpodstatnější z nich je vysoká kvalita výsledného produktu, jež zahrnuje i tlustostěnné komponenty. Nicméně, jedná se o finančně a časově náročnou metodu, jež je vhodná spíše pro kusovou výrobu, při které jsou kladeny vysoké požadavky na jakost a stálost výrobku. Celý princip uvedené metody spočívá v působení kombinace podtlaku a vnějšího přetlaku za stálých teplot. Do tlakové nádoby se vkládají připravené vrstvence prepregu, jež jsou opatřeny potřebnými doplňkovými tkaninami, tj. odtrhová, odsávací apod. Takto připravený materiál se dále opatřuje vakuovou fólií, pomocí které se na povrch struktury, skrze vývěvu či jiné zařízení, aplikuje podtlak. Podtlak zaručuje polotovaru nejen stálý tvar, ale zároveň stlačuje jednotlivé vrstvy k sobě, čímž redukuje vznik vzduchových bublin a rovnoměrně rozvádí pryskyřici mezi vlákna tkaniny. Přípravek s odsátým vzduchem následně putuje do autoklávu, v němž pomocí řízené teploty a přetlaku dochází k rozpouštění a postupnému vytvrzování pryskyřice. Přetlak v tlakové nádobě se pohybuje v desetinách MPa a teplota vytvrzování je uzpůsobena použitému prepregu. Nevýhodami zmíněného vytvrzování jsou vysoké vstupní náklady na pořízení a rozměrová dispozice zařízení. Se sortimentem vyráběných dílů v autoklávu se můžeme setkat hlavně v letectví, kosmonautice nebo u skořepin vozů formule 1. Ukázka vytvrzování v autoklávu, viz obrázek (obr.16). [3] [12] [11] [14] [8]



Obrázek 16 Vytvrzování v autoklávu [13]

Vytvrzování v peci využívá, stejně tak jako v autoklávu, vakuového pytle, v němž je přichystaný materiál uložen. Lišícím prvkem je zařízení, ve kterém je daná technologie prováděna. Vytvrzovací pec obvykle funguje na bázi mikrovlnného ohřevu. Tato metoda má oproti autoklávu nižší náklady na spotřebu energie a není tak časově náročná. Mikrovlnný ohřev způsobuje v první řadě rozpouštění a vytvrzování pryskyřice. Ostatní komponenty, jako jsou kovové části formy, reflektují mikrovlny do prostředí pece, čímž nedochází k jejich zahřívání. Některé průsvitné nekovové materiály, jimiž jsou třeba skleněná vlákna, vlny

rovněž nepohlcují. Jistým úskalím bývají vakuové fólie, které se mohou během procesu vytvrzování zahřívat. Proto musí být navrženy z materiálu, jenž odolává vysokým teplotám. Takovým materiálem bývají většinou fólie z polyimidů. Daná technologie se liší od autoklávu také tlakovými podmínkami. Zatímco v autoklávu jde o kombinaci podtlaku a přetlaku, u mikrovlnné pece je průběh tlaku řízen pouze podtlakem, jenž je zajištěn skrze vakuový pytel. Konečné produkty vytvořené vytvrzováním v peci dosahují dle průzkumů shodné kvality jako kompozity vytvrzené v autoklávu. [3] [13]



Obrázek 17 Vytvrzování v peci [13]

3.4.3 Povrchové úpravy

Mezi povrchové úpravy patří dokončovací operace a povrchové vrstvy. Dokončovací operací bývá obrábění vytvrzených výrobků. Jelikož se kompozity řadí mezi špatně obrobitelné materiály, používá se obrábění pouze k nezbytným úpravám. Mezi dokončovací operace se většinou řadí srážení hran, tvorba děr či odřezávání přebytečného materiálu. Špatnou obrobitelnost způsobuje fakt, že vláknové kompozity obsahují tvrdou abrazivní výztuž, jež způsobuje rychlé opotřebování běžných obráběcích nástrojů. Proto se k daným technologiím používají speciální nástroje, jako jsou diamantové či karbidové vrtáky nebo vodní a laserové paprsky. Při obrábění se musí klást důraz na chlazení, jelikož by mohlo docházet k tepelnému narušování matrice. Také se musí kontrolovat ostrost použitých nástrojů, aby nedocházelo ke třepení a delaminaci. [12]

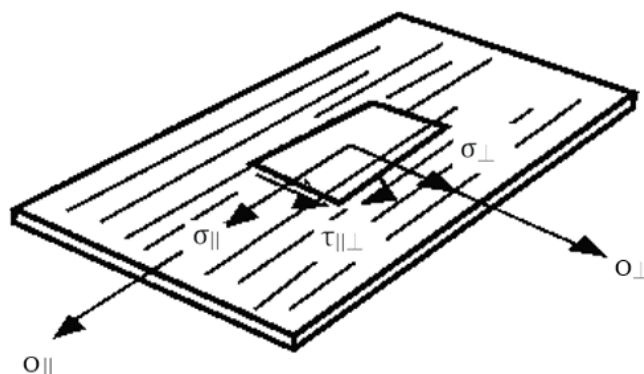
Povrchové vrstvy prepregových výrobků bývají většinou v podobě nátěrů na bázi dvousložkových polyuretanových laků. Tyto nátěry slouží ke zvýšení kvality povrchu a zároveň výrobek chrání před okolními vlivy. Před aplikací nátěru je nutné, aby výrobek prošel mycí linkou a sušárnou. Jako náhrada nátěru se používají také tzv. gelcoaty, jež se nanášejí v podobě tekutých pryskyřic na povrch formy před zpracováním. [8]

4 MECHANIKA VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ

Vrstvené kompozity se skládají z jednotlivých vrstev, které obsahují výztuž a matici. Na základě materiálových charakteristik, mezi které patří modul pružnosti, Poissonovo číslo, geometrické uspořádání vláken, podíl dílčích složek a soudržnost na rozhraní obou fází, jsme schopni odvodit skrze zákonitosti pevnosti a pružnosti mechanické chování kompozitových struktur. Jak již bylo vysvětleno, vrstvy laminátu se liší skladbou výztuže, jež může být tvořena jednosměrnými vlákny, tkaninou nebo rohoží. Nicméně, jak tkanina, tak i rohož obsahují pramence jednosměrných vláken. Tato skutečnost umožňuje pohlížet na takové výztuže jako na část jednosměrné vrstvy, z čehož lze konstatovat, že jednosměrně vyztužený element tvoří všeobecný základ výztuže z kontinuálních vláken. [8] [15]

4.1 Jednosměrně vyztužená vrstva

Jednosměrně vyztužená vrstva má v různých směrech odlišné vlastnosti, zejména vyšší pevnost a tuhost ve směru vláken. Zmíněná vlastnost, jež je ve své podstatě druh anizotropie, se v daném případě nazývá ortotropie. [8]



Obrázek 18 Jednosměrně vyztužená vrstva [8]

Jednosměrně vyztužená ortotropní vrstva je definována navzájem kolmě orientovanými osami symetrie, viz obrázek (obr.18). K popisu chování ortotropní vrstvy je potřeba znát složky zatížení s indexy směru působení (σ_{\perp} , σ_{\parallel} , $\tau_{\parallel\perp}$) vůči osám souřadnic (O_{\parallel} a O_{\perp}). Dále jsou vyžadovány konstanty: modul pružnosti ve směru vláken E_{\parallel} a kolmo na směr vláken E_{\perp} , modul pružnosti ve smyku $G_{\parallel\perp}$ a Poissonova čísla ($\nu_{\parallel\perp}$, $\nu_{\perp\parallel}$). Poissonova čísla se v zásadě liší od směru zatížení, kdy platí, že $\nu_{\perp\parallel}$ je při napětí σ_{\perp} výrazně větší než $\nu_{\parallel\perp}$. Vztah mezi oběma Poissonovými čísly a modulem pružnosti je vyjádřen pomocí Maxwell-Bettiho věty. [8]

Maxwell-Bettiho věta [8]:

$$E_{\perp} \nu_{\perp\parallel} = E_{\parallel} \nu_{\parallel\perp} \Rightarrow \frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} = \frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} \quad (1)$$

Dále pro pravoúhlé elementy, na které působí napětí σ_{\perp} , σ_{\parallel} a $\tau_{\parallel\perp}$, platí dle Hookeova zákona následující vztahy pro poměrné deformace (ε) a zkos (γ) [8]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\parallel} &= \frac{\sigma_{\parallel}}{E_{\parallel}} - \frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} \sigma_{\perp}; \\ \varepsilon_{\perp} &= -\frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} \sigma_{\parallel} + \frac{\sigma_{\perp}}{E_{\perp}}; \\ \gamma_{\parallel\perp} &= \frac{\tau_{\parallel\perp}}{G_{\parallel\perp}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Předchozí vztahy lze dále rozepsat v maticovém tvaru [8]:

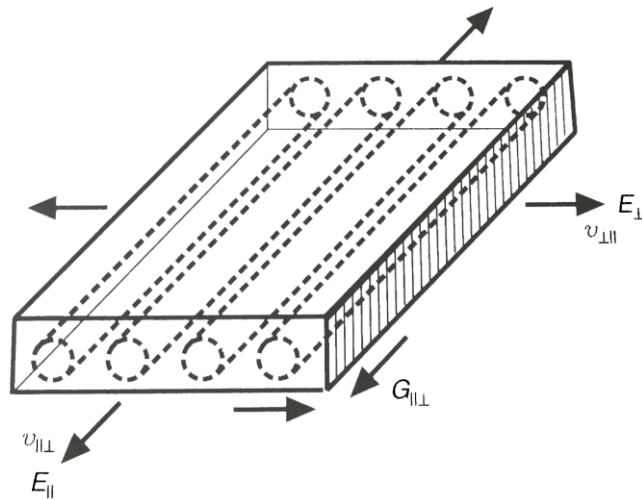
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\parallel} \\ \varepsilon_{\perp} \\ \gamma_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{\parallel}} & -\frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} & 0 \\ -\frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{\parallel\perp}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = [S] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Analogicky lze vyjádřit složky napětí pomocí poměrných deformací [8]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{\parallel}}{1 - \nu_{\parallel\perp} \nu_{\perp\parallel}} & \frac{\nu_{\parallel\perp} E_{\parallel}}{1 - \nu_{\parallel\perp} \nu_{\perp\parallel}} & 0 \\ \frac{\nu_{\perp\parallel} E_{\parallel}}{1 - \nu_{\parallel\perp} \nu_{\perp\parallel}} & \frac{E_{\perp}}{1 - \nu_{\parallel\perp} \nu_{\perp\parallel}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{\parallel\perp} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\parallel} \\ \varepsilon_{\perp} \\ \gamma_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} = [Q] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\parallel} \\ \varepsilon_{\perp} \\ \gamma_{\parallel\perp} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Jedná-li se tedy o rovinnou napjatost, pak k popisu celkového mechanického chování jednosměrně vyztužené vrstvy stačí znát čtyři nezávislé elastické konstanty. Zmíněné elastické charakteristiky stanovujeme za těchto předpokladů [8]:

- adheze mezi fázemi je dokonalá;
- izotropní matrice má modul pružnosti E_m a Poissonovo číslo ν_m ;
- pro izotropní (skleněná) vlákna je potřeba znát dvě elastické konstanty, zatímco pro anizotropní (uhlíková) vlákna je zapotřebí znát moduly pružnosti kolmo $E_{f\perp}$ a ve směru vláken $E_{f\parallel}$, dále modul ve smyku $G_{f\parallel\perp}$ a Poissonovo číslo $\nu_{f\parallel\perp}$.



Obrázek 19 Základní elastické konstanty [8]

Určování elastických charakteristik $E_{||}$, $\nu_{\perp||}$ pomocí pravidla směsi a určování zbývajících konstant dle Pucka [8]:

$$E_{||} = \varphi E_{||f} + (1 - \varphi)E_m;$$

$$\nu_{\perp||} = \varphi \nu_{\perp||f} + (1 - \varphi) \nu_m;$$

$$\nu_{||\perp} = \nu_{\perp||} \frac{E_{\perp}}{E_{||}};$$

$$E_{\perp} = \frac{E_m}{1 - \nu_m} \cdot \frac{1 + 0,85\varphi^2}{(1 - \varphi)^{1,25} + \varphi \frac{E_m}{(1 - \nu_m^2)E_{\perp f}}}; \quad (5)$$

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

φ – objemový podíl vláken

Pokud je dán obsah vláken pomocí hmotnostního podílu (ψ), pak platí daný přepočít [8]:

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

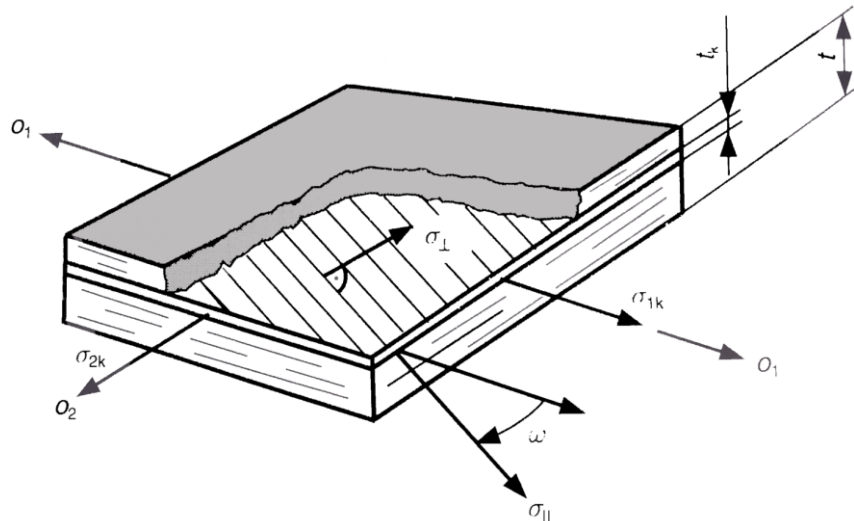
ρ – hustota (ρ_f -vláken, ρ_m - matrice).

4.2 Laminátová teorie

Laminátová teorie nebo také dvourozměrná teorie kontinua je metoda, pomocí které lze stanovit napětí σ_1 , σ_2 , τ_{12} a jednotlivé složky přetvoření ε_1 , ε_2 , γ_{12} v každé vrstvě vrstveného kompozitu. Aby bylo možné danou teorii aplikovat, je potřeba splňovat následovné podmínky [8]:

- při deformaci se veškeré vrstvy deformují stejně, v důsledku pevného spojení;
- v případě sendvičových struktur jsou tloušťky desek a skořepin malé.

Dále se z praktického hlediska vyžaduje symetričnost stěny laminátu, tedy aby byly zachovány identické vlastnosti a složení vrstev jak pod, tak i nad geometrickou rovinou souměrnosti. [8]



Obrázek 20 Rozložení složek v laminátu [8]

K demonstraci laminátové teorie byl vybrán rovinný element vrstveného kompozitu, viz obrázek (obr.20), jenž se skládá z n jednosměrně vyztužených vrstev, jejichž orientace je vztahena k osám O_1 a O_2 . [8]

Dle první podmínky laminátové teorie, která definuje, že se jednotlivé vrstvy deformují stejně, pak platí pro k -tou vrstvu podmínka kompatibility [8]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1k} &= \bar{\varepsilon}_1, \\ \varepsilon_{2k} &= \bar{\varepsilon}_2, \\ \gamma_{12k} &= \bar{\gamma}_{12}.\end{aligned}\tag{7}$$

Výše uvedené veličiny s pruhem označují přetvoření všech vrstev laminátu v jednotlivých osách O_1 a O_2 . [8]

K určení stavu napjatosti v dílčích vrstvách laminátu je nutné použít vztah tuhosti (Q) jednotlivých vrstev ($k=1$ až n) [8]:

$$\begin{aligned}\sigma_{1k} &= Q_{11k} \bar{\varepsilon}_1 + Q_{12k} \bar{\varepsilon}_2 + Q_{16k} \bar{\gamma}_{12}, \\ \sigma_{2k} &= Q_{12k} \bar{\varepsilon}_1 + Q_{22k} \bar{\varepsilon}_2 + Q_{26k} \bar{\gamma}_{12}, \\ \tau_{12k} &= Q_{16k} \bar{\varepsilon}_1 + Q_{26k} \bar{\varepsilon}_2 + Q_{66k} \bar{\gamma}_{12}.\end{aligned}\tag{8}$$

K uvedeným stavům napjatosti se následně stanovuje podmínka rovnováhy, jež je vyjádřena silami na jednotku šířky [8]:

$$\begin{aligned}f_1 &= \bar{\sigma}_1 \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{1k} t_k, \\ f_2 &= \bar{\sigma}_2 \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{2k} t_k, \\ f_{12} &= \bar{\tau}_{12} \cdot t = \sum_{k=1}^N \tau_{12k} t_k.\end{aligned}\tag{9}$$

kde jsou

- f_1, f_2, f_{12} – síly na jednotku délky
- t – celková tloušťka stěny
- t_k – tloušťka jednotlivé vrstvy ($k = 1$ až n)
- $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\tau}_{12}$ – střední napětí v kompozitu.

Z rovnic (8) a (9) dále obdržíme Hookeův zákon pro vícevrstvý kompozit, který má následovný tvar [8]:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_1 &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{11k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{16k} \frac{t_k}{t} \\ \bar{\sigma}_2 &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{22k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{26k} \frac{t_k}{t} \\ \bar{\tau}_{12} &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{16k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{26k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{66k} \frac{t_k}{t}\end{aligned}\tag{10}$$

Z výše uvedeného Hookeova zákona pro vícevrstvý kompozit vyplývá tzv. zákon spolupůsobení, který zní [8]:

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

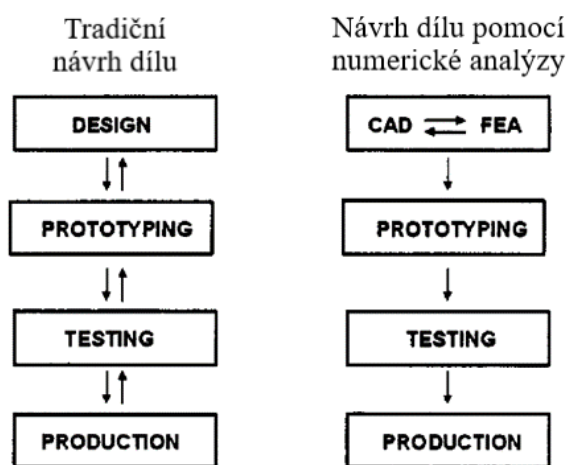
5 NUMERICKÁ ANALÝZA

S vývojem nových technologií se po konci druhé světové války objevily převratné výpočetní metody mechanického chování. Nejpodstatnější změnu v řešení fyzikálních problémů sehrála role numerické analýzy pomocí metody konečných prvků. Počátek zmíněné metody se datuje do druhé poloviny padesátých let dvacátého století, kdy ze Spojených států amerických expandovala mezi populaci matematiků a vědců po celém světě. Zprvu analýza pro inženýrské účely k řešení statických a dynamických úloh posléze posloužila kapacitám z řad světových matematiků a fyziků k jejímu dalšímu vývoji. Tento vývoj vedl během následujících let k novým poznatkům a při nástupu počítačů se metoda konečných prvků zdokonalila do podoby, kterou známe dnes. [16]

5.1 Analýza metodou konečných prvků – FEA

Analýza metodou konečných prvků, dále značená FEA z anglického názvu *Finite Element Analysis*, slouží ke zkoumání vlastností dílů, sestav a různých struktur. Numerické modely v dané metodě konečných prvků reprezentují vlastnosti reálných objektů, u kterých se řeší rozličné mechanické problémy. Z výsledků analýzy provedených na definovaných modelech se ověřuje správnost řešení v oblastech nastávajícího použití. Jak z popisu vyplývá, využití metody FEA se týká hlavně prototypování a predikování chování bez potřeby vynaložení enormně vysokých nákladů na testování v reálných podmínkách. [17]

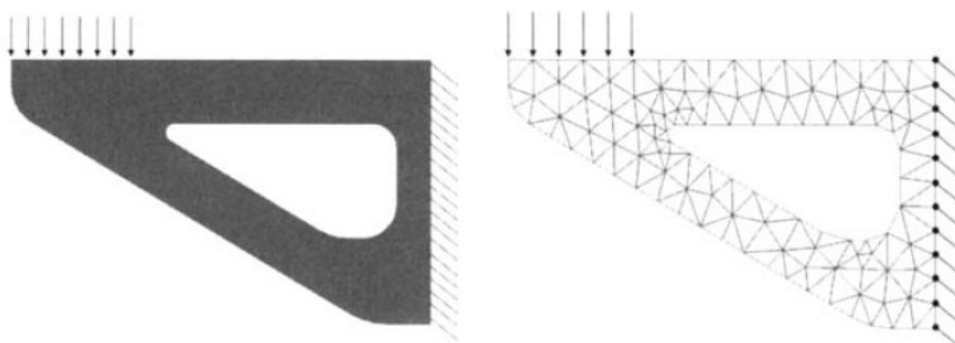
Rozdíl mezi dříve používanými metodami prototypování a dnes zažitému numerickému modelování pomocí výpočetních technologií, viz obrázek (obr. 21).



Obrázek 21 Rozdíly v návrzích dílu [17]

Jak je z předchozího porovnání patrné, moderní způsob návrhu součásti začíná s geometrickým návrhem dílu pomocí CAD modeláře, avšak samotná geometrie v prostředí CAD neudává veškeré údaje potřebné k provedení numerické analýzy. Těmi jsou například mezní podmínky, vazby či materiálové vlastnosti. Proto je nutné v rámci dalšího vyšetřování mechanických vlastností tento formát převést do prostředí FEM. V prostředí FEM jsme schopni vykonat na definovaném modelu numerickou analýzu-FEA. Metodu konečných prvků lze aplikovat na téměř jakýkoli typ analýzy a je tudíž pouze na programátorech, jaký typ metody v komerčním softwaru použijí. Mezi výpočtové moduly, které komerční softwary používají k řešení analýzy konečných prvků, patří kupříkladu Abaqus, Ansys, Nastran aj. [17] [18]

Základem metody konečných prvků je rozklad řešené oblasti na jednoduché podoblasti neboli konečné prvky. Proces nahrazování spojitého prostředí diskretními body, v angličtině označován jako *Meshing*, je běžně nazýván jako tvorba sítě. Tvorbu sítě využíváme pro zjednodušení polynomických funkcí, jimiž jsou vázány posuny jednotlivých bodů podoblastí. Pokud bychom chtěli popsat chování modelu v jednom kuse, byly by tyto funkce velice složité, což by značně zkomplikovalo výpočet. Použitá síť může být trojrozměrná, nebo dvojrozměrná podle použitého modelu. Jednotlivé části sítě jsou spojeny koncovými body podoblastí neboli uzly. Zjištěním velikosti posunutí/rotace jednotlivých uzlů, jež souvisí s minimální potenciální energií modelu, jsme schopni zjistit stav rovnováhy při aplikovaném zatížení. Výsledek stavu po zatížení úzce souvisí s použitými tvary a počtem jednotlivých elementů sítě. [17] [19]



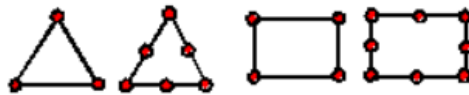
Obrázek 22 Rozdělení tělesa na konečný počet prvků [17]

5.1.1 Elementy a uzly sítě

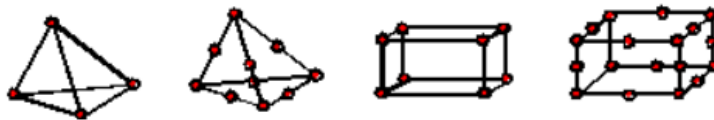
Elementy definujeme podle následujících parametrů.

- Čísla elementů – každému elementu je přiřazeno číslo, jež slouží k jeho identifikaci.
- Geometrie – tvary elementu se odlišují podle toho, zda se jedná o dvojrozměrnou či trojrozměrnou síť. U dvojrozměrné sítě mohou mít elementy podobu trojúhelníků nebo obdélníků. Pro 3D síť jsou charakteristické elementy v podobě různých čtyřstěnů, šestistěnů či kvádrů. [19]

Elementy 2D



Elementy 3D



Obrázek 23 Příklady geometrie elementů [19]

Uzly jsou souborem bodů v tělese, jež spojují elementy sítě. Jejich vlastnosti jsou dány následnými veličinami.

- Čísla uzlů – určují pořadí a lokaci ve vytvořené síti, lze zvolit libovolné číslování.
- Uzlové souřadnice – pro analýzu trojrozměrné sítě je každému uzlu přiřazena sada souřadnic (x_1, x_2, x_3) , jež určuje polohu od počátku souřadnicové soustavy. U dvojrozměrné sítě sada souřadnic sestává pouze ze dvou parametrů (x_1, x_2) . U rotačně symetrických modelů musí být souřadnice x_2 souměrná s osou symetrie.
- Posunutí – je počítáno modulem použitého softwaru při deformaci síťovaného tělesa. Během deformace se každý uzel přesune do nové polohy, která se určuje pomocí složek posunutí $u(x)$. Pro trojrozměrnou analýzu existují tři složky posunutí (u_1, u_2, u_3) , zatímco u dvojrozměrného jsou složky dvě (u_1, u_2) .
- Stupně volnosti – jedná se o počet všech neznámých veličin, včetně posunutí, v dílčích uzlech. [19]

5.1.2 Běžné vady sítě

Tvorba sítě bývá obtížný a často časově náročný proces. Síť lze nastavit automaticky, avšak po vykreslení elementů je doporučována její důkladná kontrola, jelikož může dojít ke vzniku chyb, které vedou k zavádějícím výsledkům numerické analýzy. Chyby vytvořeného FEM modelu jsou nejčastěji způsobeny nedostatečnou velikostí, počtem či špatnou volbou geometrie elementů. Stavba sítě, při které je použito elementů s nadměrnou velikostí, vede často k ignorování podrobností, převážně pak v rozích, záhybech a jinak složitě tvarovaných místech modelu. [17]

5.2 Postup analýzy konečných prvků

Při návrhu analýzy je nutné stanovit si cíle. Uživatel programu se musí v první řadě rozhodnout, o jaký typ analýzy se bude jednat a jakých výsledků chce dosáhnout. V neposlední řadě při stanovení cílů je nutné přizpůsobit rozhraní programu vybraným měrným systémům. Dalším postupem analýzy je tvorba geometrie a její převedení do formátu FEM. Tento postup, jak již bylo zmíněno, je doprovázen definováním sítě. Po vytvoření sítě konečných prvků analýza pokračuje níže uvedenými procesy. [17]

- Definování materiálových vlastností – většinou se jedná o automatické vybírání materiálu z materiálové nabídky softwaru. Pokud nabídka neobsahuje potřebný materiál, dochází k ručnímu připsování vlastností k entitám modelu, jimiž jsou kupříkladu hustota, Youngův modul, mez pevnosti apod. [17]
- Nastavení okrajových podmínek – okrajovými podmínkami jsou chápány velikosti a místa zatížení nebo vazby modelu. Mezi vazby modelu patří různá uchycení a podpěry, která omezují daný model nebo jeho část v pohybu. S těmito okrajovými podmínkami bývá často spojován výskyt chyb z důvodu nadbytečných vazeb. [17]

Poslední operací je samotný výpočet čili zjištění hledaného chování, například napětí, deformace apod. Jakmile je analýza provedena, dochází ke zhodnocení výsledků a následně buď k výrobě prototypu, nebo návratu na začátek analýzy, kde jsou provedeny potřebné úpravy. [17]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit a analyzovat numerický model vrstveného kompozitového profilu v podobě tvarované trubky. Veškeré operace byly provedeny prostřednictvím programu Siemens NX 12.

V první řadě byl vytvořen 3D model, který byl následně převeden do formátu FEM. V prostředí FEM modeláře byla nadefinována potřebná síť (mesh) a vrstvená struktura uhlíkového prepregu pomocí funkce Ply-based modeling čili metodou globální vrstvy.

K závěru byla vykonána analýza mechanického chování. Jedním z hlavních cílů bylo zjištění vlivu kladení jednotlivých vrstev a vlivu stříhů nanášené tkaniny na výsledné mechanické vlastnosti.

Definovaný díl byl součástí ortopedické pomůcky. Výsledné zatížení a okrajové podmínky, spojené s numerickým modelem, odpovídají reálným podmínkám dílu při uplatnění v praxi.

7 KONSTRUKCE KOMPOZITOVÉHO PROFILU

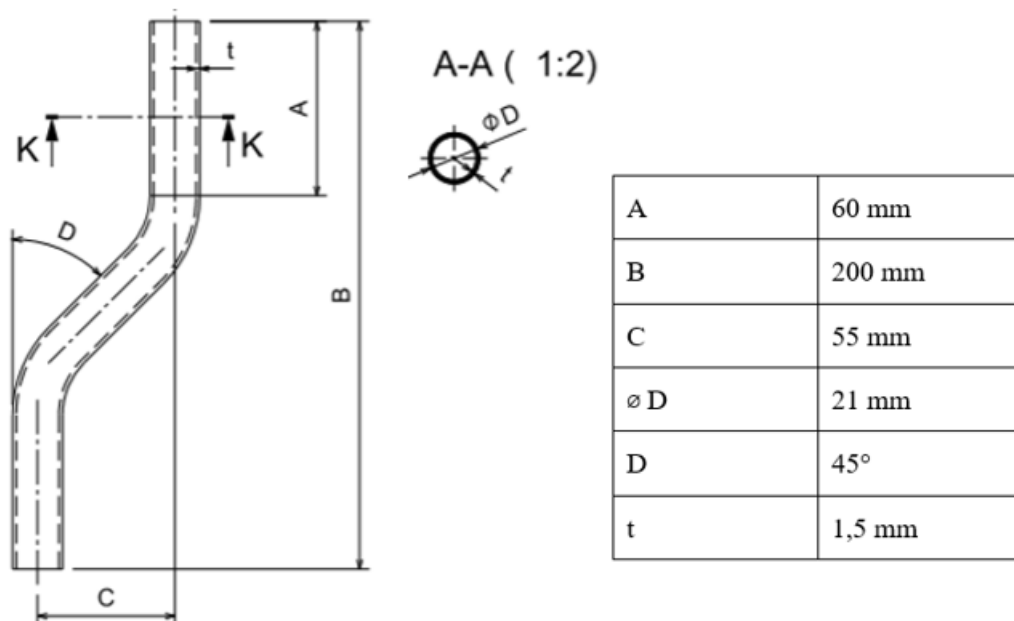
Pro konstrukci výrobku byl vybrán kompozitový materiál v podobě uhlíkového prepregu, tvořený tkaninou z uhlíkových vláken s plátňovou vazbou a matricí z epoxidové pryskyřice s označením L285. Materiál byl zvolen s ohledem na potřebu vysoké pevnosti, tuhosti a nízké hmotnosti. Tento laminát je tvořen z 12 vrstev o tloušťce 0,125 mm a jejich vzájemné natočení, které se výrazně projevuje na chování celého dílu, bylo podrobena analýze.

Tabulka 1 Parametry vyztužujících vláken a matrice

Materiál	Youngův modul [GPa]	Poissonova konstanta	Hustota [g/cm ³]	Pevnost v tahu [MPa]
Uhlíková vlákna	232	0,2	1,76	3000
Epoxid L285	3,3	0,33	1,2	70

Tabulka 2 Zastoupení výztuže a matrice v kompozitu

Materiál	Objemový podíl v kompozitu
Uhlíková vlákna	0,45
Epoxid L285	0,55



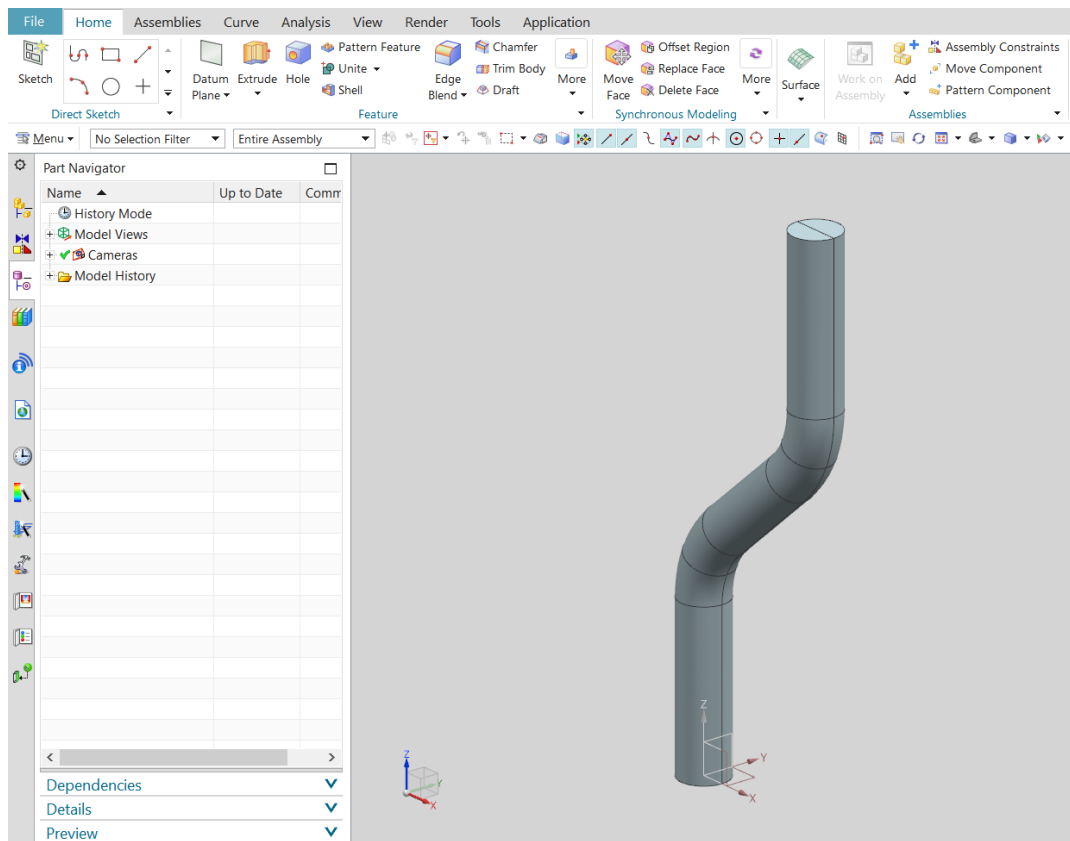
Obrázek 24 Náhled s rozměry kompozitového dílce

8 TVORBA 3D MODELU

Při tvorbě 3D modelu se vycházelo ze zadaného výkresu (Obr. 24, str. 48) a bylo využito prostředí modeláře programu NX 12.

Po zobrazení domovské stránky programu byl vytvořen nový model v podobě formátu s příponou *PRT*. Samotný postup při modelování je obdobný pro ostatní rozšířené CAD programy, se kterými se můžeme v praxi běžně setkat.

Konstrukce modelu samotného těla se skládá ze dvou skic. Jednu z nich tvoří boční profil středové osy zadaného dílu, na jehož začátku se nachází kolmo skica druhá v podobě kružnice o velikosti vnitřního průměru dílu. Za pomoci funkce *Sweep*, tedy tažením po křivce, bylo možné vést kružnici po profilu středové osy a tím vytvořit 3D objekt. Dalším krokem bylo podélné rozdělení trojrozměrného tělesa na dvě části pomocí funkce *Split Body*, za účelem vytvoření pomyslných hran. Zobrazené hrany sloužily později při tvorbě *FEM* modelu k umístění stříhů kladené tkaniny. Takto formulovaný model není ve tvaru trubky, nicméně slouží jako šablona, na jejíž povrch se později v prostředí *FEM* modeláře nanášejí jednotlivé vrstvy kompozitního materiálu, čímž se dosáhne výsledného profilu trubky o potřebné tloušťce stěny.

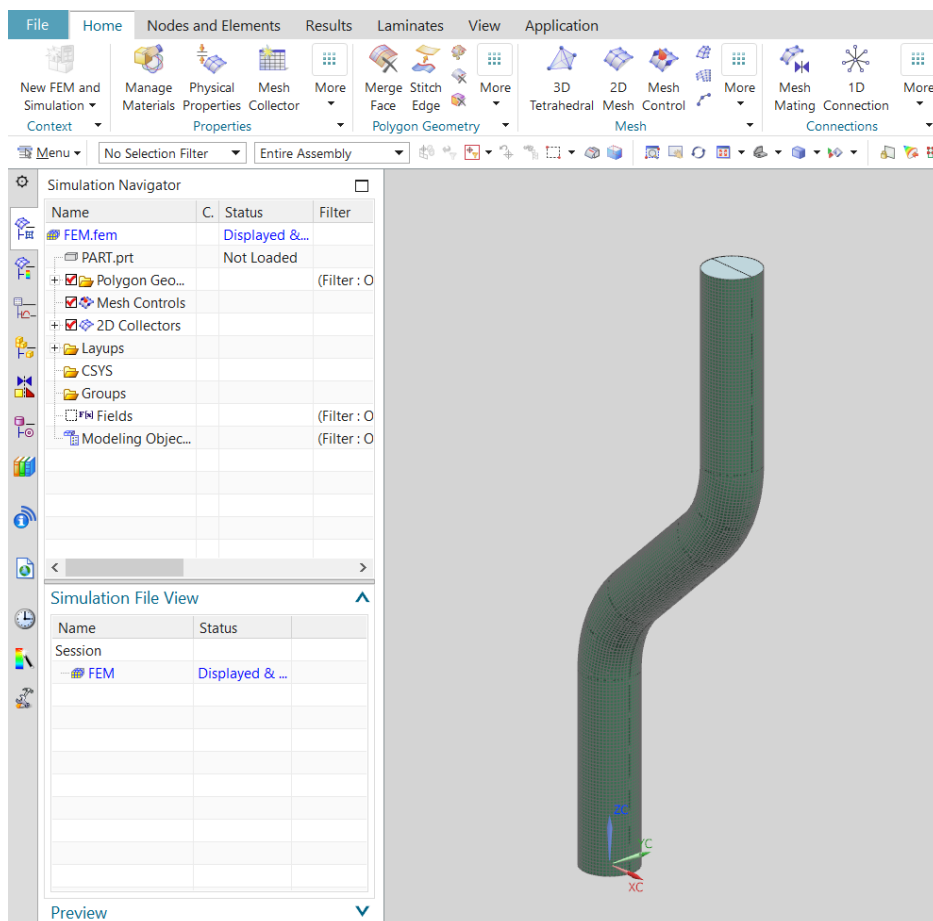


Obrázek 25 Prostředí 3D modelu v programu NX 12

9 NÁVRH FEM MODELU V PROGRAMU SIEMENS NX 12

Zatímco předchozí 3D model (Obr. 25, str. 49) dává uživateli programu představu o tvaru a rozměrech součásti, v prostředí modeláře FEM (Finite element method) dochází k nadefinování sítě s konečným počtem prvků, resp. uzlových bodů a materiálovým vlastnostem. Pomocí této sítě jsme schopni dosáhnout simulace napěťových stavů, deformace a dalších specifík mechanického chování.

Po otevření modelu v prostředí *FEM* byla vytvořena vhodná 2D síť. Dále došlo k definici matrice a výztuže do materiálového inventáře, po čemž následovalo zadání laminátového kompozitu typu *woven* neboli tkanina. K nastavení počtů vrstev, jejich vzájemné orientace a tloušťky, bylo využito funkce *Ply-based modeling*. Zmíněná metoda je hojně používána pro svoji schopnost detailního definování vrstev kompozitu na zakřiveném povrchu a možnost vyhledat místa s vysokou pravděpodobností vzniku trhlin tkaniny v jednotlivých vrstvách. Výše uvedeným postupem končí proces definice kompozitu a následuje kladení materiálu na povrch dílu, kdy program automaticky vypočítá fyzikální vlastnosti na základě definic vrstvy.

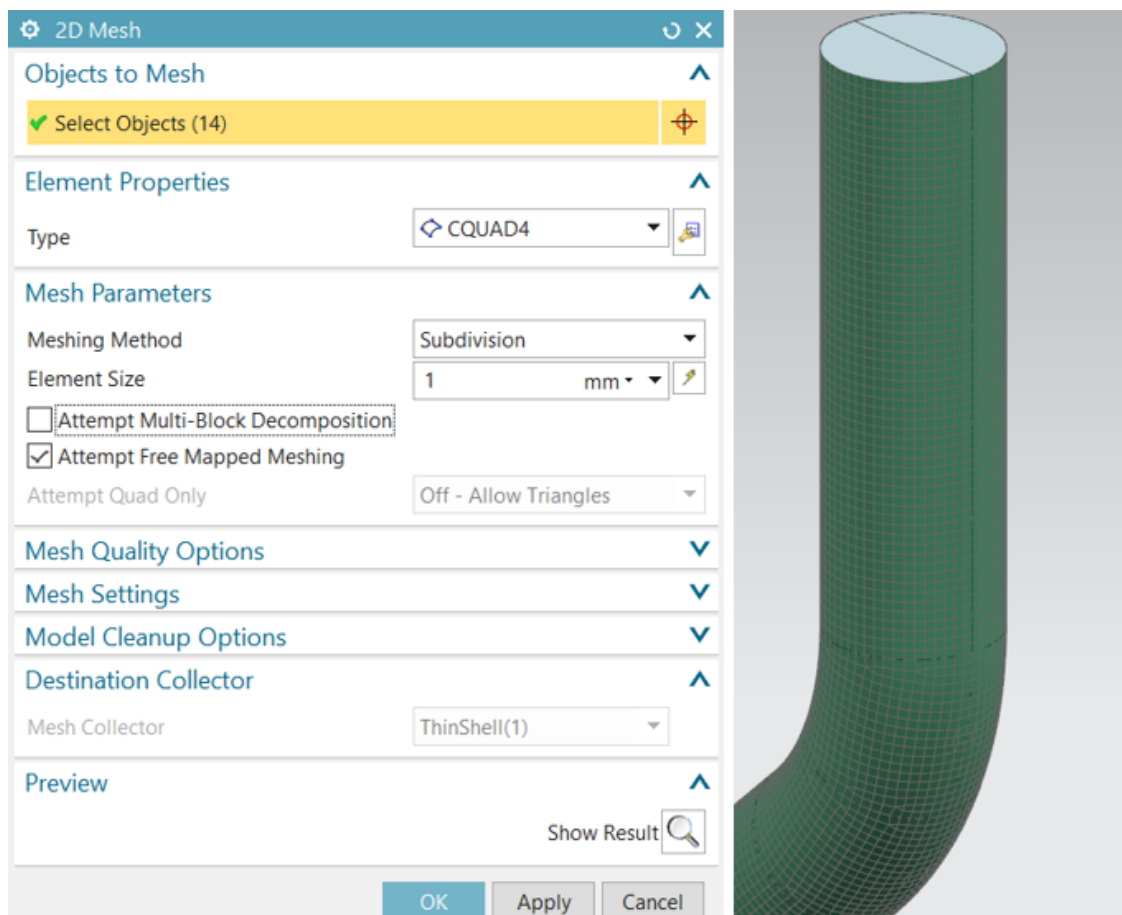


Obrázek 26 Prostředí FEM modelu v programu NX 12

9.1 Tvorba sítě

Síť rozděluje těleso na konečný počet prvků. Určujícím faktorem těchto prvků je jejich velikost, počet uzlů a tvar. Uzly vzniklé sítě se stávají místem, ve kterém zjišťujeme během simulace neznámé chování tělesa, resp. posunutí, natočení apod.

Během této práce byla tvorba 2D sítě první operací v prostředí FEM a k jejímu nastavení byly vybrány čtyřúhelníkové prvky CQUAD4 o velikosti 1 mm. Tato velikost byla zvolena s ohledem na vysokou přesnost výpočtu, ovšem za cenu výpočetní doby trvání. Po pečlivém zkoušení byla síť vyhodnocena jako dostatečně přesná, jelikož u menších elementů nedocházelo k významným rozdílům ve výsledcích.



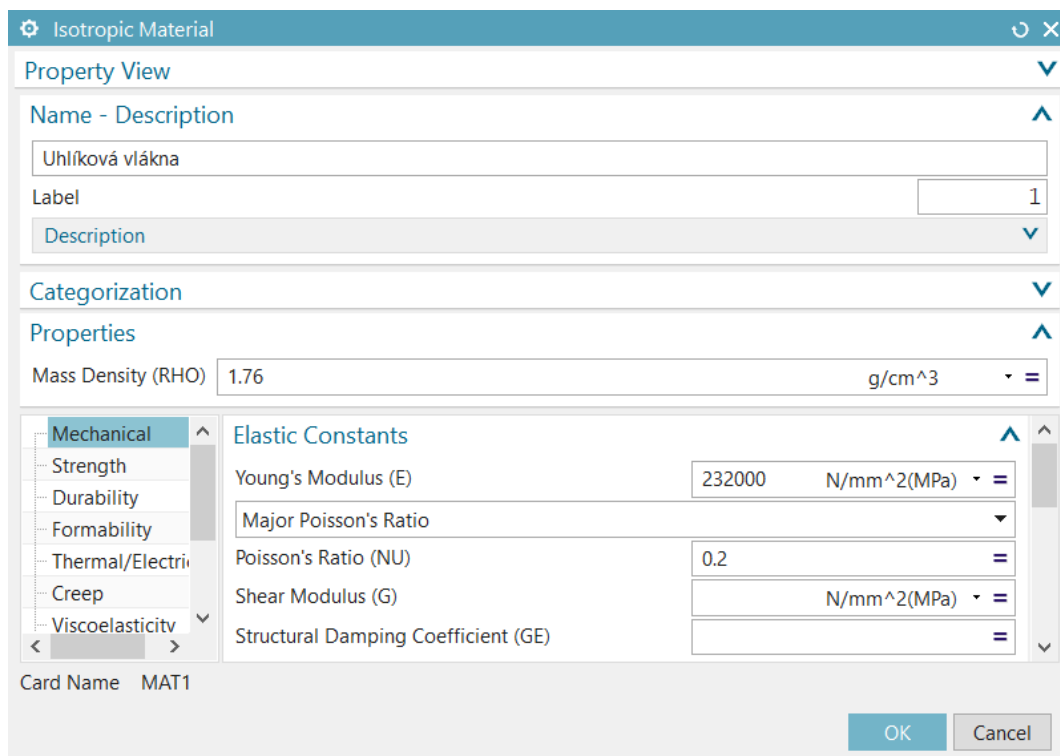
Obrázek 27 Tvorba 2D sítě

Jak je patrné z obrázku (Obr. 27), zelené pole vyplněné vysokým počtem malých čtyřúhelníků signalizuje zdárné vytvoření sítě. Lze si také všimnout šedého prostoru na horní části dílce, kde se struktura sítě nevytvořila, což znamená, že kladený materiál nebude na čelech součásti.

9.2 Nastavení materiálu

Zvolený materiál, uhlíkový prepreg, se skládá z epoxidové matrice a výztuže z uhlíkové tkaniny. Vlastnosti samostatných materiálů, tvořící kompozit, jsou uvedeny na str. 49 (Tab. 1), dále pak objemový podíl matrice a výztuže (Tab. 2).

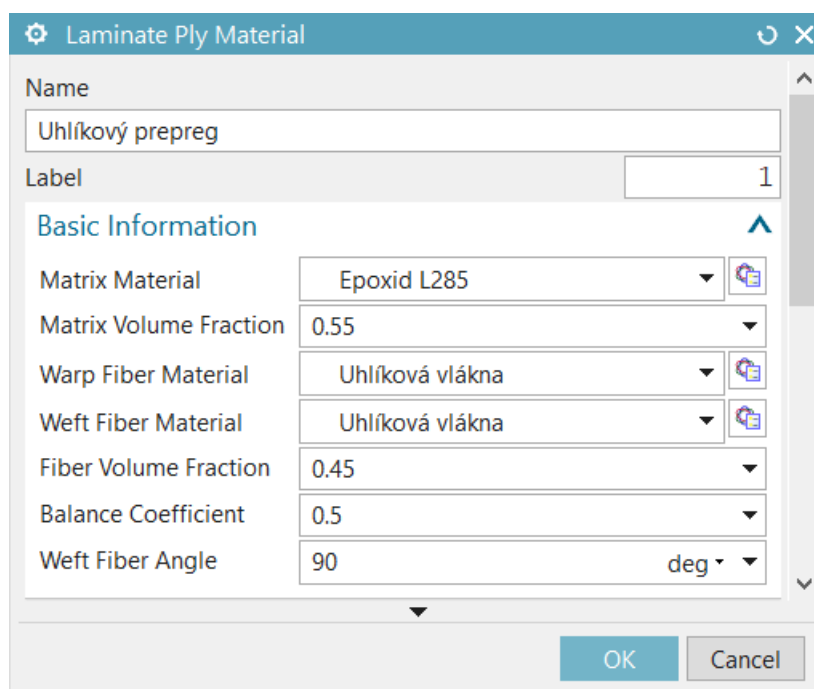
Pro definování kompozitu v programu Siemens NX12 se nejprve nastaví vlastnosti jednotlivých materiálů, výztuže i matrice. Tyto vlastnosti se vypisují do tabulky v podobě hustoty materiálu, Youngova modulu a Poissonovy konstanty (Obr. 28).



Obrázek 28 Nastavení vlastností uhlíkových vláken

Pro demonstraci postupu (Obr. 28) byla zvolena pouze výztuž, tedy uhlíková vlákna. Postup pro formulování matrice je stejný, pouze s rozdílem ve vyplněných hodnotách.

Dalším krokem k dosažení kompozitního materiálu je spojení již nadefinované matrice a výztuže pomocí funkce *Laminate Ply Material Manager*, nacházející se v záložce *Laminates*. Po otevření nabídky zmíněné funkce se vybere možnost nastavení typu *woven*, tedy tkaniny. Do tabulky se dále uvádí objemový podíl složek matrice, výztuže a materiál útky a osnovy. U konkrétního modelu jsou materiálem útky a osnovy, v obou případech uhlíková vlákna.



Laminate Ply Material

Name: Uhlíkový prepreg

Label: 1

Basic Information

Matrix Material: Epoxid L285

Matrix Volume Fraction: 0.55

Warp Fiber Material: Uhlíková vlákna

Weft Fiber Material: Uhlíková vlákna

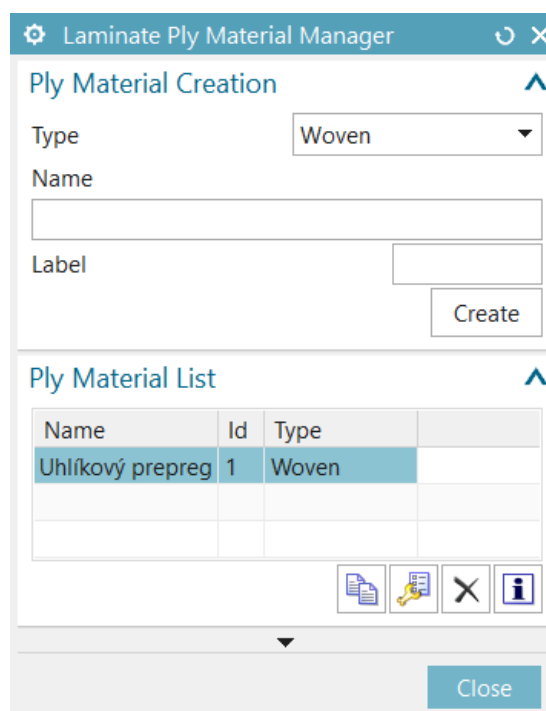
Fiber Volume Fraction: 0.45

Balance Coefficient: 0.5

Weft Fiber Angle: 90 deg

OK Cancel

Obrázek 29 Tvorba laminátu typu woven



Laminate Ply Material Manager

Ply Material Creation

Type: Woven

Name:

Label:

Create

Ply Material List

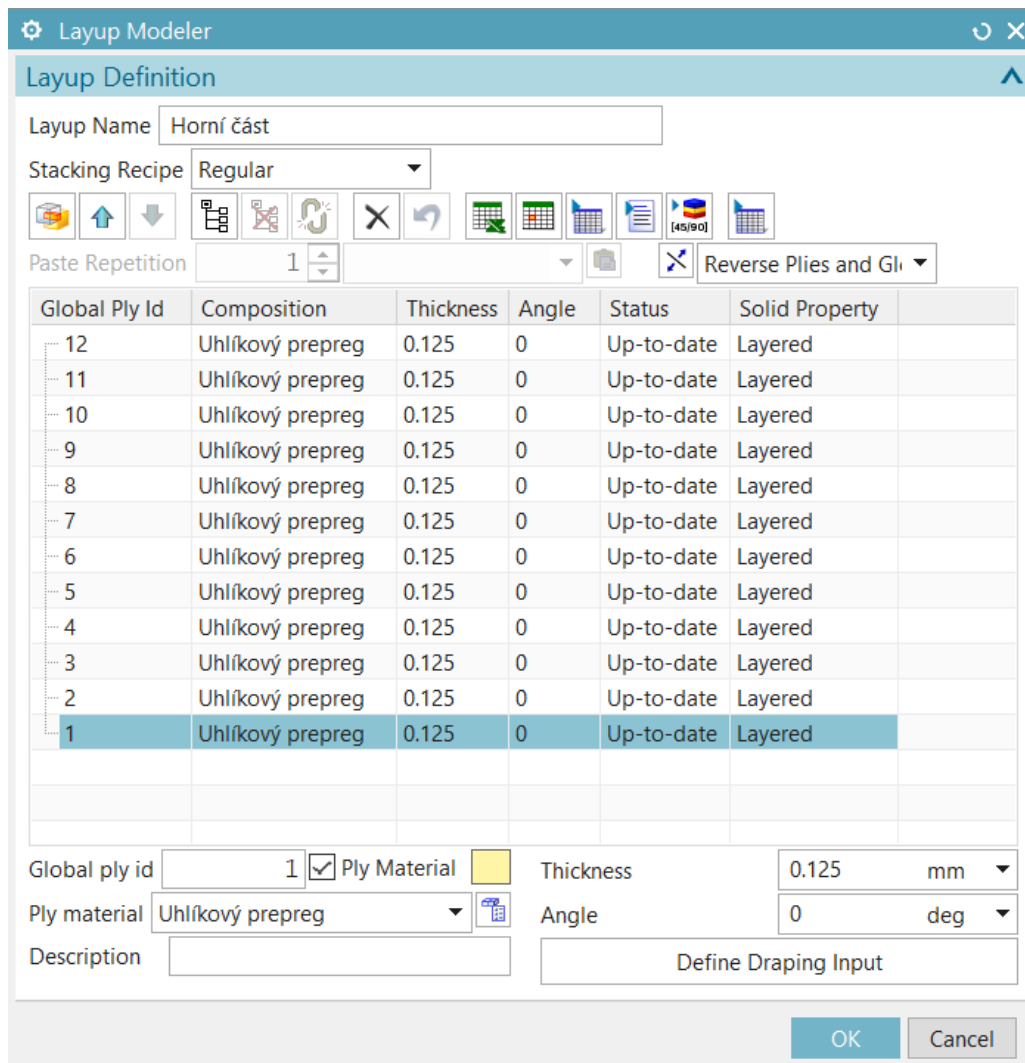
Name	Id	Type
Uhlíkový prepreg	1	Woven

Close

Obrázek 30 Inventář vytvořených laminátů

9.3 Tvorba kompozitové struktury

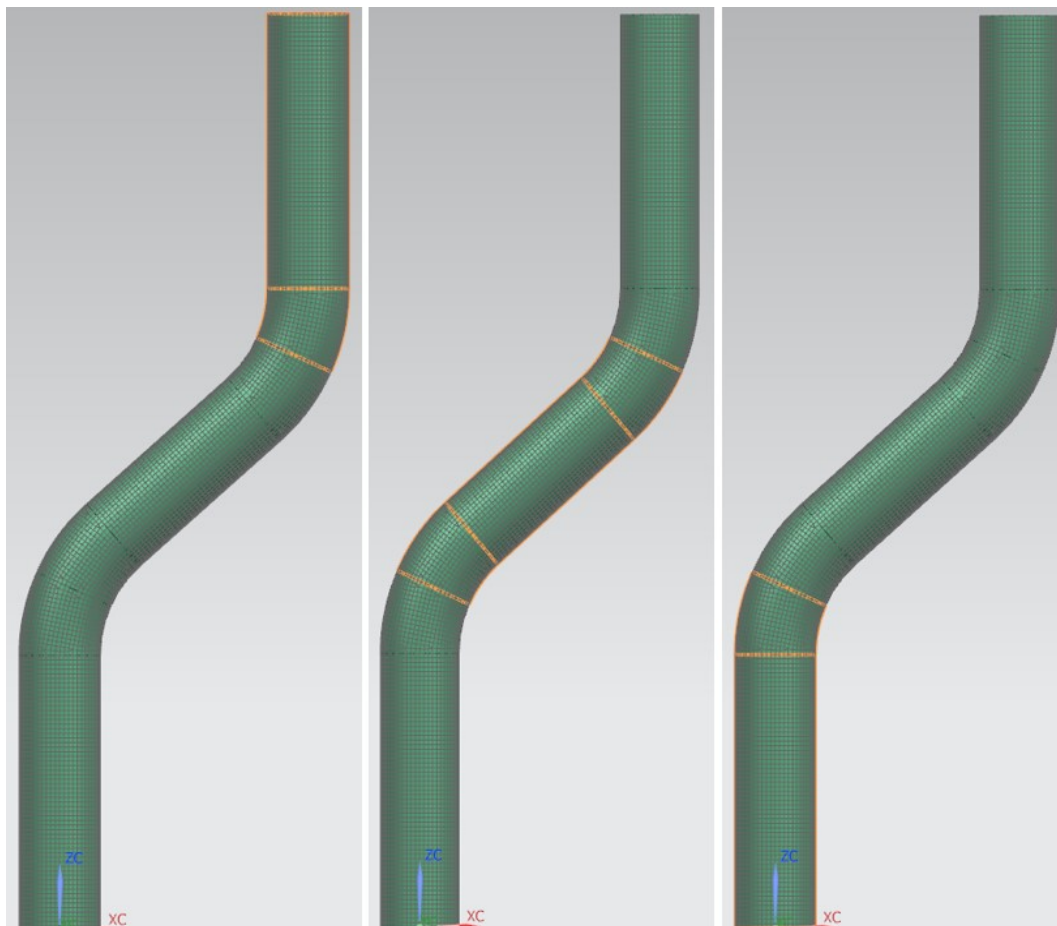
Jakmile je zkoumaný prepreg připraven v inventáři laminátových materiálů, přesouvá se proces k funkci *Global Layup*, tzn. definice globální vrstvy. Tento krok spočívá v nastavení počtu vrstev kladeného laminátu, úhlu natočení jednotlivých vrstev a tloušťky samostatné vrstvy (Obr. 31).



Obrázek 31 Nastavení kompozitové struktury

Pro zvolený materiál bylo nastaveno 12 vrstev uhlíkového prepregu o tloušťce 0,125 mm. V kolonce *Angle* lze nastavit úhel, pod kterým jsou jednotlivé vrstvy kladeny. Po provedení této operace se vybírá model, resp. část modelu, na který bude struktura kompozitu nanášena, a zároveň počáteční bod a směr kladení vrstev. Tyto kroky se provádí pomocí příkazu *Define Draping Input* (Obr. 31).

Během nanášení vrstev se složitý tvar dílu stává určitou překážkou. Při pokusech o kladení laminátu v celku docházelo k četným vznikům trhlin a velkému zkosení mezi vlákny útku a osnovy. Při výrobě a použití v reálných podmínkách by nebylo možné dosáhnout daného tvaru. Proto se celý model rozdělil na tři části, které umožnily souvislé napojení prepregu bez vzniku závažných poruch. Konkrétně byl model rozdělen na horní část, střední část a dolní část (Obr. 32).

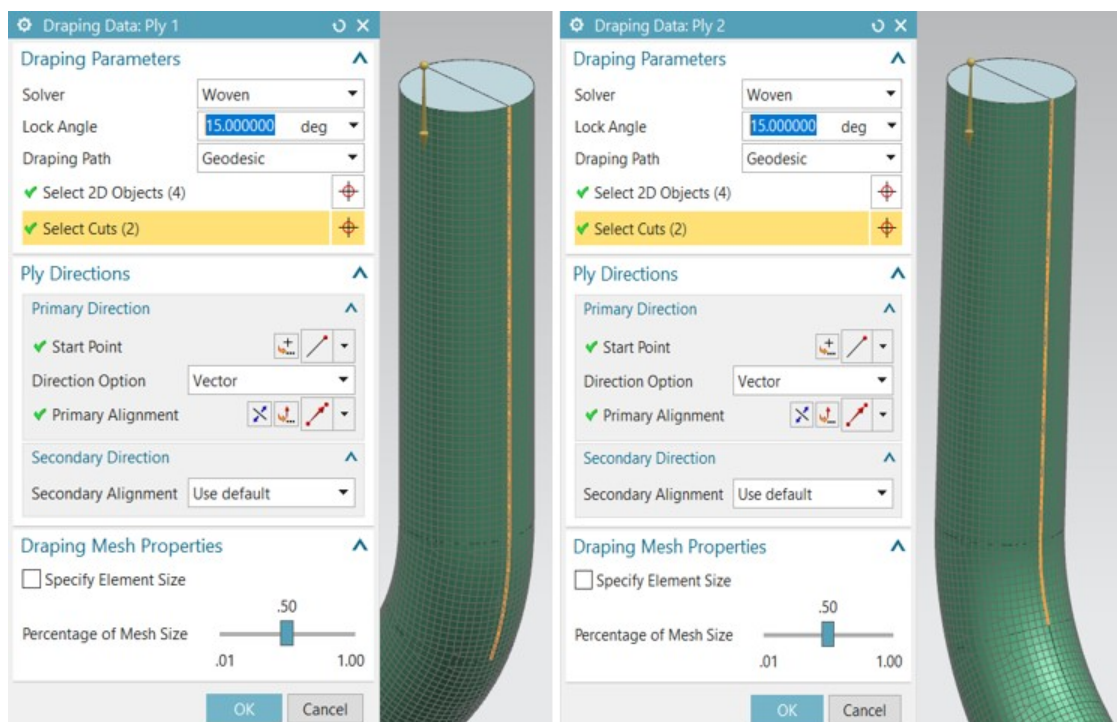


Obrázek 32 Rozdělení modelu na tři části

Jednotlivé úseky modelu, na kterých je kompozitová struktura kladena, jsou ohraničeny oranžovou barvou, viz obrázek (Obr. 32). Pro každý úsek je vybrán počáteční bod, ze kterého je laminát kladen, a vektor udávající směr kladení vrstev. Specifickou součástí tvorby vrstveného kompozitu je umístování stříhů na jednotlivé vrstvy, které snižují počet míst s velkým zkosením a omezují tvorbu trhlin. S vadami, jako jsou trhliny, zvlnění povrchu nebo nebezpečné pnutí mezi vlákny, se potýkají převážně výrobky skládající se ze složitých tvarových ploch, např. rotačně symetrické plochy apod.

9.3.1 Variace stříhů

Během pokusů o nalezení vhodné struktury s nejlepšími mechanickými vlastnostmi byl porovnán vliv stříhů ve dvou variantách. První varianta kompozitní struktury se skládala z vrstev se střídavými stříhy, zatímco druhá struktura obsahovala vrstvy, kde byl řez umístěný vždy ve stejném místě. Řez byl umístěn tak, aby se počáteční bod, ze kterého je kompozit nanášen, nacházel vždy na protější straně a tím snížil pnutí v nejrizikovější zóně modelu.



Obrázek 33 Variace stříhů horní části modelu

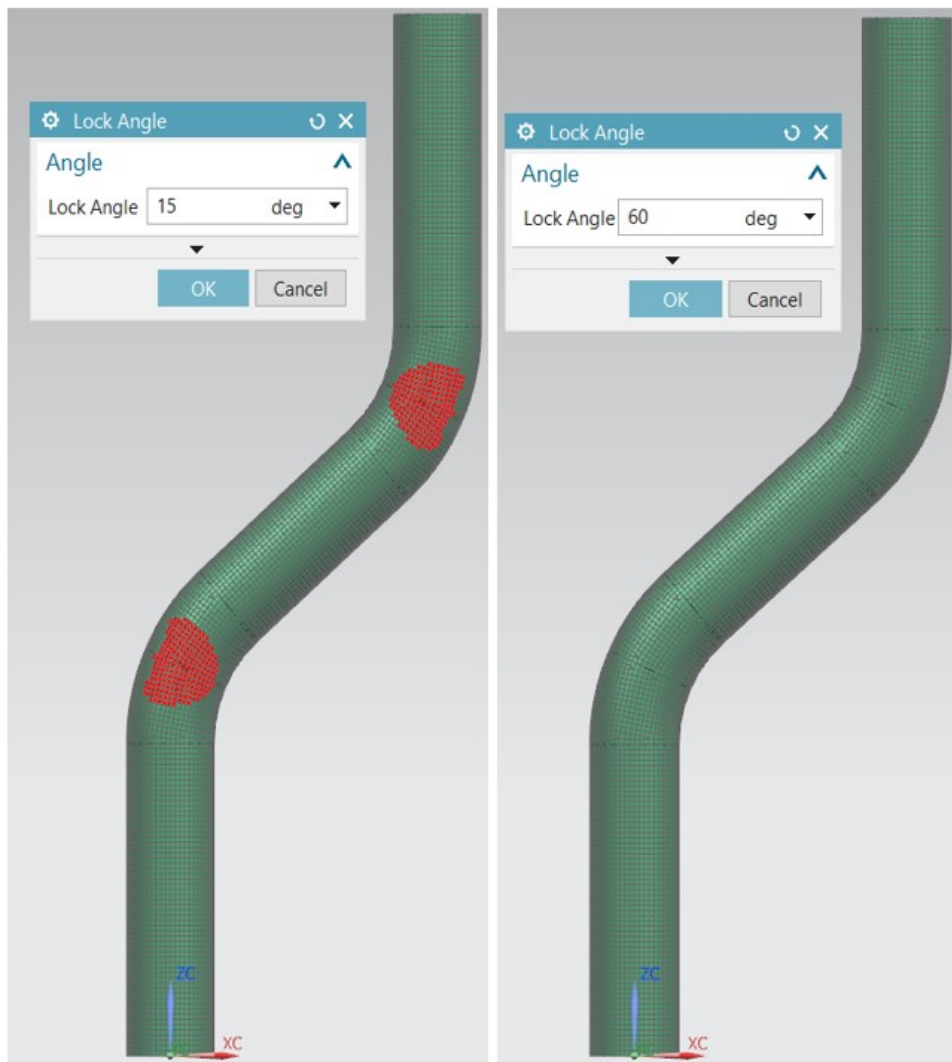
Na obrázku (Obr. 33) je patrné symetrické umístění řezů na podélné hraně modelu. V levé části obrázku je zobrazena vrstva č.1, zatímco v pravé části vrstva č.2. Tímto způsobem se u struktury se střídavými stříhy obměňuje umístění až do konečné vnější vrstvy. U struktury se stálými stříhy má každá z 12 vrstev umístěný řez tak, jak je tomu na levé části obrázku a nachází se na shodném místě po celé tloušťce stěny. Jak je demonstrováno na horní části, stejně tak jsou stříhy umístěny i na zbylých dvou spodních úsecích celého dílu.

9.3.2 Problematická místa kladených vrstev

Oblastem, ve kterých dochází k většímu pnutí mezi vlákny útky a osnovy, lze obtížně předcházet, jelikož vznikají ve složitých záhybech modelu. Zkosení mezi vlákny útku a osnovy by nemělo být větší než 60° , jelikož by mohlo dojít v daném místě ke vzniku

zvlnění, nebo trhlin. Pomocí funkce určené pro nalezení problematických míst, s názvem *View Fiber orientation*, lze zjistit, zda není ve složitých částech modelu úhel zkosení za limitem a tím předejít závadám a zkresleným výsledkům.

V továrním nastavení programu NX12 je kritický úhel zkosení přednastaven na 15°, což vyvolá vykreslení červených míst, ve kterých je překročeno zkosení útkových a osnovních vláken. Pokud úhel předdefinujeme na 60°, pak by červená místa na modelu neměla být přítomna.



Obrázek 34 Kontrola problematických míst

Z obrázku (obr. 34) je patrné, že výskyt míst, kde dochází k většímu zkosení, se týká především ohybů, kde je tkanina zdeformována nejvíce.

9.4 Úhly kladených vrstev

Byly vytvořeny dva druhy analýzy pro struktury s:

- proměnnou orientací vrstev;
- stálou orientací vrstev.

Do obou těchto skupin byla zahrnuta prvotní skladba s úhlem natočení 0° , u které je každá z vrstev orientována ve směru zatížení a svůj směr nemění. Skladba vrstev s tímto úhlem sloužila jako společný referenční bod pro porovnání obou skupin.

9.4.1 Proměnná orientace vrstev

Nejprve byla provedena analýza pro 5 různých skladeb prepregu, které měly úhly natočení mezi vrstvami: 0° , $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° . Počáteční úhel první vrstvy byl vždy 0° a jednotlivé vrstvy se skládaly tak, aby se o zadaný úhel vůči sobě natáčely až do finální úrovně. Příklad kladení vrstev pod úhlem 15° pro strukturu s proměnnou orientací vrstev je znázorněn na obrázku (Obr.35).

Global Pl...	Composition	Thickness	Angle
12	Uhlíkový prepreg	0.125	165
11	Uhlíkový prepreg	0.125	150
10	Uhlíkový prepreg	0.125	135
9	Uhlíkový prepreg	0.125	120
8	Uhlíkový prepreg	0.125	105
7	Uhlíkový prepreg	0.125	90
6	Uhlíkový prepreg	0.125	75
5	Uhlíkový prepreg	0.125	60
4	Uhlíkový prepreg	0.125	45
3	Uhlíkový prepreg	0.125	30
2	Uhlíkový prepreg	0.125	15
1	Uhlíkový prepreg	0.125	0

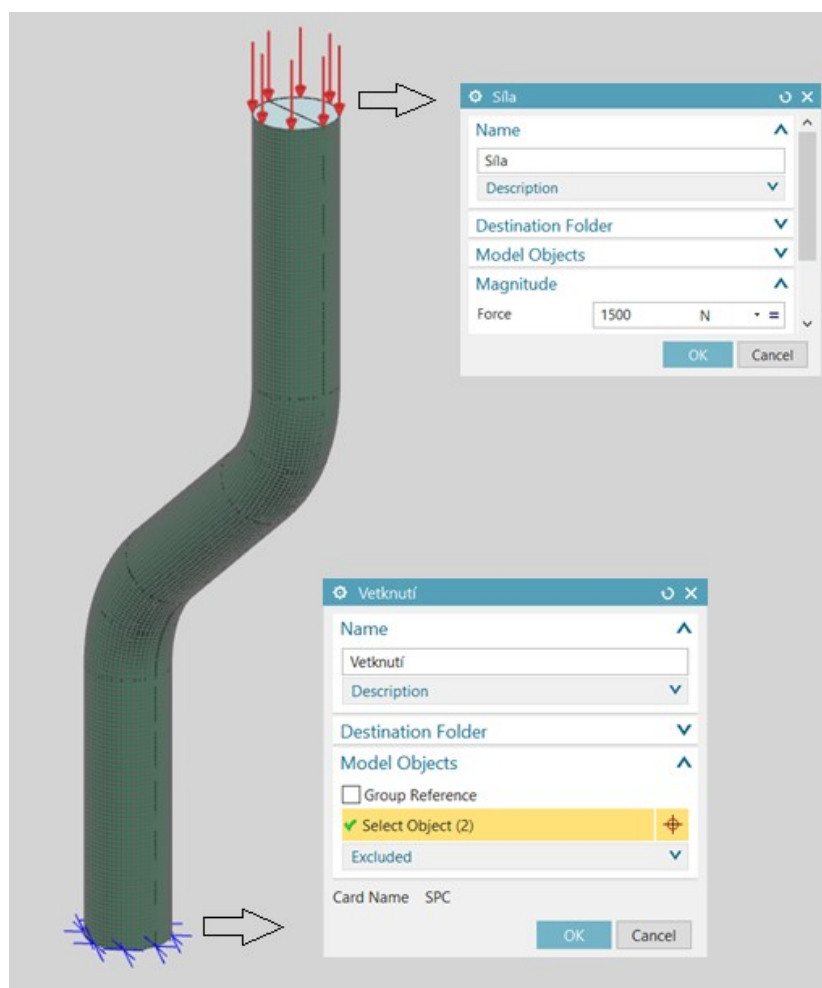
Obrázek 35 Skladba prepregu s úhlem natočení 15° mezi vrstvami

9.4.2 Stálá orientace vrstev

Dále byla provedena analýza na takovém složení, kdy úhel od první vrstvy nevzrůstal, tzn. každá vrstva měla stejný úhel natočení po celé tloušťce stěny. Bylo vytvořeno 5 struktur a globální úhly natočení těchto vrstev byly taktéž: 0° , $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° .

9.5 Zatížení a okrajové podmínky

Před zahájením samotné simulace je třeba nadefinovat okrajové podmínky, které zahrnují uchycení a zatížení modelu. Tyto podmínky byly navrženy tak, aby odpovídaly předpokladu reálné situace při použití. Zkoumaná součástka ortopedické pomůcky je v reálných podmínkách pevně uchycena v dolní části a namáhána svislou silou v horní části dílu. Velikost zatížení byla stanovena na 1500 N a typ uchycení nastaven jako úplné vetknutí, viz obrázek (Obr. 36).



Obrázek 36 Uchycený a zatížený model

Takto nachystaný model bude dále podroben simulaci, jejíž výsledkem bude lineární deformace, resp. posunutí ve svislém směru osy Z, tvarová stabilita a maximální napětí v nejméně namáhané vrstvě prepregu.

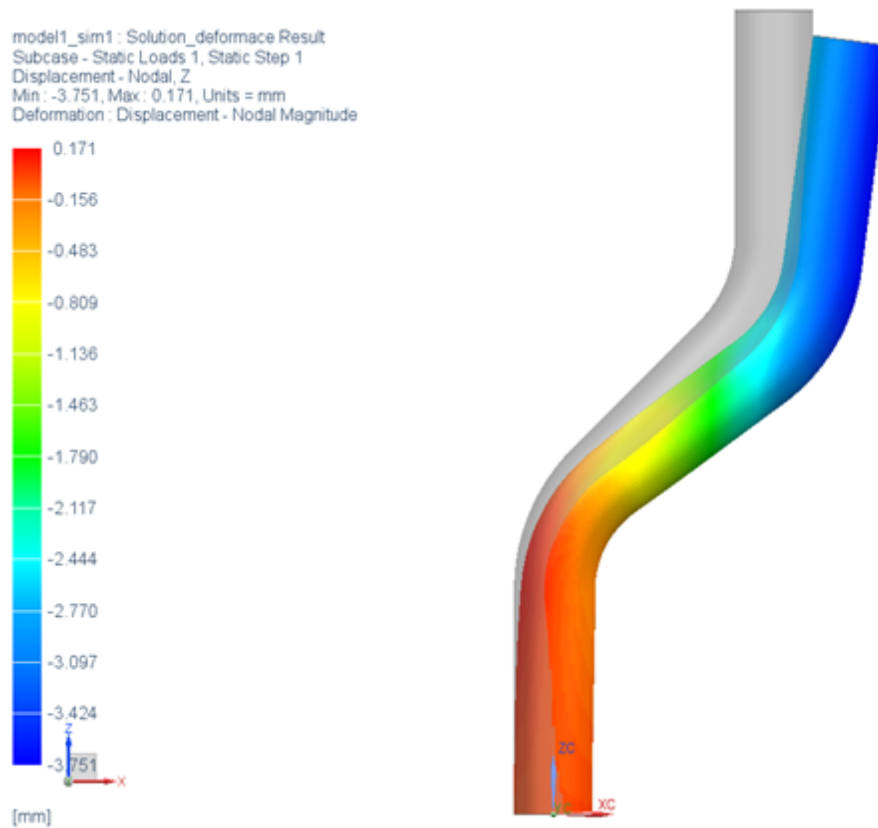
10 VÝSLEDKY

Připravený FEM model s nadefinovanou strukturou a okrajovými podmínkami byl v prostředí Simulation podroben analýze. Výpočet byl proveden pomocí řešiče NX Nastran a výsledky zahrnovaly deformaci, napětí ve vrstvách laminátu a tvarovou stabilitu. Analýza byla provedena na modelech s rozdílnými strukturami lišícími se skládáním vrstev s různými úhly natočení. Dále byl porovnán vliv střídavých a stálých stříhů tkaniny na výsledné chování. Záměrem této analýzy bylo nalézt takovou strukturu vrstveného kompozitu, která by nejvíce vyhovovala požadovaným vlastnostem. Výsledná struktura s nejvyšší tuhostí a optimální tvarovou stabilitou by byla vyhodnocena jako nejvýhodnější k výrobě a použití.

10.1 Deformace

Při analýze bylo měřeno svislé posunutí od zatěžující síly 1500 N, díky čemuž byl dále zjišťován vliv orientace jednotlivých vrstev a vliv různých stříhů na celkovou tuhost soustavy. Způsob deformace byl ve všech případech totožný, pouze s rozdílem v naměřených hodnotách.

Na obrázku (Obr. 37, str. 61) si lze všimnout zmíněného posunutí, vyvolaného svislou silou. Barevné spektrum v levém dolním rohu obrázku znázorňuje stupnici posunutí, jež odkazuje na místa modelu, kterých se zmíněné hodnoty týkají. Jak je z obrázku patrné, v horní části modelu dosahuje maximální svislé posunutí hodnoty 3,75 mm. Tato maximální hodnota je orientována ve směru působící síly, tedy v záporném směru osy Z.



Obrázek 37 Náhled výsledku simulace pro svislé posunutí

10.1.1 Proměnná orientace vrstev

Uvedené výsledky se týkají modelu, jehož vrstvy jsou kladeny tak, aby každá jednotlivá vrstva byla pootočená vůči té předchozí o určitý úhel uvedený v tabulce. Na prvním řádku tabulky (Tab.3) je uveden referenční úhel 0° . Vrstvy této struktury mají v celé tloušťce stěny stejnou orientaci s nulovým natočením.

Výsledky maximálního posunutí ve svislém směru pro strukturu s proměnlivou orientací vrstev lze vidět v tabulce (Tab. 3).

Tabulka 3 Posunutí: proměnná orientace vrstev

Úhel kladených vrstev [°]	Maximální svislé posunutí [mm]
0	3,741
7,5	4,289
15	4,284
30	4,262
45	4,254

10.1.2 Stálá orientace vrstev

Znázorněné výsledky se týkají modelu, kde jednotlivé vrstvy tkaniny svírají po celé tloušťce stěny stejný úhel. První řádek začíná referenčním úhlem kladení 0° , který je stejný pro obě vyšetřované skupiny struktur. Výsledky maximálního posunutí ve svislém směru pro strukturu se stálou orientací vrstev lze nalézt v tabulce (Tab. 4).

Tabulka 4 Posunutí: stálá orientace vrstev

Úhel kladených vrstev [°]	Maximální svislé posunutí [mm]
0	3,741
7,5	4,899
15	6,995
30	12,180
45	15,040

10.1.3 Vliv stříhů na posunutí

Díl podrobený této analýze se skládá z 12 vrstev, na kterých jsou umístěny stříhy buď stálé, nebo střídavé. Stálé stříhy jsou situovány vždy na stejném místě po celé tloušťce stěny modelu, zatímco střídavé stříhy mění s každou vrstvou svou pozici (Tab. 5). Měření bylo provedeno pouze na strukturách s proměnnou orientací vrstev.

Tabulka 5 Vliv stříhů na posunutí

Úhel kladených vrstev [°]	Maximální svislé posunutí [mm]	
	Střídavé stříhy	Stálé stříhy
0	3,751	3,741
7,5	4,273	4,289
15	4,257	4,284
30	4,263	4,262
45	4,254	4,254

10.1.4 Shrnutí výsledků posunutí

Výsledky uvedené v tabulkách (Tab. 3-5) poskytují ucelený pohled na chování různých struktur kompozitového výrobku. Jako první si lze všimnout, že nejlepších výsledků dosáhla skupina s proměnnou orientací vrstev, nehledě na jednotlivé úhly natočení. Naproti tomu, nejvyšší míru odolnosti vzhledem k deformaci zaujala struktura tvořená shodnou orientací vrstev s úhlem natočení 0° . Tento jev byl s vysokou pravděpodobností způsoben tím, že jednotlivé vrstvy mají identickou orientaci se zatěžující silou, což způsobilo vysokou tuhost ve směru zatížení.

Při zkoumání vlastností vrstev se stálou orientací je patrný vzrůstající trend posunutí v závislosti na zvětšujícím se úhlu (Graf 1). Z takovéto závislosti vyplývá, že při odchylování všech vrstev od vertikální polohy, dochází ke snižování tuhosti ve směru zatížení.

Graf 1 Zobrazení chování struktur se stálou orientací vrstev

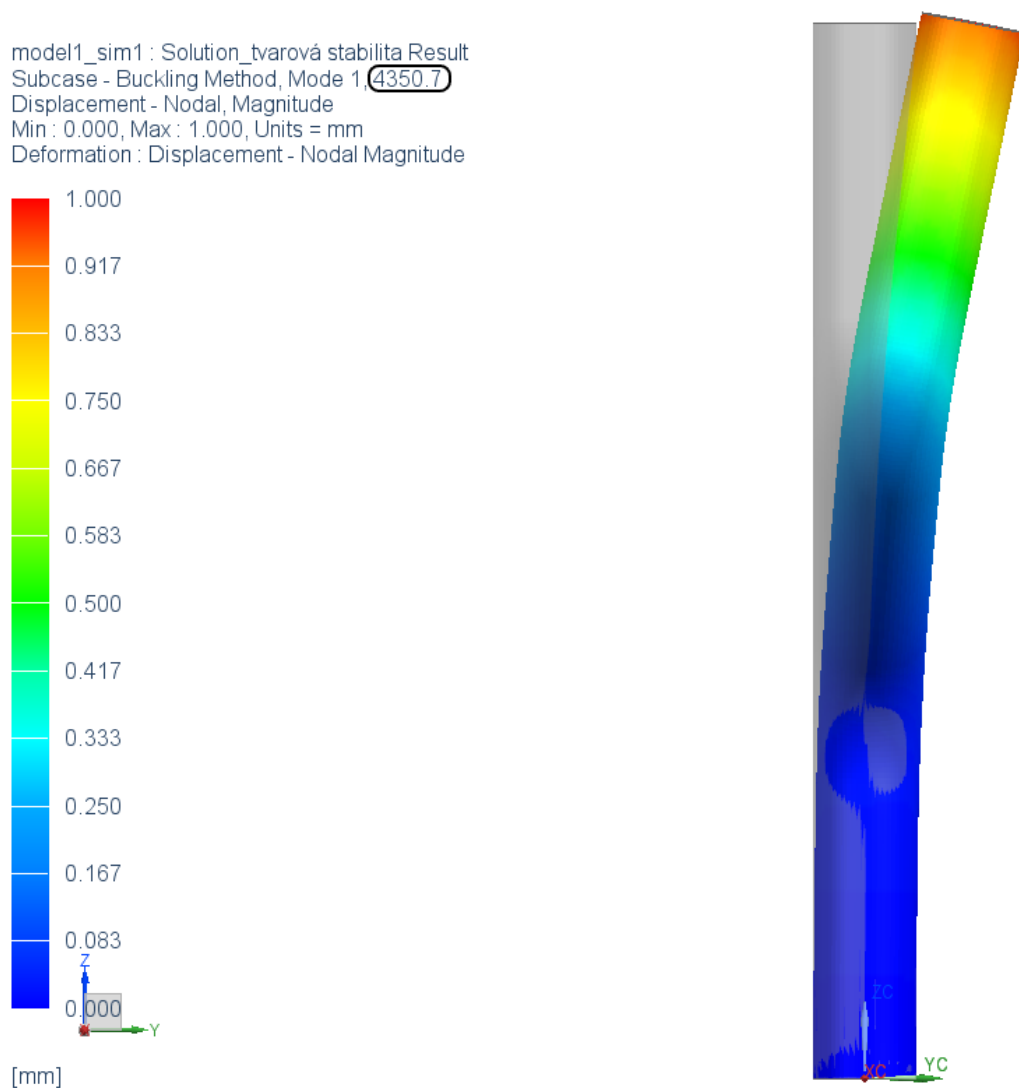


Výsledné hodnoty posunutí pro vliv stříhů nedosáhly výrazných rozdílů. O tom, zdali je výhodnější použití stříhů střídavých, či stálých, by v praxi rozhodovala náročnost výroby a ekonomický pohled na věc. Nicméně o důležitosti stříhů při výrobě vrstvených kompozitů není pochyb, jelikož zmenšují zkosení mezi vlákny útku a osnovy a zamezují vzniku trhlin tkaniny.

10.2 Tvarová stabilita

Zkouška tvarové stability byla provedena na stejných strukturách, jak tomu bylo během předchozích simulací u svislého posunutí. Informace, které tato zkouška poskytla, udávají odolnost daného výrobku vůči trvalé ztrátě původního tvaru, resp. zborcení.

Na obrázku (Obr. 38) lze vidět výsledek analýzy tvarové stability (anglicky *Buckling Method*). Konečná hodnota kritické síly pro tvarovou stabilitu (Obr. 38) je uvedena na druhém řádku. Z grafického zobrazení je patrné, že při zatížení kritickou silou, dojde k bočnímu vychýlení a tvarovému zborcení.



Obrázek 38 Grafické znázornění výsledku tvarové stability

10.2.1 Vliv orientace vrstev na tvarovou stabilitu

Struktury odpovídají stejným vlastnostem jako u předchozí simulace pro posunutí. Grafické zobrazení průběhu simulace je ve všech případech shodné, ovšem s rozdílnými výsledky analýzy.

Výsledky vlivu orientace vrstev na tvarovou stabilitu lze nalézt v tabulce (Tab. 6).

Tabulka 6 Tvarová stabilita: vliv orientace vrstev

Úhel kladených vrstev [°]	Kritická síla [N]	
	Proměnná orientace vrstev	Stálá orientace vrstev
0	4283,06	4283,06
7,5	5448,06	3770,62
15	5425,81	3133,59
30	5443,70	2254,47
45	5471,25	1901,74

10.2.2 Vliv stříhů na tvarovou stabilitu

Stříhy byly umístěny stejným způsobem jako v předchozí kapitole pro deformaci. Měření se týkalo pouze struktur s proměnnou orientací vrstev. Výsledky vlivu stříhů na tvarovou stabilitu jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7).

Tabulka 7 Tvarová stabilita: vliv stříhů

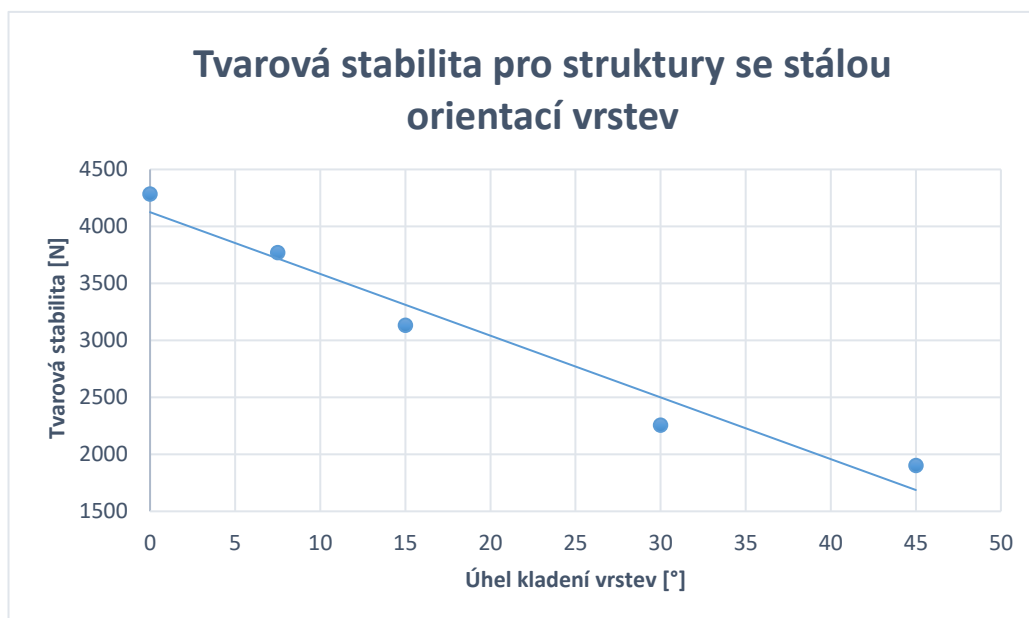
Úhel kladených vrstev [°]	Kritická síla [N]	
	Střídavé stříhy	Stálé stříhy
0	4350,70	4283,06
7,5	5485,17	5448,06
15	5482,61	5425,81
30	5460,06	5443,70
45	5476,35	5471,25

10.2.3 Shrnutí výsledků tvarové stability

Při porovnání vlivu orientace vrstev je patrné, že nejlepších výsledku dosáhla struktura s proměnnou orientací vrstev a nejvýhodnější úhel natočení pro tuto strukturu vyšel 45° s hodnotou 5471,25 N.

Stejně tak, jak tomu bylo u simulace pro posunutí, můžeme znovu postřehnout u struktury se stálou orientací vrstev určitý lineární trend, kdy se zvětšujícím se úhlem od nuly, dochází ke zhoršení mechanických vlastností modelu (Graf. 2). Zmíněná závislost naznačuje, že při zvětšování odklonu od vertikální pozice kladení vrstev ztrácí model svou tvarovou stabilitu.

Graf 2 Závislost tvarové stability a úhlu kladení: stálá orientace vrstev



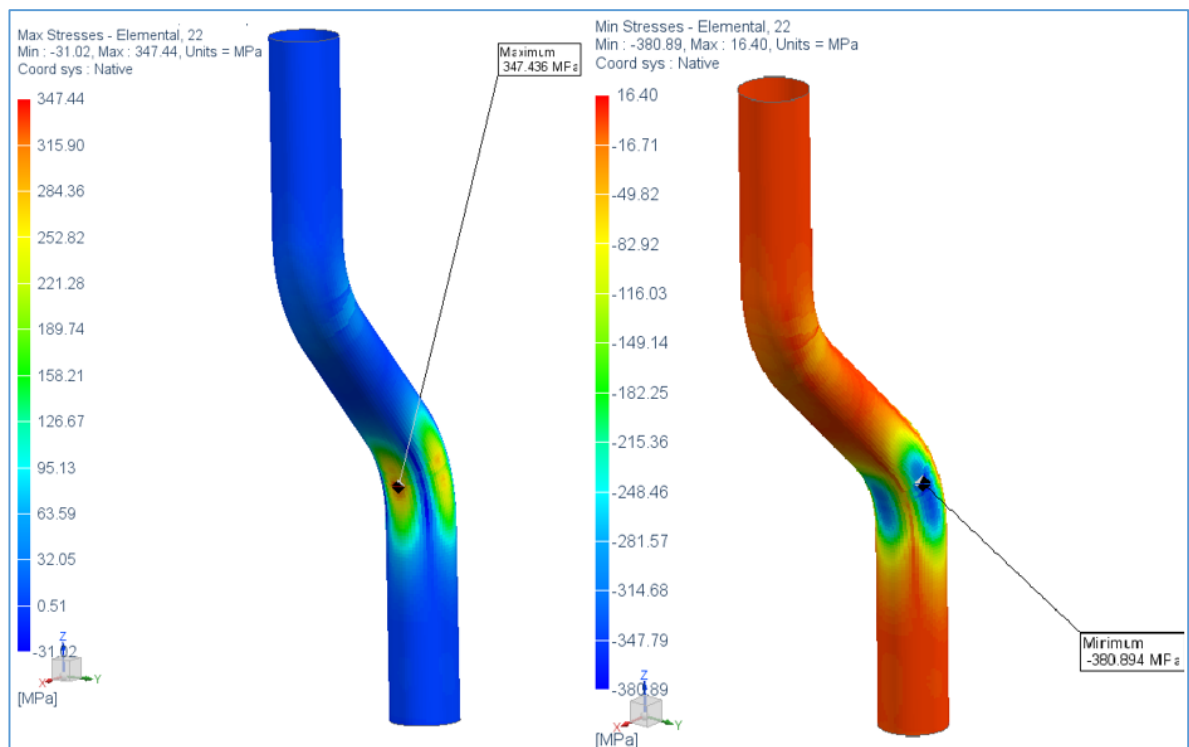
Vliv různých stříhů nedosáhl v tomto měření nijak podstatných rozdílů ve výsledcích. Nepatrné zlepšení bylo zpozorováno u struktury se střídavými stříhy.

10.3 Maximální napětí ve vrstvách

Poslední kapitola výsledků je věnována zkoumání kritické vrstvy kompozitu, ve které vzniká největší napětí. Testovaný díl byl zkoumán při zatížení 1500 N. Účelem této analýzy bylo grafické zobrazení místa s minimální a maximální hodnotou napětí, pomocí funkce *Laminate Post Report*. Nejvyšší hodnoty s kladným znaménkem představují maximální napětí v tahu ve směru vláken, zatímco záporné hodnoty představují maximální napětí v tlaku. Pro přiřazení extrémní hodnoty k hledané vrstvě slouží tabulka typu Excel, jež je součástí zmíněné funkce.

Pozorování průběhu napětí proběhlo jako u předchozích měření na složení materiálu s proměnnou a stálou orientací vrstev. Obě struktury obsahovaly výhradně střihy střídavé.

Kritické hodnoty napětí všech struktur byly nalezeny v prvním ohybu ve spodní části dílu. Jejich přesná lokace (Obr. 39) je označena příslušnou barvou odkazující na spektrální stupnici s hodnotou napětí (MPa). Výsledek je k nalezení také v popisku s odkazovou čarou na modelu.



Obrázek 39 Grafické zobrazení maximálních hodnot napětí v tahu a tlaku

10.3.1 Vliv orientace vrstev na průběh napětí

Čísla vrstev, spojená s nejvyššími hodnotami napětí pro strukturu s proměnnou orientací kladení vrstev, jsou uvedena v tabulkách (Tab. 8, 9).

Tabulka 8 Maximální napětí v tahu: proměnná orientace vrstev

Proměnná orientace vrstev		
Úhel kladených vrstev [°]	Maximální napětí v tahu [MPa]	Číslo kritické vrstvy [1-12]
0	347,44	1
7,5	414,11	1
15	399,63	1
30	384,89	1
45	371,93	1

Tabulka 9 Maximální napětí v tlaku: proměnná orientace vrstev

Proměnná orientace vrstev		
Úhel kladených vrstev [°]	Maximální napětí v tlaku [MPa]	Číslo kritické vrstvy [1-12]
0	-380,89	1
7,5	-391,60	12
15	-381,07	1
30	-390,13	1
45	-372,94	1

Výsledky napětí pro strukturu složenou z vrstev se stálou orientací (Tab. 10, 11).

Tabulka 10 Maximální napětí v tahu: stálá orientace vrstev

Stálá orientace vrstev		
Úhel kladených vrstev [°]	Maximální napětí v tahu [MPa]	Číslo kritické vrstvy [1-12]
0	347,44	1
7,5	460,83	1
15	515,12	1
30	411,38	1
45	339,62	12

Tabulka 11 Maximální napětí v tlaku: stálá orientace vrstev

Stálá orientace vrstev		
Úhel kladených vrstev [°]	Maximální napětí v tlaku [MPa]	Číslo kritické vrstvy [1-12]
0	-380,89	1
7,5	-461,90	1
15	-532,94	12
30	-658,37	12
45	-484,98	12

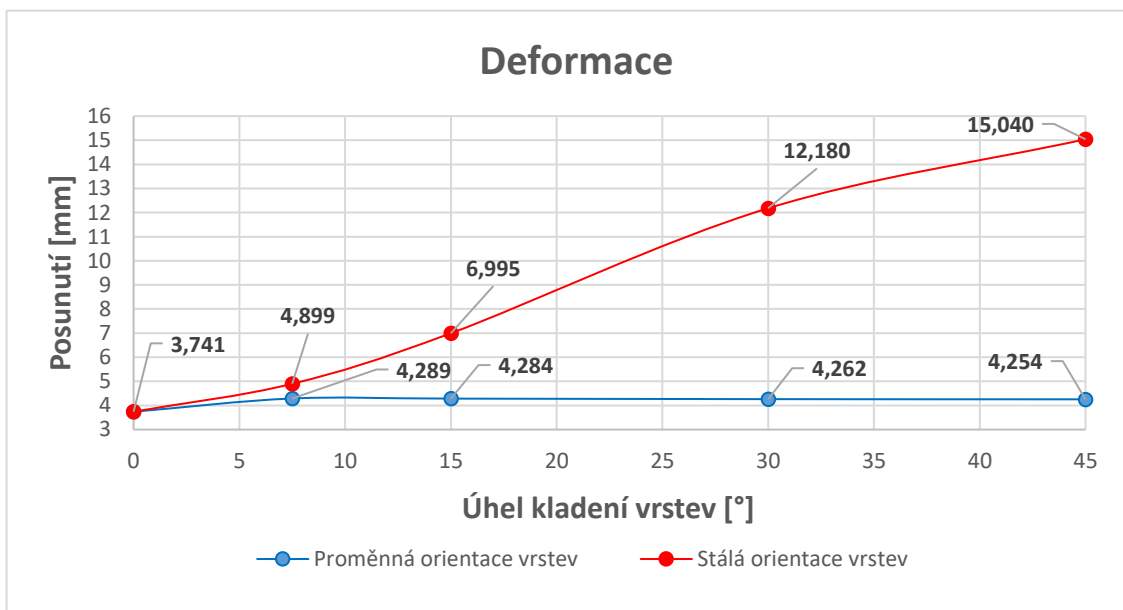
10.3.2 Shrnutí výsledků maximálního napětí

Zobrazené výsledky v tabulkách dokazují, že nejkritičtějším místem se vždy stává první nebo poslední vrstva. Nejlepší souhrnné výsledky byly nalezeny u skupiny s proměnnou orientací. Nejnižší samostatné hodnoty napětí v tahu dosáhla struktura se stálou orientací vrstev a úhlem kladení 45°. Nejnižší hodnota v tlaku byla dále zjištěna u struktury s proměnnou orientací a úhlem kladení taktéž 45°.

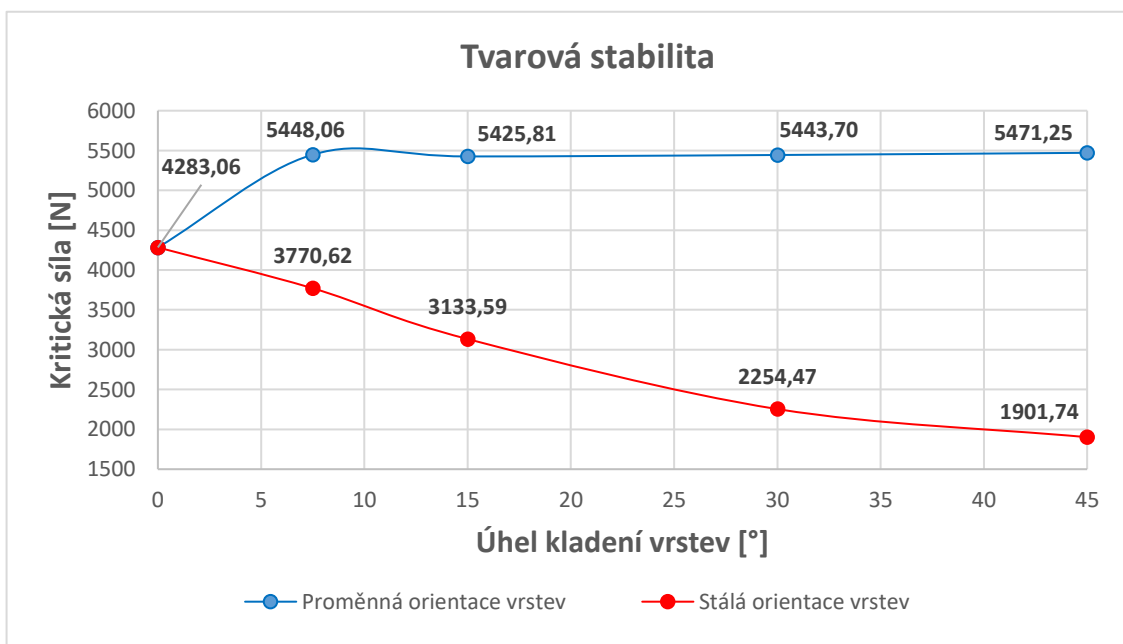
10.4 Souhrnné zhodnocení výsledků

Při celkovém porovnání všech výsledků analýzy, viz graf 3-6, se skupina s proměnnou orientací prokázala jako nejvýhodnější. Za optimální byly zvoleny úhly kladení 0° a 45° . Struktura s úhlem kladení 0° dosáhla nejvyšší hodnoty tuhosti a vzhledem k danému zatížení ji lze považovat za ideální. Nicméně, dodržet nulové natočení mezi vrstvami bývá v praxi obtížné, vzhledem ke složitému tvaru výrobku. Další struktura s úhlem kladení 45° patřila do skupiny s proměnnou orientací a měla nejlepší výsledek u analýzy tvarové stability.

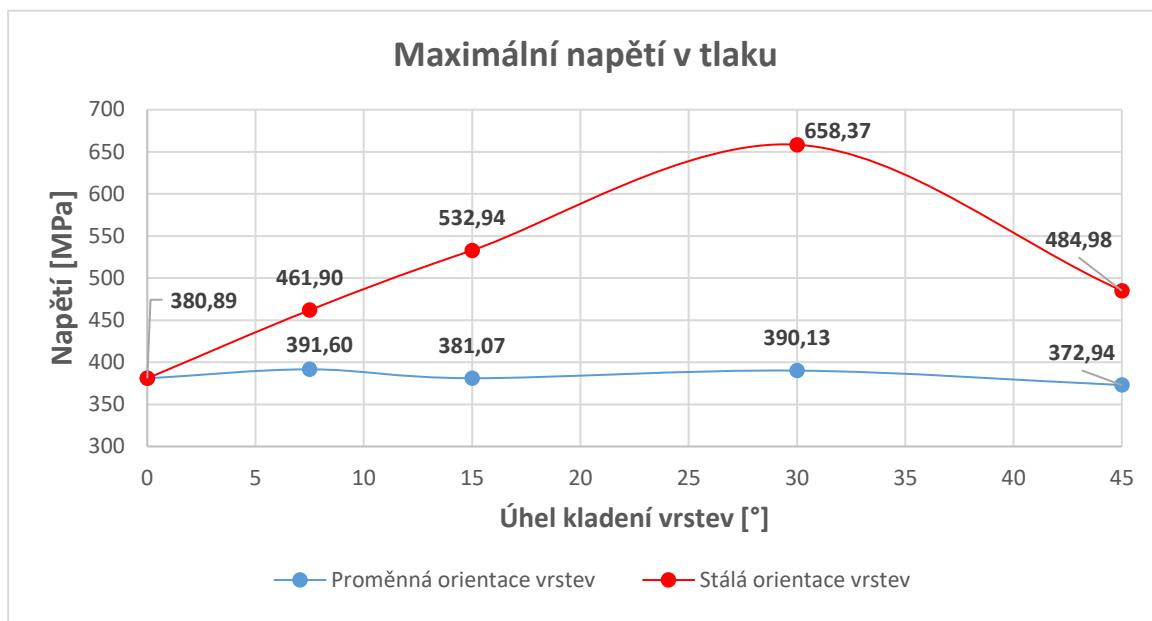
Graf 3 Znázornění vlivu různých struktur na deformaci



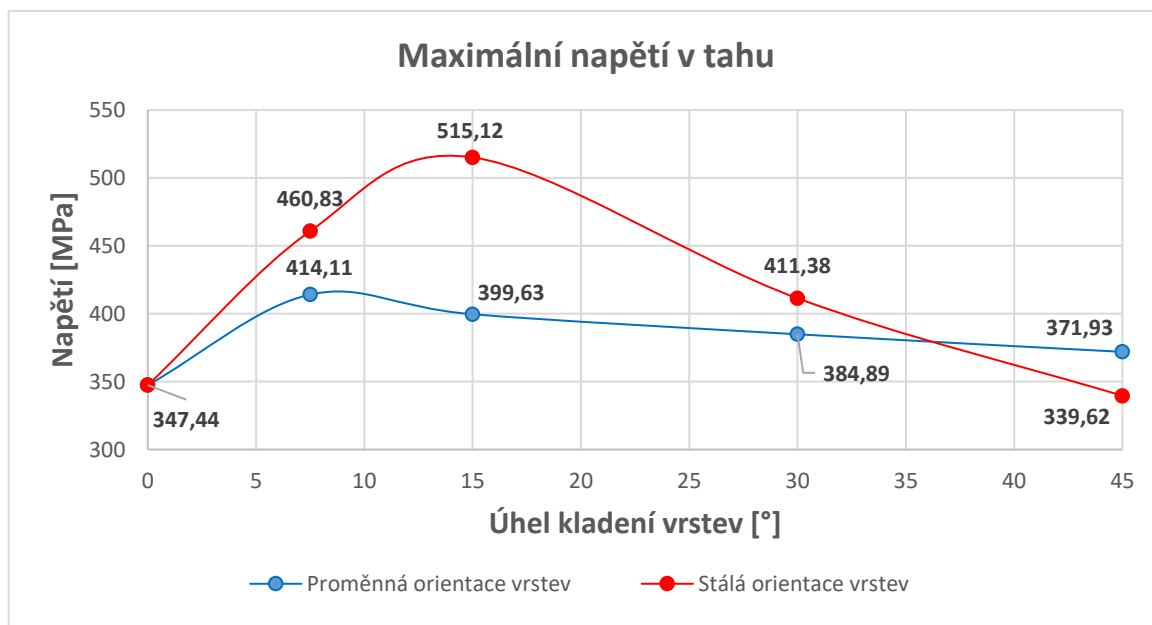
Graf 4 Znázornění vlivu různých struktur na tvarovou stabilitu



Graf 5 Znázornění vlivu různých struktur na maximální tlakové napětí



Graf 6 Znázornění vlivu různých struktur na maximální tahové napětí



Optimálních výsledků napětí opět dosahovala skupina s proměnnou orientací vrstev. Nejvýhodnější úhly kladení jsou, stejně jako u předchozích analýz, 45° pro napětí v tlaku a 0° pro napětí v tahu. Úhel 45° u skupiny se stálou orientací, viz graf 6, dosáhl sice nejnižší hodnoty napětí v tahu, avšak z důvodu špatných výsledků u přechozích analýz nebyla tato skladba zahrnuta mezi vhodné struktury.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout numerický model s vlastnostmi, jež odpovídají vrstvenému kompozitu z uhlíkového prepregu, dále pro daný model nalézt optimální úhel a metodu kladení za pomoci numerické analýzy konečných prvků.

V teoretické části práce byla věnována pozornost tématům od všeobecných základů v oblasti kompozitů, přes jejich mechanické chování až po samotnou konečně prvkovou analýzu numerických modelů.

Předmětem praktické části bylo vytvořit FEM model výrobku z uhlíkového prepregu, jehož skladba vrstev byla podrobena analýze, za účelem nalezení optimálního úhlu kladení. Jako materiál byl zvolen prepreg s výztuží v podobě tkaniny z uhlíkových vláken s plátňovou vazbou a epoxidovou maticí. Během tvorby FEM modelu bylo zapotřebí zvolit takový způsob kladení, aby nedocházelo v nejkritičtějších místech tkaniny k poškození vláken, což zahrnovalo rozdělení modelu do tří napojených částí a vytvoření podélných stříhů jednotlivých vrstev. Na takto připraveném modelu proběhla analýza mechanického chování pro struktury se stálou orientací a proměnnou orientací vrstev. První skupina se stálou orientací obsahovala 12 vrstev, u kterých byla každá natočena pod stejným úhlem vůči ose modelu. Skupina s proměnnou orientací obsahovala vrstvy, kdy byla každá pootočena o stejný úhel vůči té předchozí. Počet 12 vrstev prepregu byl pro obě skupiny stejný. Celý proces praktické části byl realizován prostřednictvím programu NX 12 se softwarem pro řešení analýz NX Nastran.

Výsledky analýzy, se zvoleným zatížením 1500 N, prokázaly optimální úhel kladení 0° a 45° . Úhel 45° patřil do zkoumané skupiny s proměnnou orientací čili představoval natočení mezi jednotlivými vrstvami, kdy počáteční vrstva měla natočení nulové. Zmíněné úhly dosáhly nejlepších výsledků v simulacích zaměřených na deformaci, tvarovou stabilitu a maximální napětí v kritické vrstvě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 9788073722791.
- [3] *Kompozity - Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. [online]*. ©2016, [cit. 28.10.2020]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>.
- [4] VINSON, Jack R. a Tsu-Wei CHOU. *Composite materials and their use in structures*. London: Applied Science, 1975, XII, 438 s. Materials science. ISBN 0853345937.
- [5] Damascénská ocel. Tercik [online]. 2019 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://www.tercik.cz/damascenska-ocel/>.
- [6] *Kompozitní materiály definice a rozdělení [online]*. Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit.2020-10-21]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defroz d.pdf.
- [7] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 294 s.
- [8] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 9788086960296G.
- [9] CALLISTER, William D. a David G. RETHWISCH. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 8. Wiley, 2009, XII, 438 s. Materials science. ISBN 0470941669, 9780470941669.
- [10] What You Need To Know About Prepregs Before Committing To Them. *GREELANE [online]*. 2018 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.greelane.com/ca/science-tech-math/v%C4%9Bda/what-are-prepregs-820462/>.
- [11] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002. s. 322. ISBN 80-7204-248-3. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:fd950360-c655-11e6-bf97-005056825209>.
- [12] FLAŠKA, Miroslav a Bedřich ŠTEKNER. *Speciální letecké technologie*. Praha: ČVUT, 1991. ISBN ISBN 80-01-00522-4.
- [13] HexPly® Prepreg Technology. *HEXCEL [online]*. 2018 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf

- [14] JANČÁŘ, Josef a Chemická fakulta. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. s. 148. ISBN 80-214-2443-5. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:9ec67240-e9c9-11e2-9439-005056825209>.
- [15] 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.
- [16] BITTNAR, Zdenek a ŠEJNOHA, Jiří. *Metoda konečných prvků I: určeno pro stud. fak. stavební*. Praha: ČVUT, 1991. s. 4. ISBN 80-01-00557-7. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:757f1250-8b0b-11e3-8031-001018b5eb5c>.
- [17] KUROWSKI, P. M. *Finite Element Analysis for Design Engineers* [online]. SAE International, 2004 [cit.2020-11-20]. ISBN 978-1-61583-645-1 (elektronická verze). Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFEADE006/finite-element-analysis/finite-element-analysis>.
- [18] NX Advanced FEM. Automation.siemens.com [online]. © 2007. Siemens Product Lifecycle Management Software [cit.2020-11-24]. Dostupné z: https://www.plm.automation.siemens.com/en_cz/Images/nx%20advanced%20fem%20fs%20W%20841-4364.pdf.
- [19] Applied Mechanics of Solids. Solidmechanics.org [online]. (c) A.F. Bower (2012) [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <http://solidmechanics.org/index.html>.
- [20] VÝROBA A PŮVOD DAMAŠKOVÉ OCELI SNADNO A RYCHLE. Chladné zbraně [online]. 2018, [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://www.chladnezbrane.eu/clanky-a-recenze/vyroba-a-puvod-damaskove-oceli-strucne-damaskova-ocel-damascus-steel/>.
- [21] CHAWLA, K. *Composite Materials: Science and Engineering* [online]. The University of Alabama at Birmingham: Department of Materials Science and Engineering, 2019 [cit 2021-3-25]. ISBN 978-3-030-28983-6 (elektronická verze). Dostupné z: https://www.academia.edu/41764342/Composite_Materials_Science_and_Engineering_by_Krishan_K_Chawla.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Θ	Kontaktní úhel smáčivosti	[°]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
G	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
ν	Poissonovo číslo	[-]
ε	Poměrná deformace	[-]
γ	Poměrná smyková deformace	[-]
τ	Smykové napětí	[MPa]
σ	Normálové napětí	[MPa]
Q	Tuhost	[MPa]
S	Poddajnost	[1/MPa]
φ	Objemový podíl vláken	[-]
ψ	Hmotnostní podíl vláken	[-]
ρ_f	Hustota vláken	[kg/m ³]
ρ_m	Hustota matrice	[kg/m ³]
t	Celková tloušťka stěny	mm
t_k	Tloušťka jedné vrstvy	[mm]
ω	Úhel natočení vrstvy	[°]
f	Síla na jednotku délky	N
$\bar{\sigma}$	Střední normálové napětí	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Příklad výrobku z damascénské oceli [20].....	12
Obrázek 2 Rozdělení kompozitů dle tvaru disperze [9] [2].....	13
Obrázek 3 Grafické znázornění disperzní částice [2]	14
Obrázek 4 Kontaktní úhel Θ mezi kapalinou a tuhou fází [1]	15
Obrázek 5 Příčně izotropní materiál z jednosměrných vláken [6].....	16
Obrázek 6 Vnitřní uspořádání vláknového laminátu [9] [3].....	17
Obrázek 7 Mikrostruktura uhlíkového vlákna [8]	20
Obrázek 8 Druhy textilních vazeb [8].....	23
Obrázek 9 Výztuže prepregu [13].....	27
Obrázek 10 Výroba textilního prepregu [8].....	29
Obrázek 11 Výroba SMC polotovarů [8]	30
Obrázek 12 Vytlačovací proces při výrobě termoplastického prepregu [3]	31
Obrázek 13 Výroby prepregu slinováním termoplastického prášku [3].....	31
Obrázek 14 Strojní kladení prepregu [13]	33
Obrázek 15 Výroba nosu letadla metodou navíjení prepregu [3].....	34
Obrázek 16 Vytvrzování v autoklávu [13]	35
Obrázek 17 Vytvrzování v peci [13].....	36
Obrázek 18 Jednosměrně vyztužená vrstva [8]	37
Obrázek 19 Základní elastické konstanty [8]	39
Obrázek 20 Rozložení složek v laminátu [8].....	40
Obrázek 21 Rozdíly v návrzích dílu [17].....	42
Obrázek 22 Rozdělení tělesa na konečný počet prvků [17].....	43
Obrázek 23 Příklady geometrie elementů [19].....	44
Obrázek 24 Náhled s rozměry kompozitového dílce.....	48
Obrázek 25 Prostředí 3D modelu v programu NX 12	49

Obrázek 26 Prostředí FEM modelu v programu NX 12	50
Obrázek 27 Tvorba 2D sítě	51
Obrázek 28 Nastavení vlastností uhlíkových vláken	52
Obrázek 29 Tvorba laminátu typu woven.....	53
Obrázek 30 Inventář vytvořených laminátů.....	53
Obrázek 31 Nastavení kompozitové struktury.....	54
Obrázek 32 Rozdělení modelu na tři části	55
Obrázek 33 Variace stříhů horní části modelu.....	56
Obrázek 34 Kontrola problematických míst.....	57
Obrázek 35 Skladba prepregu s úhlem natočení 15° mezi vrstvami	58
Obrázek 36 Uchycený a zatížený model.....	59
Obrázek 37 Náhled výsledku simulace pro svislé posunutí	61
Obrázek 38 Grafické znázornění výsledku tvarové stability	64
Obrázek 39 Grafické zobrazení maximálních hodnot napětí v tahu a tlaku.....	67

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Zobrazení chování struktur se stálou orientací vrstev	63
Graf 2 Závislost tvarové stability a úhlu kladení: stálá orientace vrstev	66
Graf 3 Znázornění vlivu různých struktur na deformaci	70
Graf 4 Znázornění vlivu různých struktur na tvarovou stabilitu	70
Graf 5 Znázornění vlivu různých struktur na maximální tlakové napětí	71
Graf 6 Znázornění vlivu různých struktur na maximální tahové napětí	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Parametry vyztužujících vláken a matrice	48
Tabulka 2 Zastoupení výztuže a matrice v kompozitu	48
Tabulka 3 Posunutí: proměnná orientace vrstev	61
Tabulka 4 Posunutí: stálá orientace vrstev	62
Tabulka 5 Vliv stříhů na posunutí.....	62
Tabulka 6 Tvarová stabilita: vliv orientace vrstev.....	65
Tabulka 7 Tvarová stabilita: vliv stříhů.....	65
Tabulka 8 Maximální napětí v tahu: proměnná orientace vrstev.....	68
Tabulka 9 Maximální napětí v tlaku: proměnná orientace vrstev	68
Tabulka 10 Maximální napětí v tahu: stálá orientace vrstev	69
Tabulka 11 Maximální napětí v tlaku: stálá orientace vrstev	69