

# Optimalizace kompozitního výrobku

Bc. Marek Zubík

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek Zubík**  
Osobní číslo: **T16225**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Optimalizace kompozitního výrobku**

Zásady pro vypracování:

- 1. Literární přehled**
- 2. Návrh numerického modelu**
- 3. Řešení modelu**
- 4. Vyhodnocení modelu**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

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

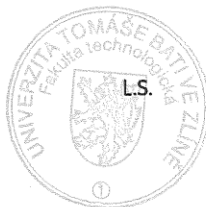
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2018**

Ve Zlíně dne 2. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ZUBÍK MAREK

Obor: ŘÍZENÍ JAKOSTI

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/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.

Ve Zlíně 2.5.2018



<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>31</sup> 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odporují-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídá k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Hlavním cílem této práce bylo nalezení optimálního úhlu, pod kterým se na sebe kladou jednotlivé vrstvy uhlíkového prepregu, pro získání co nejlepších mechanických vlastností součásti. Součástí byl v tomto případě disk, určený pro formuli Dragon 6 vyrobenou týmem TU Brno Racing.

V teoretické části byly popsány kompozitní materiály, jejich mechanika, technologie výroby i samotné zkoušení těchto materiálů. Dále zde byl popsán program NX 11 a jeho nástroje pro výrobu kompozitních modelů.

V praktické části byla popsána tvorba FEM modelů, vyrobenými nástroji Zone-Based i Ply-Based. Nástrojem Ply-Based byly nalezené problémová místa z hlediska kladení tkaniny. V závěru práce pak byly provedeny analýzy vytvořených modelů a její vyhodnocení.

**Klíčová slova:** kompozit, optimalizace, prepreg, uhlík, automobilový disk

## **ABSTRACT**

The main goal of this thesis was to define optimal angle for laying of each layer of carbon prepreg to gain the best mechanical properties of a part. The part was in this case a wheel designed for formula Dragon 6 made by team engineers from TU Brno Racing.

In theoretical part of the thesis was a description of composite materials, their mechanicals properties, technology of production and testing of these materials. As a next step was described a program NX 11 and his tools for design composite models.

In practical part of the thesis was described creation of FEM models made by tools Zone-Based and Ply-Based. With support by Ply-Based tool were found problem critical places from viewpoint laying woven. In a final part of the thesis were made analyses of created models and their evaluation.

**Keywords:** composite, optimization, prepreg, carbon, car wheel

Zde bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D. za odborné vedení celé práce, poskytnutí důležitých informací i cenných rad a pozornost, kterou věnoval této práci. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
<b>1 KOMPOZITY.....</b>	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA KOMPOZITY .....	14
1.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	15
1.2.1 Homogenita a nehomogenita.....	15
1.2.2 Izotropie a anizotropie.....	15
1.2.3 Adheze.....	16
1.2.4 Synergický efekt.....	17
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PODLE DRUHU VÝZTUŽE.....	17
1.3.1 Částicové kompozity .....	17
1.3.2 Vláknové kompozity .....	18
1.3.2.1 Struktura a vlastnosti vláknových kompozitů.....	19
1.4 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PODLE DRUHU MATRICE .....	20
1.4.1 Kovové matrice .....	20
1.4.2 Keramické matrice .....	20
1.4.3 Polymerní matrice .....	20
1.4.3.1 Termoplastické matrice.....	21
1.4.3.2 Reaktoplastové matrice.....	21
<b>2 TECHNOLOGIE A KONTROLA VÝROBY KOMPOZITU.....</b>	<b>22</b>
2.1 RUČNÍ VÝROBA .....	22
2.2 STRÍKÁNÍ LAMINÁTU .....	23
2.3 TECHNOLOGIE RTM – VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ .....	23
2.4 LISOVÁNÍ POMOCÍ VAKUOVANÉHO VAKU A TLAKOVÉHO VAKU .....	24
2.5 LISOVÁNÍ V AUTOKLÁVU .....	25
2.6 ZPRACOVÁNÍ LISOVACÍCH ROHOŽÍ SMC .....	25
2.7 KONTROLA VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	26
<b>3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITU .....</b>	<b>27</b>
3.1 ZKOUŠKA TAHEM .....	27
3.2 ZKOUŠKA TLAKEM .....	28
3.3 ZKOUŠKA SMYKEM.....	28
3.4 ZKOUŠKA OHYBEM.....	29
<b>4 PREPREGY .....</b>	<b>30</b>
4.1 DRUHY VAZEB.....	30
4.2 MATRICE .....	32
4.2.1 Epoxidové pryskyřice.....	32
4.2.2 Fenolické pryskyřice .....	32
4.2.3 Bismalitické pryskyřice.....	32



4.3	VÝZTUŽE.....	33
4.3.1	Uhlíková vlákna .....	33
4.3.2	Aramidová vlákna .....	33
4.3.3	Skleněná vlákna .....	34
4.3.4	Přírodní vlákna .....	34
4.3.5	Porovnání mechanických vlastností jednotlivých typů vláken .....	35
4.4	VÝROBA PREPREGU .....	36
4.5	VÝHODY PREPREGU.....	37
<b>5</b>	<b>MECHANIKA KOMPOZITU .....</b>	<b>38</b>
5.1	VZTAH NAPĚTÍ A DEFORMACE PRO ORTOTROPNÍ MATERIÁL .....	38
5.1.1	Maticе poddajnosti pro ortotropní materiál.....	38
5.1.2	Maticе tuhosti pro ortotropní materiál .....	39
5.2	VZTAH NAPĚTÍ A DEFORMACE PRO PŘÍČNĚ IZOTROPNÍ MATERIÁL .....	40
5.2.1	Maticе poddajnosti pro příčně izotropní materiál .....	41
5.2.2	Maticе tuhosti pro příčně izotropní materiál .....	42
5.3	VRSTVA VYZTUŽENÁ TKANINOU .....	43
5.4	KLASICKÁ LAMINÁTOVÁ TEORIE .....	43
<b>6</b>	<b>POUŽITÍ PROGRAMU NX 11 PRO ANALÝZU KOMPOZITU.....</b>	<b>46</b>
6.1	MODELOVÁNÍ KOMPOZITU POMOCÍ ZONE-BASED .....	46
6.2	MODELOVÁNÍ KOMPOZITU POMOCÍ PLY-BASED.....	46
6.3	OPTIMALIZACE KOMPOZITU V NX.....	47
6.4	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....	48
6.4.1	Princip a postup tvorby a analýzy konečně prvkového modelu.....	48
6.4.2	Metoda konečných prvků – Element.....	49
6.4.3	Zatížení a okrajové podmínky.....	49
6.4.4	Výhody a nevýhody .....	50
<b>7</b>	<b>AUTOMOBILOVÁ KOLA V PRAXI .....</b>	<b>51</b>
7.1	ROZDĚLENÍ KOL .....	51
7.2	RÁFKY.....	52
7.2.1	Základní parametry ráfku .....	52
7.3	DRUHY KOL PODLE KONSTRUKCE STŘEDNÍ ČÁSTI KOLA .....	53
7.3.1	Hvězdicová kola.....	53
7.3.2	Disková kola.....	53
7.3.3	Drátová kola .....	54
7.3.4	Paprskové kola .....	54
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI .....</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>TVORBA MODELU NAVRŽENÉHO DISKU.....</b>	<b>57</b>
<b>10</b>	<b>TVORBA FEM MODELU DISKU V PROGRAMU NX 11.....</b>	<b>58</b>
10.1	TVORBA FEM MODELU POMOCÍ ZONE-BASED .....	59
10.1.1	Tvorba sítě.....	59

10.1.2	Přiřazení materiálu k síti .....	60
10.1.3	Nastavení okrajových podmínek pro model disku.....	64
	Spojení uhlíkového disku s duralovým kroužkem.....	64
	Uchycení modelu .....	65
	Zatížení modelu .....	66
10.2	TVORBA FEM MODELU POMOCÍ PLY-BASED .....	68
10.2.1	Tvorba sítě a vytvoření materiálu .....	68
10.2.2	Přiřazení materiálu k síti .....	68
10.2.3	Nastavení okrajových podmínek pro model disku.....	69
10.2.4	Hledání problémových míst disku z hlediska kladení tkaniny.....	70
<b>11</b>	<b>PEVNOSTNÍ VÝPOČET DURALOVÉHO KROUŽKU .....</b>	<b>72</b>
<b>12</b>	<b>VÝSLEDKY ANALÝZY .....</b>	<b>73</b>
12.1	ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ V DISKU.....	73
12.2	VÝSLEDKY ANALÝZY FEM MODELU, VYTVOŘENÉHO POMOCÍ ZONE-BASED .....	73
12.2.1	Výsledky analýzy celkového přetvoření uhlíkového disku .....	74
12.2.2	Výsledky analýzy poměrné deformace uhlíkového disku .....	75
12.2.3	Průběh napětí v kritické vrstvě uhlíkového disku .....	76
12.2.4	Rozložení napětí do jednotlivých směrů vláken v kritické vrstvě disku.....	77
12.2.5	Smykové napětí v kritické vrstvě disku .....	78
12.3	VÝSLEDKY ANALÝZY FEM MODELU, VYTVOŘENÉHO POMOCÍ PLY-BASED .....	79
12.3.1	Výsledky analýzy celkové přetvoření uhlíkového disku .....	80
12.3.2	Výsledky analýzy poměrné deformace uhlíkového disku .....	81
12.4	SHRNUTÍ ANALÝZY.....	82
12.4.1	Vyhodnocení analýzy z hlediska celkového přetvoření disku .....	82
12.4.2	Vyhodnocení analýzy z hlediska poměrné deformace disku .....	83
12.4.3	Vyhodnocení analýzy z hlediska velikosti napětí v kritické vrstvě .....	84
12.4.4	Volba optimálního úhlu.....	85
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>94</b>

## ÚVOD

Úkolem disku je přenášet krouticí moment a všechny síly z náboje na pneumatiku a zároveň odolávat zatížení, které na disk během provozu působí. Vývoj v automobilovém průmyslu se posouvá neustále dopředu. Dochází ke změně konstrukčních materiálů a designů jednotlivých součástí. Hlavním cílem je dosáhnout co nejmenší hmotnosti vozidla, což umožňuje větší zrychlení a menší spotřebu paliva.

Ke snížení hmotnosti součástí se stále více používají kompozitní materiály. Kompozitní materiál je složený ze dvou, nebo více složek. Dochází ke kombinaci vlastností všech použitých složek. Pro kompozity je typický synergický efekt. Jako synergický efekt je označován efekt, ke kterému dochází kombinací vlastností jednotlivých složek kompozitu tak, že celek přesahuje poměrný součet složek. Kompozitní materiály se připravují tak, aby synergický efekt byl co nejsilnější.

V této práci byl disk, určený pro formuli Dragon 6 vyrobenou týmem TU Brno Racing, vyrobený z uhlíkového prepregu. Uhlíkový prepreg byl vybrán zejména kvůli jeho pevnosti, tvrdosti a nízké hmotnosti. Oproti hliníkovým diskům, které se na formuli používali doposud, je hmotnost tohoto disku nižší. Počet kladených vrstev prepregu na jednotlivé části tohoto disku byl pevně daný. Úkolem bylo najít optimální úhel tkaniny, pod kterým se budou jednotlivé vrstvy klást na sebe. Pro analýzu byl zvolen program NX 11.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

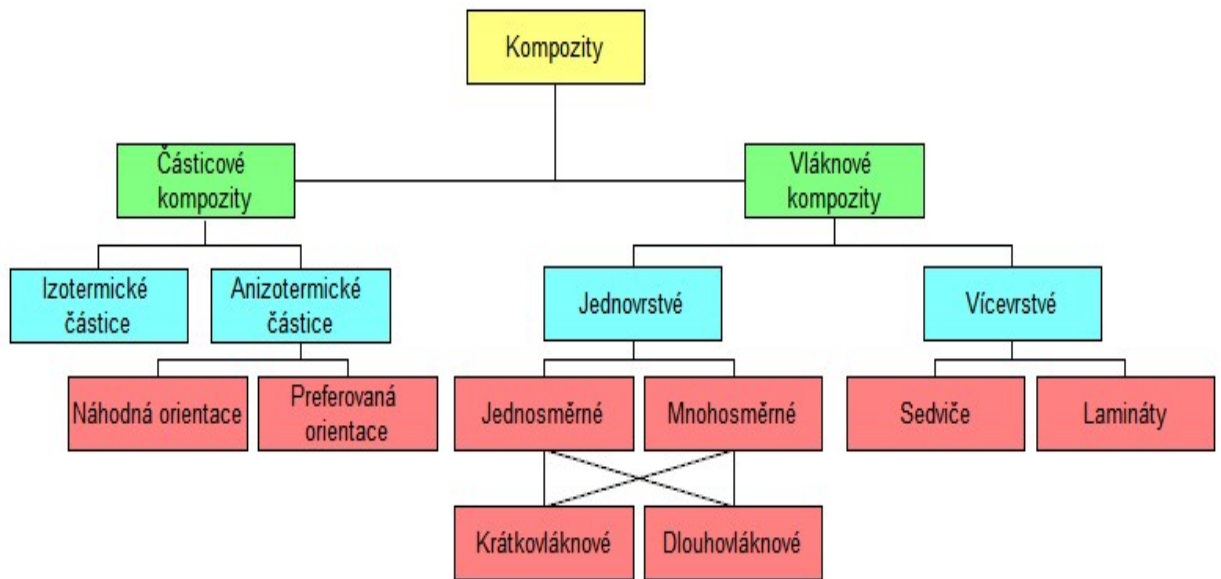
## 1 KOMPOZITY

Kompozitní materiál je definován jako heterogenní materiál, který je složený ze dvou, nebo více složek. Tyto složky se vzájemně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Charakteristickým jevem pro kompozitní materiály je synergismus, což znamená, že výsledné vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo jednoduchému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Každá složka v tomto systému plní svou specifickou funkci. Kontinuální složkou v tomto systému je matrice a diskontinuální složkou je výztuž. Jako výztuž se označuje složka, která je tvrdší, pevnější a tužší, naproti tomu matrice plní funkci pojiva a je poddajnější. Vedle umělých kompozitů existují i kompozity přírodní. Nejznámějším přírodním kompozitem je dřevo, nebo kost. Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny tyto podmínky:

- Podíl výztuže musí být větší než 5 %
- Vlastnosti výztuže a matrice se liší, výztuž je výrazně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- Kompozit musí být připraven mísením složek [1, 2, 3, 7, 10, 15]

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Makrokompozity obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru  $10^0$  až  $10^2$  mm a používají se zejména ve stavebnictví. Za makrokompozity lze považovat i plátové kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce. Nanokompozity jsou kompozitní materiály s polymerní matricí, u kterých se rozměr částicové výztuže pohybuje v jednotkách nm. V průmyslu se nejčastěji používají mikrokompozitní materiály, u kterých největší příčné rozměry výztuže jsou v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Oproti kovům mají mikrokompozitní materiály menší hustotu a tedy příznivější poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, to znamená, že dosahují velké měrné pevnosti a měrného modulu. Podle geometrie a velikosti výztuže dělíme mikrokompozity na dvě základní skupiny:

- Částicové kompozity
- Vlákňové kompozity [3, 4, 7, 10]



Obrázek 1: Rozdělení kompozitních materiálů [6]

## 1.1 Základní požadavky na kompozity

Kompozity jsou vyráběny zejména proto, aby splnily požadavky, které jsou u klasických materiálů jen těžko splnitelné. Mezi tyto požadavky patří:

- Zvýšení tuhosti
- Zvýšení pevnosti
- Zvýšení rozměrové stability
- Zvýšení houževnatosti
- Zvýšení teplotní stability
- Zvýšení mechanického tlumení
- Snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny
- Modifikace elektrických vlastností
- Snížení nasákavosti
- Zmenšení teplotní roztažnosti
- Zvýšení korozní, nebo chemické odolnosti
- Udržení tuhosti a pevnosti při vysoké teplotě
- Snížení negativního dopadu na životní prostředí
- Redukce hmotnosti
- Snížení ceny [1, 2]

## 1.2 Základní vlastnosti kompozitních materiálů

### 1.2.1 Homogenita a nehomogenita

Každý technický materiál je v atomárním měřítku nehomogenním. Je tedy nutné požadovat, aby kompozitní nehomogenity byly v mnohem větším měřítku, než atomárním. V souvislosti s homogenitou je možno narazit na dva problémy. Rozměry nehomogenit u moderních nanokompozitů mohou být poměrně blízké atomárním rozměrům. Pro takovéto kompozity nejsou plně použitelné jen rovnice klasické fyziky, ale může dojít i k některým jevům spojeným atomovou fyzikou.

V praxi existuje řada struktur, které jsou blízké kompozitům, liší se však tím, že počet nehomogenit je velmi malý. Tento materiál není možné považovat za přirozeně homogenní v makroměřítku. Jedná se například o vrstvené struktury, například vrstvené sklo, nebo armovaný beton. Mluvíme o takzvaných kompozitních strukturách, kde metody jejich výpočtů jsou blízké metodám výpočtů kompozitů. [1, 2]

### 1.2.2 Izotropie a anizotropie

Řada kompozitních materiálů jeví velmi silné anizotropní vlastnosti, na rozdíl od většiny technických materiálů, které jsou zcela izotropní. U kompozitů s plastovou maticí a uspořádanými vlákny se tuhost ve směru vláken a kolmo na ně může lišit i o několik řádů.

Základní typy materiálů z hlediska symetrie jeho vlastností jsou:

- **Izotropní materiál** – Ve všech směrech má stejné vlastnosti.
- **Anizotropní materiál** – V každém směru má jinou vlastnost.
- **Pseudoizotropní materiál** – Stejně vlastnosti ve směru tří kolmých základních os a jsou symetrické podle tří rovin, tvořených těmito osami.
- **Ortotropní materiál** – Symetrické vlastnosti podle tří vzájemně kolmých rovin. V hlavních směrech, které jsou na sebe kolmé a tvoří průsečnice těchto rovin má vlastnosti vzájemně různé, však bez typických efektů anizotropie.
- **Příčně izotropní materiál** – Má izotropní vlastnosti v určité rovině. Jeho vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a dvou rovin na ni i sebe vzájemně kolmých. Tato vlastnost je typická zejména pro kompozitní materiály. [1, 2, 3]

### 1.2.3 Adheze

Adheze má přímý vliv na vlastnosti kompozitu. Velikost adheze ovlivňuje elektrická interakce, absorpce, reakční vazby a nevázané interakce, smáčení a kovalentní vazba matrice s vlákny. Matrice a vlákna jsou vyrobeny z navzájem odlišných materiálů, mají tedy odlišný koeficient teplotní roztažnosti. Proto si při změně teploty jednotlivé vrstvy navzájem brání vzniku teplotních dilatací. Je-li adheze velmi slabá, jednotlivé vrstvy matrice a vláken se mohou volně roztahovat a kompozit přestane plnit svou funkci. Takovýto jev je označen jako delaminace jednotlivých vrstev. Z hlediska působících sil ji rozdělujeme na chemickou, fyzikální, mechanickou, difuzní a elektrostatickou. Vlastnosti kompozitu nejvíce ovlivňují chemická, fyzikální a mechanická adheze. [1, 6]

- **Chemická adheze** – Jsou to vazby na rozhraní matrice a disperze, které působí ve vzdálenosti 0 – 0,3  $\mu\text{m}$  a mohou dosáhnout pevnosti až 70 GPa. Matrice a disperze mohou vzájemně difundovat, nebo spolu chemicky reagovat. Tato adheze však může ovlivňovat kompozit i negativně a to tím, že vzniklá mezivrstva může mít malou pevnost, nebo velkou křehkost.
- **Fyzikální adheze** – Na rozhraní jednotlivých vrstev mezi částicemi působí Van Der Waalsova vazba, jejíž velikost udává teoretickou pevnost, která může nabýt hodnoty až 7 GPa ve vzdálenosti 0,3 – 0,5  $\mu\text{m}$ . Fyzikální adheze velmi závisí na smáčivosti matrice a disperze.
- **Mechanická adheze** – Mechanická adheze vzniká při působení smykových sil mezi výztuží a maticí, kde mezi nimi dochází k zaklínění jednotlivých nerovností povrchů. Velikost této adheze ovlivňuje hodnota drsnosti povrchu vláken. Čím větší budou mít vlákna drsnost, tím větší tato adheze bude.

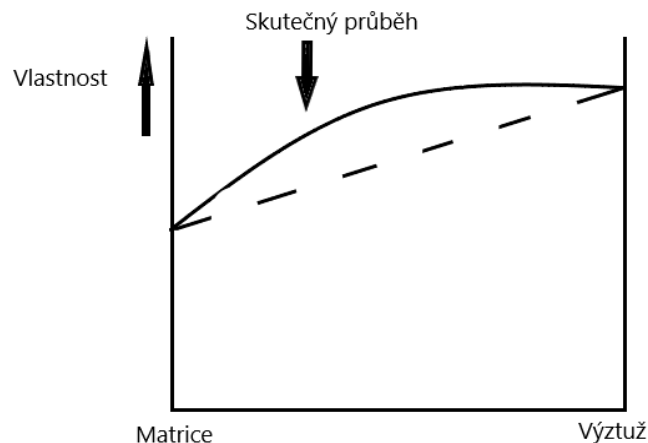
#### Měření velikosti adheze:

- Přímá metoda – Pevnost je určena ze statických zkoušek
- Porovnávací metoda
  - Vrypový test
  - Mřížkový test
  - Od lupovací test
- Přímě na kompozitech
  - Vytrhávácí zkouška
  - Příčný a podélný test kompozitu [1, 6]



### 1.2.4 Synergický efekt

Jako synergický efekt je označován efekt, ke kterému dochází kombinací vlastností jednotlivých složek kompozitu tak, že celek přesahuje poměrný součet složek. Kompozitní materiály se připravují tak, aby synergický efekt byl co nejsilnější. Prioritou jsou požadované vlastnosti výsledného kompozitu. [1, 2, 3]



Obrázek 2: Znázornění synergického efektu v kompozitním materiálu [1]

## 1.3 Rozdělení kompozitních materiálů podle druhu výztuže

### 1.3.1 Částicové kompozity

Částicový kompozit má větší modul pevnosti v tahu, tvarovou stálost za tepla, tepelnou vodivost, menší smrštění a tepelnou roztažnost, než polymer. U navlhavých polymerů potlačují částice rozměrové změny způsobené absorpcí vody. Částice také zlepšují vlastnosti kompozitu, nejedná se tedy o pouhé plnivo. Výroba částic se provádí mletím anorganických materiálů. Složením jsou to především hlinitokřemičnany (mastek, kaolin), vrstevnaté hlinitokřemičnany (slídy) a uhličitany (vápenec a baryt). U reaktoplastů je možné použít práškový kov, nebo cement. Pro zlepšení kluzných vlastností a zvýšení odolnosti proti otěru je možné kombinovat částice bronzu s částicemi grafitu, sulfidu molybdenu nebo polytetrafluorethylenu. Hořlavé polymery s velkým podílem anorganických částic mají sníženou hořlavost. Částice sférického tvaru by neměli být příliš velké, aby nezmenšovali pevnost polymeru. Pro zvýšení tuhosti se používají obvykle sférické částice o rozměrech 1 až 10 mm. Částice jehlicovité a destičkovité kromě vyztužení polymerní matrice významně zpevňují výsledný kompozit.

Podle materiálu matrice se částicové kompozity dělí na:

- Částicové kompozity s polymerní matricí
- Částicové kompozity s kovovou matricí
- Částicové kompozity s keramickou matricí
- Částicové kompozity s minerální a smíšenou matricí [3, 4, 6]

### 1.3.2 Vlákňové kompozity

Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem. Vlákná s krystalickou strukturou mají nejpevnější atomové vazby přednostně orientovány v podélném směru vláken. Pevnost snižují trhliny, které leží kolmo ke směru zatížení. Tahová pevnost vlákna závisí také na jeho délce. Elementární vlákna jsou sdružená do pramenů a ty do pramenců. Toto uspořádání označujeme pod pojmem roving. Počet konců znamená, kolik pramenců roving obsahuje. Pro kompozitní materiály jsou vhodné rovingy s nulovým, nebo malým počtem zakroucení pramenců, aby bylo co nejlépe využito pevnosti a tuhosti vláken. Krátká vlákna se vyrábí sekáním pramenů a rovingů, u sklovin zvlákňováním proudem vzduchu a všechna křehká vlákna lze pak krátit mletím. Vlákňové monokrystaly mají příčný rozměr kolem 0,1 mm, délku až 100 mm a jsou velmi pevné. Vzhledem k malým příčným rozměrům a vysoké pevnosti jsou ohebné, takže při přípravě kompozitu mechanickým mísením nejsou lámány. Vlákňové kompozity se podle druhu materiálu dělí na:

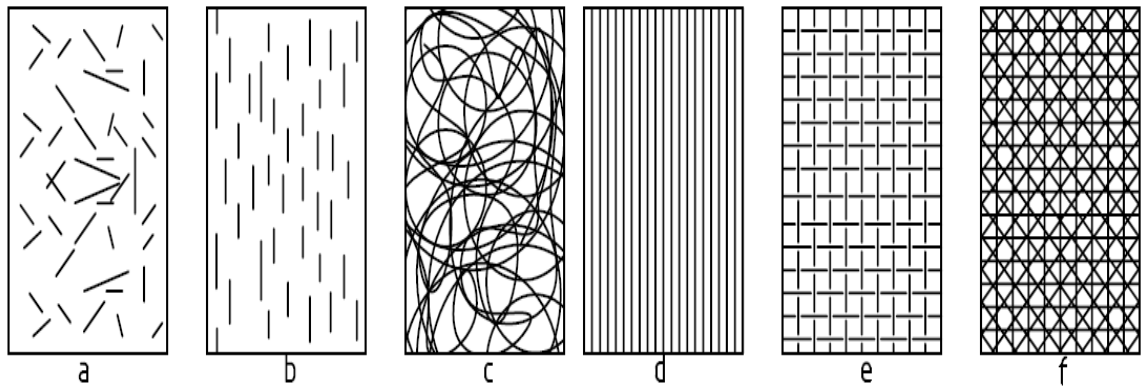
- Skleněná
- Uhlíková
- Polymerní
- Keramická
- Kovová

Materiál matrice pak může být:

- Polymerní
- Kovová
- Keramická
- Uhlíková
- Skleněná
- Sklokeramická [3, 5]

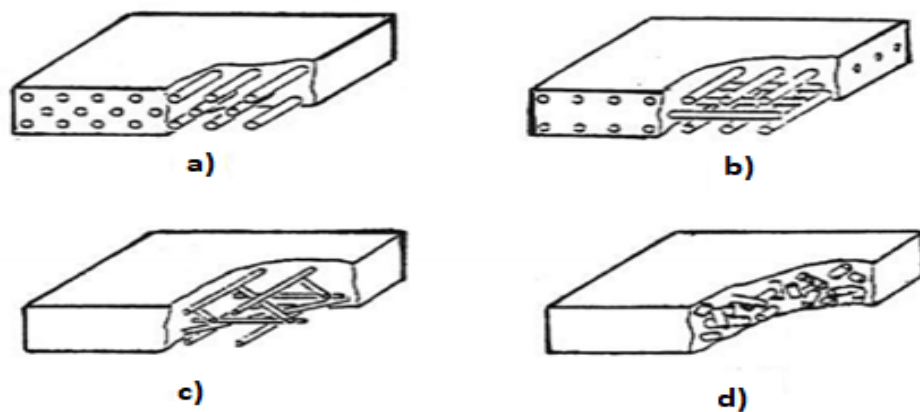
### 1.3.2.1 Struktura a vlastnosti vláknových kompozitů

Vláknová výztuž může být orientována jednoose, dvouose, víceose, v rovině, prostorově a nahodile v rovině. Krátká vlákna a vláknové monokrystaly mohou být orientovány přednostně, nebo nahodile. Příklady uspořádání vláken jsou vidět na Obr. 3. a Obr. 4. [3, 8]



Obrázek 3: Příklady rovinného uspořádání vláken

a) Krátká vlákna s nahodilou orientací, b) Krátká vlákna jednosměrně orientovaná, c) Rohož, nahodilá orientace kontinuálních, nebo krátkých vláken, d) Jednosměrné uspořádání kontinuálních vláken, e) dvouosá orientace, f) víceosá výztuž z kontinuálních vláken [3]



Obrázek 4: Prostorové uspořádání vláken v kompozitu

a) Jednosměrná dlouhá vlákna, b) Dvousměrné vyztužení dlouhými vlákny, c) Vícesměrné vyztužení dlouhými vlákny, d) Náhodná orientace krátkých vláken [8]

## 1.4 Rozdělení kompozitních materiálů podle druhu matrice

Matrice je spojitá složka, která spojuje výztuž a přenáší do ní zatížení. Matrice také chrání výztuž před vlivem okolí. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách výztuže a její poměrné prodloužení při přetržení by mělo být větší, než mezní prodloužení výztuže. Tento požadavek splňují pouze polymerní a kovové matrice. [4]

### 1.4.1 Kovové matrice

Použitím kovové matrice pro kompozity má proti nejčastěji používané polymerní matici některé výhody, jako jsou např. elektrická vodivost, teplotní vodivost, nehořlavost, smykovou pevnost, tvárnost, odolnost proti obrusu, možnost povlakování, vyšší tepelnou odolnost a odolnost vlhkému prostředí. Nejrozšířenější z kovových matic je hliník a jeho slitiny, vyztužované nejčastěji borovými, uhlíkovými a křemíkokarbidovými vlákny. Matrice může být vytvářena z prášku, fólie, popřípadě taveniny. Výrobní postup se musí volit tak, aby došlo k dokonalému smíšení matrice s vlákny bez mechanického poškození, bez jejich degradace, bez zkrěhnutí materiálu a s dostatečnou soudržností ve stykových plochách. Kromě hliníkových matic se používají matrice z titanu a jeho slitin a matrice na bázi niklu. [4]

### 1.4.2 Keramické matrice

Keramické materiály mají výhodu ve vysoké pevnosti při vysokých teplotách, malou hustotu a vynikající odolnost vůči oxidaci. Nevýhodou keramických materiálů je však křehkost. Vzhledem k vysokému modulu a nepatrnému creepu jsou k jejímu vyztužení vhodná jen málokterá vlákna. Nekoherentní styk mezi vlákny a maticí zajistí, že trhliny se budou šířit spíše okolo vláken, než přes vlákna. Pokud vlákna mají vyšší teplotní vodivost než matrice, mohou také zlepšit odolnost vůči teplotnímu šoku. Většinou se pro matici odolnou vůči vysokým teplotám používají oxidy, nitridy, nebo karbidy různých prvků. Nejčastěji jsou to hliník, křemík a hořčík. Spojení vláken a matrice je obvykle slabé, i když existují výjimky způsobené chemickou reakcí mezi maticí a vlákny. [4]

### 1.4.3 Polymerní matrice

Polymerní matrice patří mezi nejpoužívanější pro přípravu kompozitů. Podle vlastností i výrobního postupu se výrazně liší podle toho, je-li polymer termoplast, nebo reaktoplast.

#### *1.4.3.1 Termoplastické matrice*

Požítím termoplastu jako matrice může značně zredukovat cenu kompozitu a to až o 80%. Výhodou může být poměrně dobrá dimenzionální stabilita, malý obrus, zvýšená pevnost, modul pružnosti a houževnatost. Nejpoužívanější termoplasty jsou polyamidy, polyethylen, polypropylen, polykarbonát, polybutyltereftalát, polysulfol a kopolymery tetrafluorethylenu. K vyztužení jsou vhodná uhlíková, aramidová a skleněná vlákna, nebo jejich kombinace. Vlastnosti těchto kompozitů jsou velmi závislá na výrobním postupu, na povrchové úpravě, a na viskoelastickém chování matrice.

#### *1.4.3.2 Reaktoplastové matrice*

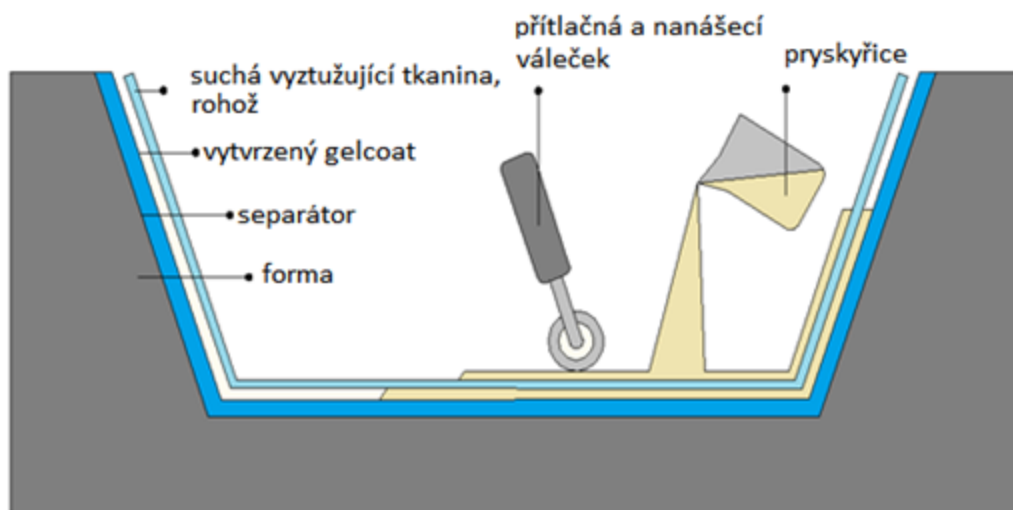
Reaktoplasty vyztužené vlákny jsou nejrozšířenější konstrukční kompozity. Reaktoplastová matrice dokáže snížit cenu kompozitu až o 50%. Vlákna mohou být organizovaně uspořádána rozmanitým způsobem, nebo náhodně orientována. Nejpoužívanější vlákna pro reaktoplastové matrice jsou skleněná, uhlíková, borová, keramická, kovová aramidová, nebo jejich kombinace. Pro matrice jsou nejpoužívanější polyestery, epoxidy, melaminy a siloxylové pryskyřice. Perspektivní jsou polyesterové pryskyřice s menším množstvím adipové kyseliny a místo styrenu obsahují monomer diaffyl-ftalát. Tyto pryskyřice poskytují zlepšení vlastností kompozitu nad 100 °C, umožňují rychlé vytvrzení, mají výbornou odolnost vůči vlhkosti, delší životnost a nižší cenu. [4]

## 2 TECHNOLOGIE A KONTROLA VÝROBY KOMPOZITU

### 2.1 Ruční výroba

Tento způsob výroby kompozitu je nejjednodušší, je vhodný pro malé série, prototypy a velkoplošné díly. Nástroje pro výrobu kompozitů ručním způsobem jsou levné a jednoduché. Kvalita vyrobeného dílu závisí na zkušenostech a znalostech výrobce.

Prvním krokem je nanesení separátoru na povrch formy, na kterou se nanese vrstva pryskyřice o tloušťce 0,3 - 0,6 mm, která se označuje jako gelcoat. Tato vrstva slouží k ochraně povrchu, zabraňuje proniknutí výztuže na povrch a může být využita jako barevná úprava povrchu. Potom se do vrstvy pryskyřice postupně kladou přířezy skleněné výztuže a ty se pomocí válečku prosycují pryskyřicí. Takovýto postup je nazýván jako kladení za mokra. Pryskyřice může být nanášena štětcem, stěrkou, válečkem, nebo stříkací pistolí. Vytvrzení probíhá u většiny pryskyřic při teplotě okolo 80 °C. Důležitou věcí při ruční výrobě je zamezení tvorby vzduchových bublin, které zhoršují mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Při použití této technologie je však úplné odvzdušnění nemožné. [6, 15]

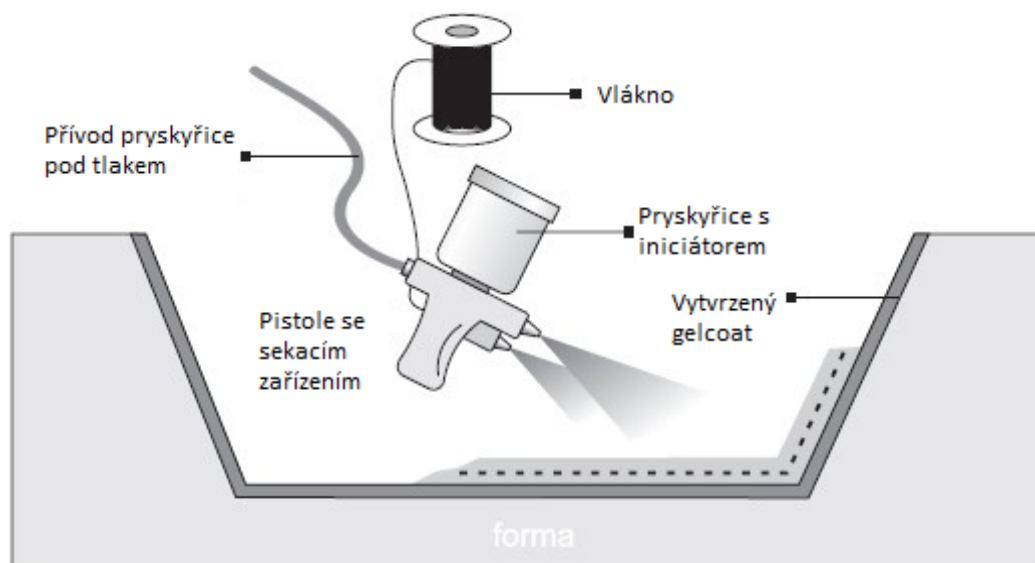


Obrázek 5: Schéma ruční výroby kompozitních materiálů [6]

Velkou výhodou této metody je výroba menšího počtu kusů za relativně přijatelnou cenu. Vyrábět je možné i tvarově složitější dílce. Výsledný produkt závisí na zručnosti operátora, na druhu použitých materiálu, na kvalitě formy a na vytvrzovacích podmínkách. [6,15]

## 2.2 Stříkání laminátu

Stříkání laminátu patří mezi částečně mechanizované formy ručního kladení. Tato metoda je vhodná při výrobě malých sérií, velkoplošných dílů a nanášení povlaků. Výztuž, pryskyřice a ostatní složky se nanášejí na povrch formy pomocí stříkacího zařízení. Zařízení se skládá ze dvou nádrží, z nichž jedna obsahuje směs pryskyřice a iniciátoru a druhá směs pryskyřice a urychlovače. Přes sekací zařízení je přiváděn svazek pramenců a seká se na délku 20 až 50 mm. Pomocí tlakového vzduchu se směs složená z těchto tří složek stříká tryskami na povrch formy s nánosem separátoru. [6, 15]

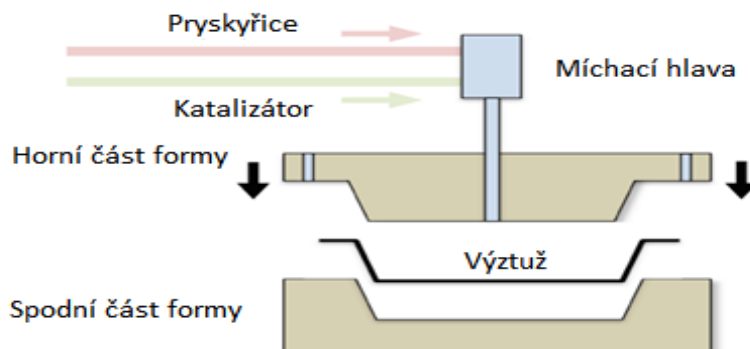


Obrázek 6: Schéma výroby kompozitu stříkáním [6]

## 2.3 Technologie RTM – Vysokotlaké vstřikování

Tato technologie spojuje nízké základní investice s dobrou kvalitou výlisku a je vhodná pro průmyslovou výrobu středně velkých sérií. Prvním krokem při použití vysokotlakého vstřikování je vložení přířezů výztuže do formy. Tyto formy jsou dvoudílné a vyrábějí se většinou z laminátu, nebo vysoce plněných pryskyřic. Pro velké série, nebo pro vyhřívané formy se používají formy ocelové. Po uzavření formy se do ní přivádí pryskyřice pod tlakem maximálně 5 barů. Dalším krokem může být vytvoření vakua, které zlepšuje prosycení výztuže a odstraní bubliny. Tato metoda se nazývá VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding). Zkrácení výrobního času a snížení viskozity pojiva dosáhneme použitím vytápěných forem. Snížení viskozity pojiva umožňuje prodloužení zatékačí dráhy. Tímto způsobem je možné opakovaně vyrábět výlisky s požadovanými parametry. Dalším možným způsobem

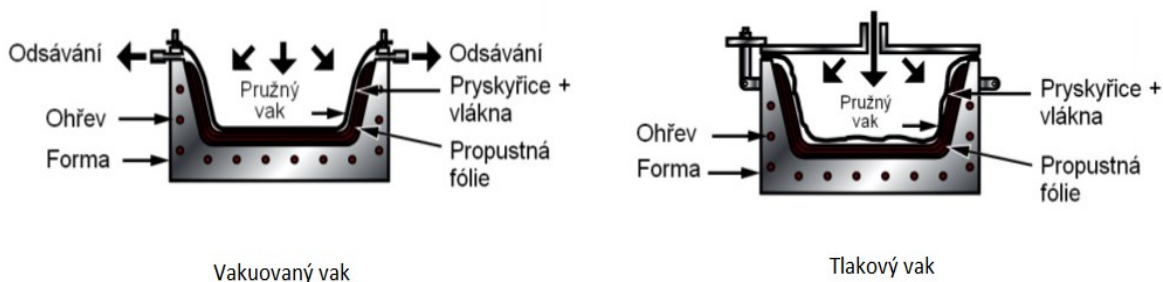
využití technologie RTM je její kombinování se zpracování prepregů. Tato metoda se nazývá SQRTM. Při použití této metody je důležité přesné umístění vtoků. Po uzavření formy se dovnitř vstříkne malé množství pryskyřice, která neslouží k prosycení prepregu, ale k udržení stabilního hydrostatického tlaku a k odstranění vzduchových bublin. [6, 8]



Obrázek 7: Schéma technologie RTM [8]

## 2.4 Lisování pomocí vakuovaného vaku a tlakového vaku

Pro lisování pomocí vakuovaného vaku se používá jednodílná forma. Následně se přikryje laminát porézní separační fólií, na kterou se položí hrubá odsávací tkanina a forma se utěsní pomocí těsnění a fólie. Takto připravená forma se připojí k čerpadlu, které ve formě vytvoří vakuum. Na formu působí atmosférický tlak, který zhutní laminát a také odstraní vzduchové bubliny. Přebytečná pryskyřice se odvede z odsávací tkaniny i ze žlábků, který je umístěn na obvodu formy. Při použití dvoudílné formy dostaneme výlisky s oboustranně hladkým povrchem. Lisování pomocí tlakového vaku je v podstatě obrácenou variantou lisování pomocí vakuovaného vaku. Negativní forma musí být uzavřena krytem, aby se ve formě dosáhlo rovnoměrného přetlaku. Vysokým rozdílem tlaků dochází k lepšímu zhutnění laminátu. Nevýhodou je, že forma oproti předchozí technologii musí být podstatně stabilnější. [6]

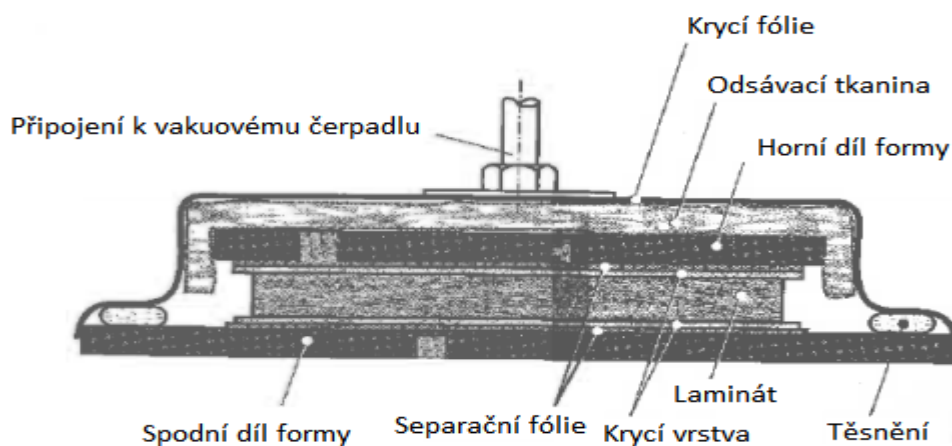


Obrázek 8: Schéma technologie vakuovaného a tlakového vaku [6]



## 2.5 Lisování v autoklávu

Jedná se v podstatě o spojení lisování pomocí vakuovaného a tlakového vaku. Tato metoda je velice nákladná a dovoluje pouze malosériovou výrobu. Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba, s přesným řízením tlakových a teplotních cyklů. Spojením přetlaku, teploty a vakua dochází k velmi účinnému zhutnění a odstranění vzduchových bublin. Vytvrzovací teplota termosetických materiálů se pohybuje okolo 180 °C. Typické lisovací tlaky používané pro lisování v autoklávu jsou mezi 2 až 25 bary. Příprava formy, respektive kladení jednotlivých separačních, odsávacích a vakuovacích fólií probíhá mimo autokláv. Požadovaný obsah výztuže zajistí odsávací tkanina, která odvede a zadrží přebytečnou pryskyřici. Tlak, který uvnitř působí zabrání vytékání matrice, ke kterému dochází například u lisování. Výhodou této technologie je možnost současného spojení a vytvrzení i velmi složitých výlisků. [6, 15]



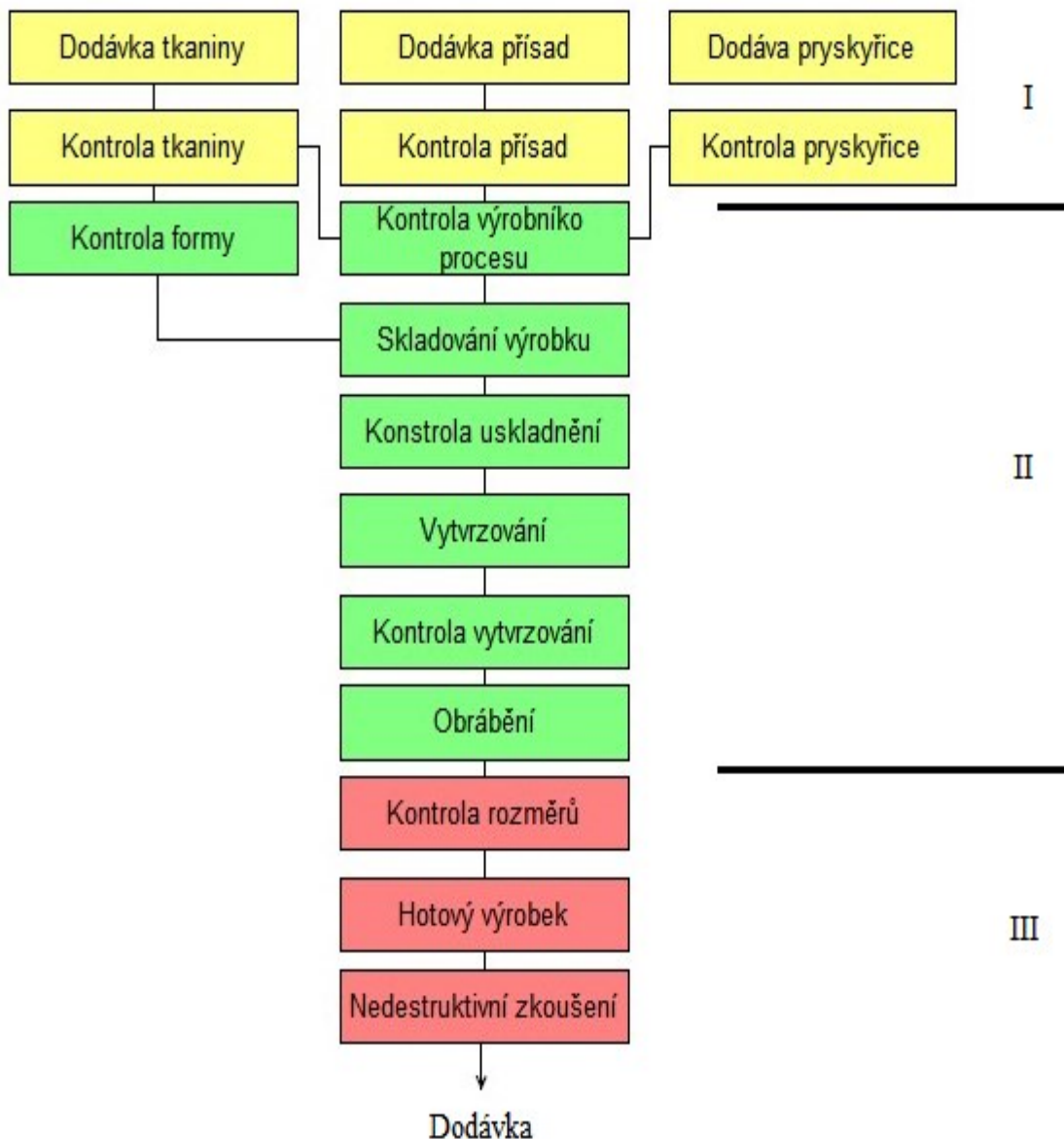
Obrázek 9: Schéma technologie lisování v autoklávu [6]

## 2.6 Zpracování lisovacích rohoží SMC

Tyto rohože se zpracovávají převážně na hydraulických lisech ve vytápěných ocelových formách. Lisovací tlaky se pohybují v rozmezí od 30 do 140 barů. Vyšší lisovací tlaky jsou potřeba pro vyšší obsah skelné výztuže, nebo plniv. Přířezy se připravují na řezačce, nebo ručně. Plocha formy se pokryje přířezy z 30 až 70 %. Přesné množství přířezů závisí na požadované délce dráhy zatékání. Lisovací teploty jsou v rozmezí od 130 až 160 °C. Výlisky z rohoží SMC mají relativně příznivou cenu a dobré mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů patří mezi nejpoužívanější technologie výroby termosetických kompozitů. Velkou výhodou těchto kompozitů je jejich tvrdost a snadná úprava povrchu. Mezi nejčastěji vyráběné díly patří skříňe kabelových rozvaděčů, kryty svítidel a díly karoserie automobilů. [6, 15]

## 2.7 Kontrola výroby kompozitních materiálů

Při výrobě kompozitních materiálů je důležitá několikanásobná kontrola. Jednotlivé složky prochází kontrolami, které se provádějí podle příslušných norem. Důležité je také zajištění vhodných podmínek pro danou technologii. Mezi tyto podmínky patří zejména příznivá teplota, vlhkost, tlak a nízká prašnost. Hotový výrobek je pak podroben destruktivním i nedestruktivním zkouškám. Na obr. 14. je uvedena třístupňová kontrola kvality kompozitu s tkaninovou výztuží a polymerní matricí. [6]



Obrázek 10: Třístupňová kontrola kvality při výrobě kompozitu [6]

### 3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITU

Vliv na chování kompozitu při působení mechanického zatížení mají zejména orientace vláken, rozložení plniva a vláken, vytvrzení matrice, zakřivení vláken a obsah vláken. Porušení struktury, nebo únavové procesy jsou u kompozitů mnohem složitější, než u homogenních materiálů. Zjišťuje se zde zejména vznik a rychlost šíření trhlin, stav poškození a životnost materiálu. Porušení nosných vláken způsobují lokální poškození různého druhu. Porušením nosných vláken může dojít až k celkovému lomu. Lamináty, které jsou zatíženy víceosým namáháním, mají větší pravděpodobnost vzniku mezivláknového poškození. Vzniklé poškození způsobují vzduchové bubliny, nepravidelnost uspořádání vláken, nedostatky v adhezivním spojení složek a na druhu zatížení. Mimo zkoušky, které jsou zmíněné v dalších kapitolách, zde patří zkoušky, jako zkouška rázová, zkoušky opakovaným zatížením, zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti, dále se zjišťuje nesprávná orientace vláken ve vrstvě, delaminace volných okrajů, propadliny, dutiny, porušená vlákna a porušení matrice. [3, 6]

#### 3.1 Zkouška tahem

Hlavním cílem tahových zkoušek je zjistit modul pružnosti, pevnost v tahu a poissonovo číslo kompozitního materiálu. Zkušební tělesa pro zkoušky tahem mají mnoho tvarů a geometrií, ty závisí na normě, podle které se zkouška provádí.

a. **Zkouška tahem dle ASTM D3039/D3039 M-08**

Cílem této zkoušky je zjistit moduly pružnosti v příčném a podélném směru, poissonovo číslo, pevnost v tahu v obou směrech a poměrné prodloužení při přetržení. Pracovní délka zkušebního tělesa je 150 mm, celková délka tělesa je 250 mm, šířka tělesa je 25 mm a tloušťka tělesa je 2 až 4 mm. Pevnost se určuje kolmo k vláknům. Na koncích pásků jsou epoxidovým lepidlem přilepeny plechové příložky o tloušťce 3 mm. Pro upevnění tělesa se používají pneumatické, nebo hydraulické čelisti. K přesnému určení podélné a příčné deformace se používá elektronický průtahoměr.

b. **Zkouška tahem dle ASTM D7291/D7291M**

Měří se pevnost laminátu ve směru kolmém na jeho plochu. Tahová síla je přivedena kovovými příložkami na těleso specifického tvaru.

c. **Zkouška tahem navíjených kompozitních trubek dle ASTM D21105-01**

Touto zkouškou kromě pevnostních a deformačních parametrů lze zjistit i způsob porušení trubky. Trubky se zkouší s různým úhlem návínů a s různým vrstvením. Na

konec trubky je nainstalovaná zátka, obvykle hliníková, aby byly její konce zesílené. Kovové čelisti svírající konce trubky jsou zality epoxidovou pryskyřicí a navzájem sešroubovány. Výsledná deformace se měří tenzometry.

**d. Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 527**

Na zkušební těleso se působí ve směru jeho podélné osy. S rostoucí silou dochází k deformacím tělesa a nakonec až k jeho přetržení. Praktické provedené zkoušky je obdobné, jako u materiálů kovových. Trvale se zaznamenává průběh síly a deformace tělesa. Zkušební těleso má celkovou délku 250 mm, šířku 15 až 50 mm a délku pracovní části 150 mm. Při měření charakteristik materiálu je nutné, aby tělesa byla vyříznuta ze zkušební desky přesně ve směru os ortotropie. [6, 11, 12]

### 3.2 Zkouška tlakem

Při zkoušce tlakem hrozí ztráta stability zkušebního tělesa, proto musí být jeho geometrie a rozměry pečlivě navrženy. Vhodná jsou válcová tělesa, nebo trubky, protože zjišťují symetrické zatížení. Je-li adheze mezi vláknem a matricí dobrá, lom nastává vlivem smyku. V opačném případě lom nastane vlivem delaminace. Plochy, které budou namáhány vnějším tlakem, musí být zcela rovné a rovnoběžné.

**e. Zkouška tlakem dle ASTM D695**

Při působení tlaku na jednosměrnou vyztuženou vrstvu ve směru os vláken dochází k poruše ztráty stability vláken. Hodnota pevnosti je velmi citlivá na zvlnění vláken a úroveň mezifázové soudržnosti. Nejvyšší pevnost v tlaku mají kompozity s vysoce tuhými vlákny o velkých průměrech. Zkušební tělesa mohou mít tvar lopatky, ale s mnohem kratší pracovní částí. Těleso bez přílozek musí být při zkoušce vedeno, aby nedošlo ke vzpěru. Touto zkouškou zjistíme pevnost v tlaku ve směru vláken i ve směru na něho kolmý, poissonovo číslo v tlaku, moduly pružnosti v tlaku v obou směrech a poměrné zkrácení při porušení.

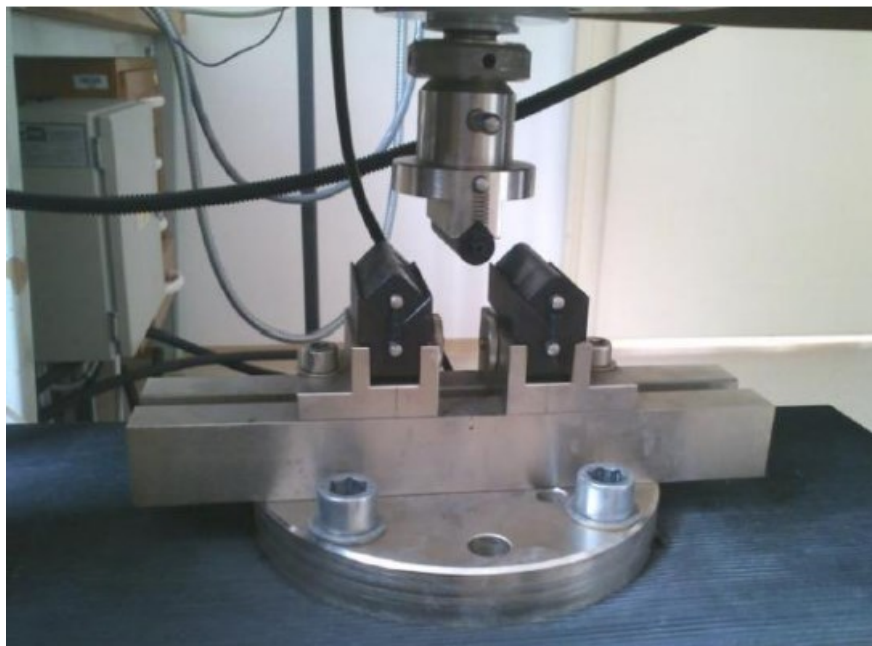
### 3.3 Zkouška smykem

Zvláštnost u kompozitních materiálů je kromě jiného i závislost pevnosti ve smyku na směru zatížení. Ve směru vláken je únosnost materiálu mnohem vyšší, než ve směru na vlákna kolmém. Zvláštní případ je laminát namáhaný smykovým napětím, které působí pod úhlem 45° ke směru vláken. V rovnoběžném a příčném směru k vláknům působí pouze normálová

napětí. Realizace prostého smyku je velmi náročná, proto je nejvhodnější zkušební tělesu tvaru trubky namáhat krutem. Náročnější, ale také velice používaná je rovinná zkouška pevnosti. Touto zkouškou zjistím interlaminární pevnost ve smyku a moduly pružnosti ve smyku. Pro různé uspořádání vláken dostaneme různé hodnoty těchto parametrů.

### 3.4 Zkouška ohybem

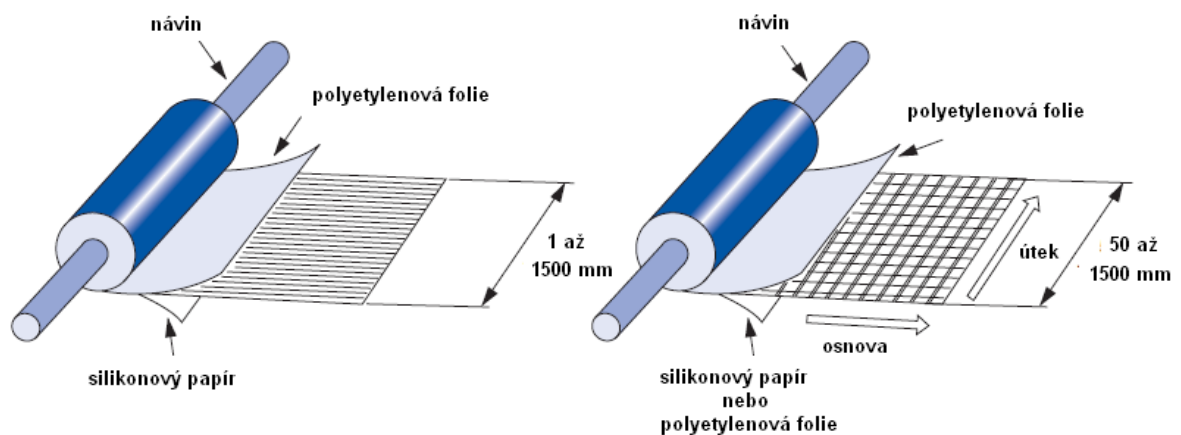
Pro zkoušku ohybem je typické tří, nebo čtyř bodové uložení. Předpokladem při určení materiálových charakteristik je lineární rozdělení normálových napětí. Pevnost v ohybu je velmi závislá na poloze vláken vzhledem k neutrální ose. Zkouška čtyřbodovým ohybem má výhodu v konstantním rozložení ohybového momentu po celé délce rozteče uložení vzorku. Při zkoušce tříbodovým ohybem existuje ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu v bodě zatížení. Největší smykové napětí se nachází mezi vrstvami uprostřed tloušťky tělesa. Pevnost v ohybu je silně závislá na vrstvení. Důležité je také sledovat druh porušení. Přijatelný druh porušení je lom vyvolaný tahem, nebo tlakem. Měření se musí provádět na dostatečně štíhlých vzorcích, protože s rostoucím štíhlostním poměrem stoupají hodnoty pevnosti a modulu pružnosti. Normy pro zkoušení ohybem jsou například ČSN EN ISO 14125, ASTM D7901 (tříbodový ohyb), ASTM D62722 (čtyřbodový ohyb), nebo ASTM D2344/D2344M-00 (zkouška krátkého nosníku). [6, 11, 12]



Obrázek 11: Přípravek pro zkoušku tříbodovým ohybem [12]

## 4 PREPREGY

Prepregy jsou polotovary, které jsou určeny pro výrobu kompozitu, jejich hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Hlavní výhodou prepregů je vysoký podíl výztuže, stejnosměrnost a hladkost hotových dílů, která souvisí s předem definovatelným a přesným uložením výztuže. Nejběžnější jsou takzvané tkaninové prepregy, ale dobře lze impregnovat i pásy a jednosměrné či multiaxiální struktury. Jako pryskyřičnou matricí lze používat modifikované epoxidové, nebo fenolové pryskyřice, které při pokojové teplotě nejsou schopné tečení. Při zahřátí pryskyřice velmi rychle na krátkou dobu zkapalňuje a plně impregnuje vlákna předtím, než začne vytvrzovat. V praxi nejčastěji používané materiály výztuže jsou uhlík, aramid, skelné vlákna, nebo jejich kombinace. Prepregy se skladují při teplotě okolo  $-20^{\circ}\text{C}$ . [13, 14, 16]



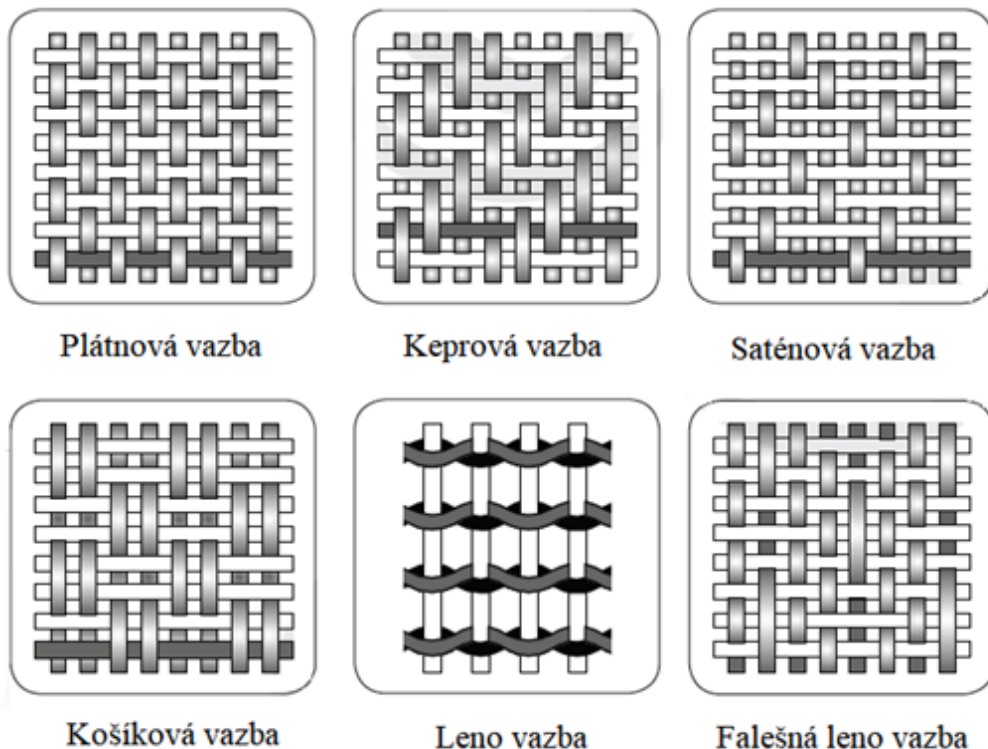
Obrázek 12: Schéma jednosměrně a dvousměrně orientovaného prepregu [9]

### 4.1 Druhy vazeb

Tkaniny se vyrábějí vzájemným propletením osnovních a útkových vláken. Druh vazby má vliv na mechanické vlastnosti výsledného produktu. Kombinací různého propletení vláken získáme námi požadované vlastnosti. V praxi se nejčastěji používá plátňová vazba, keprová vazba a saténová vazba.

- Plátňová vazba – Základní jednoduchá vazba. Každé osnovní vlákno střídavě prochází nad a pod útkovým vláknem. Výhodou je dobrá rozměrová stabilita, jednoduché zpracování a vznik malých ořepů při řezání.

- Keprová vazba – Tato vazba dosahuje větší pevnosti díky menšímu zvlnění vláken. Tento typ tkaniny je vhodný pro tvarově složitější dílce, díky vyšší ohebnosti tkaniny.
- Saténová vazba – Saténová vazba je vhodná pro dosažení hladkých povrchů. Na rozdíl od keprové vazby má menší vychýlení vláken. Používá se pro prostorově složité prvky.
- Košíková vazba – Je v podstatě stejná, jako plátňová vazba, jediný rozdíl je v počtu propletených vláken. V tomto případě se proplétají dvě, nebo více osnovních vláken s dvěma nebo více útkovými vlákny. Oproti plátňové vazbě má větší pevnost, ale menší stabilitu.
- Leno vazba – Zlepšuje stabilitu v tkaninách, které mají nízký počet vláken. Slouží především ke kombinaci s jinými tkaninami, protože při použití samotné leno vazby by se nepodařilo vytvořit efektivní kompozit.
- Falešná leno vazba – Hladká vazba, ve které se příležitostně osnovní vlákna v pravidelných intervalech prokládají dvě, nebo více útkových vláken. [13, 14, 16]



Obrázek 13: Orientace vláken pro jednotlivé druhy tkaninových vazeb [13]

## 4.2 Matrice

Matrice je spojitá složka, která spojuje výztuž a přenáší do ní zatížení. Matrice také chrání výztuž před vlivem okolí. Kromě toho druh matrice také určuje provozní teplotu výsledného prepregu, která je klíčová pro volbu prepregu při výrobě. Nejpoužívanější druhy pojiva pro výrobu prepregů jsou epoxidové, fenolické a bismalitické pryskyřice.

### 4.2.1 Epoxidové pryskyřice

Tyto pryskyřice mají dobré mechanické vlastnosti a při kombinaci s vhodnými tvrdidly lze dosáhnout i vyšší teplotní odolnosti. Jejich výhodou je velká houževnatost, snadné zpracování a to, že neobsahují škodlivý styren. V praxi se nejčastěji používají pryskyřice na bázi bisfenolu A, nebo bisfenolu F. Lepších technologických vlastností, zejména snížení viskozity lze dosáhnout přidáním takzvaných reaktivních ředidel. Používají se pro letecký a lodní průmysl, automotive, kolejovou a vojenskou techniku.

### 4.2.2 Fenolické pryskyřice

Fenolické pryskyřice jsou reaktivní pryskyřice, které se vyrábějí kondenzací fenolů a 30 až 50% vodních roztoků aldehydů. Jednotlivé druhy těchto pryskyřic se liší použitím různých druhů fenolických surovin, různých molárních poměrů fenolu a formaldehydu a použitím různých chemických, nebo fyzikálních modifikací. Mají výbornou odolnost proti hoření a proti vysokým teplotám, nízkou toxicitu a nenákladnou výrobu. Používají se v leteckém a lodním průmyslu.

### 4.2.3 Bismalitické pryskyřice

Jedná se o poměrně nový druh pryskyřice, který výborně kombinuje vlastnosti, jako jsou dobré mechanické vlastnosti při zvýšených teplotách i v mokřém prostředí, téměř konstantní elektrické vlastnosti v širokém rozmezí teplot, nehořlavost, odolnost vůči radiačnímu záření a odolnost vůči působení chemikálií. Jejich snadná zpracovatelnost a jejich vynikající vlastnosti je činí oblíbenými, při výrobě moderních kompozitních materiálů a v elektronice. Tyto pryskyřice se používají především v leteckém průmyslu, a to konkrétně pro některé díly leteckých motorů. [6, 9, 18]



### 4.3 Výztuže

Hlavním úkolem výztuže je přenášet zejména tahové napětí. Druh, materiál, orientace a uspořádání výztuže má velký vliv na výsledné vlastnosti kompozitu. Tyto faktory ovlivňují vlastnosti, jako jsou pevnost, elektrická a tepelná vodivost a houževnatost. Při výrobě prepregů se nejčastěji jako výztuž používají tkaniny. Kromě tkanin lze používat pásy a rovin-  
gové svazky. Výztuže mohou být z uhlíkových, skleněných, aramidových, nebo přírodních vláken.

#### 4.3.1 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují extrémně vysokou pevností a tuhostí, mají však nízkou tažnost. Výchozí organická surovina je karbonizována, tím dojde k odštěpení téměř všech prvků až na uhlík. Mechanické vlastnosti se zlepšují s rostoucí teplotou, tím se zvyšuje i grafítizace. Teplotou 1800°C tvorba grafitové struktury končí. Suroviny pro výrobu uhlíkových vláken jsou celulóza, polyakrylonitril a smola. K zajištění vysoké pevnosti slouží co nejtěsněji uložená síť silných vazeb, vyrobená z těchto vláken. Uhlíková vlákna tvoří více než 90 % uhlíku, 7 % dusíku, 1 % kyslíku a 0,3 % vodíku. Vzhledem k jejich vysokému modulu a pevnosti a relativně nízké hmotnosti, ale vysoké ceně se tyto výztuže používají pro speciální aplikace. Kombinují se především s epoxidovými pryskyřicemi a vyrábí se z nich zejména díly do závodních automobilů, díly lodí, sportovní potřeby a dílce pro letecký průmysl.

#### 4.3.2 Aramidová vlákna

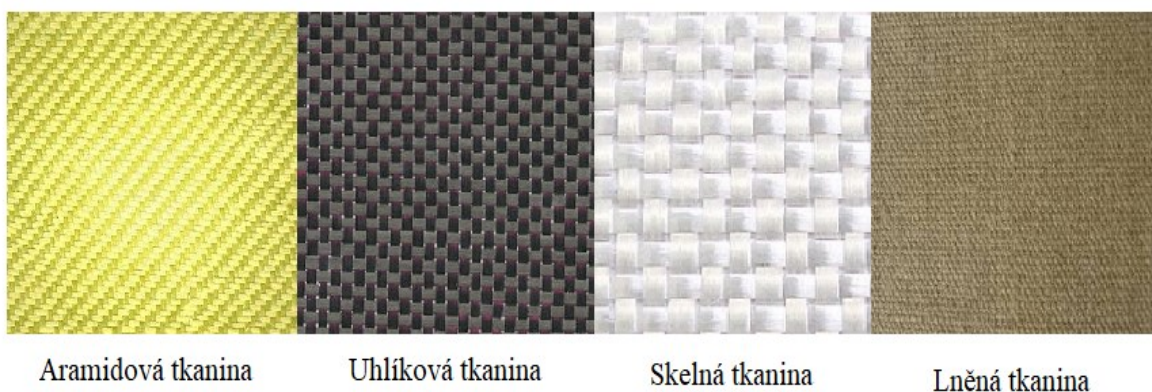
Jedná se o vlákna na bázi lineárních organických polymerů. Jejich kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Vlákna vyrobená z aramidu se vyznačují vysokou pevností a tuhostí, nízkou hmotností avšak mají nízkou adhezi k matrici. Tyto vlastnosti zajišťuje pravidelné uspořádání fenolenových jader a aramidových skupin s vazbami vodíkových můstků. Aramidová vlákna lze zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V laminátu lze využít až 70 % jejich skutečné pevnosti. Hlavní oblast použití se nachází v automobilovém průmyslu, kde se používají pro výrobu brzdového obložení, pro výrobu pneumatik, dále se také využívají pro balistické aplikace a světlovodné kabely. Aramidové kompozity jsou vhodné pro výrobu lehkých konstrukcí namáhaných tahem, nikoli však tlakem a ohybem.

### 4.3.3 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se vyrábějí tažením z trysek. Při teplotě asi 1400°C se roztaví křemičitý písek, vápenec, kaolin, dolomit, kyselina boritá, a kazivec na E-sklovinu. Ta se několik dní čirí, poté vede v tekutém stavu kanálky před pecí do sprádacích trysek. Trysky jsou zahřáty tak, aby vlákna pomalu vytékala a rychle tuhla. Kalibrace průměru vláken se provádí dloužením na velmi rychle rotujícím navíjecím zařízení. Textilní vlákna se mohou dodávat ve formě příze, skané příze, pramenců, rohoží, sekaných pramenců a krátkých vláken. Tyto vlákna jsou na rozdíl od uhlíkových a aramidových izotropní. Vyznačují se zejména vysokou pevností, odolností vůči abrazi, nízkým modulem pružnosti, odolností vůči ohni a chemikáliím. Výsledné vlastnosti vláken ovlivňuje poměr jednotlivých složek.

### 4.3.4 Přírodní vlákna

Jedná se o rostlinná vlákna na bázi celulózy. Patří sem len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Velkou výhodou těchto vláken je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Vyznačují se nízkou měrnou hmotností, proto jsou vhodná pro různé lehčené konstrukce. Mezi jejich přednosti patří kromě nízké hustoty také malá abrazivita při mechanickém opracování a výhoda likvidace spalováním. Nevýhodou je však citlivost na působení vlhkosti, omezená volba matrice, omezená délka vláken, nákladná úprava pro zlepšení vazby s matricí a závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu. Nejrozšířenějším druhem přírodních vláken jen lněné vlákno. [6, 9, 18]

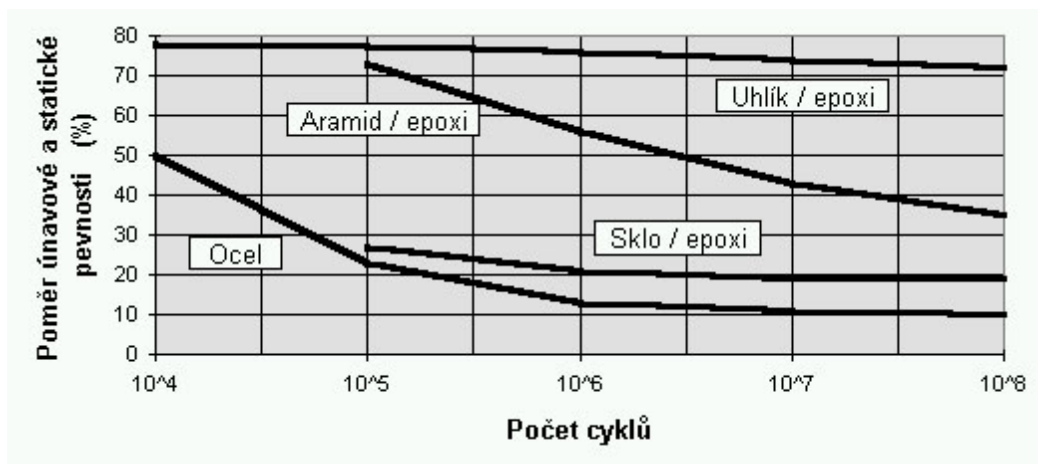


Obrázek 14: Základní druhy tkanin dle materiálu použitých vláken [19]

4.3.5 Porovnání mechanických vlastností jednotlivých typů vláken

Tabulka 1: Tabulka mechanických vlastností jednotlivých druhů vláken [6]

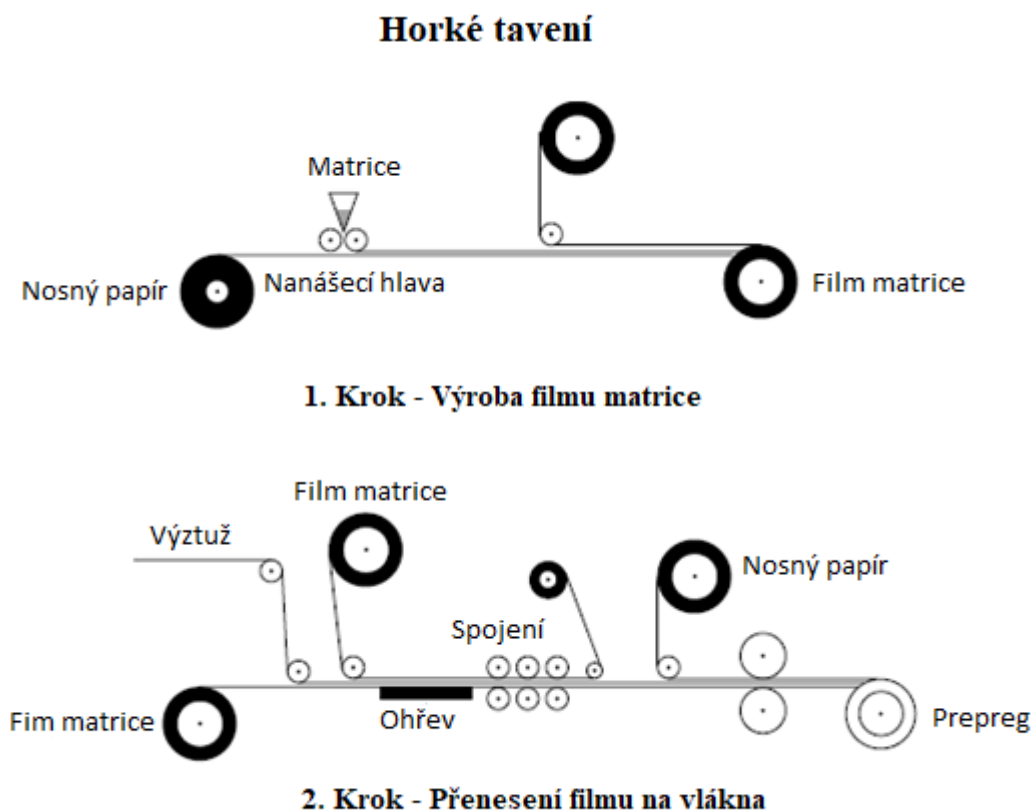
Vlákno		Pevnost v tahu	Modul pružnosti	Tažnost
		[Mpa]	[Mpa]	[%]
Uhlíková vlákna	karbonizované z PAN (95 % uhlíku)	5500	250000	1,9
	grafitované z PAN (99 % uhlíku)	4400	377000	1,2
	mezofázová smola (99 % uhlíku)	3800	900000	0,4
	Viskóza (99 % uhlíku)	1200	100000	0,5
	nanovlákno 0,2 μm	7000	600000	5
Skleněná vlákna	S-sklo	4500	85000	5,7
	E-sklo	3400	73000	4,8
Aramidová vlákna	Vysokotažný aramid	3600	80000	4
	Aramid s vysokou tuhostí	3800	131000	2,8
	Ultratuhy aramid	3400	186000	2
Přírodní vlákna	Konopí	600	70000	1,6
	Len	750	30000	2
	Juta	550	55000	2
	Sisal	600	20000	2



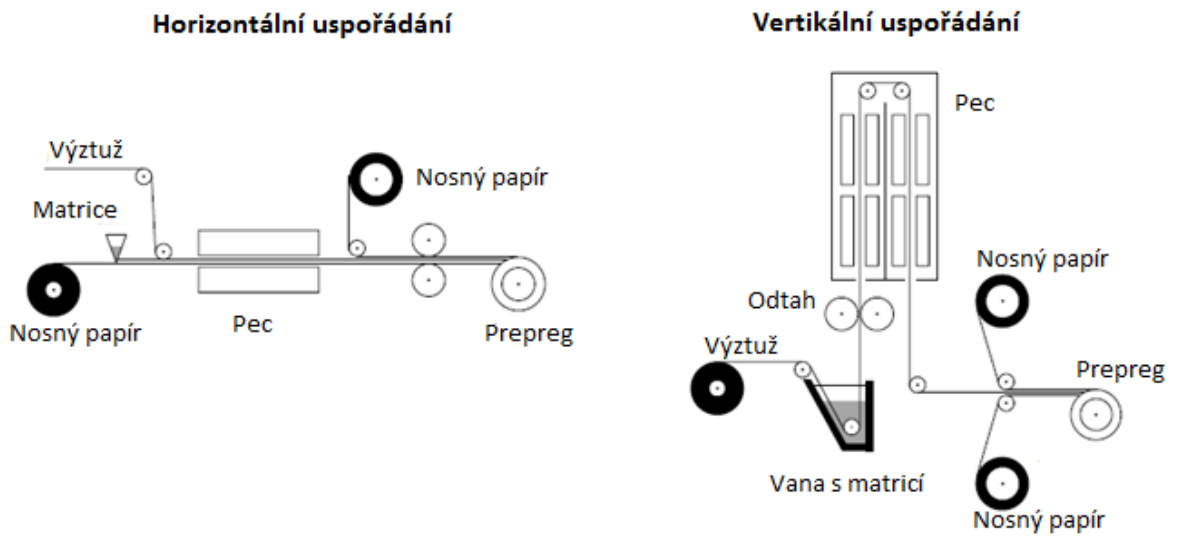
Obrázek 15: Únavové chování různých druhů kompozitů [22]

#### 4.4 Výroba prepregu

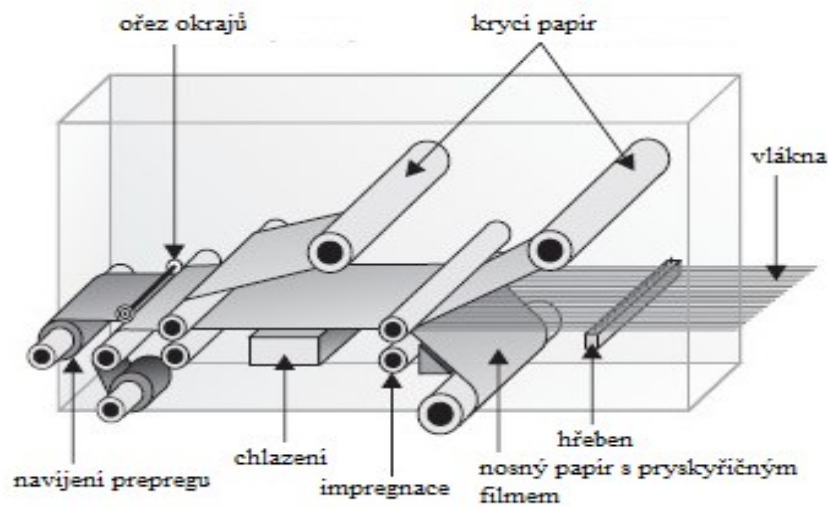
Prepregy se vyrábějí za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek na speciálních zařízeních. Prepregy se mohou vyrábět buď jednosměrné, nebo plošné. Výztužná vlákna jsou ponořena do tekuté pryskyřice. Prepregy je možné vyrábět dvěma způsoby. Prvním způsobem je metoda zvaná horké tavení. Tímto způsobem se tkanina impregnuje pryskyřicí za pomoci tlaku a tepla. Celý proces se rozděluje do dvou kroků. Prvním krokem je protažení tenké vrstvy horké pryskyřice na papírový podklad. Druhým krokem je nanášení výztuže s pryskyřicí a poté dojde k navinutí na jádro. Dalším způsobem výroby prepregů je takzvaný rozpouštědlový způsob. Principem tohoto způsobu je namáčení výztuže, která je ve formě tkaniny v lázni tekuté pryskyřice. Dalším krokem je umístění do sušárny, kde dojde k odpaření rozpouštědla, které je přidáno do pryskyřičné lázně. [6, 9, 18]



Obrázek 16: Výroba prepregu horkým tavením [9]



Obrázek 17: Výroba prepregů rozpouštědlovým způsobem [9]



Obrázek 18: Výroba jednosměrně orientovaného prepregu [9]

#### 4.5 Výhody prepregu

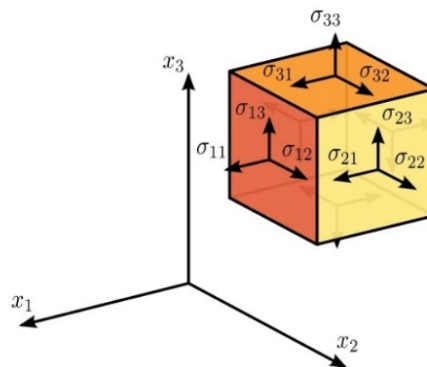
Mezi hlavní výhody prepregu patří snadné použití, dobrá odolnost proti únavě, snadno se kontroluje výsledná tloušťka kompozitu, odolnost vůči korozi, vysoký měrný modul a vysoká pevnost, nízký koeficient tepelné roztažnosti, čistota, snadná kontrola vlákna a jeho hustoty v tkanině a tlumení vibrací. Další výhodou je vysoký podíl vláknové výztuže, stejnosměrnost, hladkost povrchu a přesné uložení vláknové výztuže. Používáním polotovaru lze rovněž snížit cenu výsledného kompozitu. [6, 13, 14, 18]

## 5 MECHANIKA KOMPOZITU

Materiálové charakteristiky výsledného kompozitu závisí na charakteristikách jednotlivých složek. Výsledné vlastnosti ovlivňují faktory, jako jsou materiál výztuže a matrice, orientace výztuže, uspořádání výztuže, typ výztuže, kvalita mezisložkového rozhraní a poměr obsahu matrice a výztuže. Kromě těchto faktorů vlastnosti kompozitu ovlivní i použitá technologie pro jeho výrobu. [7, 21]

### 5.1 Vztah napětí a deformace pro ortotropní materiál

U tohoto modelu existují tři hlavní ortotropní osy, které jsou vzájemně ortogonální. Pokud působí v jejich směrech normálová napětí, způsobí pouze poměrné prodloužení a nedochází ke zkosení, zatímco smykové napětí způsobuje pouze zkosení a nikoli poměrné prodloužení.



Obrázek 19: Hlavní souřadný ortotropní systém [20]

Hookeův zákon obecného ortotropního materiálu v hlavním ortotropním souřadnicovém systému odvodíme z Hookeova zákona obecného anizotropního materiálu.

#### 5.1.1 Matice poddajnosti pro ortotropní materiál

Matice poddajnosti pro ortotropní materiál má následující tvar.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Jednotlivé složky poddajnosti lze vyjádřit pomocí materiálových charakteristik, které mají fyzikální, či geometrický význam. Mezi tyto charakteristiky patří modul pružnosti  $E$ , smykový modul pružnosti  $G$  a poissonovo číslo  $\nu$ . V tomto případě ortotropního materiálu jsou k těmto charakteristikám přiřazeny příslušné směrové indexy, které jsou v souladu s hlavním ortotropním souřadným systémem. Matice poddajnosti dostane následující tvar:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Matice poddajnosti obecného ortotropního materiálu obsahuje devět nezávislých konstant. Tyto konstanty jsou:  $E_1, E_2, E_3, G_{23}, G_{31}, G_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}, \nu_{12}$  [5, 7, 20, 21]

### 5.1.2 Matice tuhosti pro ortotropní materiál

Inverzí matice poddajnosti dostaneme matici tuhosti v následujícím tvaru.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Jednotlivé složky tuhosti lze rovněž vyjádřit pomocí materiálových charakteristik, které mají fyzikální, či geometrický význam. Mezi tyto charakteristiky patří modul pružnosti  $E$ , smykový modul pružnosti  $G$  a poissonovo číslo  $\nu$ . V tomto případě ortotropního materiálu jsou k těmto charakteristikám přiřazeny příslušné směrové indexy, které jsou v souladu s hlavním ortotropním souřadným systémem. Matice tuhosti získá následující tvar:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{21}+\nu_{31}\nu_{23}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{12}+\nu_{13}\nu_{32}}{E_3E_1\Delta} & \frac{1-\nu_{31}\nu_{13}}{E_3E_1\Delta} & \frac{\nu_{32}+\nu_{31}\nu_{12}}{E_3E_1\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{23}}{E_1E_2\Delta} & \frac{\nu_{23}+\nu_{13}\nu_{21}}{E_1E_2\Delta} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1E_2\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

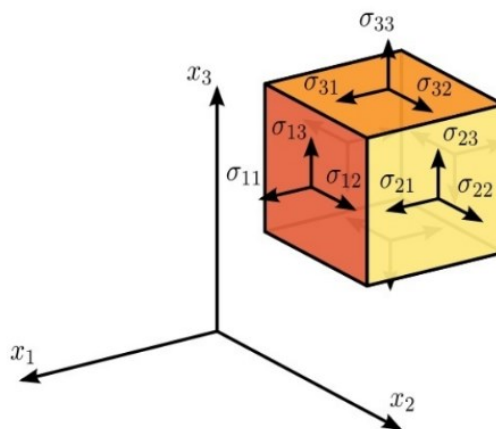
Kde  $\Delta$  vyjádříme jako:

$$\Delta = \frac{1-\nu_{13}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-2\nu_{12}\nu_{23}\nu_{31}}{E_1E_2E_3} \quad (5)$$

Matice tuhosti obecného ortotropního materiálu obsahuje rovněž devět nezávislých konstant. Tyto konstanty jsou:  $E_1, E_2, E_3, G_{23}, G_{31}, G_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}, \nu_{12}$  [5, 7, 20, 21]

## 5.2 Vztah napětí a deformace pro příčně izotropní materiál

Jedná se o zvláštní případ ortotropního materiálu, kde jedna z hlavních rovin je rovinnou izotropie. Vlastnosti kompozitu jsou symetrické dle této roviny a obou rovin na ni vzájemně kolmých. Jako hlavní osa je označována průsečnice těchto rovin. Příčná izotropie je typická zejména pro kompozitní materiály.



Obrázek 20: Hlavní souřadný systém pro příčně izotropní materiál [20]



### 5.2.1 Matice poddajnosti pro příčně izotropní materiál

Matice poddajnosti pro příčně izotropní materiál má následující tvar.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Jednotlivé složky poddajnosti lze vyjádřit pomocí materiálových charakteristik, které mají fyzikální, či geometrický význam. Mezi tyto charakteristiky patří modul pružnosti  $E$ , smykový modul pružnosti  $G$  a poissonovo číslo  $\nu$ . K těmto charakteristikám jsou přiřazeny směrové indexy, které odpovídají hlavnímu souřadnému systému. Matice poddajnosti pro příčně izotropní materiál dostane následující tvar:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_1}{E_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Matice poddajnosti příčně izotropního materiálu obsahuje pět nezávislých konstant. Tyto konstanty jsou:  $E_1 = E_2$ ,  $E_3$ ,  $G_{23} = G_{31}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_1 = \nu_{12} = \nu_{21}$  [5, 7, 20]

### 5.2.2 Matice tuhosti pro příčně izotropní materiál

Inverzí matice poddajnosti dostaneme matici tuhosti v následujícím tvaru.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Jednotlivé složky tuhosti lze rovněž vyjádřit pomocí materiálových charakteristik, které mají fyzikální, či geometrický význam. Mezi tyto charakteristiky patří modul pružnosti  $E$ , smykový modul pružnosti  $G$  a poissonovo číslo  $\nu$ . K těmto charakteristikám jsou přiřazeny směrové indexy, které odpovídají hlavnímu souřadnému systému. Matice tuhosti pro příčně izotropní materiál dostane následující tvar:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{\nu_1 + \nu_{31}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{31} + \nu_1\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_1 + \nu_{13}\nu_{31}}{E_3 E_1 \Delta} & \frac{1-\nu_{31}\nu_{13}}{E_3 E_1 \Delta} & \frac{\nu_{31} + \nu_{31}\nu_1}{E_3 E_1 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{13} + \nu_1\nu_{13}}{E_1^2 \Delta} & \frac{\nu_{13} + \nu_{13}\nu_1}{E_1^2 \Delta} & \frac{1-\nu_1^2}{E_1^2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E_1}{1+\nu_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Kde  $\Delta$  vyjádříme jako:

$$\Delta = \frac{(1+\nu_1)(1-\nu_1-2\nu_{13}\nu_{31})}{E_1^2 E_3} \quad (10)$$

Matice tuhosti obecného ortotropního materiálu obsahuje rovněž pět nezávislých konstant. Tyto konstanty jsou:  $E_1 = E_2$ ,  $E_3$ ,  $G_{23} = G_{31}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_1 = \nu_{12} = \nu_{21}$  [5, 7, 20, 21]

### 5.3 Vrstva vyztužená tkaninou

Tkaniny se skládají ze systému pramenců vláken, které jsou většinou kolmo na sebe určitým způsobem provázány. Z mechanického hlediska je vrstva vyztužená tkaninou ortotropní materiál, kde směry osnovy a útku tvoří osy ortotropie. Proplétáním vláken dochází k jejich zvlnění, což omezuje jejich efektivní pevnost a tuhost. Není-li tkanina tkaná hustě, má modul pružnosti u skleněných vláken o 2 až 5 % a u uhlíkových vláken asi o 7 % menší hodnotu, než kdyby šlo o vlákna přímá.

Výrobce o tkanině poskytuje tyto údaje:

- Plošnou hmotnost  $Q$
- Hustotu tkání ve směru osnovy  $v_o$  a ve směru útku  $v_u$
- Tloušťku tkaniny
- Počet přízí v osnově a útku
- Druh materiálu osnovy a útku a vazby tkaniny

Mechanicky je materiál vlákna popsán:

- Hustotou  $\rho_t$
- Elastickými vlastnostmi  $E_{II_f}$ ,  $E_{\perp f}$ ,  $\nu_{II_{\perp f}}$ ,  $G_{II_{\perp f}}$

Pomocí plošné hmotnosti  $Q$  a hustoty vlákna  $\rho_f$  lze stanovit objemový podíl vláken  $\varphi$  ve vrstvě tkaniny:

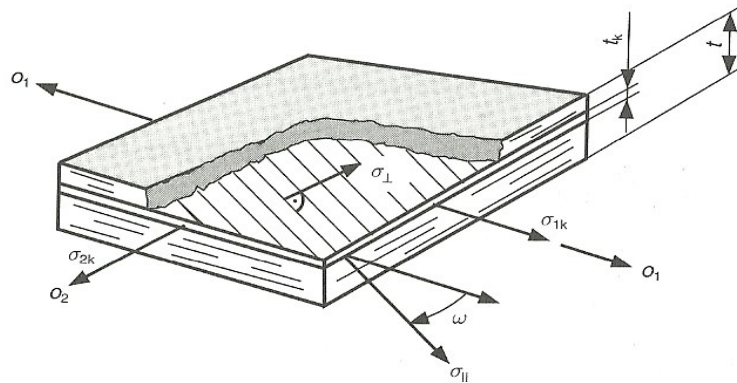
$$\varphi_t = \frac{V_f}{V_T} = \frac{Q}{\rho_t h \cdot 10^{-3}} \quad (11)$$

$V_f$  je celkový objem tkaniny o tloušťce  $h$ ,  $V_T$  je objem vláken v 1 m<sup>2</sup> vrstvy tkaniny. [6]

### 5.4 Klasická laminátová teorie

Pomocí takzvané klasické laminátové teorie lze stanovit  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$  a příslušná přetvoření  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\gamma_{12}$ , v každé jednotlivé vrstvě kompozitu. Je však nutné dodržet základní předpoklady:

- Tloušťka desky, nebo skořepiny je proti ostatním rozměrům malá
- Vrstvy jsou spolu pevně spojeny, při rovinném zatížení se deformují všechny vrstvy stejně



Obrázek 21: Systém souřadnic a označení [6]

Protože se všechny vrstvy ve směru os souřadnic deformují shodně, platí pro k-tou vrstvu podmínka kompatibility.

$$\varepsilon_{1k} = \bar{\varepsilon}_1 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{2k} = \bar{\varepsilon}_2 \quad (13)$$

$$\gamma_{12k} = \bar{\gamma}_{12} \quad (14)$$

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

Pomocí tuhosti příslušné vrstvy lze stanovit napětí, která působí v každé jednotlivé vrstvě.

$$\sigma_{1k} = C_{11k}\bar{\varepsilon}_1 + C_{12k}\bar{\varepsilon}_2 + C_{16k}\bar{\gamma}_{12} \quad (15)$$

$$\sigma_{2k} = C_{12k}\bar{\varepsilon}_1 + C_{22k}\bar{\varepsilon}_2 + C_{26k}\bar{\gamma}_{12} \quad (16)$$

$$\tau_{1k} = C_{16k}\bar{\varepsilon}_1 + C_{26k}\bar{\varepsilon}_2 + C_{66k}\bar{\gamma}_{12} \quad (17)$$

Podmínka rovnováhy ve všech třech případech je vyjádřena silami, vztaženými na jednotku šířky.

$$f_1 = \sigma_1 \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{1k} t_k \quad (18)$$

$$f_2 = \sigma_2 \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{2k} t_k \quad (19)$$

$$f_{12} = \tau_{12} \cdot t = \sum_{k=1}^N \tau_{12k} t_k \quad (20)$$

Dosazením rovnic 15, 16, 17 do rovnic 18, 19, 20 vznikne Hookeův zákon vícevrstvého elementu.

$$\bar{\sigma}_1 = \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N C_{11k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N C_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N C_{16k} \frac{t_k}{t} \quad (21)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N C_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N C_{22k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N C_{26k} \frac{t_k}{t} \quad (22)$$

$$\bar{\tau}_1 = \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N C_{16k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N C_{26k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N C_{66k} \frac{t_k}{t} \quad (23)$$

Součinitele u složek poměrné deformace představují tuhosti celého laminátu. Z toho plyne takzvaný zákon spolupůsobení, který se nachází v následujícím tvaru:

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

Důsledkem této laminátové teorie je nezávislost elastických vlastností laminátu na pořadí uložení vrstev. Z praktických důvodů je vhodné, aby složení laminátu bylo symetrické. V takovém případě je výhodné usnadnit výpočet spojením dvou vzájemně symetrických vrstev do výpočtových prvků a sčítat jejich tuhosti. [6]

## 6 POUŽITÍ PROGRAMU NX 11 PRO ANALÝZU KOMPOZITU

NX je komerční CAD, CAM, CAE program, který vlastní společnost Siemens PLM software. Tento program je určený pro tvorbu dílů i sestav, jejich následnou výkresovou dokumentaci, simulaci a analýzy výrobků a programování NC centra i měřících přístrojů. NX je modulární systém, který umožňuje souběžnou práci týmu řešitelů. V praxi to znamená, že na rozpracovaném dílu je možné provádět simulace a analýzy, popřípadě pevnostní a kinematické výpočty. Pro tvorbu kompozitních materiálů využívá modulární simulační sadu NX. Pomocí tohoto modulu je možné vytvořit, optimalizovat a zkontrolovat kompozitní strukturu. Nástroje pro tvorbu kompozitů umožňují snadné definování jednotlivých vrstev, orientace vláken, tkanin, nebo rohoží, materiál jednotlivých vrstev a jejich tloušťku. Tyto nástroje zpracují uživatelem zvolené požadavky a na základě těchto požadavků vytvoří konečně prvkový model, který představuje nadefinovaný kompozit. [23]

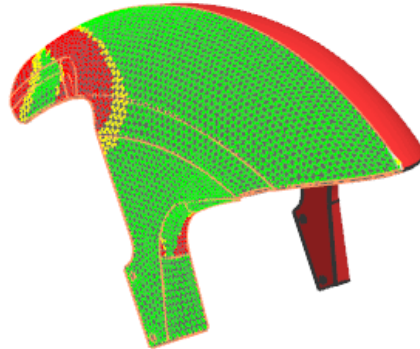
### 6.1 Modelování kompozitu pomocí Zone-Based

Modelování Zone Based umožňuje připevnění uživatelem zvoleného kompozitu k 2D, nebo 3D síťovým kolektorům. Interaktivní grafický modelář pomáhá uživateli vytvářet a skládat jednotlivé vrstvy efektivně. K tvorbě kompozitu je možné použít standartní předdefinované stohování sekvencí, nebo vrstvené skupiny, aby se minimalizovalo úsilí potřebné k vytvoření a úpravě komplexního vícevrstvého kompozitu. Laminát je možné naimportovat například z programu Microsoft Excel. Tento způsob modelování je jednodušší a je vhodný pro předběžné návrhy a pro tvorbu jednoduchých geometrií. [23]

### 6.2 Modelování kompozitu pomocí Ply-Based

Modelování kompozitu tímto způsobem spočívá ve vytvoření globální vrstvy, která je přiřazena k 2D síťovým kolektorům. Software automaticky spočítá fyzické vlastnosti vycházející z nadefinování jednotlivých vrstev. Tento způsob je vhodný pro přesné výpočty složitějších součástí. Nadefinovat lze druh výztužného materiálu, jeho orientaci, úhly a tloušťky jednotlivých vrstev a materiál jednotlivých vrstev. Jako výztužný materiál je zde možné nadefinovat jednosměrné vlákna, orientované, nebo nahodilé, tkaniny a rohože. V případě jednosměrných vláken orientovaných vlákna zůstávají paralelní a mohou po sobě klouzat. Při vyztužení tkaninou síťový algoritmus orientuje osovní a útkové vlákna. Vlákna se mohou po sobě otáčet. Dále je možné nadefinovat nastříhnutí tkaniny v místě ostrých přechodů, jako

by tomu bylo pře skutečné výrobě kompozitu. Tento program dále umožňuje zvolit počáteční a koncový body kladení a směr, kterým se tkanina bude pokládat. [23]

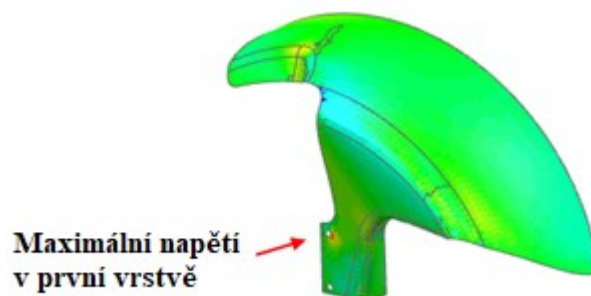


Obrázek 22: Zobrazení orientace vláken u kompozitního výrobku [24]

### 6.3 Optimalizace kompozitu v NX

Optimalizace laminátu v programu NX umožňuje zlepšení základních vlastností finálního produktu. Je možné zde optimalizovat fyzikální vlastnosti, zjistit tuhost, stabilitu a velikost deformace. Genetický optimalizátor zpracovává spojité proměnné, jako jsou orientační úhel a tloušťka vrstvy, stejně jako disktrétní proměnné, mezi které patří existence vrstvy a materiál vrstvy. Software poskytuje pět laminátových definic, které slouží k co nejbližšímu popisu skutečné laminátové struktury. Pomocí těchto nástrojů můžeme u kompozitů zjistit a graficky znázornit:

- Napětí v jednotlivých vrstvách
- Posunutí a prodloužení jednotlivých vrstev
- Indexy selhání vrstvy
- Napětí ve výsledné skořepině
- Hranice bezpečnosti [23]



Obrázek 23: Analýza a následná optimalizace kompozitního výrobku [24]

## 6.4 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (Finite Element Method) je technika, která nalezne přibližně řešení parciálních a analytických rovnic. Tato metoda se používá pro řešení problémů pružnosti a dynamiky, lineární strukturální analýzy, nelineární analýzy, kmitání a lomové mechaniky. Její variační formulace umožnila rozšíření na řešení proudění kapalin a plynů, vedení tepla, elektromagnetismus, akustiku a mechaniku hornin. Při řešení problémů touto metodou je třeba kontinuum rozdělit na konečný počet podoblastí. Mezi numerickými metodami, jako jsou metoda konečných objemů, metoda hraničních prvků, metoda sítí a další, zaujímá metoda konečných prvků zcela dominantní postavení. Řešení probíhá numericky převedením problému hledání spojité funkce na problém konečného počtu parametrů, pomocí nichž se hledané funkce aproximují. Tento proces se nazývá diskreditace. Na trhu je řada softwarů, které využívají metodu konečných prvků. Mezi ně patří Nastran, ANSYS, SAMCEF, Abaqus, COSMOL, COSMOS, Marc a další. [20,25]

### 6.4.1 Princip a postup tvorby a analýzy konečně prvkového modelu

Základním stavebním kamenem je prvek konečných rozměrů, na rozdíl od infinitesimálního pohledu klasické pružnosti, který vychází z představy rovnováhy na nekonečně malém elementu. Nutné je rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí. Je tedy třeba na modelu tělesa vytvořit síť konečných prvků. Každý typ prvků má charakteristickou dimenzi, tvar, polohu a počet uzlů. Každý uzel má své číslo a souřadnice. Dále je nutné, aby každý uzel měl nadefinované stupně volnosti. Je nutné definovat posunutí, rotaci, teplotu, elektrické napětí a podobně. Uzly jsou tedy body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení. Hustota a typ sítě zásadně ovlivňuje kvalitu výsledků a potřebnou kapacitu pro řešení. Samotné řešení se rozdělí na tři části, které jsou preprocessor, solver a postprocessor. [20,25]

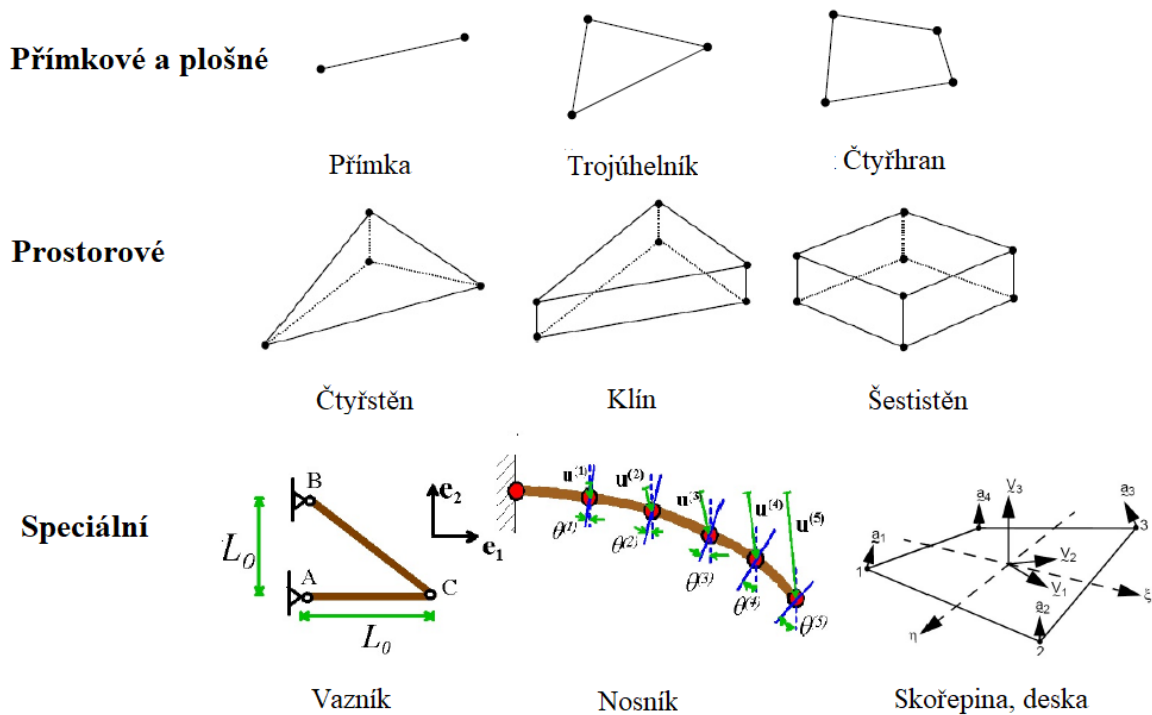
Tabulka 2: Postup tvorby a analýzy FEM modelu [20]

Preprocessor	Solver	Postprocessor
Geometrický model	Výpočet	Vyhodnocení a prezentace výsledků
Definice vlastností		
Volba elementu		
Tvorba sítě		
Okrajové podmínky		



### 6.4.2 Metoda konečných prvků – Element

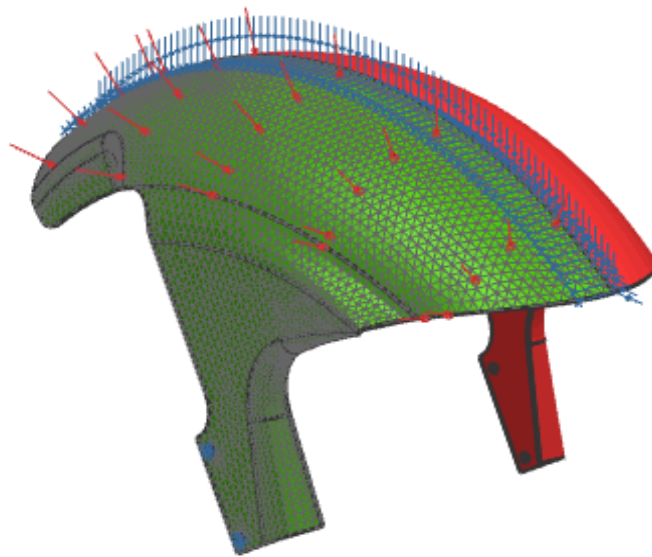
Elementy rozdělují těleso na jednotlivé základní oblasti. Každý element má své číslo, připojené uzly, interpolaci, integrační body a materiálové vlastnosti. Hustota a typ sítě vytvořené z elementů zásadně ovlivňují kvalitu výsledků a potřebnou kapacitu pro řešení. [20,25]



Obrázek 24: Základní typy elementů [20]

### 6.4.3 Zatížení a okrajové podmínky

Okrajové podmínky simulují stav při reálném provozu analyzované součásti. Uložení slouží k odebrání stupňů volnosti, aby nedošlo k pohybu součásti a aby co nejvíce přiblížilo reálné uložení součásti. Každý uzel má obecně šest stupňů volnosti. Jsou to posuvy ve směrech hlavních os  $x, y, z$  a natočení kolem těchto os. Zatížení se obvykle zadává pomocí sil, tlaků a momentů. Při zadávání je třeba si uvědomit, že každá osamělá síla, která je umístěná do jednoho uzlu způsobí velkou napět'ovou špičku, v praxi k tomuto však nedochází. Tlaky jsou zadávány na určité plochy prvku, ze které program vypočte výslednou sílu, kterou rozpočítá do jednotlivých uzlů prvku. Tyto podmínky mohou být mechanické, akustické, elektromagnetické, teplotní, magnetické, nebo například kontakt s jiným tělesem. [20,25]



Obrázek 25: Definování okrajových podmínek analyzovaného tělesa [24]

#### 6.4.4 Výhody a nevýhody

Omezením této metody jsou pouze kapacita dostupného hardwaru a časové nároky na výpočet. Výsledky se vztahují jen ke konkrétnímu případu, jakékoliv úpravy a optimalizace je třeba podrobit novému výpočtu. Správnost výsledků musí být vždy zvažována, výsledky nesmí být přijaty, pokud neodpovídají očekávání a zkušenostem výpočtáře. Kromě těchto faktorů však převažuje celá řada výhod, mezi které patří:

- Zkrácení vývojových časů
- Snížení nákladů na zavedení výroby
- Zvyšování kvality
- Dodržování norem
- Inovace
- Řešit lze i složitá tělesa
- Optimalizace součástí [20,25]

## 7 AUTOMOBILOVÁ KOLA V PRAXI

Ocelová kola se skládají ze dvou částí. První část je ráfek, který je v podstatě prstencová profilovaná část kola, která nese pneumatiku. Druhá část je disk, nebo kotouč kola, který slouží ke spojení náboje kola a ráfku. Obě tyto části se spojují většinou obloukovým, nebo odporovým svařováním. Označení a rozměry kol jsou stanoveny normami DIN a v současnosti jsou v souladu s mezinárodními standardy. Mezi hlavní rozměry kol patří zális, průměr roztečné kružnice pro přípevňovací šrouby, průměr dosedací plochy, průměr středního otvoru kola a průměr střední nosné části kola. [26, 27]

### 7.1 Rozdělení kol

Podle druhu použití se kola rozlišují pro:

- Motocykly
- Osobní automobily
- Nákladní automobily
- Zemědělské stroje
- Autobusy
- Stavební stroje
- Přípojná vozidla

V praxi existuje několik konstrukcí střední nosné části, podle které lze kola rozdělit na:

- Hvězdicová
- Disková
- Drátová
- Paprsková

Podle počtu pneumatik na náboji nápravy je lze rozdělit na:

- Jednoduché
- Podvojná [26, 27]

## 7.2 Ráfky

Ráfek je prstencová profilovaná část kola, jejímž úkolem je udržení pláště, aby mohl přenášet síly a aby nedošlo k pohybu mezi ráfkem a pláštěm. V praxi se nejčastěji používají ocelové ráfky. [26, 27]

### 7.2.1 Základní parametry ráfku

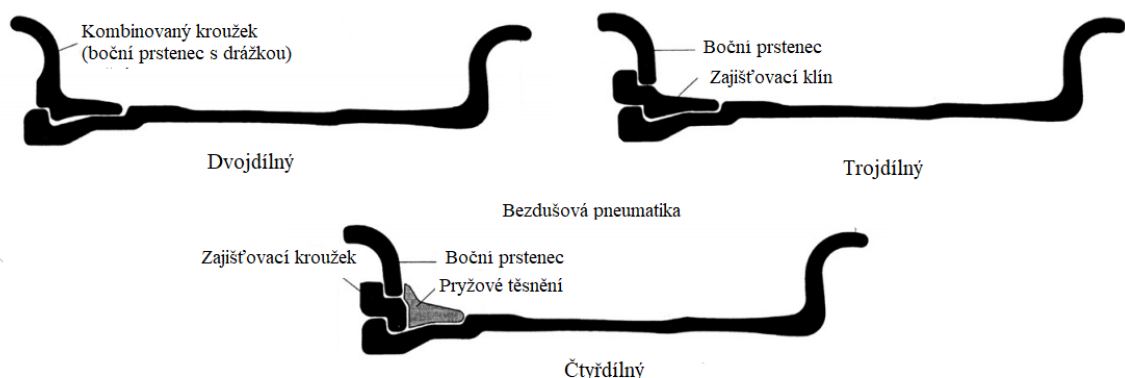
Moderní pneumatiky mají na obou dosedacích plochách po celém obvodu vyvýšení. Toto vyvýšení se nazývá hump a slouží k zajištění pneumatiky proti sklouznutí. Tento výstupek může být buď kulatý, nebo plochý. Okraj ráfku slouží jako boční opora pro patku pneumatiky. Šířka ráfku je vzdálenost od jednoho kraje ráfku k druhému, měřeno na vnitřních mocích kolmo na obvodovou čáru v palcích. Dosedací plochy ráfku pro patku pneumatiky, o kterou se pneumatiky opírá v radiálním směru ráfku, zabezpečuje dokonalé dosednutí pneumatiky. Prohloubení ráfku zajišťuje, aby bylo možné pneumatiku snáze namontovat k ráfku, prohloubení se zvětšuje směrem ke středu kola.

Ráfky se dělí na:

- Jednodílné
- Vícedílné

Podle jejich tvaru na:

- Symetrické
- Asymetrické [26, 27]



Obrázek 26: Dvojdílný, trojdílný a čtyřdílný ráfek [26]

### 7.3 Druhy kol podle konstrukce střední části kola

Design disků kol je velmi rozmanitý, protože kromě konstrukčních požadavků je nutné brát ohled i na jejich vzhled. Na kola působí vysoké zatížení, přitom kola musí mít co nejmenší hmotnost. Konstrukce disků se řídí podle náboje kol a typu brzd. Prostor pro brzdový kotouč, nebo buben musí být dostatečný pro přívod vzduchu a odvod tepla. [26, 27]

#### 7.3.1 Hvězdicová kola

Hvězdicová kola mají podobnou konstrukci jako disková kola, disk je však nahrazen hvězdicí. Hvězdice, které budou použity pro osobní automobily, se lisují z tenkého ocelového plechu. Pro nákladní automobily se hvězdice odlévají s hlavou jako jeden kus, ve většině případů mají dělený ráfek. [26, 27]



Obrázek 27: Hvězdicové kolo [29]

#### 7.3.2 Disková kola

Tento typ kola se používá pro velkosériovou výrobu a to pro osobní i nákladní auta. Disk je opatřen otvory, které snižují výslednou hmotnost kola a zlepšují přívod vzduchu pro chlazení brzd. Mezi největší výhody těchto kol patří jejich cena. Další výhodou je odolnost proti chemickým posypům. Největším nedostatkem těchto kol je jejich vzhled a malá tuhost. [26, 27]



Obrázek 28: Diskové kolo [30]

### 7.3.3 Drátová kola

Ráfek a náboj kole je spojen určitým počtem paprsků, které jsou uspořádány pod různými úhly tak, aby co nejlépe přenášeli hnací síly. Výroba těchto kol je časově náročná a vyžaduje pečlivé rozvržení při napínání jednotlivých drátů. Mezi výhody těchto kol patří nízká hmotnost, pružnost kol a pevnost. Nevýhodou však je časová náročnost výroby, údržba kol a aerodynamické vlastnosti. [26, 27]



Obrázek 29: Drátové kolo [28]

### 7.3.4 Paprskové kola

Po diskových kolech se v praxi nejčastěji používají paprsková kola z lehkých slitin. Nejčastěji se kola vyrábí ze slitin hliníku a hořčíku. Funkční plochy těchto kol jsou následně obráběny, proto jsou tyto kola výborně vyváženy oproti diskovým kolům. Paprsková kola se vyrábí dvěma způsoby První způsob je odlévání a druhým způsobem je zápusťkové kování. Výhodou je vzhled kol, nízká hmotnost a přesnost kol. Nevýhodou je nižší tuhost, vyšší cena a nízká odolnost proti posypům v zimním období. [26, 27]



Obrázek 30: Paprskové kolo [30]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

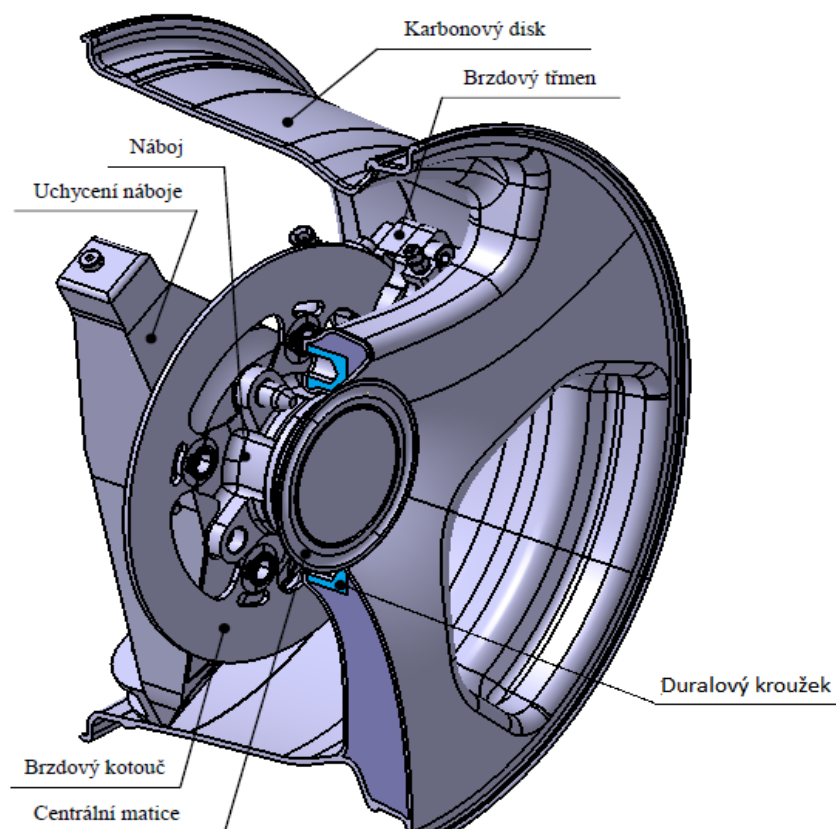
## 8 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem této práce bylo nalezení optimálního úhlu kladení jednotlivých vrstev uhlíkového prepregu na sebe, za účelem získání co nejlepších mechanických vlastností výrobku. Výrobkem byl v tomto případě disk, určený pro formuli Dragon 6 vyrobenou týmem TU Brno Racing. Velikost zatížení disku byla získána tenzometrickým měřením. Design disku i počet kladených vrstev prepregu na jednotlivé části tohoto disku byl pevně daný. Součásti disku byly vytvořeny v programu CATIA V5 a následně importovány ve formátu STEP do programu NX 11, ve kterém došlo k vytvoření FEM modelu a následné analýze.



## 9 TVORBA MODELU NAVRŽENÉHO DISKU

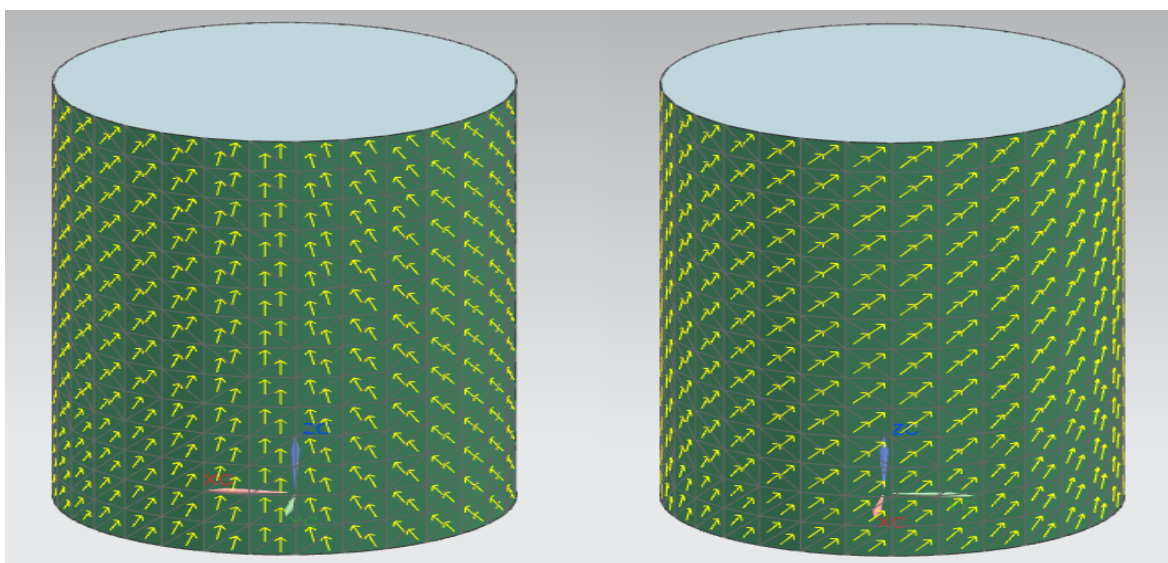
Navržený disk byl vyrobený z uhlíkového prepregu a skládá ze dvou základních částí. Jedná se o ráfek a střední část kola, která je v tomto případě tvořena třemi paprsky. Ráfek je prstencová profilovaná část kola, jejímž úkolem je přenášet síly a momenty na pneumatiku a zároveň zabránit vzájemnému pohybu mezi ráfkem a pneumatikou, střední část disku pak přenáší krouticí moment z náboje, na samotný ráfek. Tloušťka zhotoveného ráfku je 3 mm, skořepina střední části disku má tloušťku 2 mm. Rozměry disku a kroužku jsou popsány v diplomové práci: Vývoj a konstrukce uhlíkových ráfků pro automobilový průmysl [17], na kterou tato práce navazuje. Pro zjednodušení analýzy bylo z modelu vyjmuto jádro z PUR pěny, které zásadně neovlivní mechanické vlastnosti výsledného disku a sloužilo zejména k správnému zaformování materiálu. Pro hladký přenos krouticího momentu mezi nábojem a diskem byla střední část kola opatřena duralovým kroužkem, ve kterém byly vyvrtány díry o průměru 12 mm. Přenos krouticího momentu je zajištěn čtyřmi čepy, ostatní díry slouží jako odlehčení kroužku (Obr. 31). Uhlíkový disk i duralový kroužek byly vytvořeny v programu CATIA V5 a následně importovány ve formátu STEP do programu NX 11.



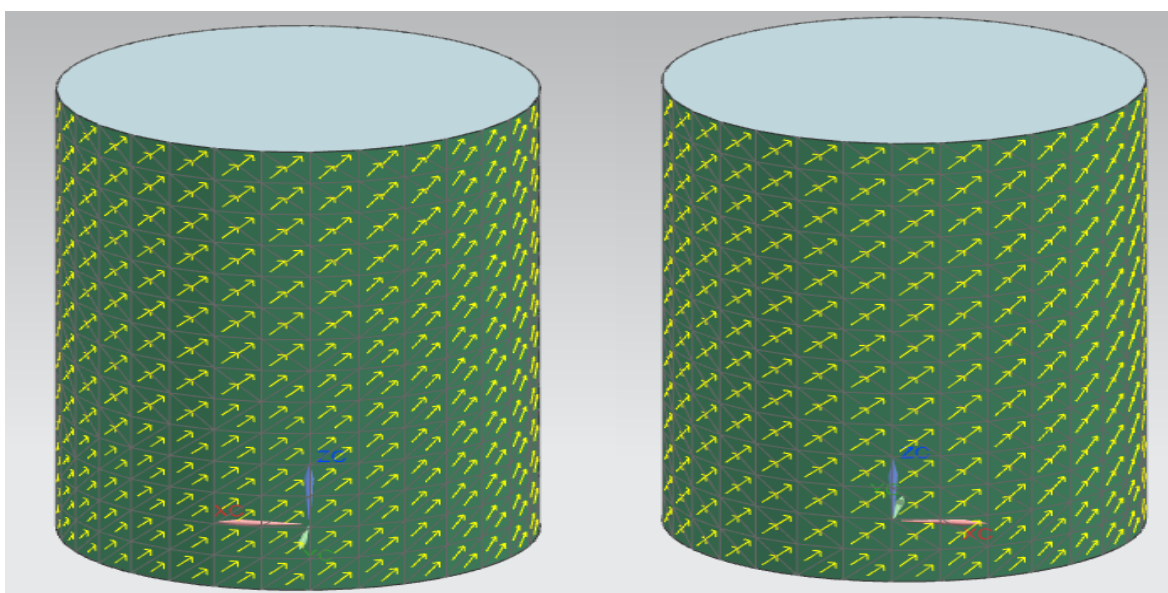
Obrázek 31: Uložení karbonového disku na náboji a popis jednotlivých součástí

## 10 TVORBA FEM MODELU DISKU V PROGRAMU NX 11

Program NX 11 má pro analýzu kompozitních materiálů dva základní nástroje. Jedná se o modelování pomocí Zone-Based a modelování pomocí Ply-Based. Pro analýzu karbonového disku byly použity oba způsoby. Jednou z výhod nástroje Ply-Based je mnohem přesnější popis orientace materiálu v problematických částech součástí. Porovnání přesnosti orientace materiálu při použití obou nástrojů bylo znázorněno na Obr. 32 a Obr. 33. Na těchto obrázcích byl jako příklad vybrán válec, který byl vytvořený z uhlíkové tkaniny, ta byla na válec kladena pod úhlem  $45^\circ$ .



Obrázek 32: Zobrazení orientace osnovních vláken pomocí nástroje Zone-Based



Obrázek 33: Zobrazení orientace osnovních vláken pomocí nástroje Ply-Based

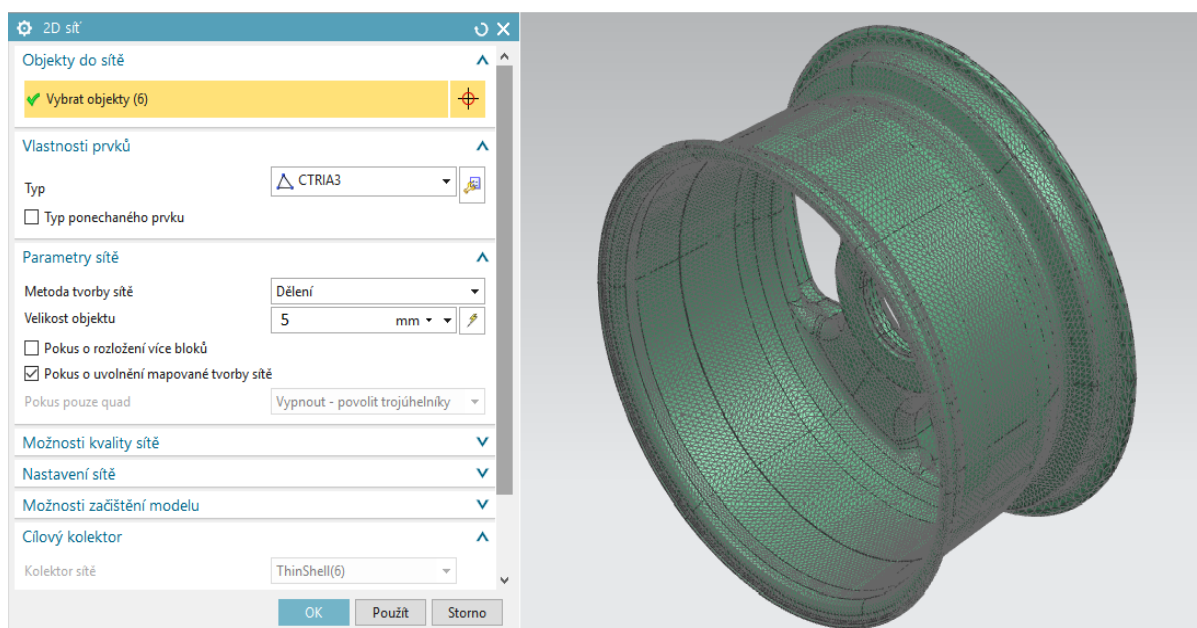
Hlavní směr, tedy směr osnovních vláken na válci, který byl vytvořený nástrojem Ply-Based, opisuje šroubovici okolo válce. Naproti tomu na válci vytvořeném nástrojem Zone-Based dochází ke kolizi těchto vláken. Z toho vyplývá, že model vytvořený nástrojem Ply-Based vystihuje mnohem přesněji reálné kladení vrstev tkaniny i v problémových místech analyzované součásti a tím se zpřesňují i výsledky samotné analýzy.

## 10.1 Tvorba FEM modelu pomocí Zone-Based

Modelování kompozitu tímto způsobem umožňuje přidělení kompozitních vlastností k 2D, nebo k 3D síti. V případě analyzovaného disku byla použita na samotný disk 2D síť a na duralový kroužek 3D síť, jejich vlastnosti jsou popsány níže. Interaktivní grafický modelář pomáhá uživateli přehledně seskupit jednotlivé vrstvy, jejich tloušťky a úhly výsledného kompozitu a přidělit je k patřičné síti.

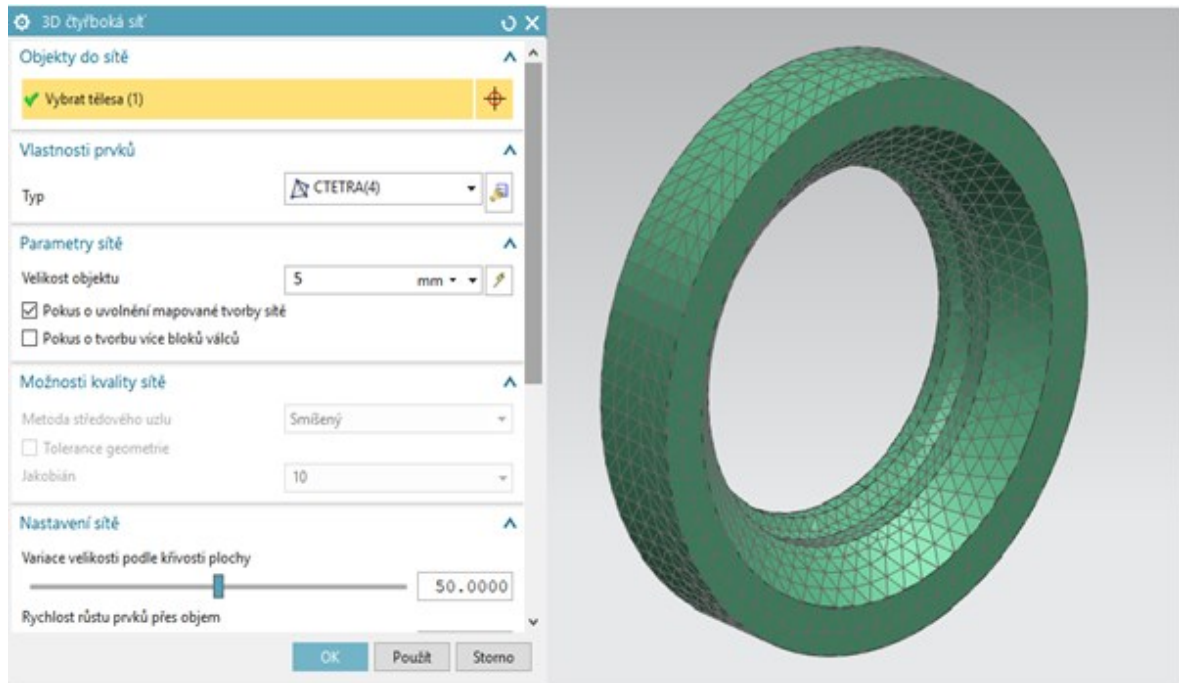
### 10.1.1 Tvorba sítě

Výsledná síť modelu se skládá z uzlů a elementů. Každý uzel má přidělené své číslo, souřadnice a stupeň volnosti. Každý element má své číslo, připojené uzly, interpolaci, integrační body a materiálové vlastnosti. Velikost elementů zásadně ovlivňuje kvalitu výsledků. Čím menší je velikost elementů, tím přesnější výsledky dostaneme, prodlužuje se však doba výpočtu. Pro analýzu disku byl zvolen trojúhelníkový typ elementu CTRIA3 a velikost elementu 5 mm (Obr. 34).



Obrázek 34: Tvorba 2D sítě na modelu disku

Kroužek uvnitř disku byl vytvořen pomocí 3D sítě. Je složen ze 7732 elementů. Pro analýzu byl zvolen čtyřboký typ elementu CTETRA(4) a velikost elementu rovněž 5 mm (Obr. 35). Úkolem tohoto kroužku je rovnoměrně přenášet zatížení z náboje kola na samotný disk.



Obrázek 35: Tvorba 3D sítě na modelu kroužku

### 10.1.2 Přiřazení materiálu k síti

Skořepina karbonového disku byla vyrobena z uhlíkového prepregu. Tloušťka tohoto prepregu byla 0,2 mm. Složitý tvar disku neumožnil vytvoření uhlíkového disku jako celku, výroba se tedy musela rozdělit do několika kroků. Jako první byla vytvořena středová část disku, jejíž tloušťka byla 2 mm. Pro dosažení této tloušťky bylo třeba umístění 10 vrstev prepregu. V případě ráfku, který má tloušťku 3 mm, bylo potřeba nanést 15 vrstev prepregu. Prvním krokem před skládáním jednotlivých vrstev bylo vytvoření odpovídajícího materiálu. Vlastnosti materiálu odpovídají použitému prepregu GG200T-DT120-42. Jedná se o příčně izotropní materiál, který má 5 nezávislých konstant. Mechanické a pevnostní vlastnosti jsou popsány na Obr. 36. Kroužek uvnitř disku byl vyrobený ze slitiny hliníku zvané dural. Jedná se o izotropní materiál, který má pouze 2 nezávislé konstanty. Vlastnosti tohoto materiálu jsou popsány na Obr. 37. Po vytvoření duralu s požadovanými vlastnostmi následovalo přidělení jeho vlastností k 3D síti kroužku. Vlastnosti uhlíkového prepregu byly pomocí laminátového modeláře přiděleny ke každé vrstvě kompozitu a následně přiděleny k 2D síti. Tím bylo umožněno pokládání jednotlivých vrstev tkaniny pod různými úhly.

Ortotropní materiál

Zobrazení vlastností  
Všechny vlastnosti

Název - Popis  
UHLÍKOVÝ\_PREPREG  
Popisek 2  
Popis

Pedigree

Kategorizace

Vlastnosti  
Hustota (Ro) 1.75e-006 kg/mm<sup>3</sup>

Mechanické

Pevnost

Životnost

Tepelné/elektrické

Tečení

Viskoelastická

Viskoplasticita

Poškození

Různé

Pevnost

Koeficient Tsai-Wu

Meze napětí

<input checked="" type="checkbox"/> Tah (ST1)	693 N/mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> Tah (ST2)	610 N/mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> Tah (ST3)	7 N/mm <sup>2</sup>
<input checked="" type="checkbox"/> Stlačení (SC1)	552 N/mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> Stlačení (SC2)	558 N/mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> Stlačení (SC3)	7 N/mm <sup>2</sup>
<input checked="" type="checkbox"/> Smyk (SS12)	109.1 N/mm <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/> Smyk (SS13)		<input type="checkbox"/> Smyk (SS23)	

Youngův modul (Ei)

<input checked="" type="checkbox"/> Youngův modul (E1)	55800000 mN/mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> Youngův modul (E2)	53700000 mN/mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> Youngův modul (E3)	53700000 mN/mm <sup>2</sup>
--	-----------------------------	--	-----------------------------	--	-----------------------------

Hlavní Poissonova konstanta

Poissonova konstanta (NUij)

<input checked="" type="checkbox"/> Poissonova konstanta (NU12)	0.3	<input checked="" type="checkbox"/> Poissonova konstanta (NU23)	0.3	<input checked="" type="checkbox"/> Poissonova konstanta (NU13)	0.3
---	-----	---	-----	---	-----

Smykový modul (Gij)

<input checked="" type="checkbox"/> Smykový modul (G12)	3120000 mN/mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> Modul smyku (G13)	3120000 mN/mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> Smykový modul (G23)	3120000 mN/mm <sup>2</sup>
---	----------------------------	---	----------------------------	---	----------------------------

Obnovit na výchozí

Název karty MAT3/MAT8/MAT11

OK Storno

Obrázek 36: Mechanické vlastnosti uhlíkového prepregu GG200T-DT120-42



**Izotropní materiál**

Zobrazení vlastností  
Všechny vlastnosti

Název - Popis  
dural  
Popisek 9  
Popis

Pedigree

Kategorizace

Vlastnosti  
 Hustota (Ro) 2.76e-006 kg/mm<sup>3</sup>

**Mechanické**

- ... Pevnost
- ... Životnost
- ... Tvářitelnost
- ... Tepelné/elektrické
- ... Tečení
- ... Viskoelasticita
- ... Viskoplasticita
- ... Poškození
- ... Různé

**Elastické konstanty**

- Youngův modul (E) 72000 N/mm<sup>2</sup>(MPa)
- Hlavní Poissonova konstanta
- Poissonova konstanta (NU) 0.33

**Vlastnosti pevnosti**

- Mez kluzu 430 N/mm<sup>2</sup>(MPa)
- Mez pevnosti v tahu 490 N/mm<sup>2</sup>(MPa)
- Tsai-Wu koeficient interakce (F12) mm<sup>4</sup>/N<sup>2</sup>
- Napětí-přetvoření (H) N/mm<sup>2</sup>(MPa)
- Typ nelinearity (TYPE) PLASTIC

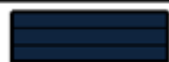








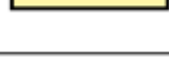
Obnovit na výchozí

Název karty MAT1

OK Storno

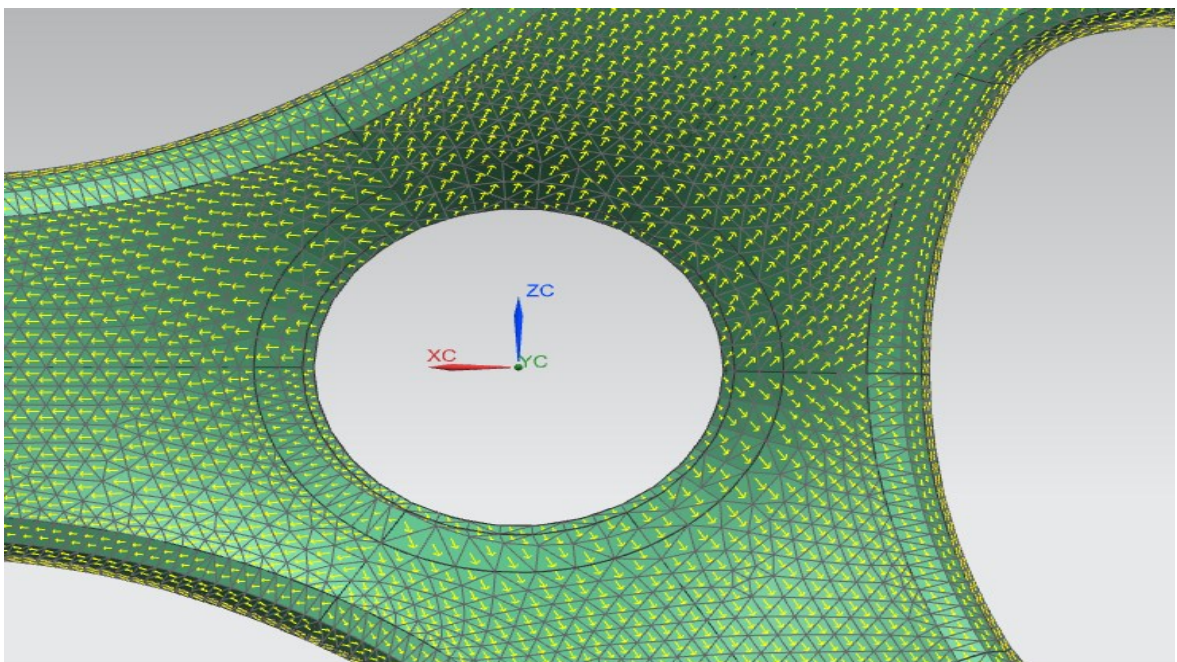
Obrázek 37: Mechanické a pevnostní vlastnosti duralu

Přidělení materiálu k jednotlivým vrstvám kompozitu bylo nastaveno v Laminátovém modeláři. Uhlíkový prepreg byl přidělen ke každé vrstvě laminátu zvlášť, aby bylo možné dosáhnout jednotlivých úhlů pootočení mezi vrstvami tkaniny. Lze rovněž nastavit rozdílné tloušťky jednotlivých vrstev, to však v tomto případě nebylo potřeba. Pro analýzu bylo použito 8 velikostí úhlů, pod kterými na sebe byly kladeny jednotlivé vrstvy tkaniny, a to konkrétně: 0 °, 20 °, 30 °, 45 °, 60 °, 70 °, 80 °, 90 °. Při výrobě celého disku se jako první zhotovila střední část disku a následně došlo k spojení s ráfkem. Úhel natočení jednotlivých vrstev byl zvolen pro ráfek i pro disk stejný.

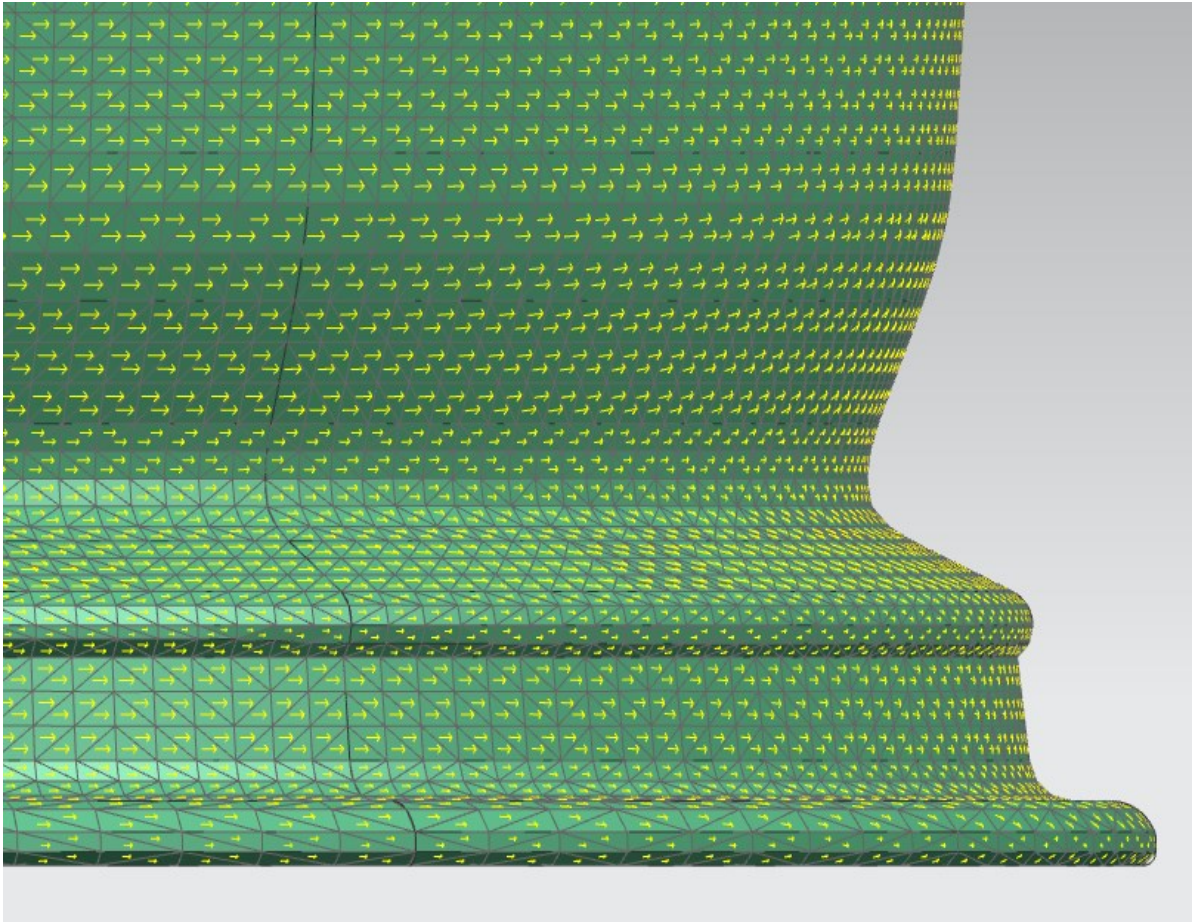
			Tloušťka [mm]	Úhel [°]
10		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	0.0
9		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	20.0
8		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	40.0
7		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	60.0
6		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	80.0
5		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	100.0
4		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	120.0
3		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	140.0
2		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	160.0
1		UHLÍKOVÝ_PREPREG	0.200	180.0

Obrázek 38: Vytvoření jednotlivých vrstev pro případ kladení pod úhlem 20°

Byl-li laminát přidělen k 2D síti, bylo nutné také definovat orientaci první vrstvy prepregu. Hlavní směr orientace materiálu na střední části disku byl určen pro každý paprsek zvlášť a tímto směrem byla osa každého paprsku. Při kladení tkaniny na ráfek byl hlavní směr určen obvodem ráfku. Oba tyto směry jsou znázorněny na Obr. 39 a Obr. 40.



Obrázek 39: Určení hlavního směru kladení prepregu středové části



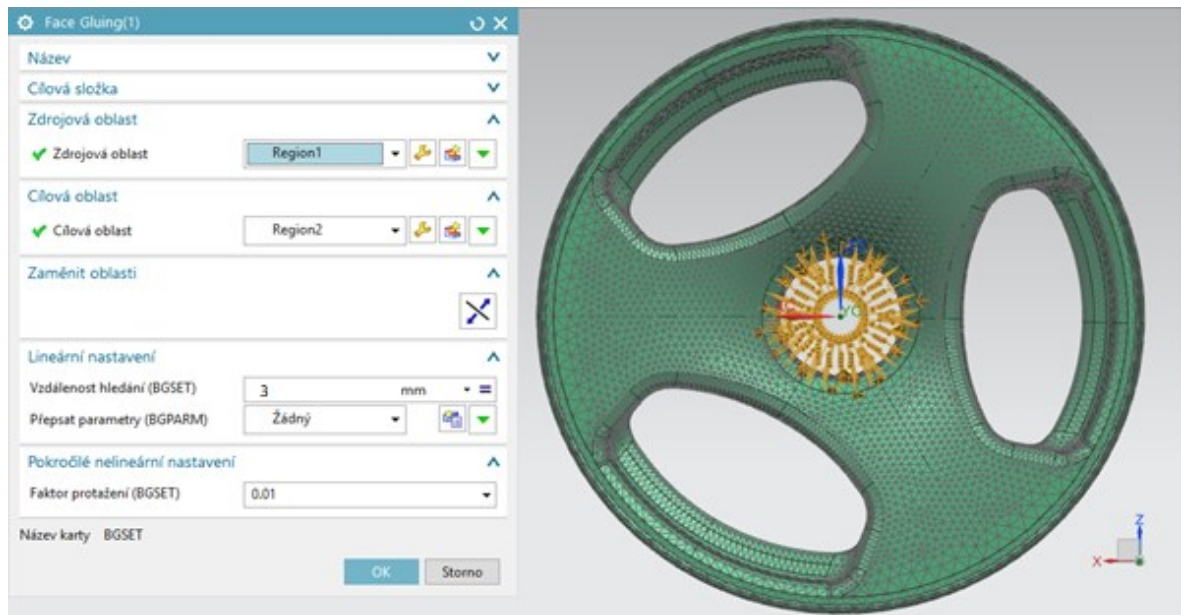
Obrázek 40: Určení hlavního směru kladení prepregu ráfku

### 10.1.3 Nastavení okrajových podmínek pro model disku

#### *Spojení uhlíkového disku s duralovým kroužkem*

Před nastavení okrajových podmínek muselo být zajištěno spojení karbonového disku a duralového kroužku. Tohoto spojení bylo dosaženo pomocí nástroje Face Gluing, který zafixuje jednotlivé plochy k sobě. Při použití tohoto nástroje byly nejprve vybrány plochy, které měly být spolu spojeny, a poté byla nastavena vzdálenost vyhledávání, která musí být větší, než skutečná vzdálenost mezi jednotlivými plochami. V tomto případě byla reálná vzdálenost mezi plochami 2 mm, vzdálenost hledání byla nastavena na 3 mm. Po aplikaci těchto operací došlo k pevnému spojení těchto součástí ve vybraných plochách (Obr. 41). Výsledkem bylo dokonalé přenášení sil z kroužku na disk. Po zhotovení analýzy bylo možné zjistit, jak velké síly byly v těchto stykových plochách přenášeny, dále bylo možné zjistit, jaký tlak a trakce zde působí. Přesné hodnoty těchto veličin závisejí na konkrétní variantě uspořádání jednotlivých vrstev.

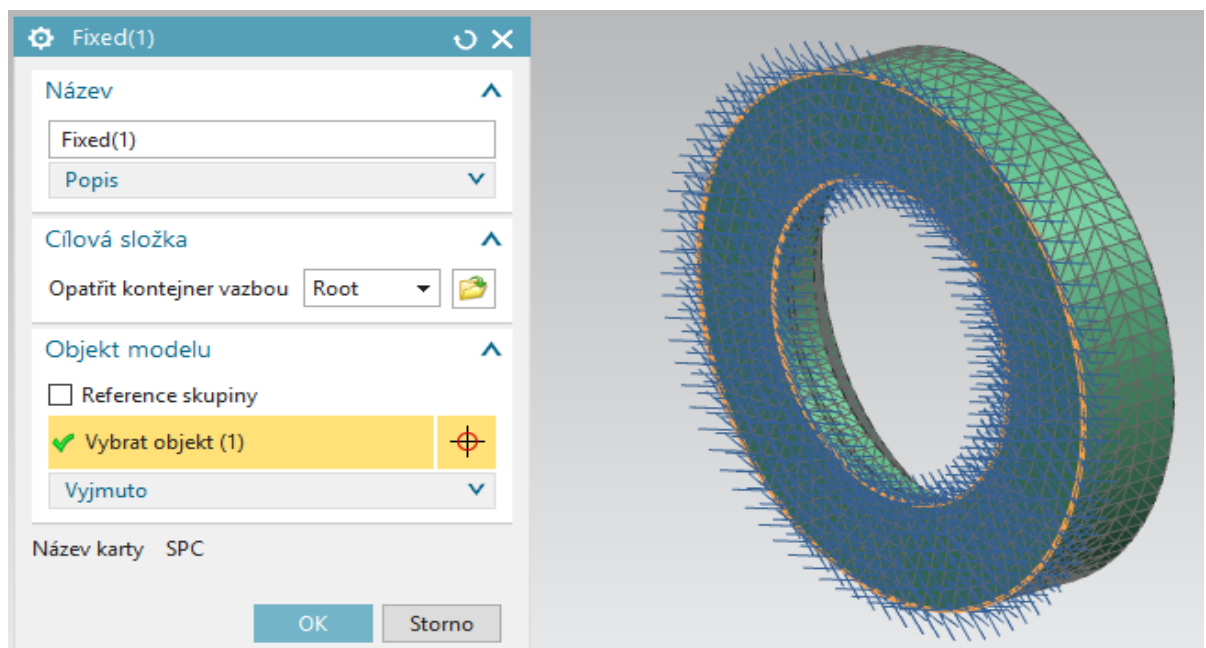




Obrázek 41: Pevné spojení kroužku s diskem pomocí nástroje Face Gluing

### *Uchycení modelu*

Po spojení disku s kroužkem bylo nutné napodobit reálné podmínky ukotvení disku s nábojem. Ve skutečnosti je disk pevně spojen s nábojem, krouticí moment se přenáší pomocí čepů a celý disk je dotažen maticí. Pro zjednodušení analýzy byl disk ukotven pomocí pevné vazby na plochu vnitřního duralového kroužku, která simuluje pevné spojení kroužku s nábojem (Obr. 42).

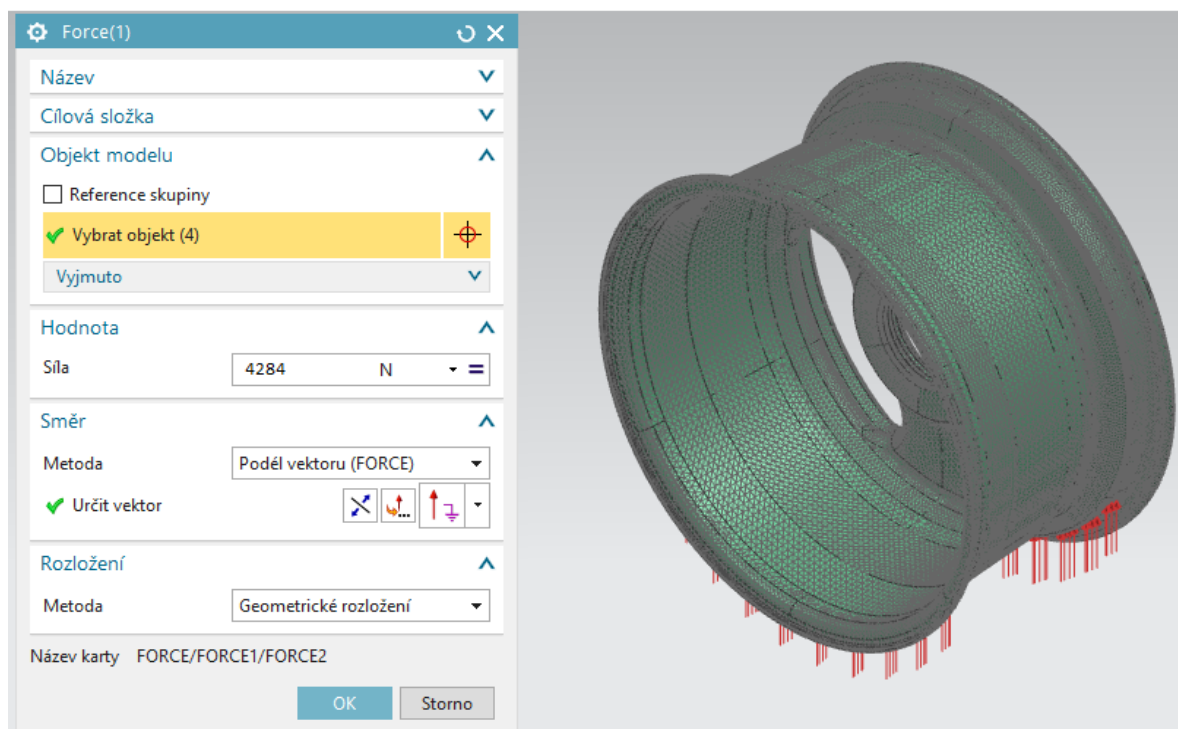


Obrázek 42: Ukotvení ráfku v dosedacích plochách patek pomocí válcové vazby

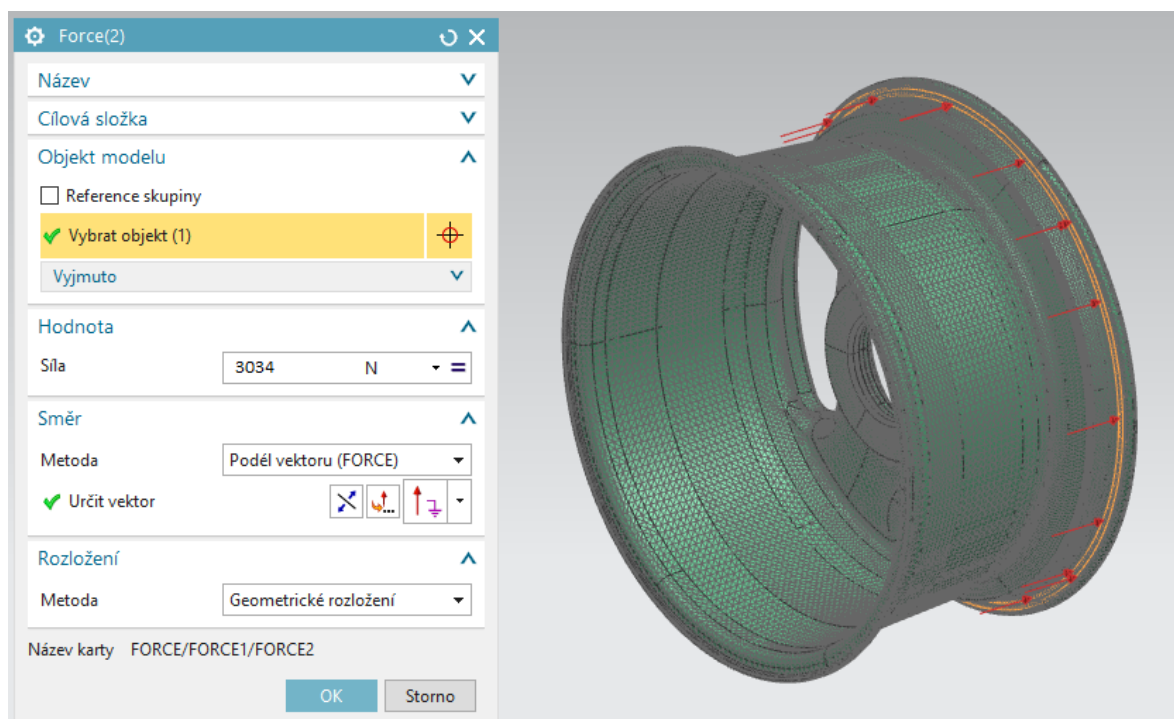
### Zatížení modelu

Posledním krokem před začátkem analýzy je nadefinování zatížení daného výrobku. Vyrobený disk byl určený pro formuli Dragon 6, vyrobenou týmem TU Brno Racing. Tento tým je složený ze studentů Ústavu automobilového a dopravního inženýrství na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Maximální výkon formule je 63 kW při 6900 ot/min. Nejvyšší dosažená rychlost je 115 km/h. Formule Dragon 6 dosahuje hmotnosti 174 Kg a krouticího momentu 72 Nm při 6900 ot/min.

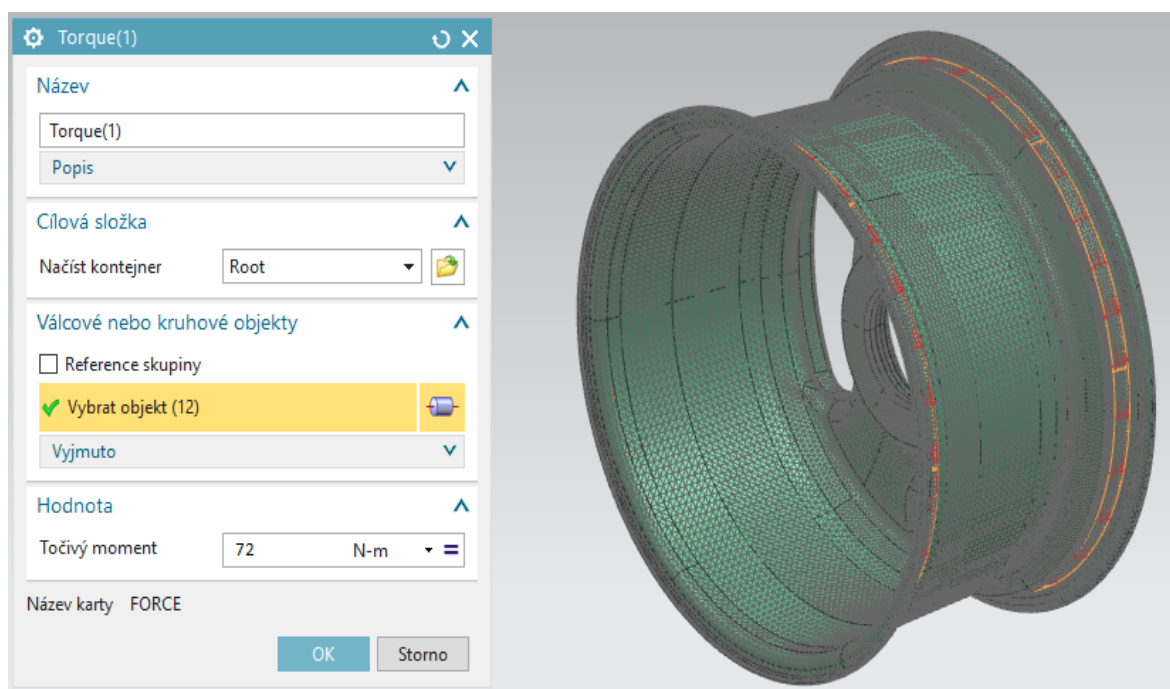
Z tenzometrického měření v zavěšení formule bylo patrné, že největší hodnoty sil působících na jedno kolo, nastávají v případě průjezdu formule zatáčkou. Hmotnost řidiče pro měření byla 75 kg. Na kolo působí vertikální síla, která při průjezdu zatáčkou nabývá hodnoty 4284 N, příčná síla, která má hodnotu 3034 N. Nakonec bylo kolo zatíženo maximálním krouticím momentem formule, což je 72 Nm. Krouticí moment a síly se na pneumatiku přenáší pomocí patek pneumatiky. Patka je část pneumatiky, která se opírá a dosedací plochu ráfku. Jejím úkolem je zajistit pevné spojení pneumatiky s diskem a přenášet síly mezi diskem a pneumatikou. Patka pneumatiky musí přesně dosednout do žlábků vytvořených na disku. Pro simulaci byl disk zatížen v dosedacích plochách patek pneumatik. Pevnostní výpočty duralového kroužku jsou uvedeny níže v této práci.



Obrázek 43: Zatížení uhlíkového disku vertikální silou



Obrázek 44: Zatížení uhlíkového disku příčnou silou



Obrázek 45: Zatížení uhlíkového disku krouticím momentem formule Dragon 6

## 10.2 Tvorba FEM modelu pomocí Ply-Based

Tato metoda spočívá ve vytvoření globální vrstvy a jejím následném přidělení k 2D síti. Velkou výhodou je zobrazení problémových míst, kde dochází ke zkosení vláken tkaniny. Ve výpočtu je toto zkosení uvažováno. Další výhodou je nadefinování druhu výztuže, v tomto případě se jednalo o výztuž tkaninou z uhlíku, možné je však nadefinovat i vyztužení dlouhými vlákny, krátkými vlákny, které mohou být orientované, nebo nahodilé. Tento způsob je vhodný pro výpočty součástí složitějších tvarů.

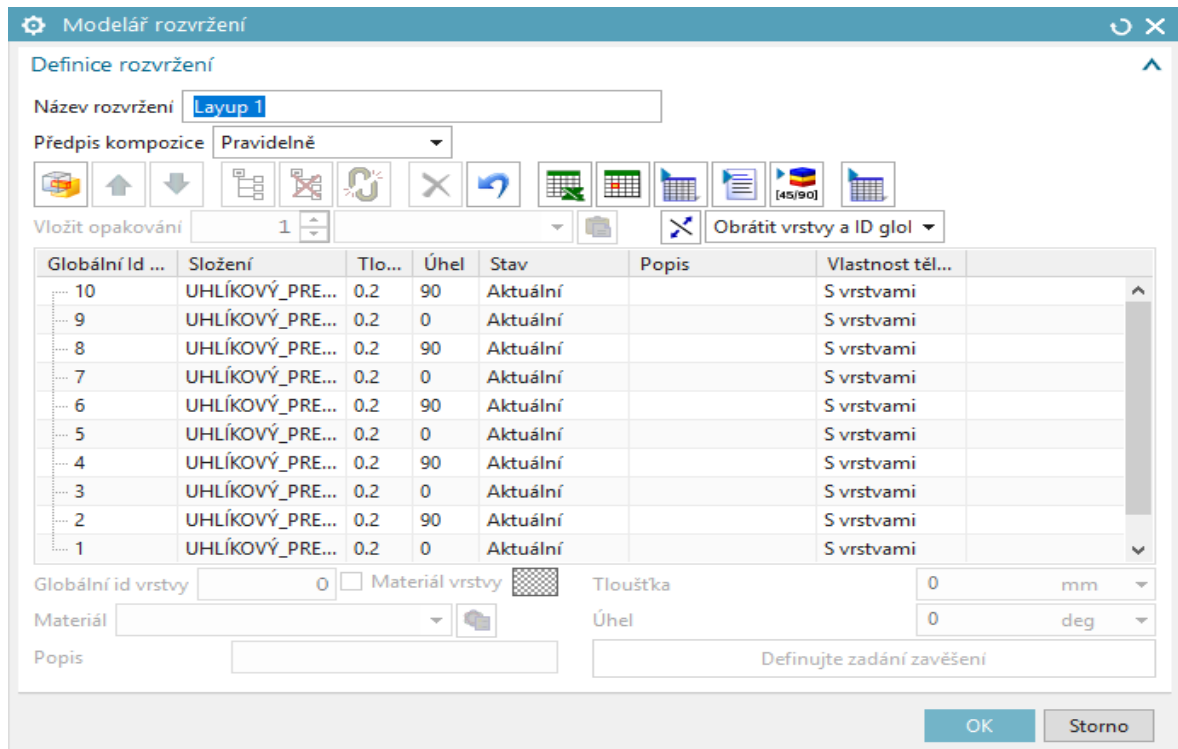
### 10.2.1 Tvorba sítě a vytvoření materiálu

Prvním krokem při tvorbě FEM modelu bylo vytvoření 2D sítě na ploše uhlíkového disku. Velikost této sítě i typ sítě byly totožné s FEM modelem pomocí Zone-Based. Velikost elementu byla nastavena 5 mm a typ použitého elementu byl CTRIA3. Na modelu se však našla problémová místa, zejména v ostrých záhybech, kde musela být velikost sítě přizpůsobena, aby bylo možné uskutečnit výpočet. Duralový kroužek, který je uvnitř disku byl vytvořen pomocí 3D sítě o velikosti elementu 5 mm a typ elementu byl zvolen čtyřboký element CTETRA(4). Jako materiál byl použit znovu uhlíkový prepreg, jehož vlastnosti jsou popsány na Obr. 36 a kroužek byl zhotoven z duralu, jehož vlastnosti popisuje Obr. 37.

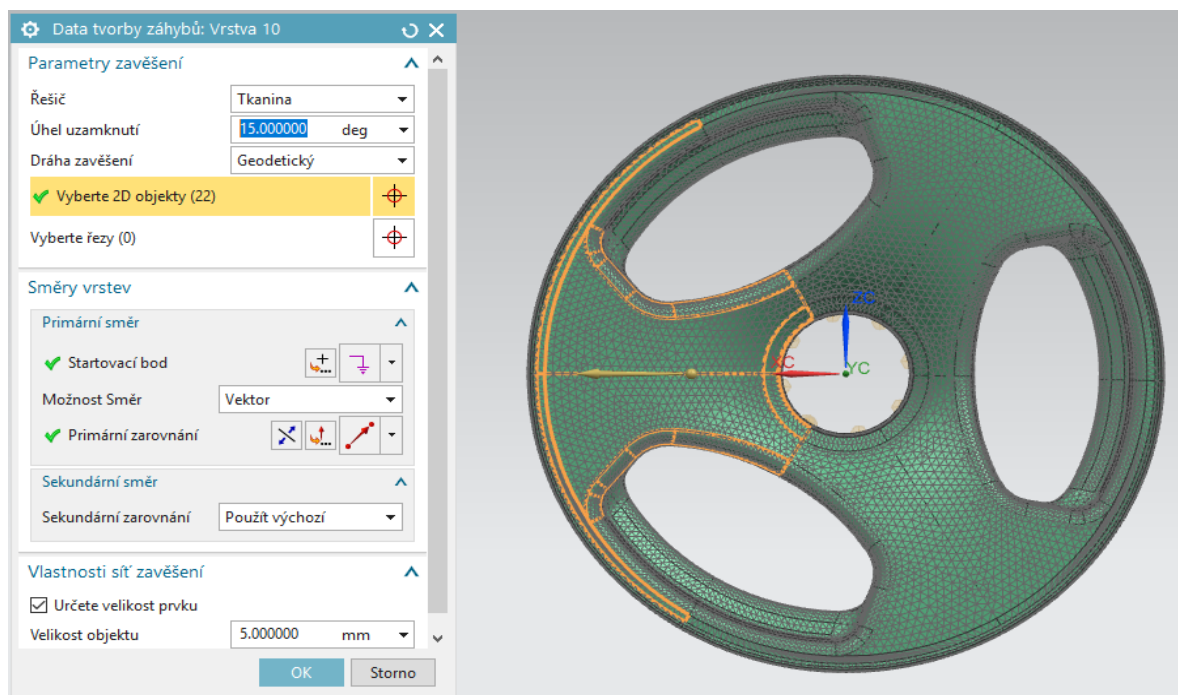
### 10.2.2 Přiřazení materiálu k síti

Dalším krokem při tvorbě FEM modelu bylo přiřazení vytvořeného materiálu k 2D síti. Na rozdíl od první metody, kdy se jednotlivé vrstvy, jejich pootočení a tloušťka definují v laminátovém modeláři, se materiál k jednotlivým vrstvám přidělí pomocí nástroje Global layup. Hlavním rozdílem je možnost definovat druh výplně, v tomto případě se jednalo o uhlíkovou tkaninu. Další výhodou je přesnější definice orientace materiálu ve složitých částech modelu. Tloušťka ráfku i střední části disku byla nastavena stejně, jako v případě modelování pomocí Zone-Based. Samotný ráfek byl tedy vytvořen z 15 vrstev prepregu a celková tloušťka ráfku činila 3 mm. Střední část disku byla složena z 10 vrstev prepregu a její tloušťka byla 2 mm. Po vytvoření všech vrstev, nastavení jejich tloušťky a úhlu bylo nutné přiřadit orientaci materiálu jednotlivých vrstev, určit zda se jedná o tkaninu nebo vlákna a nastavit velikost sítě tkaniny. Tímto způsobem byly vytvořeny všechny plochy tak, aby se model co nejvíce přiblížil reálnému disku. Hlavní směr středové části byl určen pro každý paprsek zvlášť a tímto směrem je osa každého paprsku, stejně jako u prvního modelu. Při kladení tkaniny na ráfek byl hlavní směr určen obvodem ráfku.





Obrázek 46: Nastavení počtu vrstev a jejich vlastností pro středovou část disku



Obrázek 47: Určení hlavního směru kladení tkaniny pomocí příslušného vektoru

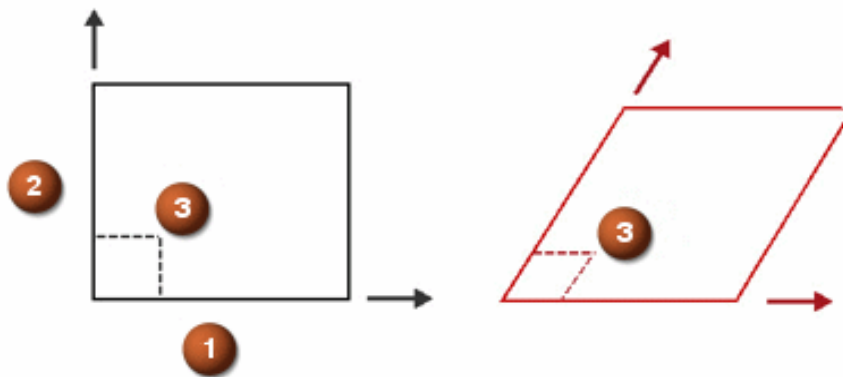
### 10.2.3 Nastavení okrajových podmínek pro model disku

Spojení duralového kroužku s diskem, volba uchycení modelu i samotné zatížení modelu bylo zvolené stejně jako v případě FEM modelu vytvořeného pomocí nástroje Zone-Based.

#### 10.2.4 Hledání problémových míst disku z hlediska kladení tkaniny

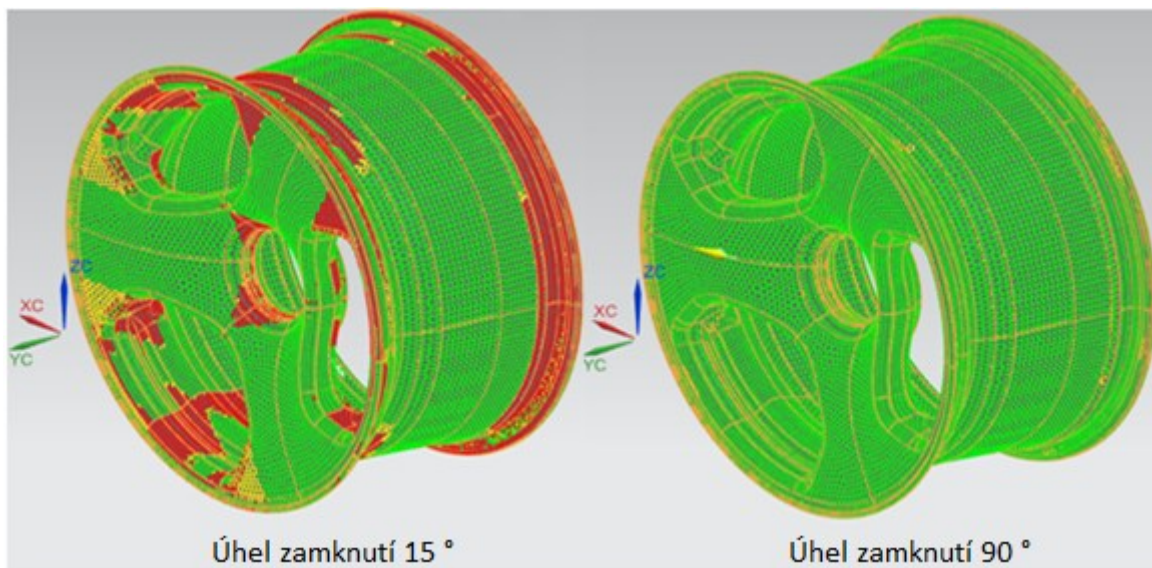
Velmi složitý tvar disku způsobil při jeho výrobě řadu problémů. Disk se díky svému tvaru nemohl vyrobit jako celek, nejprve se vyrobily paprsky střední části disku, poté došlo ke spojení s ráfkem. Vkládání prepregu do formy vyžadovalo přesnost, pečlivost a trpělivost. Výhodou modelu vytvořeného pomocí metody Ply-Based v programu NX 11 bylo zobrazení problémových míst, ve kterých dochází ke zvrásnění tkaniny.

Uhlíkový prepreg, ze kterého byl disk vyroben, byl v tomto programu nedefinován jako tkanina s požadovanými vlastnostmi. Úhel mezi osnovním a útkovým vláknem tkaniny bývá zpravidla  $90^\circ$ . Ve složitých záhybech modelu dochází vzhledem k poddajnosti tkaniny při jejím kladení do formy ke změně úhlu mezi osnovním a útkovým vláknem. Tím může docházet ke zkreslení hodnot smykového napětí. Následující obrázek popisuje změnu úhlu mezi osnovním a útkovým vláknem na kusu tkaniny s původním úhlem  $90^\circ$  (Obr. 48).



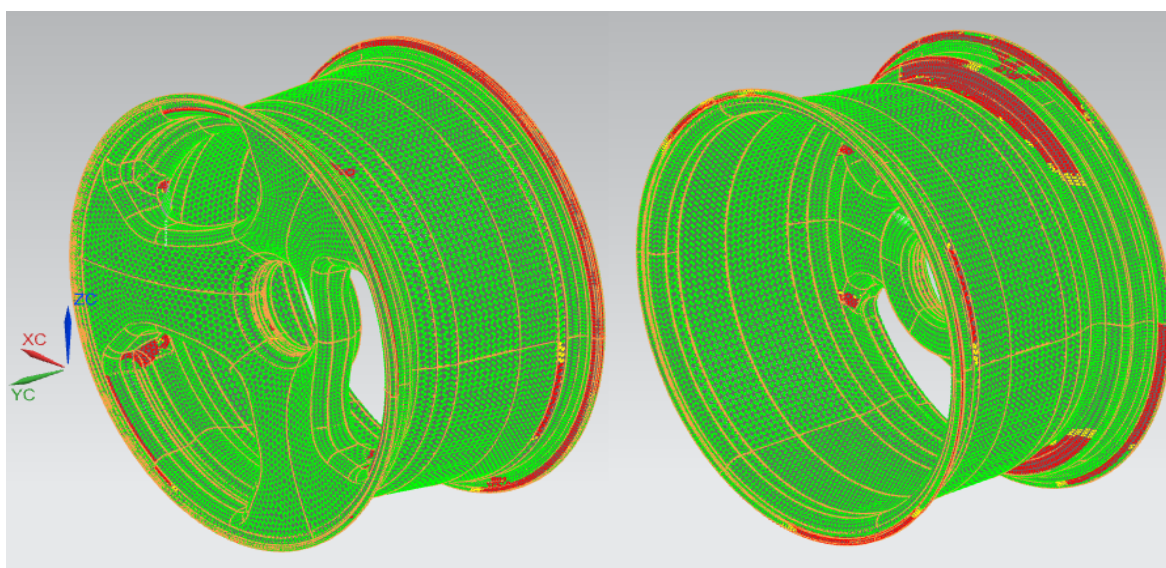
Obrázek 48: Změna úhlu mezi osnovním a útkovým vláknem

Rozdíl mezi původním úhlem příze a vychýleným úhlem příze se nazývá úhel stříhu. Pokud je tento úhel příliš velký, dochází k zvrásnění tkaniny. Maximální přípustný úhel stříhu se pak v programu NX 11 nazývá úhel zamknutí. Pro zobrazení problémových částí disku byla orientace vrstvy zabarvena do následujících barev. Zelené části na modelu ukazují místa, kde úhel stříhu je menší než úhel zamknutí. Žlutá barva popisuje místa, kde jsou oba tyto úhly stejné a červená barva pak popisuje místa s vyšším úhlem stříhu, než je úhel zamknutí. Zobrazení problémových míst bylo prováděno pomocí funkce View Fiber orientation. Problémová místa lze odstranit pomocí změnou počátečního bodu, změnou vektoru kladení tkaniny, nebo použitím řezných křivek, které simulují nařiznutí tkaniny.



Obrázek 49: Zobrazení problémových míst disku z hlediska kladení tkaniny

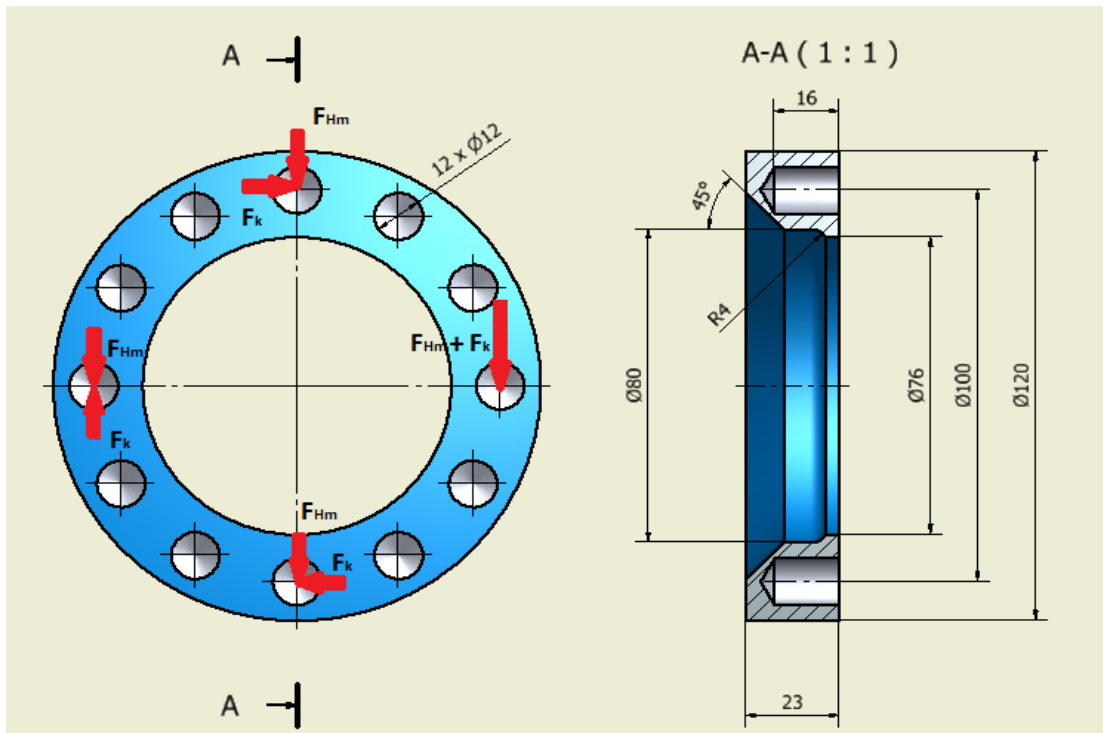
Na Obr. 49 byla znázorněny problémová místa disku pro úhel zamknutí  $15^\circ$  a  $90^\circ$ . V případě, že byl úhel zamknutí  $90^\circ$ , může dojít k maximálnímu zkosení tkaniny, na modelu tak nebudou žádná problémová místa. Byl-li úhel zamknutí  $15^\circ$ , na modelu se zobrazilo mnoho problémových míst, kde dochází ke zvrásnění tkaniny. V praxi se volí velikost úhlu zamknutí až  $60^\circ$ . V případě uhlíkového disku byl zvolen úhel zamknutí  $45^\circ$ . Místa, ve kterých byl úhel stříhu vyšší, než úhel zamknutí jsou náchylná na zvrásnění tkaniny (Obr. 50). Odstranění problémových míst se provádí nařiznutím tkaniny v těchto místech. Dochází zde však pouze ke změně úhlu mezi vlákny, jejich délka zůstává stejná.



Obrázek 50: Problémová místa při kladení tkaniny pro úhel zamknutí  $45^\circ$

## 11 PEVNOSTNÍ VÝPOČET DURALOVÉHO KROUŽKU

Duralový kroužek byl v disku umístěn zejména k hladkému přenosu sil a momentů na uhlíkový disk. Tento přenos byl zajištěn 4 čepy, ostatní díry slouží jako snížení hmotnosti. Samotný kroužek byl namáhaný především na otlačení od čepů, které na disk přenáší krouticí moment a zátěž automobilu.



Obrázek 51: Rozměry a zatížení duralového kroužku

Celý disk byl zatížen krouticím momentem, vertikální a příčnou silou. Otláčení děr, ve kterých jsou umístěny čepy, způsobuje zejména vertikální síla o velikosti 4284 N a krouticí moment o velikosti 72 Nm. Maximální otláčení  $p_{max}$  nastalo v díře, kde došlo k sečtení síly způsobené krouticím momentem  $F_k$  a vertikální síly připadající na jeden čep  $F_{Hm}$  (Obr. 51). Průměr čepu  $d = 12$  mm, délka čepu v díře byla uvažována  $l = 15$  mm, počet čepů  $n = 4$  a dovolené otláčení  $p_D = 176$  MPa.

$$F_{Hm} = \frac{F_{ver}}{n} = \frac{4284}{4} = 1071 \text{ N} \quad (24)$$

$$F_k = \frac{2 \cdot M_k}{D \cdot n} = \frac{2 \cdot 72}{0.1 \cdot 4} = 360 \text{ N} \quad (25)$$

$$p_{max} = \frac{F_{Hm} + F_k}{d \cdot l} = \frac{1071 + 360}{12 \cdot 15} = 7,95 \text{ MPa} \quad (26)$$

$$7,95 \leq 176 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (27)$$

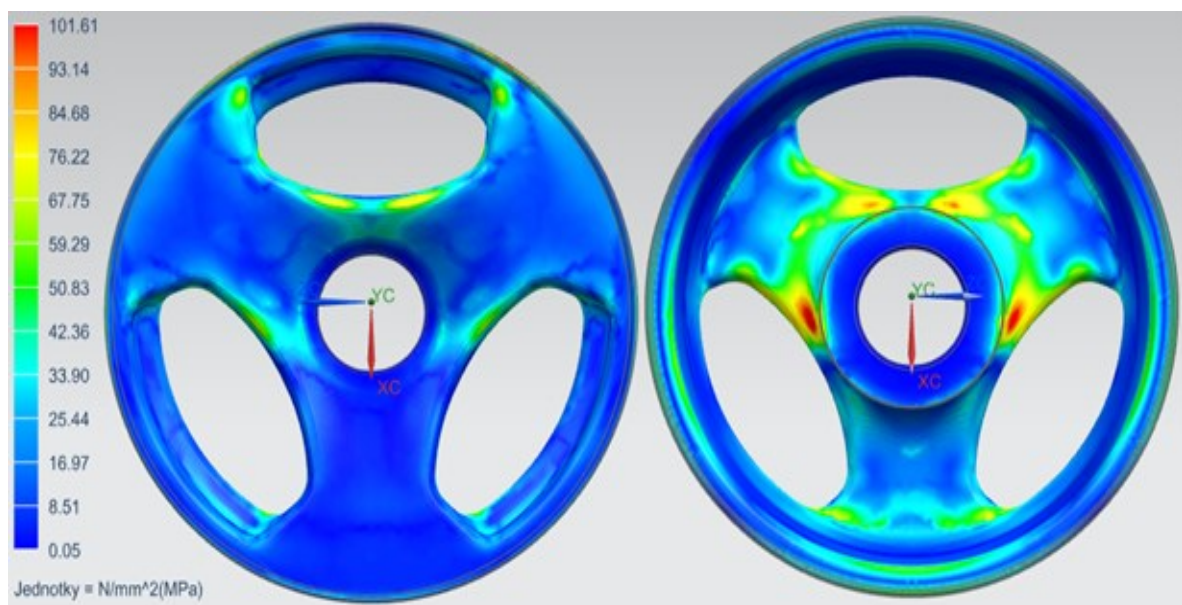


## 12 VÝSLEDKY ANALÝZY

Analýza byla provedena pro FEM model, vytvořený pomocí nástroje Zone-Based, i pro model vytvořená nástrojem Ply-Based. Model byl analyzován pro případ maximálního zatížení disku při průjezdu zatáčkou, kde na disk působí zatížení vertikální silou, boční silou a kroučícím momentem, které bylo určeno tenzometrickým měřením v zavěšení formule Dragon 6. Výsledkem analýzy bylo grafické znázornění celkového přetvoření disku, poměrné deformace disku a rozložení napětí v nejvíce namáhané vrstvě. Na základě těchto poznatků byl určen optimální úhel, pod kterým by měly být jednotlivé vrstvy na sebe kladeny.

### 12.1 Rozložení napětí v disku

Pro lepší pochopení a názorné zobrazení problémových míst disku byl disk nejprve analyzován pro rozložení Von-Misesova napětí, bez ohledu na příčně izotropní materiál disku.



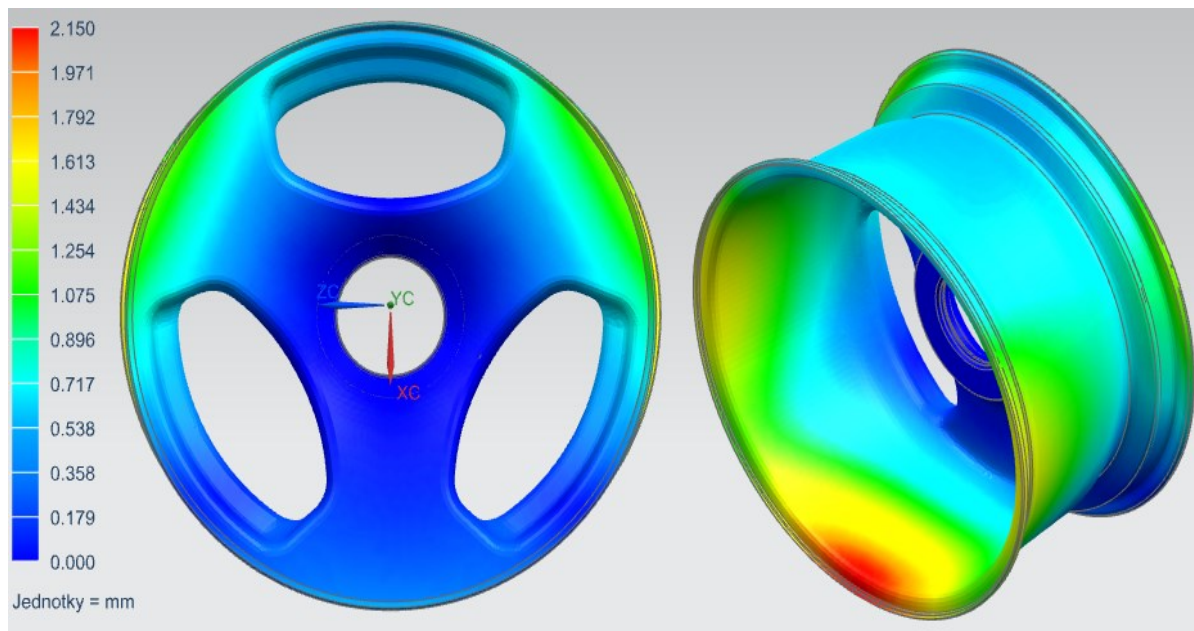
Obrázek 52: Rozložení Von-Misesova napětí v disku

### 12.2 Výsledky analýzy FEM modelu, vytvořeného pomocí Zone-Based

Pro analýzu bylo použito 8 velikostí úhlu, pod kterými na sebe byly kladeny jednotlivé vrstvy tkaniny. Konkrétně se jednalo o úhly: 0 °, 20 °, 30 °, 45 °, 60 °, 70 °, 80 °, 90 °. Analýzou modelu vytvořeného pomocí Zone-Based bylo zjištěno celkové přetvoření disku, poměrná deformace disku, maximální napětí v kritické vrstvě, normálové napětí a tečné napětí v kritické vrstvě. Kritická vrstva byla zvolena jako vrstva s největším napětím.

### 12.2.1 Výsledky analýzy celkového přetvoření uhlíkového disku

Uhlíkový disk při maximálním zatížení, které vzniká při průjezdu formule zatáčkou, byl nejvíce přetvořen v zadní části ráfku, kde na ráfek působí zejména zatížení vertikální silou. Průběh přetvoření disku byl znázorněn na Obr. 53.



Obrázek 53: Grafické znázornění přetvoření disku pro úhel kladení 90 °

Průběh přetvoření disku byl pro všechny úhly kladení stejný, lišila se pouze velikost přetvoření. Výsledky maximálního přetvoření pro všechny úhly, pod kterými se na sebe kladou jednotlivé vrstvy tkaniny, jsou znázorněny v následující tabulce (Tabulka 3).

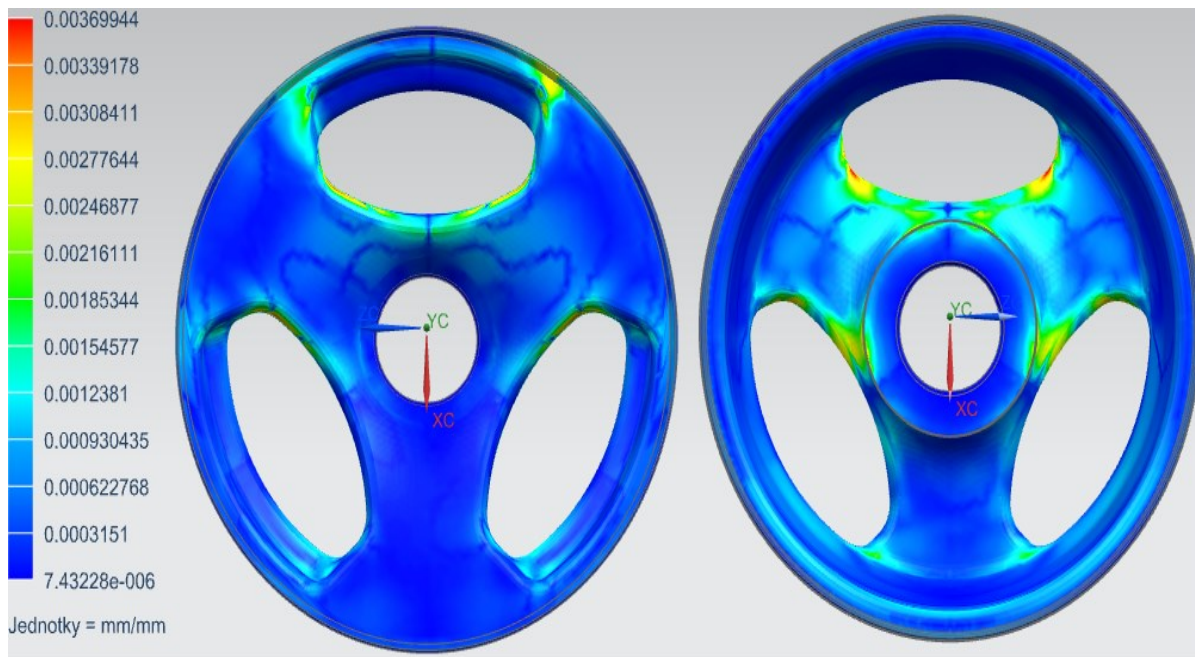
Tabulka 3: Maximální přetvoření disku pro jednotlivé úhly kladení

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální přetvoření [mm]
0	2,134
20	1,909
30	1,918
45	1,909
60	1,911
70	1,912
80	1,942
90	2,150

### 12.2.2 Výsledky analýzy poměrné deformace uhlíkového disku

Maximální poměrná deformace disku při průjezdu formule zatáčkou nastává v horní části středové části disku, respektive v místech, kde dochází ke změně velikosti zaoblení paprsků.

Průběh poměrné deformace disku byl znázorněn na Obr. 54.



Obrázek 54: Grafické znázornění poměrné deformace disku pro úhel kladení  $90^\circ$

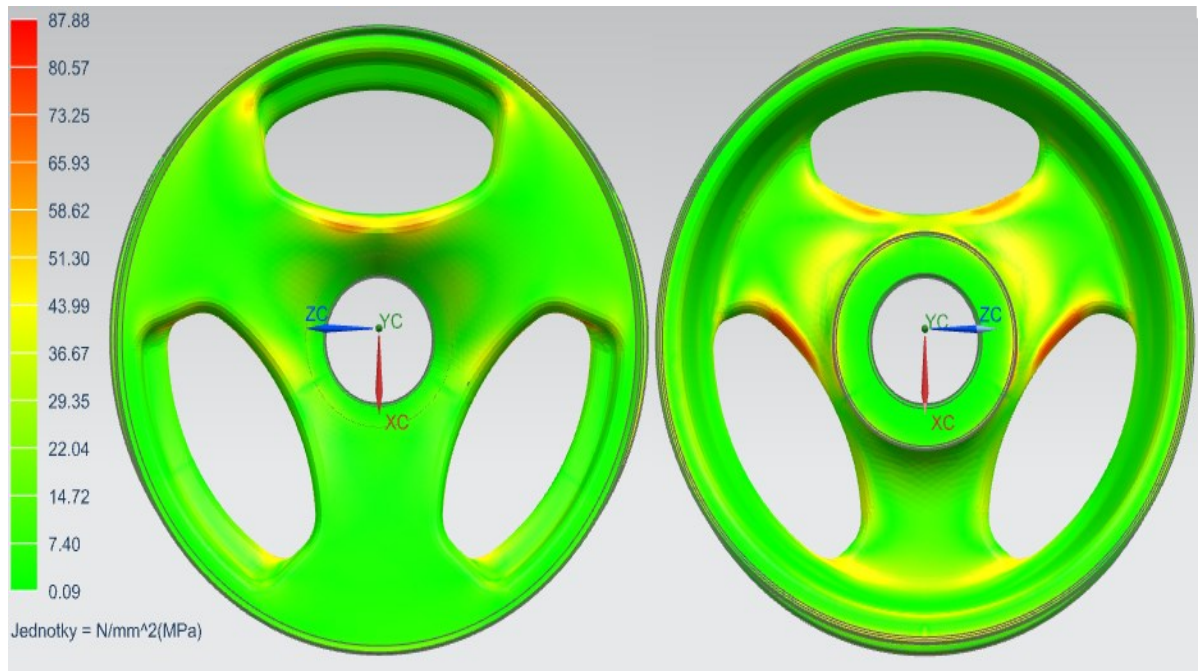
Průběh poměrné deformace disku byl pro všechny úhly kladení stejný, lišila se pouze velikost deformace. Výsledky maximální poměrné deformace pro všechny úhly kladení jsou znázorněny v následující tabulce (Tabulka 4).

Tabulka 4: Maximální poměrná deformace disku pro jednotlivé úhly kladení

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální poměrná deformace [%]
0	0,344515
20	0,294234
30	0,315457
45	0,335699
60	0,317065
70	0,318676
80	0,321010
90	0,369944

### 12.2.3 Průběh napětí v kritické vrstvě uhlíkového disku

Maximální napětí v kritické vrstvě disku při průjezdu formule zatáčkou nastává v horní části středové části disku. Kritická vrstva byla zvolena jako vrstva s největším napětím. Průběh napětí byl znázorněn na Obr. 55.



Obrázek 55: Průběh napětí v kritické vrstvě disku pro úhel kladení 80 °

Výsledky maximálního napětí v kritické vrstvě pro všechny úhly kladení jsou znázorněny v následující tabulce (Tabulka 5).

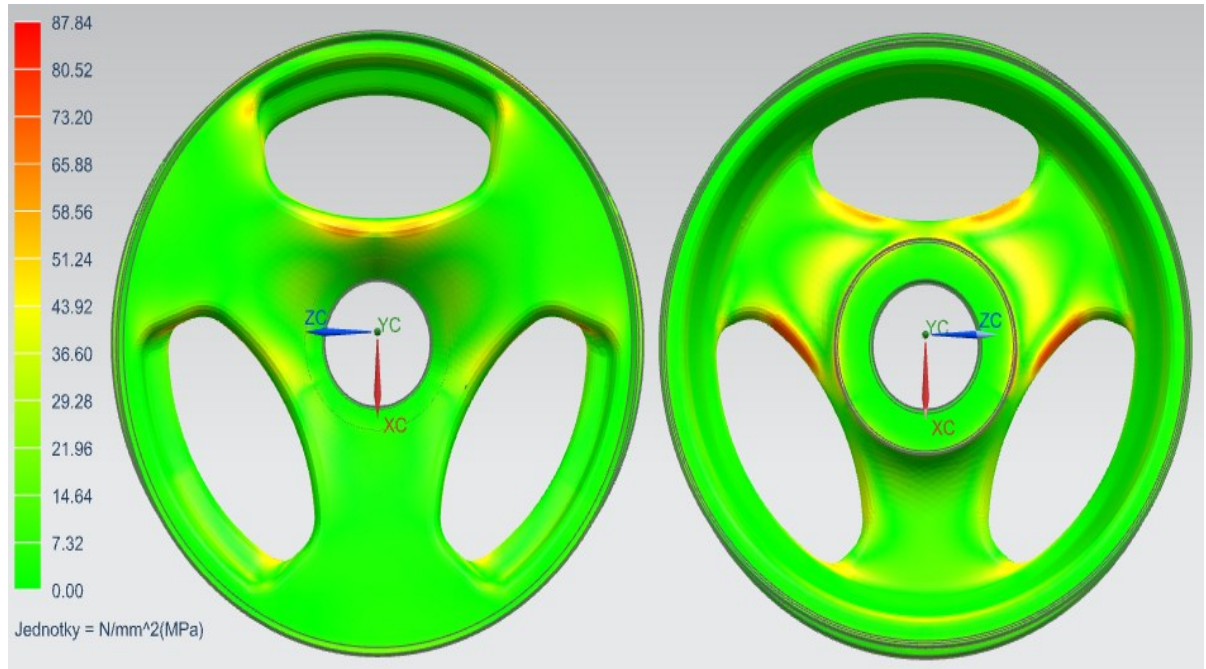
Tabulka 5: Maximálního napětí v kritické vrstvě disku pro jednotlivé úhly kladení

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální napětí [MPa]
0	103,48
20	87,51
30	87,58
45	87,36
60	87,08
70	87,25
80	87,88
90	103,98

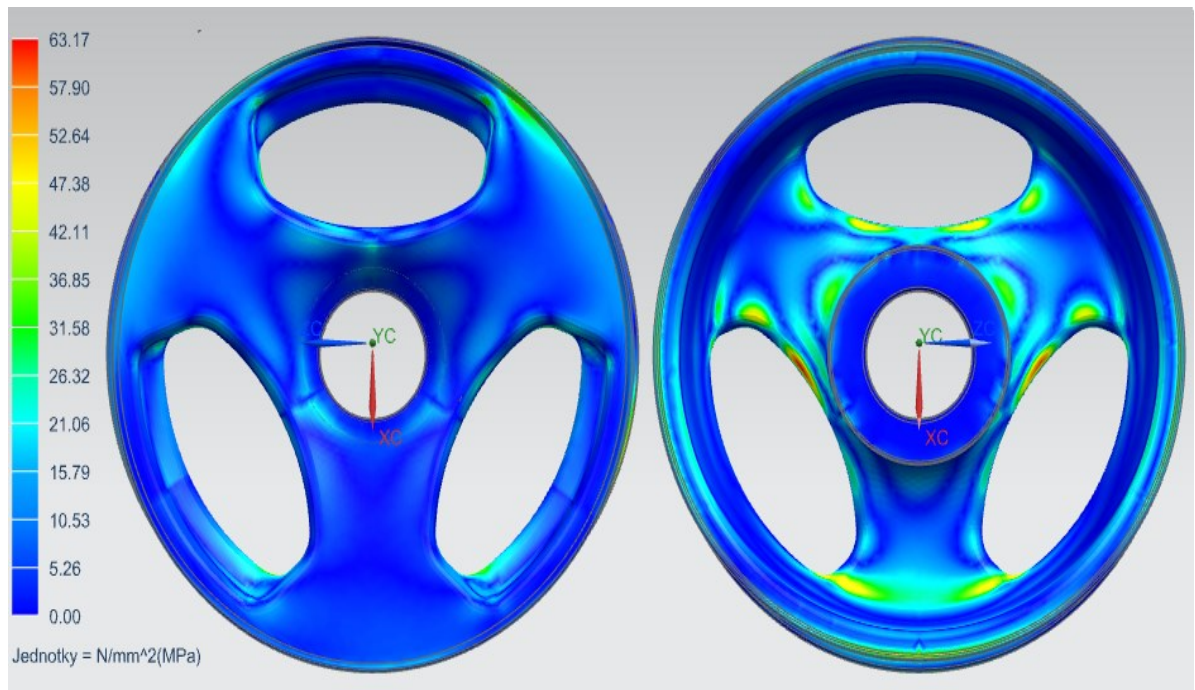


#### 12.2.4 Rozložení napětí do jednotlivých směrů vláken v kritické vrstvě disku

Pro názornost bylo provedeno rozložení celkového napětí v kritické vrstvě do jednotlivých složek napětí. Bylo zjištěno napětí v osnovním i útkovém směru vláken tkaniny. Průběh obou složek napětí byl znázorněn na Obr. 56 a Obr. 57.



Obrázek 56: Průběh napětí v osnovním směru tkaniny pro úhel kladení 80 °



Obrázek 57: Průběh napětí v útkovém směru tkaniny pro úhel kladení 80 °

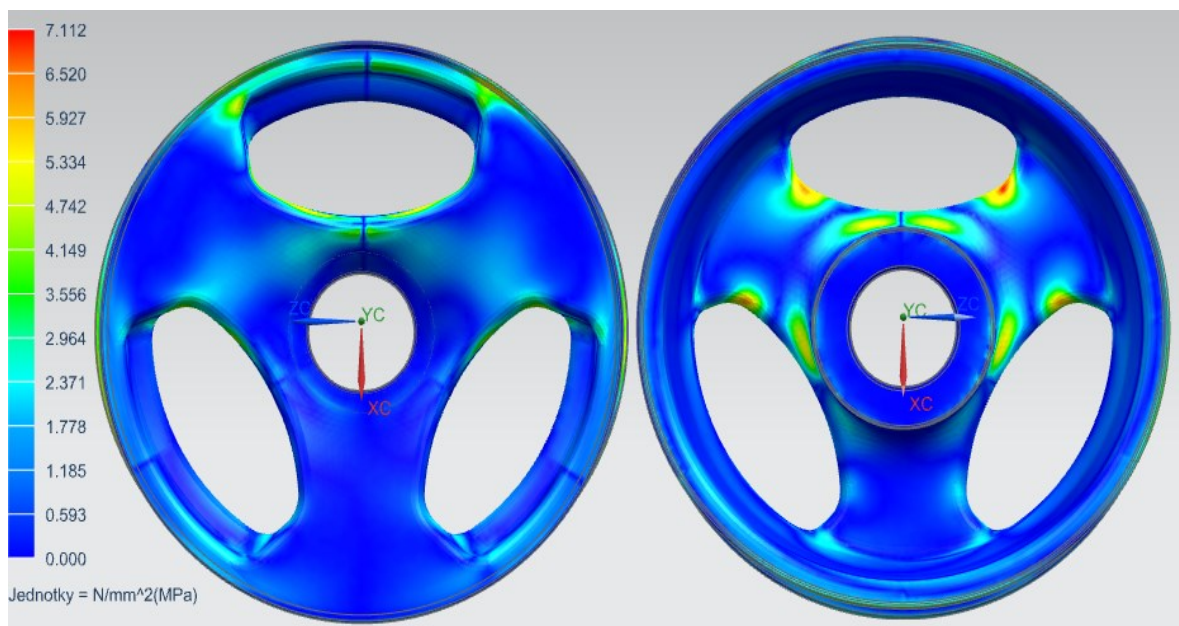
Výsledky maximálního napětí v osnovním i útkovém směru uhlíkové tkaniny v kritické vrstvě pro všechny úhly kladení tkaniny jsou znázorněny v následující tabulce (Tabulka 6).

Tabulka 6: Výsledky napětí v osnovním i útkovém směru vláken tkaniny v kritické vrstvě uhlíkového disku pro jednotlivé úhly kladení

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální napětí [MPa]	
	Napětí v osnovním směru	Napětí v útkovém směru
0	103,35	71,72
20	87,50	61,61
30	87,57	60,48
45	87,36	58,62
60	87,07	58,83
70	87,24	60,43
80	88,84	63,17
90	103,85	89,66

### 12.2.5 Smykové napětí v kritické vrstvě disku

Maximální smykové napětí v kritické vrstvě disku při průjezdu formule zatáčkou nastává v horní části středové části disku. Průběh a rozložení napětí byly znázorněny na Obr. 58.



Obrázek 58: Průběh smykového napětí v kritické vrstvě pro úhel kladení 80 °

Průběh smykového napětí v kritické vrstvě disku byl pro všechny úhly kladení stejný, lišila se pouze velikost napětí. Výsledky maximálního smykového napětí pro všechny úhly kladení v kritické vrstvě jsou znázorněny v následující tabulce (Tabulka 7).

Tabulka 7: Smykové napětí v kritické vrstvě disku pro jednotlivé úhly kladení

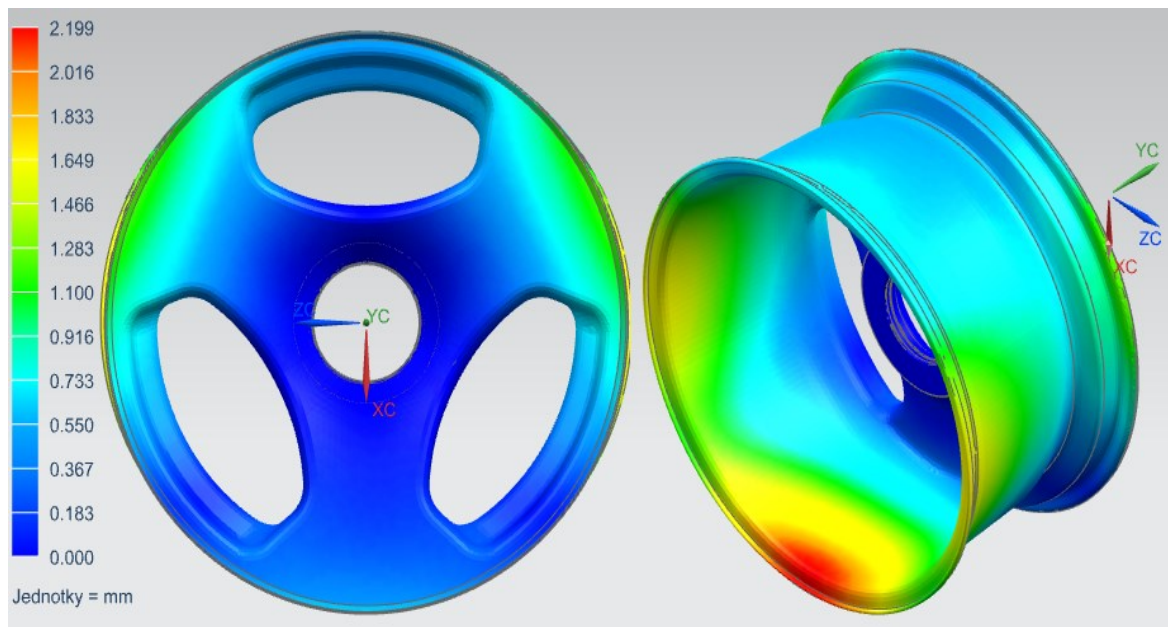
Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální napětí [MPa]
0	16,00
20	6,33
30	6,28
45	6,13
60	6,12
70	6,07
80	6,36
90	16,05

### 12.3 Výsledky analýzy FEM modelu, vytvořeného pomocí Ply-Based

Velikosti úhlů, pod kterými na sebe byly kladeny jednotlivé vrstvy tkaniny, byly totožné s první metodou. Jednalo se tedy o úhly: 0 °, 20 °, 30 °, 45 °, 60 °, 70 °, 80 °, 90 °. Analýza modelů, které byly vytvořeny pomocí nástroje Ply-Based, byly časově mnohem více náročné, její výsledky však lépe vystihují reálné hodnoty hledaných veličin. Toho bylo dosaženo zejména tím, že orientace materiálu ve všech záhybech složitého tvaru disku zde byla mnohem přesněji popsána, než v případě první metody. Další výhodou bylo nadefinování tkaniny uhlíkového prepregu, což u prvního způsobu nebylo možné. Největší výhodou je zobrazení problémových míst, kde dochází ke zkosení vláken tkaniny. Ve výpočtu je toto zkosení uvažováno. Nástrojem Ply-Based byly jednotlivé vrstvy definovány jako vrstvy tkaniny požadovaných vlastností. Na modelu, vytvořeným tímto způsobem, byly materiálové vlastnosti, orientace i tloušťka definovány pro jednotlivé plochy disku zvlášť. Z tohoto důvodu není vhodné porovnávat napětí v kritické vrstvě tkaniny s výsledky napětí analyzovaného modelu, který byl vytvořen nástrojem Zone-Based. Výsledkem analýzy byly tedy hodnoty celkové maximální přetvoření disku a maximální poměrné deformace disku. Tyto výsledky byly následně porovnány s výsledky modelu vytvořeným pomocí nástroje Zone-Based.

### 12.3.1 Výsledky analýzy celkové přetvoření uhlíkového disku

Maximální přetvoření disku nastala v zadní části ráfku, kde na ráfek působí zejména zatížení vertikální silou. Průběh přetvoření byl stejný jako u modelu vytvořeného pomocí Zone-Based. Tento průběh přetvoření disku byl znázorněn na Obr. 59.



Obrázek 59: Grafické znázornění přetvoření disku pro úhel kladení 90 °

Průběh přetvoření disku byl pro všechny úhly kladení rovněž stejný, lišila se pouze jeho velikost. Výsledky maximálního přetvoření pro všechny úhly, pod kterými se na sebe kladou jednotlivé vrstvy tkaniny, jsou zaznamenány v následující tabulce (Tabulka 8).

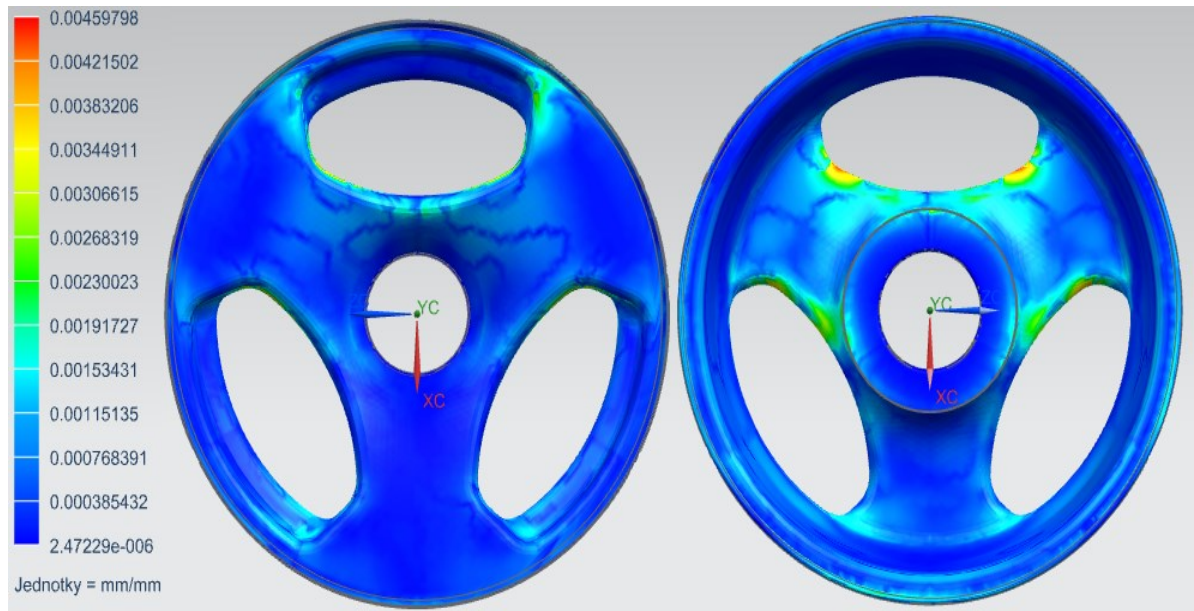
Tabulka 8: Maximální přetvoření disku pro jednotlivé úhly kladení

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální přetvoření [mm]
0	2,323
20	1,930
30	1,948
45	1,927
60	1,935
70	1,947
80	1,971
90	2,199



### 12.3.2 Výsledky analýzy poměrné deformace uhlíkového disku

Maximální poměrná deformace disku při průjezdu formule zatáčkou nastává rovněž v horní části středové části disku, respektive v místech, kde dochází ke změně velikosti zaoblení paprsků. Průběh poměrné deformace disku byl znázorněn na Obr. 60.



Obrázek 60: Grafické znázornění poměrné deformace disku pro úhel kladení 90 °

Průběh poměrné deformace disku byl pro všechny úhly kladení rovněž stejný, lišila se pouze velikost deformace. Výsledky maximální poměrné deformace pro všechny úhly kladení jsou znázorněny v následující tabulce (Tabulka 9).

Tabulka 9: Maximální poměrná deformace disku pro jednotlivé úhly kladení

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální deformace [%]
0	0,447530
20	0,285211
30	0,305109
45	0,338894
60	0,311857
70	0,319567
80	0,329597
90	0,459798

## 12.4 Shrnutí analýzy

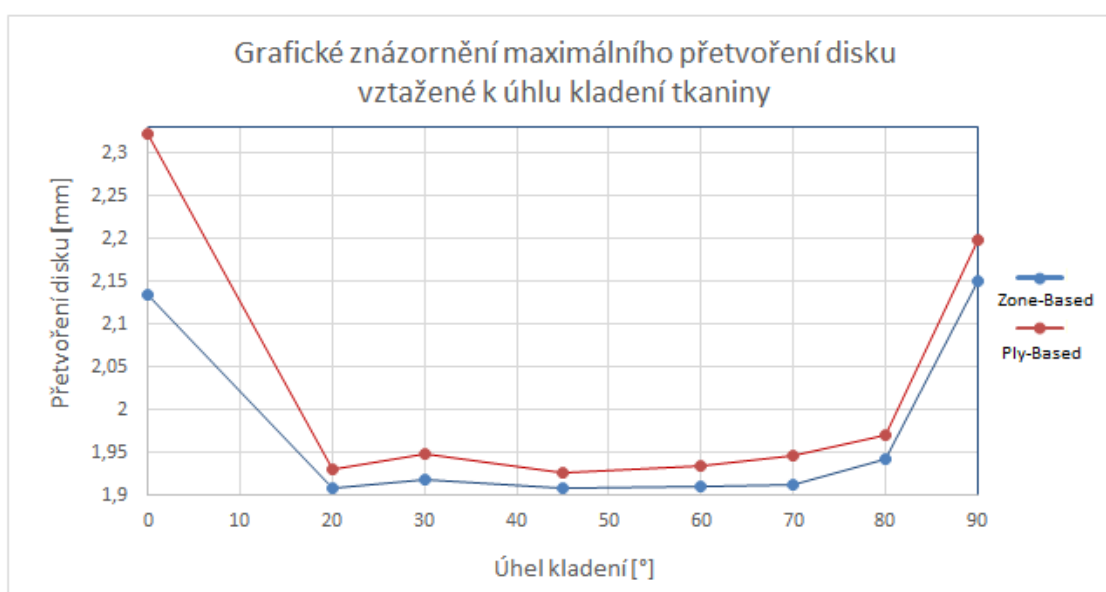
Výsledkem všech analýz bylo zjištění velikosti maximální celkového přetvoření disku, velikost poměrné deformace disku, napětí v kritické vrstvě a jeho jednotlivé složky.

### 12.4.1 Vyhodnocení analýzy z hlediska celkového přetvoření disku

Při celkovém zatížení analyzovaného disku metodou Zone-Based bylo zjištěno, že nejmenší přetvoření disku nastalo při kladení tkaniny pod úhlem 20 ° a 45 °. Největší přetvoření pak bylo dosaženo při úhlu kladení 90 °. Metodou Ply-Based bylo nejmenší hodnoty přetvoření dosaženo pro úhel 45 ° a největší přetvoření pro úhel 0 °. Ostatní hodnoty byly zaznamenány v následující tabulce (Tabulka 10). Pro minimální přetvoření disku bylo nejvhodnější možností klást jednotlivé vrstvy na sebe pod úhlem 45 °. Nejméně vhodné byly úhly 0 ° a 90 °.

Tabulka 10: Hodnoty maximální deformace pro jednotlivé úhly kladení tkaniny

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální přetvoření [mm]	
	Zone-Based	Ply-Based
0	2,134	2,323
20	1,909	1,930
30	1,918	1,948
45	1,909	1,927
60	1,911	1,935
70	1,912	1,947
80	1,942	1,971
90	2,150	2,199



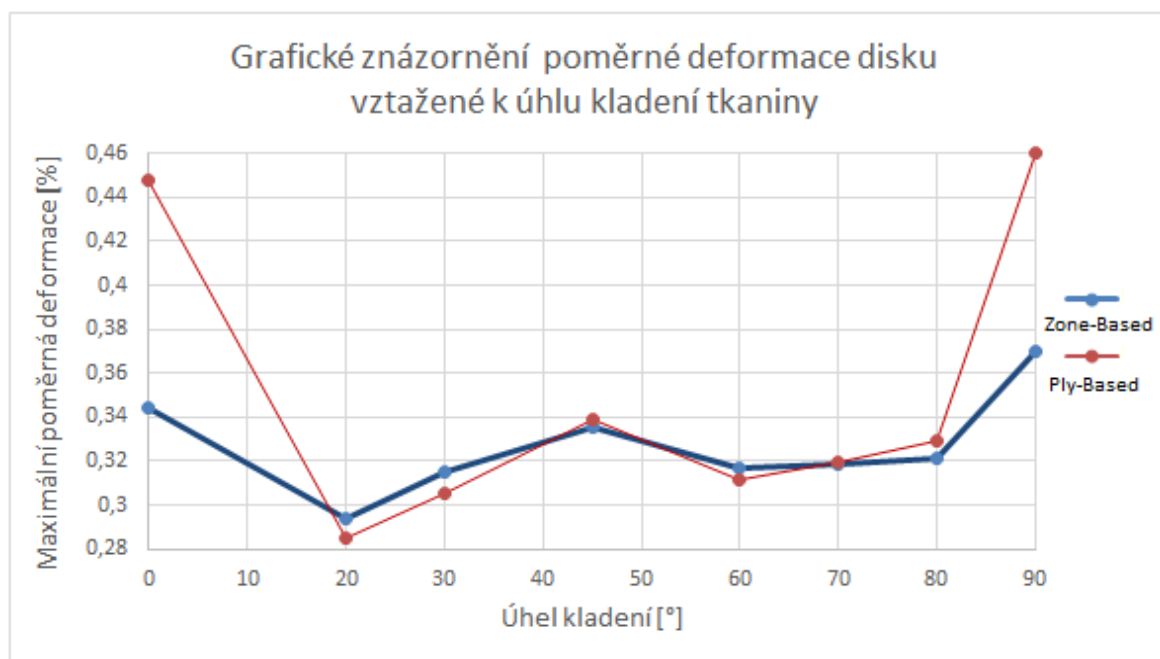
Obrázek 61: Znázornění přetvoření disku vztahované k úhlu kladení

### 12.4.2 Vyhodnocení analýzy z hlediska poměrné deformace disku

Analýzou modelu vytvořeného nástrojem Zone-Based bylo zjištěno, že nejmenší poměrná deformace disku nastala při kladení tkaniny pod úhlem 20 °. Největší deformace pak bylo dosaženo při úhlu kladení 90 °. Metodou Ply-Based bylo nejmenší hodnoty deformace dosaženo rovněž pro úhel 20 ° a největší deformace pro úhel 90 °. Ostatní hodnoty byly zaznamenány v následující tabulce (Tabulka 11). Pro minimální poměrnou deformaci analyzovaného disku bylo nejvhodnější možností klást jednotlivé vrstvy na sebe pod úhlem 20 °. Nejméně vhodný byl úhel 90 °.

Tabulka 11: Maximální poměrná deformace pro jednotlivé úhly kladení tkaniny

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální poměrná deformace [%]	
	Zone-Based	Ply-Based
0	0,344515	0,447530
20	0,294234	0,285211
30	0,315457	0,305109
45	0,335699	0,338894
60	0,317065	0,311857
70	0,318676	0,319567
80	0,321010	0,329597
90	0,369944	0,459798



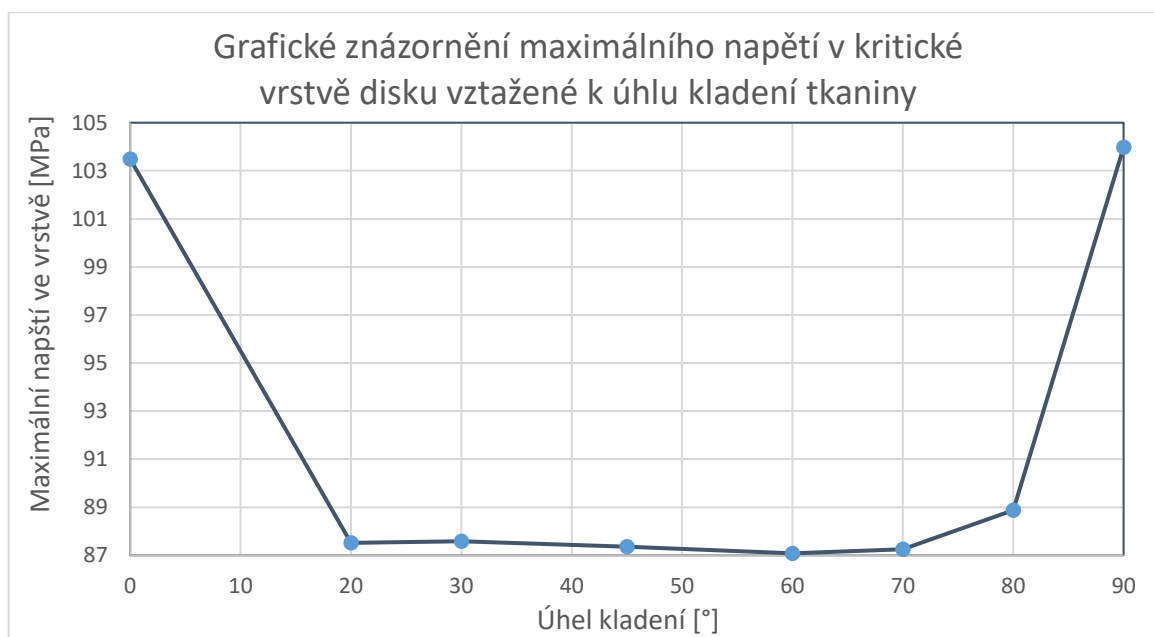
Obrázek 62: Znázornění poměrné deformace disku vztahované k úhlu kladení

### 12.4.3 Vyhodnocení analýzy z hlediska velikosti napětí v kritické vrstvě

Z provedených analýz bylo zjištěno, že největší hodnoty napětí bylo dosaženo při úhlu kladení  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Nejmenší napětí pak bylo dosaženo při úhlu kladení  $60^\circ$ . Hodnoty napětí ostatních velikostí úhlů jsou zaznamenány v následující tabulce (Tabulka 12). V tabulce byly uvedeny i hodnoty maximálního napětí rozloženého do osnovního i útkového směru vláken tkaniny a smykové napětí v kritické vrstvě. Ve směru osnovních vláken má uhlíková tkanina mez pevnosti 693 MPa, v útkovém směru vláken tkaniny má mez pevnosti 610 MPa. Vypočtené hodnoty napětí v kritické vrstvě disku se těmto hodnotám nepřibližují.

Tabulka 12: Maximální napětí v kritické vrstvě pro jednotlivé úhly kladení

Úhel kladení tkaniny [°]	Maximální napětí [MPa]				Vrstva
	Maximální napětí ve vrstvě	Napětí v osnovním směru	Napětí v útkovém směru	Smykové napětí	
0	103,48	103,35	71,72	16,00	1
20	87,51	87,50	61,61	6,33	10
30	87,58	87,57	60,48	6,28	10
45	87,36	87,36	58,62	6,13	10
60	87,08	87,07	58,83	6,12	10
70	87,25	87,24	60,43	6,07	10
80	88,88	88,40	63,17	6,36	1
90	103,98	103,85	89,66	16,05	1



Obrázek 63: Graf maximálního napětí v kritické vrstvě vztažený k úhlu kladení

#### 12.4.4 Volba optimálního úhlu

Z analýzy byly zjištěny hodnoty maximálního přetvoření, hodnoty poměrné deformace disku, maximální napětí v kritické vrstvě a jeho rozklad do jednotlivých složek. Vzhledem k tomu, že meze pevnosti v obou směrech vláken tkaniny dosahují několikanásobně vyšší hodnoty než vypočtené napětí, můžeme jako kritérium pro určení optimálního úhlu kladení použít hodnoty maximálního přetvoření a poměrné deformace. Z těchto dvou hledisek byl jako optimální úhel kladení zvolen úhel  $20^\circ$ .

Hodnota maximálního přetvoření byla metodou Zone-Based pro úhel kladení  $20^\circ$  společně s úhlem  $45^\circ$  vypočtena jako nejnižší a dosáhla velikosti 1,909 mm. Metodou Ply-Based byla nejnižší hodnota přetvoření vypočtena pro úhel kladení  $45^\circ$ , velikost druhé nejnižší hodnoty však dosáhl úhel kladení  $20^\circ$  a to hodnoty 1,930 mm. Maximální poměrná deformace disku metodou Zone-Based dosáhla hodnoty 0,294234 %, což byla nejnižší vypočtená hodnota. Stejně tomu tak bylo v případě metodou Ply-Based, kde maximální poměrná deformace dosáhla hodnoty 0,285211 %.

V případě, že se jednotlivé vrstvy tkaniny na sebe kladly pod úhlem  $0^\circ$ , zůstával osnovní a útkový směr vláken ve všech vrstvách stejný. V případě, že se jednotlivé vrstvy otáčely o  $90^\circ$ , zaměnila se v jednotlivých vrstvách pouze osnovní za útková vlákna, nedošlo však k jejich vzájemnému pootočení. Pro tyto dva úhly kladení bylo dosaženo nejvyšších hodnot maximálního přetvoření i maximální poměrné deformace. Z hlediska rozložení napětí do jednotlivých vrstev dosáhly tyto dva úhly také nejhorších výsledků, když napětí v kritické vrstvě, na rozdíl od ostatních úhlů kladení, výrazně vzrostlo. Rovněž velikost smykového napětí v kritické vrstvě byla mnohem vyšší. Obecně lze říct, že při pootočení jednotlivých vrstev tkaniny o úhel v rozmezí od  $20^\circ$  do  $80^\circ$ , získáme mnohem nižší hodnoty maximálního přetvoření, poměrné deformace a napětí v disku se mnohem lépe rozkládá mezi jednotlivé vrstvy.

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo nalezení optimálního úhlu kladení jednotlivých vrstev uhlíkového prepregu na sebe, za účelem získání co nejlepších mechanických vlastností analyzované součásti. Analyzovanou součástí byl uhlíkový disk, který byl určen pro formuli Dragon 6, vytvořenou týmem TU Brno Racing. Z tenzometrického měření v zavěšení této formule byly zjištěny velikosti zatěžujících sil. Pro tvorbu FEM modelu i samotnou analýzu byl použit program NX 11, který má pro tvorbu kompozitu dva základní nástroje. V této práci byly jednotlivé modely vytvořeny oběma nástroji. Součásti disku byly vytvořeny v programu CATIA V5 a následně importovány do programu NX 11 ve formátu STEP.

Při tvorbě FEM modelu byla zjištěna problémová místa, ve kterých dochází ke zvrásnění tkaniny při jejím kladení do formy. V těchto místech bylo nutné tkaninu naříznout. Z výsledků analýzy pak byly porovnávány hodnoty maximálního přetvoření, poměrné deformace, dále byl zjištěn průběh a velikost napětí v kritické vrstvě disku a rozklad tohoto napětí do jednotlivých složek. Protože maximální napětí v kritické vrstvě bylo několikanásobně menší než meze pevnosti v obou směrech vláken tkaniny, jako kritéria pro volbu optimálního úhlu byly zvoleny hodnoty maximálního přetvoření a hodnoty maximální poměrné deformace. Z těchto dvou hledisek byl jako optimální úhel kladení zvolen úhel  $20^\circ$ . Z výsledků analýzy lze konstatovat, že při pootočení jednotlivých vrstev tkaniny o úhel v rozmezí od  $20^\circ$  do  $80^\circ$ , získáme mnohem nižší hodnoty maximálního přetvoření a poměrné deformace, i lepší rozložení napětí do všech vrstev. Vypočtené výsledky byly zpracovány do tabulek a grafů.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - modely a vlastnosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN isbn:8070839724.
- [2] SKÁLOVÁ, Jana, Vladislav MOTYČKA a Jaroslav KOUTSKÝ. *Nauka o materiálech*. 3. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN isbn:8070432446.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*, vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN isbn:9788072042487.
- [4] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988.
- [5] KAW, Autar K. *Mechanics of composite materials*. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.), v. 29. ISBN isbn:0849313430.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN isbn:978-80-86960-29-6.
- [7] VRBKA, Jan. MECHANIKA KOMPOZITŮ [online]. Brno, 2008 [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)
- [8] Rtm proces illustration – Orenco Composites. *Custom Prefab Buildings, Tanks, Enclosures, and Basins* [online]. 2014 [cit. 05.11.2017]. Dostupný z: <http://orencocomposites.com/processes/rtm/rtm-process-illustration/>
- [9] Technologie jejich popis a schémata. [online]. havel-composites.com. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [10] Pedagogická fakulta MU katedra fyziky [online]. Brno, [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>
- [11] KOŘÍNEK, Z. *Technologie*. [online]. 2014. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z WWW: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [12] Anizotropie vlastností vláknových kompozitů s polymerní: Kompozity s textilní výztuží. [online]. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/projekty/frvs139/P3.pdf>

- [13] Prepregs Home [online]. Gurit 2011, [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.gurit.com/Our-Business/Composite-Materials/Prepregs>
- [14] BOKATECH, s.r.o. [online]. 2012. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.bokatech.cz/>
- [15] Technologie výroby tažených profilů PREFEN. Informace o technologii. 2011. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie/informace-o-technologie/>
- [16] Prepreg [online]. 2009. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.bm-chemie.cz/cz/trhy/Composites-Mould-making/Structural-composites/Prepregs.php>
- [17] NOVOTNÝ, P. Vývoj a konstrukce uhlíkových ráfků pro automobilový průmysl. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2016, 96 stran., [online]. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37901/novotn%C3%BD\\_2016\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37901/novotn%C3%BD_2016_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [18] HEXCEL CORPORATION: *Prepreg Technology* [online]. 2005. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: [http://hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Prepreg\\_Technology.pdf?w=500](http://hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf?w=500)
- [19] FIBRE GLAST, What are prepregs. [online]. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: [http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning\\_Center](http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center)
- [20] JAVOŘÍK, Jakub. Přednášky z předmětu Aplikace výpočetních metod. Zlín, 2017
- [21] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 110 s. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [22] Duratec: Použité materiály. [online]. 2011. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.duratec.cz/cs/techinfo/pouzivane-materialy/uhlikova-vlakna-karbonove-kompozity/>
- [23] Composites Analysis: Siemens PLM [online]. 2010. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/simcenter/3d/structural-analysis/composites.shtml#lightview-close>



- [24] Structural analysis using NX Laminate Composites: Siemens PLM [online]. 2010. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: [https://docs.plm.automation.siemens.com/data\\_services/resources/nx/10.0.3/nx\\_help/cs\\_CZ/selfPacedExt/advanced\\_sim\\_tutorial/index.html?goto=id557841.html](https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nx/10.0.3/nx_help/cs_CZ/selfPacedExt/advanced_sim_tutorial/index.html?goto=id557841.html)
- [25] VRBKA, M., Metoda konečných prvků-přednáška ústavu konstruování VUT Brno. [cit. 05-11.2017] Dostupné z: [http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1\\_mkp.pdf](http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf)
- [26] BROŽ, J. *Praktická dílna*. [online]. říjen 2007. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.znalec.tym.cz/kola%20a%20pneu.pdf>
- [27] JAN, Z.; ŽDÁNSKÝ, B. *Automobily I: podvozky*. 1. vydání Brno. Vydavatelství: Avid spol. s r.o. v Brně. 2001. ISBN isbn:9788087143032
- [28] Wire wheels, [online]. 2005. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.ultimaproducts.com/wires.htm>
- [29] Saf-Holand South Africa, [online]. 2005. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://www.ultimaproducts.com/wires.htm>
- [30] Oemandmore, [online]. 2014. [cit. 05-11.2017]. Dostupný z: <http://oemandmore.co.uk/tyres--wheels-913-c.asp>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\varepsilon$	Poměrná deformace	[-]
$\sigma$	Normálové napětí	[MPa]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
G	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
$\nu$	Poissonovo číslo	[-]
S	Poddajnost	[1/MPa]
C	Tuhost	[MPa]
Q	Plošná hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]
$v_o$	Hustota tkání ve směru osnovy	[kg/m <sup>3</sup> ]
$v_u$	Hustota tkání ve směru útku	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_f$	Hustota vlákna	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	Objemový podíl vláken	[-]
$v_f$	Celkový objem tkaniny	[m <sup>3</sup> ]
$v_t$	Objem vláken v 1 m	[m <sup>3</sup> ]
$\gamma$	Poměrná smyková deformace	[-]
f	Síla vztažená na jednotku šířky	[N/mm]
$p_{max}$	Maximální otláčení	[MPa]
$t_k$	Tloušťka jedné vrstvy	[mm]
$M_k$	Krouticí moment	[N/m]
$F_{Hm}$	Vertikální síla připadající na jeden čep	[N]
$F_{ver}$	Vertikální síla	[N]
$F_k$	Síla spočítaná z krouticího	[N]
l	Délka čepu	[mm]
n	Počet čepů	[-]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozdělení kompozitních materiálů [6].....	14
Obrázek 2: Znázornění synergického efektu v kompozitním materiálu [1].....	17
Obrázek 3: Příklady rovinného uspořádání vláken.....	19
Obrázek 4: Prostorové uspořádání vláken v kompozitu.....	19
Obrázek 5: Schéma ruční výroby kompozitních materiálů [6].....	22
Obrázek 6: Schéma výroby kompozitu stříkáním [6].....	23
Obrázek 7: Schéma technologie RTM [8].....	24
Obrázek 8: Schéma technologie vakuovaného a tlakového vaku [6].....	24
Obrázek 9: Schéma technologie lisování v autoklávu [6].....	25
Obrázek 10: Třístupňová kontrola kvality při výrobě kompozitu [6].....	26
Obrázek 11: Přípravek pro zkoušku tříbodovým ohybem [12].....	29
Obrázek 12: Schéma jednosměrně a dvousměrně orientovaného prepregu [9].....	30
Obrázek 13: Orientace vláken pro jednotlivé druhy tkaninových vazeb [13].....	31
Obrázek 14: Základní druhy tkanin dle materiálu použitých vláken [19].....	34
Obrázek 15: Únavové chování různých druhů kompozitů [22].....	35
Obrázek 16: Výroba prepregu horkým tavením [9].....	36
Obrázek 17: Výroba prepregů rozpouštědlovým způsobem [9].....	37
Obrázek 18: Výroba jednosměrně orientovaného prepregu [9].....	37
Obrázek 19: Hlavní souřadný ortotropní systém [20].....	38
Obrázek 20: Hlavní souřadný systém pro příčně izotropní materiál [20].....	40
Obrázek 21: Systém souřadnic a označení [6].....	44
Obrázek 22: Zobrazení orientace vláken u kompozitního výrobku [24].....	47
Obrázek 23: Analýza a následná optimalizace kompozitního výrobku [24].....	47
Obrázek 24: Základní typy elementů [20].....	49
Obrázek 25: Definování okrajových podmínek analyzovaného tělesa [24].....	50
Obrázek 26: Dvojdílný, trojdílný a čtyřdílný ráfek [26].....	52
Obrázek 27: Hvězdicové kolo [29].....	53
Obrázek 28: Diskové kolo [30].....	53
Obrázek 29: Drátové kolo [28].....	54
Obrázek 30: Paprskové kolo [30].....	54
Obrázek 31: Uložení karbonového disku na náboji a popis jednotlivých součástí ....	57
Obrázek 32: Zobrazení orientace osnovních vláken pomocí nástroje Zone-Based....	58

Obrázek 33: Zobrazení orientace osnovních vláken pomocí nástroje Ply-Based.....	58
Obrázek 34: Tvorba 2D sítě na modelu disku .....	59
Obrázek 35: Tvorba 3D sítě na modelu kroužku .....	60
Obrázek 36: Mechanické vlastnosti uhlíkového prepregu GG200T-DT120-42 .....	61
Obrázek 37: Mechanické a pevnostní vlastnosti duralu .....	62
Obrázek 38: Vytvoření jednotlivých vrstev pro případ kladení pod úhlem 20° .....	63
Obrázek 39: Určení hlavního směru kladení prepregu středové části .....	63
Obrázek 40: Určení hlavního směru kladení prepregu ráfku.....	64
Obrázek 41: Pevné spojení kroužku s diskem pomocí nástroje Face Gluing.....	65
Obrázek 42: Ukotvení ráfku v dosedacích plochách patek pomocí válcové vazby....	65
Obrázek 43: Zatížení uhlíkového disku vertikální silou .....	66
Obrázek 44: Zatížení uhlíkového disku příčnou silou .....	67
Obrázek 45: Zatížení uhlíkového disku krouticím momentem formule Dragon 6.....	67
Obrázek 46: Nastavení počtu vrstev a jejich vlastností pro středovou část disku .....	69
Obrázek 47: Určení hlavního směru kladení tkaniny pomocí příslušného vektoru....	69
Obrázek 48: Změna úhlu mezi osnovním a útkovým vláknem .....	70
Obrázek 49: Zobrazení problémových míst disku z hlediska kladení tkaniny .....	71
Obrázek 50: Problémová místa při kladení tkaniny pro úhel zamknutí 45 ° .....	71
Obrázek 51: Rozměry a zatížení duralového kroužku.....	72
Obrázek 52: Rozložení Von-Missesova napětí v disku .....	73
Obrázek 53: Grafické znázornění přetvoření disku pro úhel kladení 90 ° .....	74
Obrázek 54: Grafické znázornění poměrné deformace disku pro úhel kladení 90 ° ..	75
Obrázek 55: Průběh napětí v kritické vrstvě disku pro úhel kladení 80 ° .....	76
Obrázek 56: Průběh napětí v osnovním směru tkaniny pro úhel kladení 80 ° .....	77
Obrázek 57: Průběh napětí v útkovém směru tkaniny pro úhel kladení 80 ° .....	77
Obrázek 58: Průběh smykového napětí v kritické vrstvě pro úhel kladení 80 °.....	78
Obrázek 59: Grafické znázornění přetvoření disku pro úhel kladení 90 ° .....	80
Obrázek 60: Grafické znázornění poměrné deformace disku pro úhel kladení 90 ° ..	81
Obrázek 61: Znázornění přetvoření disku vztažené k úhlu kladení.....	82
Obrázek 62: Znázornění poměrné deformace disku vztažené k úhlu kladení .....	83
Obrázek 63: Graf maximálního napětí v kritické vrstvě vztažený k úhlu kladení .....	84

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Tabulka mechanických vlastností jednotlivých druhů vláken [6] .....	35
Tabulka 2: Postup tvorby a analýzy FEM modelu [20] .....	48
Tabulka 3: Maximální přetvoření disku pro jednotlivé úhly kladení .....	74
Tabulka 4: Maximální poměrná deformace disku pro jednotlivé úhly kladení .....	75
Tabulka 5: Maximálního napětí v kritické vrstvě disku pro jednotlivé úhly kladení .....	76
Tabulka 6: Výsledky napětí v osvním i útkovém směru vláken tkaniny v kritické vrstvě uhlíkového disku pro jednotlivé úhly kladení .....	78
Tabulka 7: Smykové napětí v kritické vrstvě disku pro jednotlivé úhly kladení .....	79
Tabulka 8: Maximální přetvoření disku pro jednotlivé úhly kladení .....	80
Tabulka 9: Maximální poměrná deformace disku pro jednotlivé úhly kladení .....	81
Tabulka 10: Hodnoty maximální deformace pro jednotlivé úhly kladení tkaniny .....	82
Tabulka 11: Maximální poměrná deformace pro jednotlivé úhly kladení tkaniny .....	83
Tabulka 12: Maximální napětí v kritické vrstvě pro jednotlivé úhly kladení .....	84

## SEZNAM PŘÍLOH

### PI: DVD disk

- Jednotlivé FEM modely v programu NX 11
- Výsledky analýz v programu NX 11
- Text diplomové práce

