Problematika výroby dutých součástí z předimpregnovaných kompozitů

Bc. Martin Janošík

Diplomová práce
2017

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Martin Janošík**
Osobní číslo:	**T15401**
Studijní program:	**N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Výrobní inženýrství**
Forma studia:	**kombinovaná**
Téma práce:	**Problematika výroby dutých součástí z predimpregnovaných kompozitů**

Zásady pro vypracování:

1. **Teoretická část**
2. **Literární rešerše v oblasti kompozitních materiálů, rozdělení vlastností.**
3. **Výroba a popis predimpregnovaných materiálů.**
4. **Popis zpracovatelských technologií vhodných pro výrobu dutých profilů z predimpregnovaných kompozitů.**
5. **Aplikace dutých profilů ve sportovním, stavebním a dopravním průmyslu.**
6. **Experimentální část**
7. **Návrh materiálového složení kompozitního profilu, stanovení počtu vrstev a návrh technologických podmínek jeho zpracování.**
8. **Testování mechanických vlastností zvoleného materiálu dle zvolených metodik, s ohledem na aplikaci profilu**
9. **Experimentální výroba prototypu daného profilu.**
10. **Závěr diplomové práce a diskuze dosažených výsledeků.**

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

Seznam odborné literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2017**

Ve Zlíně dne 23. ledna 2017

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

UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ
Fakulta technologická
L.S.

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

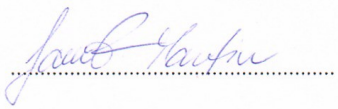
Příjmení a jméno: Janošík Martin Obor: Výrobní inženýrství

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 [1)];
- 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 [2)];
- beru na vědomí, že podle § 60 [3)] 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 [3)] 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, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 12.5.2017 .....



[1)] 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 nevýdělečně 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.

[2)] 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).

[3)] 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). Odpírá-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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

V této diplomové práci se budu zabývat problematikou výroby dutých předmětů z kompozitů, konkrétně pak z předimpregnovaných tkanin (prepregu). Teoretická část je zaměřena na kompozitní materiály, výrobu kompozitních materiálů a technologii kompozitních materiálů převážně prepregu. Praktická část je pak zaměřena na volbu vhodné technologie pro výrobu dutých profilů z předimpregnovaných tkanin, skladbu daných vrstev a orientaci vláken. Následně zkoušení vyrobených vzorků.

Klíčová slova: prepreg, kompozitní materiály, ohybová tuhost, Hot melt, Solvent dip Process, vlákno, tkanina, struktura,

ABSTRACT

In this diploma work I am going to deal with the issue of manufacturing hollow composite object, specificaly fabric prepreg (prepreg). The theoretical part is focused on composite materials, their production and technology, predominantly prepreg. The practical part is focused on the selection of appropriate technology for the protuction of tubes made from prepreg, fabric composition of the layers and the orientation of the fibers. All this followed by testing of these produced specimens.

Keywords: prepreg, composite materiál, flexural rigidity, Hot melt, Solvent dip Process, fiber, cloth, structure

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce doc. Ing. Soni Rusnákové Ph.D., za její odborné vedení a čas, který mi věnovala při konzultacích. Mimo jiné také za cenné rady a informace, které byly velkým přínosem při vypracování této diplomové práce. Mé poděkování patří dále také Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za pomoc při testování a vyhodnocení měření. Velký dík patří také panu Ing. Vladimíru Rusnákovi a firmě FORM s.r.o., kde mi byla umožněna výroba prototypů a odborné konzultace při výrobě.

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

OBSAH

ÚVOD **10**

I TEORETICKÁ ČÁST **11**

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY **12**

1.1 DRUHY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 13

1.1.1 Kompozit prvního druhu 13

1.1.2 Kompozitní materiály druhého druhu 13

1.1.3 Kompozitní materiál třetího druhu 13

1.2 ZÁKLADNÍ DRUHY MATRIC 14

1.2.1 Polyestery 14

1.2.2 Methyl-methakryláty 14

1.2.3 Epoxidy 14

1.2.4 Vinylestery 14

1.3 VÝZTUŽE 15

1.3.1 Roving 15

1.3.2 Rohož 16

1.3.3 Tkanina: 16

1.3.4 Povrchová rohož 17

1.3.5 Pramen 17

1.3.6 Příze 17

1.3.7 Střiž 18

1.3.8 Vlákno elementární 18

1.4 ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIÍ VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 18

1.4.1 Vytvrzování v autoklávu 19

1.4.2 Ruční kladení prepregu 20

1.4.3 Vakuové lisování prepregu 21

1.5 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ VOLBU TECHNOLOGIÍ VÝROBY 21

2 PREPREG **23**

2.1 VÝZTUŽE 23

2.2 MATRICE 24

2.2.1 Epoxidové matrice 24

2.2.2 Fenolické matrice 24

2.2.3 Bismaleimidové matrice 24

2.3 VÝROBA A VYUŽITÍ PREPREGU 26

2.3.1 Výroba prepregu 26

2.3.2 Využití prepregu 27

3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE VHODNÉ PRO VÝROBU DUTÝCH PROFILŮ Z PŘEDIMPREGNOVANÝCH KOMPOZITŮ **30**

3.1 PULTRUZE 30

3.2 NAVÍJENÍ 32

3.2.1 Navíjení šroubovicové 32

3.2.2 Navíjení pólové za mokra 32

3.2.3 Axiální navíjení: 33

3.3 PREPREG TECHNOLOGIE POMOCÍ VZDUCHOVÉ MEMBRÁNY 33
3.3.1 Membránová napjatost 33
3.4 VÝROBA DĚLENÉHO DUTÉHO PROFILU 36
4 APLIKACE DUTÝCH PROFILŮ 38
4.1 VÝROBA RÁMŮ SILNIČNÍCH KOL 38
4.2 KOMPOZITNÍ DUTÉ PROFILY V LETECTVÍ 39
5 ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 41
5.1 ZKOUŠKA OHYBEM 41
5.1.1 Průběh zkoušky 41
5.1.2 Stanovení a vyhodnocení zkoušky 41
5.2 VZPĚR KOMPOZITNÍCH SLOUPŮ 43
II PRAKTICKÁ ČÁST 48
6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE 49
6.1 CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI 49
7 NÁVRH PROTOTYPOVÉ FORMY PRO VÝROBU KOMPOZITNÍHO PROFILU 50
7.1 FORMA PRO VÝROBU KRUHOVÉHO PROFILU 50
7.2 FORMA PRO VÝROBU ČTVERCOVÉHO PROFILU 51
8 NÁVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ PRO JEDNOTLIVÉ PROTOTYPY PROFILŮ 54
8.1 VZORKY KRUHOVÉHO PROFILU 54
8.2 VZORKY ČTVERCOVÉHO PRŮŘEZU 55
9 TECHNOLOGICKÝ POSTUP A DOPORUČENÉ PODMÍNKY ZPRACOVÁNÍ 56
9.1 TECHNOLOGICKÝ POSTUP ZPRACOVÁNÍ KRUHOVÉHO PROFILU 56
9.2 TECHNOLOGICKÝ POSTUP PRO ČTVERCOVÝ PROFIL 61
10 EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA NAVRHNUTÝCH PROTOTYPŮ 64
10.1 DUTÝ PROFIL KRUHOVÉHO PRŮŘEZU 64
10.1.1 Vady při experimentální výrobě 64
10.2 DUTÝ PROFIL ČTVERCOVÉHO PRŮŘEZU 66
11 ZHODNOCENÍ VHODNOSTI ZVOLENÉHO POSTUPU PRO DOSAŽENÍ KOMPOZITNÍHO PROFILU V SOULADU S VÝKRESOVOU DOKUMENTACÍ 68
11.1 ZHODNOCENÍ POSTUPU PŘI VÝROBĚ KRUHOVÉHO PROFILU 68
11.2 ZHODNOCENÍ POSTUPU PŘI VÝROBĚ ČTVERCOVÉHO PROFILU 68
12 TESTOVÁNÍ KOMPOZITNÍHO PROFILU DLE ZVOLENÝCH STANDARDŮ 70
12.1 ZKOUŠKA OHYBEM 70
12.1.1 Zkušební tělesa 71
12.1.2 Průběh zkoušky 72
12.1.3 Vyhodnocení průběhu zkoušky ohybem 72
12.1.3.1 Těleso se skladbou [0;0] 72
12.1.3.2 Těleso se skladbou [45;45] 74
12.1.3.3 Těleso se skladbou [45;0] 75

12.1.4 Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu E_O 77
12.1.5 Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu σ_{Fm} 78
12.1.6 Vyhodnocení poměrné deformace ε_{OFM} 79
12.1.7 Vyhodnocení vykonané práce k dosažení meze pevnosti W_{FM} 80
12.2 ZKOUŠKA TLAKEM 81
12.2.1 Zkušební vzorky 82
12.2.2 Vyhodnocení grafů zkoušky modulu pružnosti v tlaku 83
12.2.2.1 Těleso se skladbou [0;0] 83
12.2.2.2 Těleso se skladbou [45;45] 84
12.2.2.3 Těleso se skladbou [45;0] 85
12.2.3 Vyhodnocení modulu pružnosti v tlaku E 86
12.2.4 Vyhodnocení grafů působící síly na deformaci 86
12.2.4.1 Naměřené grafy u skladby [45;0] 87
12.2.4.2 Naměřené grafy u skladby [45;45] 89
12.2.5 Vyhodnocení meze pevnosti v tlaku 91
12.2.6 Vyhodnocení deformace 91
13 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ 92
ZÁVĚR 94
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 96
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 100
SEZNAM OBRÁZKŮ 102
SEZNAM TABULEK 105
SEZNAM GRAFŮ 106
SEZNAM PŘÍLOH 107

ÚVOD

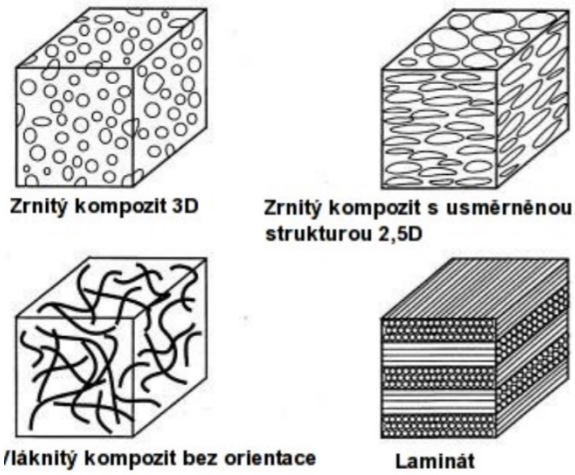
Tato práce si klade za cíle seznámení s kompozitními materiály, technologií výroby a využitím kompozitních materiálů v průmyslu, a to především dutých profilů. Kompozitní materiály jsou v současnosti jedny z nejpoužívanějších. Velká výhoda kompozitů spočívá ve vysoké lehkosti a chemické odolnosti. Kompozitní materiály se vyrábějí mnoha způsoby, ať už to jsou technologie jako ruční kladení, nebo RTM technologie. Pro výrobu dutých profilů se používají zejména technologie pultruze a výroba prepreg technologie s využitím vzduchové membrány. Metoda pultruze je velmi náročná, vyžaduje svoje know-how. Metodou pultruze vyrábíme profily ve velkém množství v jednotkách tun. Jedna z největších výhod je, že máme možnost dosáhnout až přes 80% výztuže, což pomocí žádné jiné technologie nedosáhneme. V dnešní době je trend v oblasti kompozitní technologie co nejvíce vyrábět strojně a automatizovat. V tomto ohledu má pultruzní technologie velkou výhodu. Nevýhoda ovšem spočívá v poměrně vysoké pořizovací ceně technologie. Pultruzní profily se uplatňuji zejména ve sportovních odvětvích, letectví a všude tam, kde jsou zapotřebí lehké a pevné kompozitní profily.

Při výrobě málo sériové, nebo kusové výroby, je možno použít výroby prepreg technologie s využitím vzduchové membrány. Tato technologie se používá ve velké míře u rámů cyklistických kol. Oproti pultruzní lince je pořizovací cena nižší, ovšem je potřeba zručný personál, který má zkušenosti se správným zakládáním prepregu a dodržováním předepsaných postupů. Pomocí prepreg technologie s využitím vzduchové membrány můžeme vyrobit profily, které nejsou přímé.

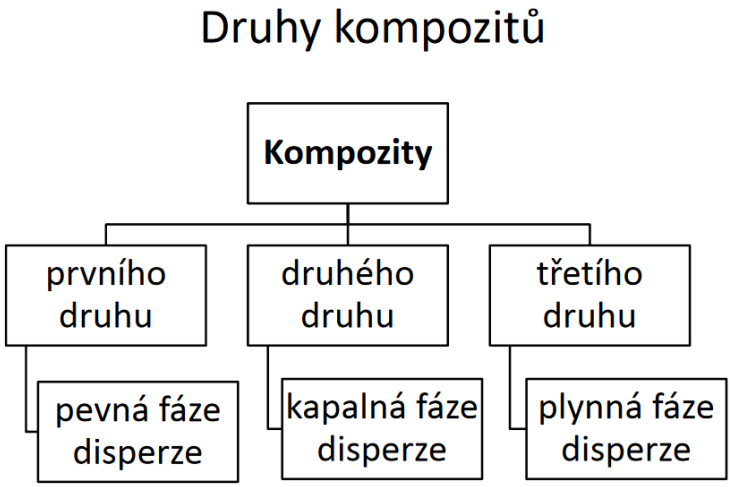
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou v poslední době na vzestupu, a to hlavně uhlíkové. Tento druh materiálů se nejvíce používá tam, kde se kladou nároky na pevnost a nízkou váhu (sportovní potřeby, letecký průmysl, automobilový průmysl, atd.). Kompozitní materiály jsou takové materiály, které se skládají ze dvou složek, které se výrazně liší svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Po spojení těchto dvou materiálů vzniká jeden materiál s unikátními vlastnostmi, které nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou samostatně, ani prostou sumací. V dnešní době existuje na trhu široké množství kompozitních materiálů, které se liší typem výztuží (rohože, tkanina, rouna,…), pojivem (pryskyřicí) a způsobu technologie kterou je daný kompozit vyráběn. Jedno z nejrozšířenější rozdělení kompozitních materiálů z hlediska typu výztuže je 3D prostorové uspořádání. [1][2]



Obrázek 1 Druhy výztuže v kompozitním materiálu [2]



Obrázek 2 Druhy kompozitních materiálů [2]

1.1 Druhy kompozitních materiálů

1.1.1 Kompozit prvního druhu

Tento kompozit je nejdůležitější a nejpoužívanější. Rozdělujeme je podle tvaru a disperze:

- vlákna – spojitá, dlouhá a krátká

- částice: Jednorozměrné (jehličky, tyčinky)

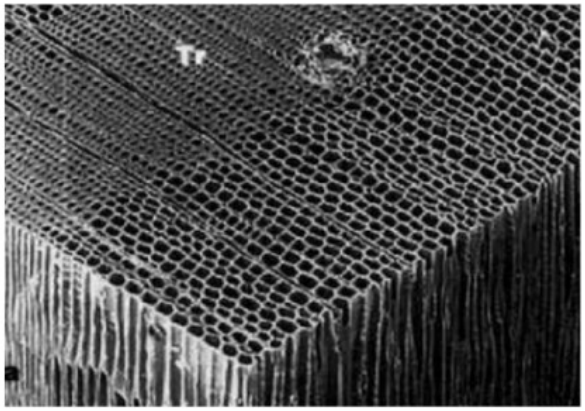
Vrstvené (destičky)

Izometrické (globule)

- desky (ztrácí se rozdíl mezi matricí a disperzí)

1.1.2 Kompozitní materiály druhého druhu

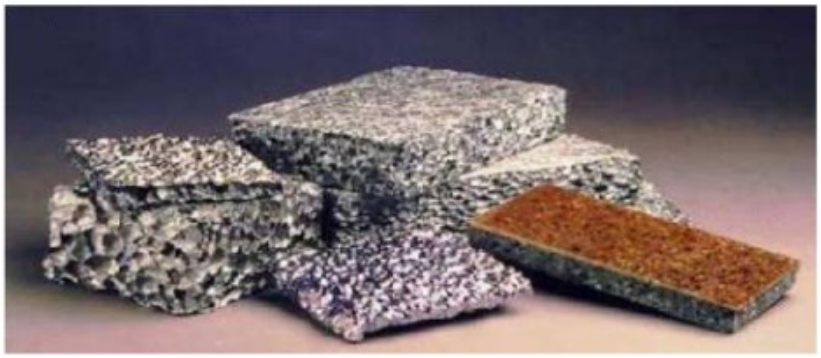
Používají se jako materiály samomazných ložisek, skládají se ze dvou složek, většinou je to spékaný kov s disperzním olejem. Spékané kovy pro ložiska vodních strojů. [3]



Obrázek 3 Kompozitní materiál druhého druhu [3]

1.1.3 Kompozitní materiál třetího druhu

Mezi tyto materiály řadíme pěnové hmoty, pěnokeramika, kovové pěny a speciální systémy s vláknových desek. [3]



Obrázek 4 Kompozitní materiály třetího druhu [3]

1.2 Základní druhy matric

Mezi základní suroviny v kompozitním materiálu jsou matrice (pryskyřice) a výztuž (tkanina, rohož, atd.). Základní matrice jsou:

1.2.1 Polyestery

Nenasycené polyestery jsou nejčastější používanou matricí pro vyztužené plasty zvláště v kombinaci se skleněnou výztuží. Polyesterové pryskyřice mají dobré mechanické vlastnosti, taktéž i elektrické a chemické. Polyestery jsou dobré do slabě kyselého prostředí.

1.2.2 Methyl-methakryláty

Tyto pryskyřice mají vynikající vlastnosti a jsou nejčastěji používanými matricemi v kombinaci s vysoce kvalitní výztuží, jako jsou uhlíková vlákna. Tyto pryskyřice je možné naplnit retardéry hoření, čímž přináší vynikající řešení pro aplikace, požadovaná ohnivzdornost výrobku.

1.2.3 Epoxidy

Epoxidy mají vynikající mechanické a elektrické vlastnosti a jsou nejčastěji používány s kvalitními výztužemi, například s uhlíkovými vlákny, pokud je podíl výztuže velmi vysoký. Velkou předností je nízká cena, odolnost proti vodě, roztoků alkálií a některým rozpouštědlům.

1.2.4 Vinylestery

Vinylesterové pryskyřice jsou kombinací nejlepších charakteristik polyesterových a epoxidových pryskyřic. Vinylestery mají dobrou odolnost v kyselém a alkalickém prostředí,

zvláště ve vysokých teplotách. Vinylesterové profily vyztužené skelným vláknem mají dobrou elektrickou a tepelnou izolaci. [2] [3]

Tabulka 1 Vlastnosti nejčastěji používaných organických matric [3]

Matrice	Hustota	Modul pružnosti v tahu	Pevnost v tahu	Max. teploty použití
	[g.m^3]	[GPa]	[MPa]	[°C]
Termosety	1,1-1,67	1,3-6	20-180	200°C
Epoxy	1,1-1,4	2,1-6	35-90	100-150
Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	260
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50-60	80-100
Polyamidy	1,2-1,9	3-3,1	80-190	260

1.3 Výztuže

Podle výztuže rozdělujeme kompozity:

1.3.1 Roving

Je forma výztuže, která je nekonečná, vlákna jsou bez krutu. Společným znaménkem je pramenec tvořený individuálními vlákny navinutý na cívku. Velice často používaný pro technologii pultruze. [4]

Obrázek 5 Ukázka rovingu [4]

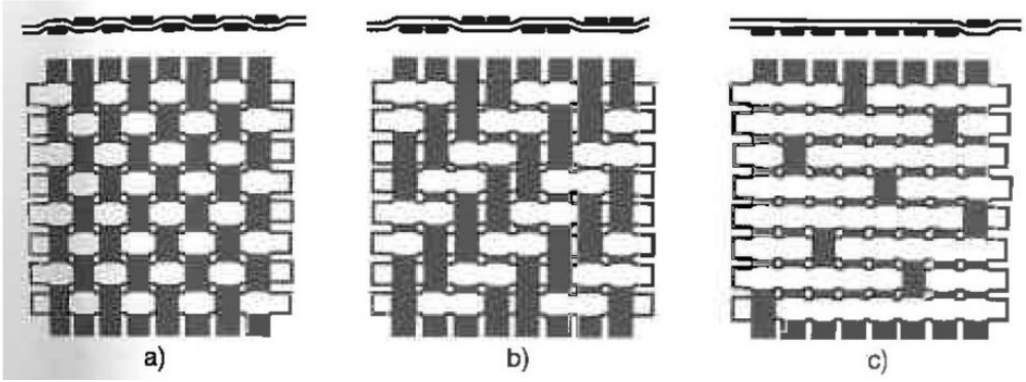
1.3.2 Rohož

Je neorientovaný nasekaný roving (krátká a středně dlouhá vlákna). Je slabě naimpregnovaná pryskyřicí a poté tepelně slisovaná do rohože. Obsah vláken v této formě je prostorově limitovaný. [4]

Obrázek 6 Rohož [4]

1.3.3 Tkanina:

Stejný způsob jako při výrobě textilie. Výrobky mají různou plošnou hmotnost a jsou tkány různými způsoby. Mezi základní struktury patří saténová, keprová, plátnová. Podle toho jak je tkanina utkaná, tak se mění mechanické vlastnosti kompozitu, který je z ní vyroben. [4]



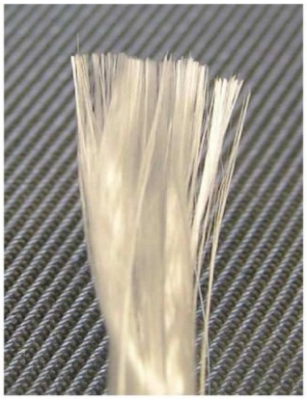
Obrázek 7 Vazba plátnová, keprová, saténová [2]

1.3.4 Povrchová rohož

Oproti tkanině má velmi jemnou strukturu a nízkou plošnou hmotnost. Většinou slouží k estetickým účelům. Zvyšuje odolnost proti vnějším vlivům a zajišťuje maximální ochranu proti nepříznivému počasí.

1.3.5 Pramen

Vniká spojení cca 200 elementárních vláken bez kroucení



Obrázek 8 Pramen [4]

1.3.6 Příze

Kroucená nebo nekroucená vlákna určená k textilnímu zpracování

Obrázek 9 Příze [3]

1.3.7 Střiž

Viz. sekané vlákno

Obrázek 10 Stříž [4]

1.3.8 Vlákno elementární

Nekonečné skleněné vlákno s průměrem většinou od 5 do 27μm[25]

Obrázek 11 Elementární vlákno [5]

1.4 Rozdělení technologií výroby kompozitních materiálů

Kompozitní matriály můžeme vyrábět několika technologiemi. Liší se v postupu a pomůckách, které při nich používáme a cenou. Liší se také spotřebovaným materiálem, a to hlavně prosycením jednotlivých vrstev kompozitu a tedy účinnosti distribuce matrice. Dále nám technologie ovlivňují některé mechanické vlastnosti kompozitu. Výrobní technologie je dána především charakterem výrobku a její volba se řídí několika zásadami.

a) Sériovosti díle
b) Velikost a členitost výrobku
c) Kvalita povrchu
d) Požadované vlastnosti
e) Limit nákladů

Většinou se musí volit kompromis mezi jednotlivými technologiemi, aby byly do jisté míry uspokojeny všechny požadavky.[7]

Mezi základní technologie pro výrobu kompozitu patří:

- **Ruční laminace –** základní metoda výroby kompozitních materiálů. Velmi závisí na zručnosti dělníka.
- **Vakuové lisování** – první fáze je ruční laminace, následně se přiloží separační odtrhová a odsávací tkanina. Následně se pomocí vakuovací folie, na které je po obvodu nalepeno těsnění, odsaje vzduch. Lepší prosycení kompozitu pryskyřicí, nižší váha, lepší povrch.
- **RTM –** forma se skládá ze dvou částí. Do dutiny se naklade výztuž. Následně je prosycená pryskyřicí pomocí čerpadla. Pohledové jsou obě strany výrobku, lepší prosycení pryskyřicí.
- **Vakuo-injekční technologie –**VARTM jde o modifikaci klasického RTM, kdy prosycení výztuže napomáhá vakuum.

1.4.1 Vytvrzování v autoklávu

Metoda autoklávu je vylepšenou technologií vakuového lisování, vytvrzování probíhá v uzavřené nádobě pod tlakem a teplem. Kompozitní materiály vyráběné touto metodou se skládají z reaktoplastové matrice (např. epoxidové pryskyřice) a uhlíkové výztuže (vláken). Tyto materiály jsou většinou ve formě prepregu, ze kterých se pomocí plotru, nebo podobným zařízení vyřežou nástřihy s požadovanou orientací vláken a rozměrů. Ty jsou následně vrstveny na formu a vytvrzeny za zvýšené teploty a tlaku v autoklávu. Navrstvené nástřihy prepregu na formu jsou ještě před vložením do autoklávu zavakuovaný. Po vytvrzení je součást doformována a vhodnou technologií obrobena do finální podoby. Tato technologie je vhodná pro velkosériovou výrobu (2-5 tisíc kusů) malých a středně velkých kusů. [5][6][7]

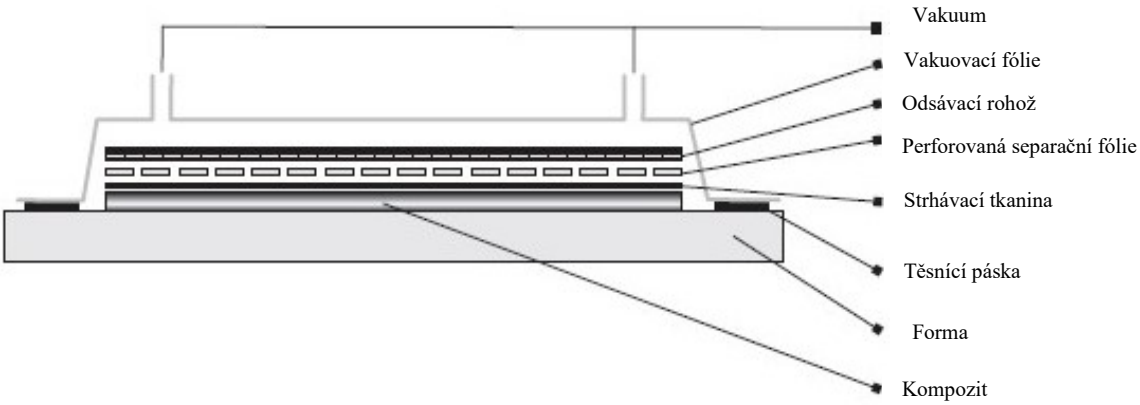
Obrázek 12 Vytvrzování v autoklávu [5]

1.4.2 Ruční kladení prepregu

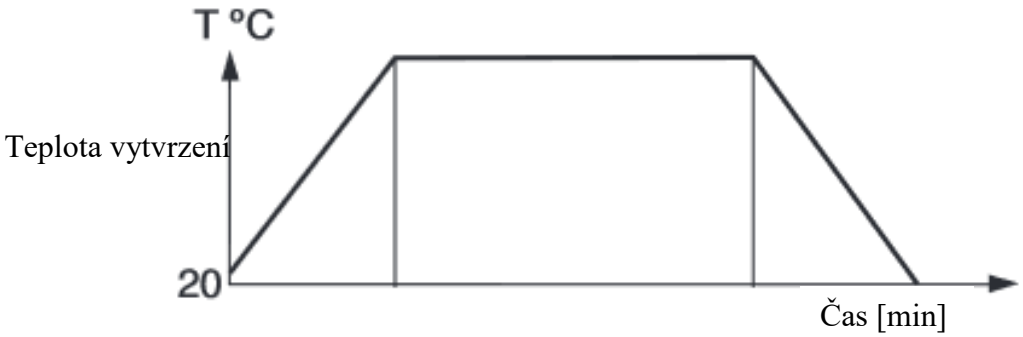
Ruční kladení prepregu je základní technologie zpracování prepregu. Prepreg se musí skladovat při teplotách okolo -18 °C. Po vytažení se nechá rozmrznout, po dobu cca 24hodin, pro snadnější zpracování. Materiál můžeme naformátovat ručně pomocí pravítka a nože, pokud to jsou pravidelné geometrické tvary, nebo pomocí šablon pro nejrůznější tvary. Pokud se prepreg využívá ve větším množství, dá se formátovat strojně pomocí plotru. Při použití plotru se rozložení šablon a nářezů vytvoří v libovolném 2D programu a následně se pošle do plotru. Velkou výhodou je přesnost takto nařezaných prepregů a vysoká výkonnost procesu přípravy. Před kladením se musí forma, na kterou budeme prepreg klást, naseparovat. Separátor nám umožní snadné oddělení vytvrzeného kompozitu od formy. Formy mohou být buď hliníkové, pro velkosériovou výrobu, nebo například laminátové, pro menší série, nebo jsou formy tak velké, že by manipulace s nimi byla nemožná. Mezi základní pomůcky při kladení patří, gumové rukavice, kovový háček, nůž, nebo nůžky. Mezi zajímavé pomůcky patří teflonová hladítka, pro vytlačení přebytečného vzduchu mezi jednotlivými vrstvami kladeného prepregu. Při velkosériové výrobě se dá kladení automatizovat a to pomocí robotických ramen. Při kladení u některých výrobků je důležité brát zřetel na posloupnost jednotlivých vrstev a orientaci vláken. Po dokončení kladení následuje vakuování.

1.4.3 Vakuové lisování prepregu

Po dokončení kladení následuje vakuování. Na prepreg se položí strhávací tkanina, pro lepší odformování výrobku, následuje perforovaná separační fólie a odsávací rohož, která pohltí přebytečnou pryskyřici při vytvrzování. Takto nakladené vrstvy se překryjí vakuovací fólií. Na okrajích vakuovací fólie je nalepena těsnící páska, ta má za úkol přilnout k formě a zajistit vakuum v okolí výrobku, stejně jako je to znázorněno na obrázku 12. Do fólie se udělají díry a připojí se vývěva pro odsátí vzduchu. Vakuovací fólie musí být značně vetší, než je výrobek i celá forma, tak aby nebyla v žádném místě napnutá a přiléhala na celý výrobek rovnoměrně. Po zavakuování putuje forma do pece, popřípadě autoklávu. Běžný průběh teplot při vytvrzování je znázorněný na obrázku 13.



Obrázek 13 Schéma vakuového lisování prepregu [6]



Obrázek 14 Vytvrzovací režim (charakteristika) pro vakuové lisování prepregu [26]

1.5 Parametry ovlivňující volbu technologií výroby

Jak už bylo psáno v bodu 1.4, kompozitní materiály se dají zpracovávat mnoha technologiemi (ruční laminace, RTM, Navíjení, kladení prepregu…). Proto je třeba věnovat volbě technologie značnou pozornost. Většinou je potřeba dělat kompromisy, aby bylo možné alespoň

do jisté míry splnit požadavky zákazníka jak na cenu a kvalitu výrobku. Sériovost je ze základních faktorů ovlivňujících volbu zpracování. Pokud je sériovost malá až kusová není vhodné použít strojní technologie, naopak velké série není vhodné vyrábět kladením.

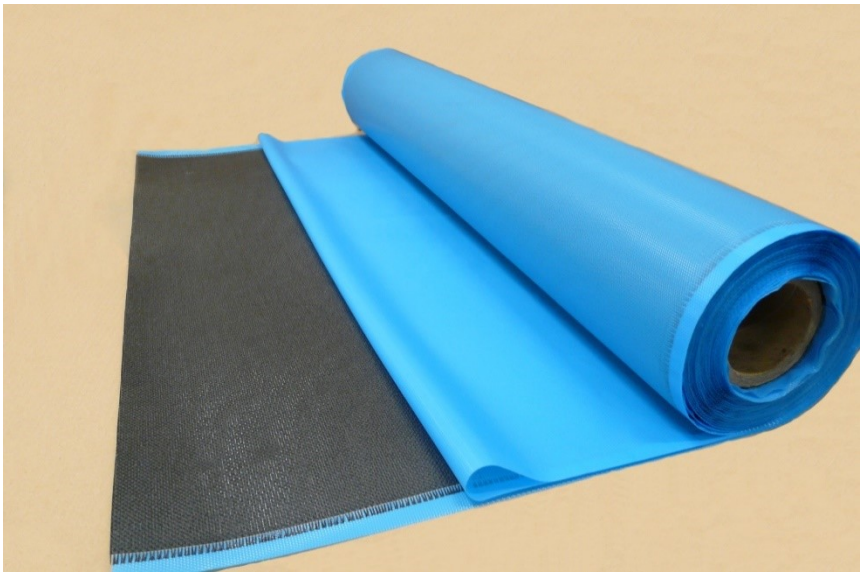
Členitost výrobku: Některé technologie dovolují výrobu pouze jednoduchých tvarů (navíjení)

Kvalita povrchu: Kvalita povrchu rozhoduje v pohledových součástech. Některými technologiemi dokážeme vytvořit pohledovou pouze jednu stranu (ruční laminace). A například u technologie RTM jsme schopni vytvořit obě strany pohledové.

Požadavky na finální vlastnosti: Většina mechanických vlastností je ovlivněna použitými materiály, orientací výztuže a použité matrice. Tyto vlastnosti jsou značně závislé na použité technologii.[6][7][8]

2 PREPREG

Prepreg je zkrácený tvar anglického preimregnated fibres, česky předimpregnovaná vlákna. Prepreg je kompozitní materiál, který je před impregnovaný termoplastickou nebo reaktoplastickou pryskyřičnou matricí v určitém poměru s vyztuženými vlákny. Použitím prepregů má tu výhodu, že je oddělen složitý proces prosycování výztuže pojivem od dalšího zpracování. Tento postup, který má velký vliv na kvalitu a vlastnosti budoucího výrobku, se provádí za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek na speciálním zařízení. Prepregy mají jedinečné vlastnosti, které se získají při vytvrzování za vysokých teplot a tlaku. Prepregy se z důvodu předimpregnování musí skladovat při nízkých teplotách nejlépe při -18 °C. Při této teplotě se usnadňuje manipulace a zabránění úplné polymerace. Výztuž může být jednosměrná nebo jednosměrné nebo více směrná. [9][25]



Obrázek 15 Uhlíkový prepreg [29]

2.1 Výztuže

U prepregu se nejčastěji jako výztuže používají tkaniny. Tkaniny se skládají z nejméně dvou nití, které jsou tkané dohromady: osnovy a útku. Výztuž může být ze skelných vláken popřípadě z vláken uhlíkových. Provedení tkaniny může být ve formě UD vlákna, bidiagonálních, nebo 3D tkanin. Následná orientace vláken ovlivňuje stejně jako u ostatních kompozitních materiálů mechanické vlastnosti.[11]

2.2 Matrice

Matrice udržuje vlákna v jejich postavení a zvolené orientaci. Matrice také přenáší mechanická zatížení. Vlastnosti matrice také ovlivňují maximální provozní teplotu prepregu. Existují tři hlavní typy matrice: epoxidové, fenolové a bismaleimidové.

2.2.1 Epoxidové matrice

Výborné mechanické vlastnosti, dobrá odolnost proti vnějším vlivům, snadné zpracování. Aplikace do 120 °C letectví, sport, lodní průmysl, auto motive, kolejová technika. Aplikace do 180 °C vojenská technika, letectví.

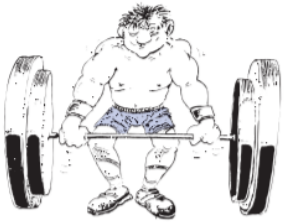
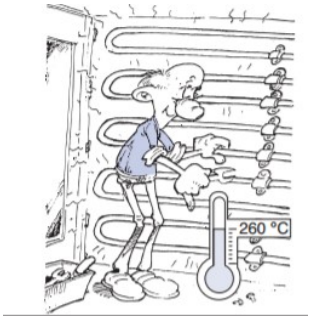
2.2.2 Fenolické matrice

Výborné ohnivzdorné vlastnosti. Dobrá tepelná odolnost, nízké množství kouře při hoření a nízké toxické emise, rychlé vytvrzování, ekonomické zpracování. Díky dobré ohnivzdornosti se hojně uplatňuje v kolejovém průmyslu, námořní technice a leteckém průmyslu.

2.2.3 Bismaleimidové matrice

Vynikající odolnost proti vysokým teplotám. Provozní teplota až do 260 °C. Dobré mechanické vlastnosti. Dobrá odolnost vůči chemickým látkám a radiaci. Využití v leteckém průmyslu jako některé části leteckých motorů a vysokoteplotní komponenty.[12]

Tabulka 2 Výhody a aplikace matric [26]

Matrice	Výhody	Aplikace
Epoxidové 	Vynikající mechanické vlastnosti, dobrá odolnost vůči vnějším podmínkám, snadné zpracování	120°C: Letectví, sport, automobilový průmysl, železniční doprava, 180 °C: Letectví, vojenství
Fenolické	Vnikající nehořlavost, dobrá teplotní stálost, nízká toxická emisivita, ekonomické zpracování, rychlé vytvrzení	Letectví Lodní průmysl Železniční doprava
Bismaleimidové 	Vynikající teplotní stálost Provozní teplota až 260°C Dobré mechanické vlastnosti Dobrá odolnost proti požárům	Vysokoteplotní komponenty Letecké motory

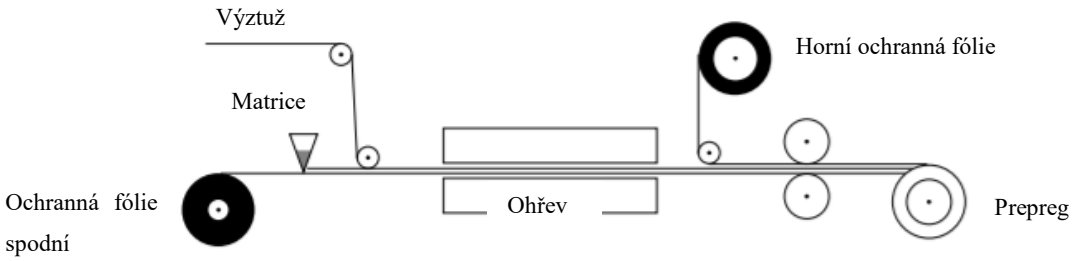
Tabulka 3 Přehled organických matric a jejich vlastnosti [13]

Matrice	Hustota	Modul pružnosti v tahu	Pevnost v tahu	Deformace do lomu
	[g.m^3]	[GPa]	[MPa]	[%]
Termosety	1,1-1,67	1,3-6,0	20-180	1-30
Epoxidy	1,1-1,4	2,1-6	35-90	1-10
Polyestery	1,3-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Fenolické prysky-řice	1,3	4,4	50-60	1-3
Polyamidy	1,2-1,9	3,0-3,1	80-190	2-40
Termoplasty	0,90-1,45	1,0-4,0	20-250	5-150
Polypropylen	0,9	1,1-1,5	28-41	10-700
Polyamid	1,42	2,8-3,4	76-83	60-300
Polykarbonát	1,21	2,1-2,8	62-76	110-130
Polyaryletherketon	1,31	3,8	70	50-150

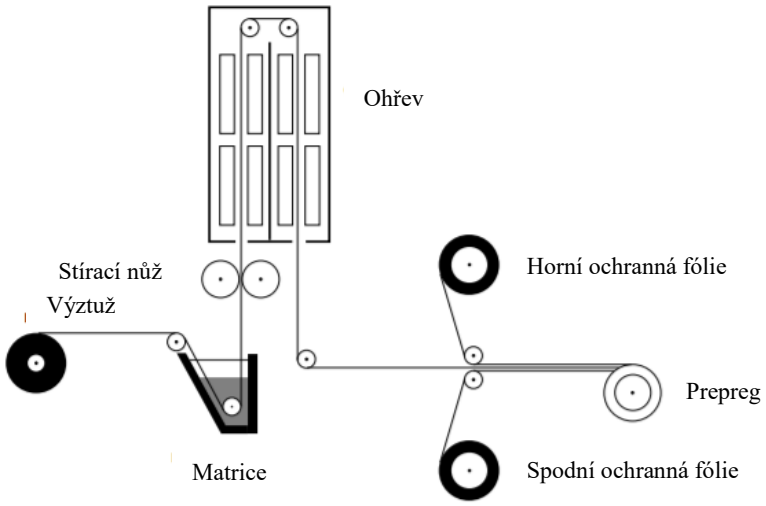
2.3 Výroba a využití prepregu

2.3.1 Výroba prepregu

Při výrobě prepregu se výztuž (uhlík, sklolaminát, aramidové vlákno nebo tkanina) nasytí ponořením do tekuté pryskyřice. V alternativní metodě zvané horké tavení (Hot Melt) je tkanina impregnovaná pryskyřicí za pomocí tepla a tlaku. Horké tavení je systém, při kterém se používá pryskyřice s velmi nízkým procentem rozpouštědla. Existují dvě etapy procesu horkého tavení (Obrázek 15). První etapa zahrnuje protahování tenkou vrstvou teplé pryskyřice na papírový podklad. Druhá etapa je nanášení výztuže s pryskyřicí. A nakonec je navinutá na jádro. Druhý způsob výroby prepregu je rozpouštědlový způsob tzv. solvent dip Process. Podstatou toho systému je namáčení výztuže ve formě tkaniny v lázni rozpuštěné pryskyřice. Za použití sušáren se odpaří rozpouštědlo (Obrázek. 16). [9][11][12]



Obrázek 16 Metoda výroby prepregu pomocí horké taveniny [11]



Obrázek 17 Rozpouštědlový způsob výroby prepregu [11]

2.3.2 Využití prepregu

Mezi hlavní výhody použití prepregu jsou:

- Snadnost použití
- Dobrá odolnost proti únavě
- Kontrola tloušťky laminátu
- Odolnost proti korozi
- Čistý proces
- Kontrola vlastností vlákna a hustoty v tkanině
- Vysoký měrný modul a pevnost
- Velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti
- Vylepšené charakteristiky tlumením a vibrací

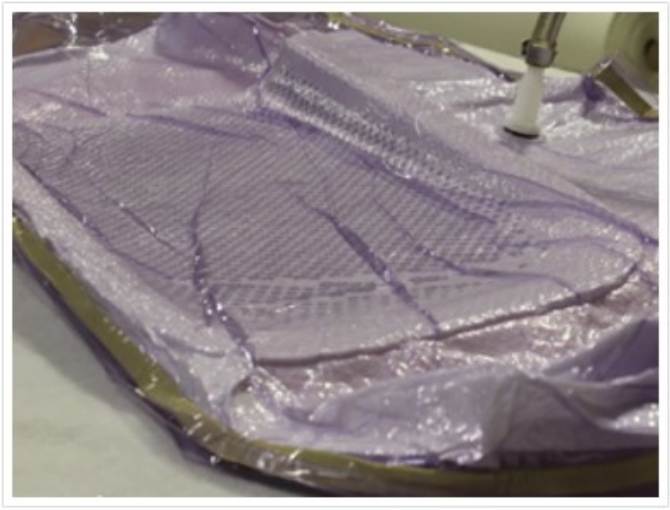
Prepregy jsou stále více využívány ve vysokovýkonných aplikacích v kompozitních materiálech a dalších odvětvích, jako jsou například interiéry letadel, automobilové součásti, balistické panely atd.

Pro výrobu součástí z prepregu se používá technologie ručního kladení na formu popř. do dutiny formy. Výrobky z prepregu mohou být poměrně složité a tvarově členité. Prepreg se dodávají v rolích nejčastěji v šířce 1,2 m. Formátování probíhá buď ručně pomocí šablon, nebo pomocí CNC plotru. Při použití CNC plotru jsou šablony přesnější a využití materiálu je efektivnější. Při kladení prepregu se vyžívá základních pomůcek, jako jsou rukavice, nůžky, teflonová hladítky atd. Před kladením musíme mít formu připravenou, čistou hladkou a naseparovanou. Následuje kladení prepregu ve vrstvách dle toho, jaké jsou požadavky na výrobek. Lze kombinovat tloušťky prepregu k dosažení potřebné tloušťky a mechanických vlastností. Následuje separační fólie, odsávací fólie a nakonec vakuovací fólie, která je oblepená těsnící páskou. Po zavakuování se forma vloží do vytvrzovací pece, nebo do autoklávu. Při vytvrzování by měl být náběh teploty pozvolný, ne více než 5 °C za minutu, dokud není dosaženo cílové teploty. Dle teploty vytvrzování také závisí na času vytvrzování (Tabulka 4)[10][11][12]

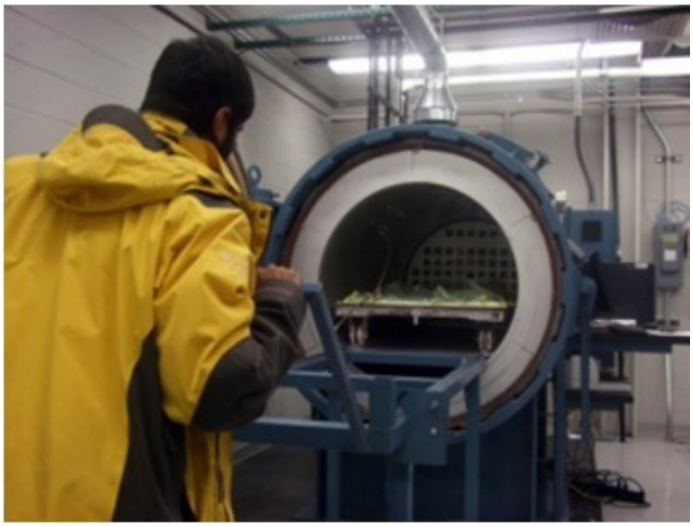
Tabulka 4 Závislost času na teplotě při vytvrzování [12]

Cílená teplota	Do dosažení teploty
310 °F (154°C)	1-2 hodiny
290°F (143°C)	2-4 hodiny
270°F (132°C)	4-6 hodin

Po vytažení a odformování následují další operace k dokončení hotového výrobku (ořez, lepení, lepení izolace, lakování atd.). Při výrobě součásti s pohledovou stranou je lepší při vytvrzování použít autokláv, ve kterém se při vytvrzování využívá také tlaku. [23]



Obrázek 18 Zavakuovaný díl připravený na vytvrzování [12]

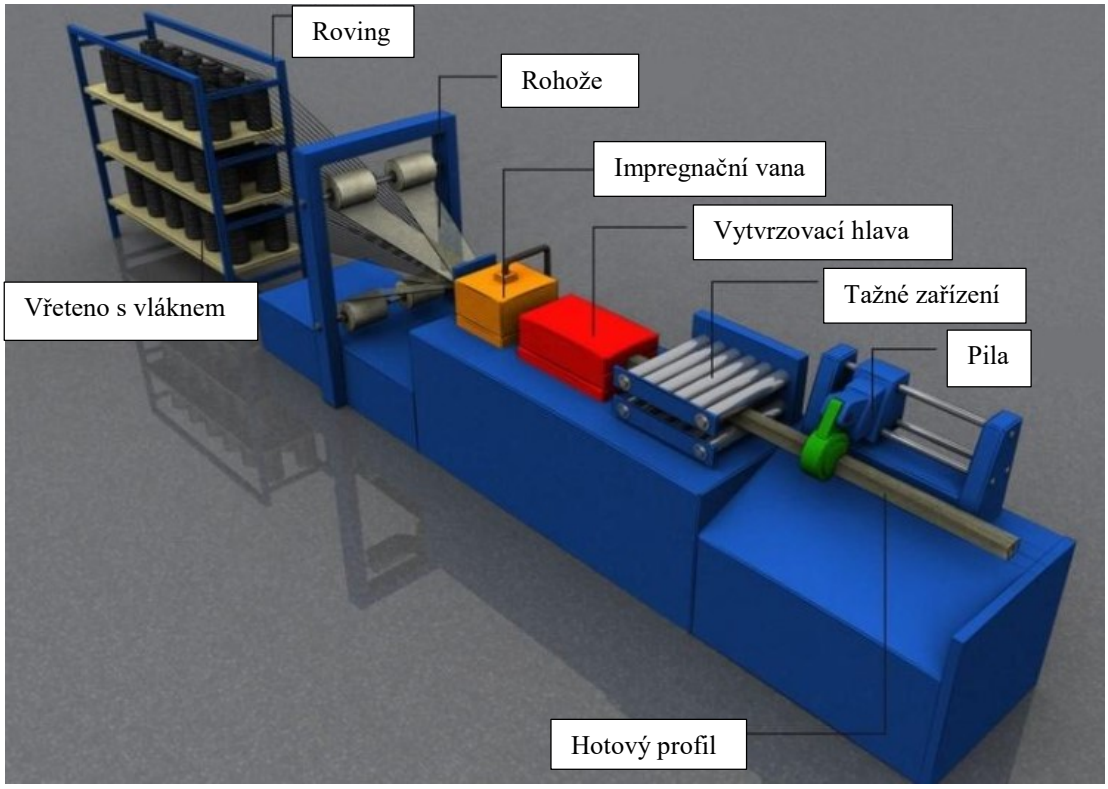


Obrázek 19 Vkládání zavakuovaného dílu do autoklávu [12]

3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE VHODNÉ PRO VÝROBU DUTÝCH PROFILŮ Z PŘEDIMPREGNOVANÝCH KOMPOZITŮ

3.1 Pultruze

Slovo „pultruze" pochází z anglického názvu pultrusion. V českém jazyce a v odborných kruzích se tento název již zažil. Pultruze je proces kontinuální výroby profilů z vyztužených pryskyřic různých tvarů a délek. Jde o proces, který se používá od 50. let minulého století. Vstupní materiál je ve formě tekuté pryskyřice a vláknové výztuže. Proces zahrnuje tažení materiálu přes vyhřívanou hlavu pomocí tažného zařízení. Zde dochází k tvarování při současném zesíťovaní pryskyřice. Vyhřívaná hlava je v podstatě forma z nástrojové ocele. Hlava má štěrbinu ve tvaru daného profilu (U,I,L…). Jako vyztužující materiály se používá převážně skelné vlákno, ve formě roving a plošných rohoží. Tato vlákna navinutá na cívkách vstupují do srovnávače, jehož funkcí je rovnoměrné rozmístění v průřezu a správné umístění rohoží. Před vytvrzovací formou je sekce, kde dochází k dokonalému nanesení polymerní matrice na vyztužovací materiál. V průvlaku dochází buď působením sdíleného tepla (forma je vyhřívaná elektricky nebo topnými tělesy) nebo vývojem tepla vysokofrekvenčního pole k vytvrzení. Kompozitní profil je odtahován regulovanou rychlostí hydraulickými čelistmi nebo pásovými elementy a dělen na požadovanou délku. Základní části pultruzní linky jsou: zásobník výztuží a naváděcí systém, impregnační sekce a přetvarování impregnované výztuže, tvarovací a vytvrzovací forma, tažná sekce, dělící sekce. Rovingy a rohože jsou taženy přes impregnační vanu a vytvrzovací tažným zařízením k pile.[7][21][27]



Obrázek 20 Pultruzní linka [27]

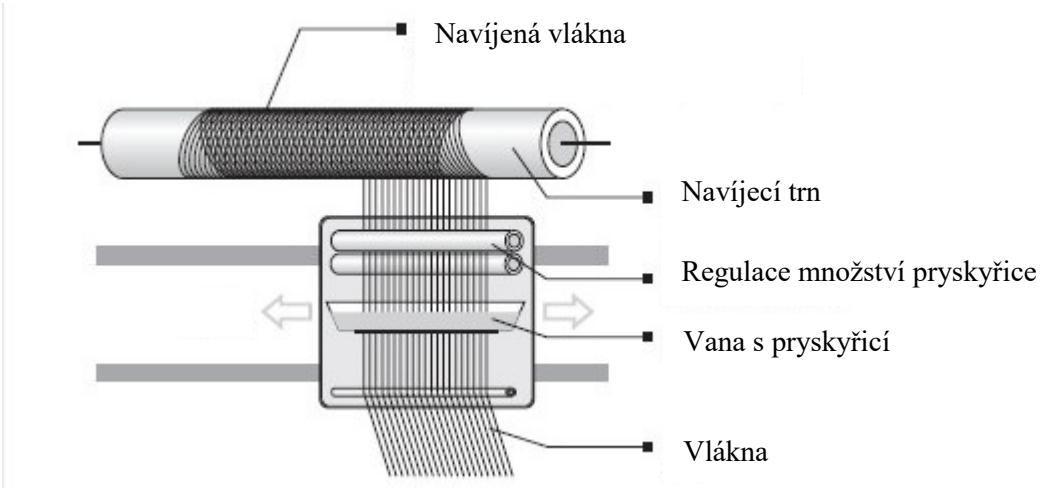
Výrobky vyrobené pultruzí, jejich obsah vyztužení je větší než u běžných kompozitních materiálů, mají nízkou hmotnost, vynikající mechanické vlastnosti, vysokou korozní odolnost, nízkou tepelnou vodivost, teplotní roztažnost srovnatelnou s kovy, vysokou rozměrovou stálost a jsou elektricky nevodivé. Další výhodou jsou nízká navlhavost, téměř neomezená velikost profilů o různých tloušťkách stěny, velké množství možných průřezů, nekonečná délka, přesné a reprodukovatelné uložení vyztužovacího materiálu a nízké výrobní náklady. Právě proto je tato technologie vhodná k výrobě relativně cenově výhodných kompozitních profilů. Kvalita těchto kompozitů zhotovených za vysoké teploty při vytvrzování a při konstantních podmínkách podstatně převyšuje skládané a za studena tvrzené kompozity. Pultruzí se vstřikováním lze vyrábět i sendvičové panely. V současné době se pro putruzi používají také prepregy, profily je potom možno použít pro primární prvky letadel. Pultruze prepregu s uhlíkovými vlákny a epoxidovou pryskyřicí je však nepřetržitý proces, protože epoxidová pryskyřice pomaleji reaguje a profil se musí před odtažením nechat vytvrdit alespoň na 70 %. [27]

3.2 Navíjení

Při navíjení se většinou výztuž ve formě většinou skelného, uhlíkového, ale i aramidového pramence impregnovaného pryskyřicí navíjí na jádro (trn) ve tvaru výrobku. Touto technologií se vyrábějí duté profily. Pohyb ukládacího pramene podél osy za současné rotace trnu a poloha ukládacího oka dovolují přesné kladení vláken v několika osách a umožňují vytváření i relativně složitých tvarů.

3.2.1 Navíjení šroubovicové

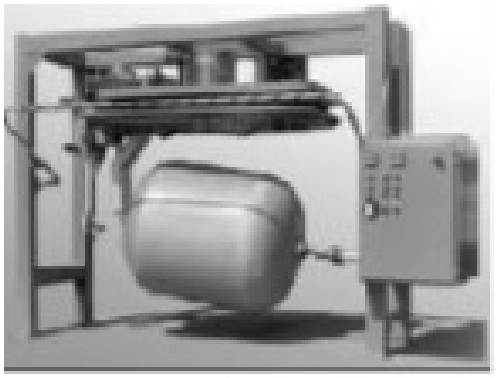
Stroj pro šroubovicové navíjení lze přirovnat k soustruhu. Navíjení rovingu smočených v pryskyřici je používáno při výrobě rotačních i nerotačních nádob s konvexními povrchy (trubky a těla raket). Vhodné orientace vláken ve stěně nádoby je dosaženo regulací rychlosti posuvu kladecího ústrojí. Při dané rychlosti otáčení jádra. Navíjet se mohou i prepregy. Pro velké nádoby se používají zvlášť velké trny. Při snímání výrobku sklopí dovnitř segmenty. U menších průměrů lze trn z výrobku vytlačit pomocí lisu.



Obrázek 21 Šroubovicové navíjení

3.2.2 Navíjení pólové za mokra

Stroje pro pólové navíjení využívají otáčivou tenkostěnnou formu. Vlákna jsou nanášená ramenem. Která se pohybují okolo formy, takže vlákna jsou kladená v oblasti pólů formy. Největší rozdíl mezi šroubovitým navíjením a navíjením pólovým za mokra je v tom, že nádoby vyrobené technologií šroubového navíjení se musí uzavírat víky, které se vyrábějí zvlášť. Při pólovém navíjení forma zůstává uvnitř a slouží jako „liner".



Obrázek 22 Pólové navíjení za mokra [6]

3.2.3 Axiální navíjení:

Výhodou navíjení v axiálním směru je orientace vláken. Zvyšuje se odolnost výrobku při axiálním tlaku, lze použít techniky v angličtině nazývané „pin suppored widing". Vlákna jsou téměř axiálně položena a na koncích jádra držená systémem radiálních trnů.[6][7]

3.3 Prepreg technologie pomocí vzduchové membrány

Při kusové, nebo malosériové výrobě se ekonomicky nevyplatí pořizování drahých technologií jako je pultruzní linka. Využívá se tedy prepreg technologie s využitím vzduchové membrány. Princip je poměrně jednoduchý. Do dělené formy se vloží membrána, na kterou se navine prepreg, popřípadě se může prepreg vložit nejdříve do dutiny formy, následně se vloží membrána a forma se uzavře. Membrána se nafoukne vzduchem na určitý tlak. Čím je tlak větší tím je i výslede lepší. Ovšem musíme dát pozor na to, že se vzduch ve vytvrzovací peci zahřeje a rozpíná. Následkem může membrána prasknout, nebo povolit ventil. Následkem je únik vzduchu, nedoléhání prepregu na stěnu formy. Podrobnější popsání membránové napjatosti v bodě 3.3.1

3.3.1 Membránová napjatost

Nejčastějším případem rotačně symetrické skořepiny je plášť tenkostěnné válcové nádoby zatížené přetlakem. Uvolníme-li část nádoby řezem kolmým k ose, bude rovnice rovnováhy sil v nádobě zřejmě

$$p\pi r^2 = \sigma_x 2\pi rs \tag{1}$$

Osové (axiální) membránové napětí v plášti nádoby je odtud

$$\sigma_x = \frac{pr}{2s} \tag{2}$$

Oddělíme-li myšleně dvěma řezy kolmými k ose válce z pláště prstenec jednotkové šířky, platí pro jeho polovinu rovnice rovnováhy

$$2\sigma_\varphi s = \int_0^r pr \sin\varphi d\varphi = 2pr \tag{3}$$

Takže obvodové napětí je

$$\sigma_\varphi = \frac{pr}{s} \tag{4}$$

Ve stěně pláště tedy působí dvouosá membránová napjatost s normálovými složkami napětí ve směru osovém a obvodovém, přičemž obvodové napětí je dvakrát větší než osové (axiální). Poněvadž v osovém ani obvodovém řezu nepůsobí napětí smyková, jsou to hlavní řezy, σ_φ, σ_x, jsou hlavní napětí membránové napjatosti válcové stěny.

Vyjádříme nyní membránové deformace pláště. Podle rovnice elasticity

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \tag{5}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \tag{6}$$

Je nyní

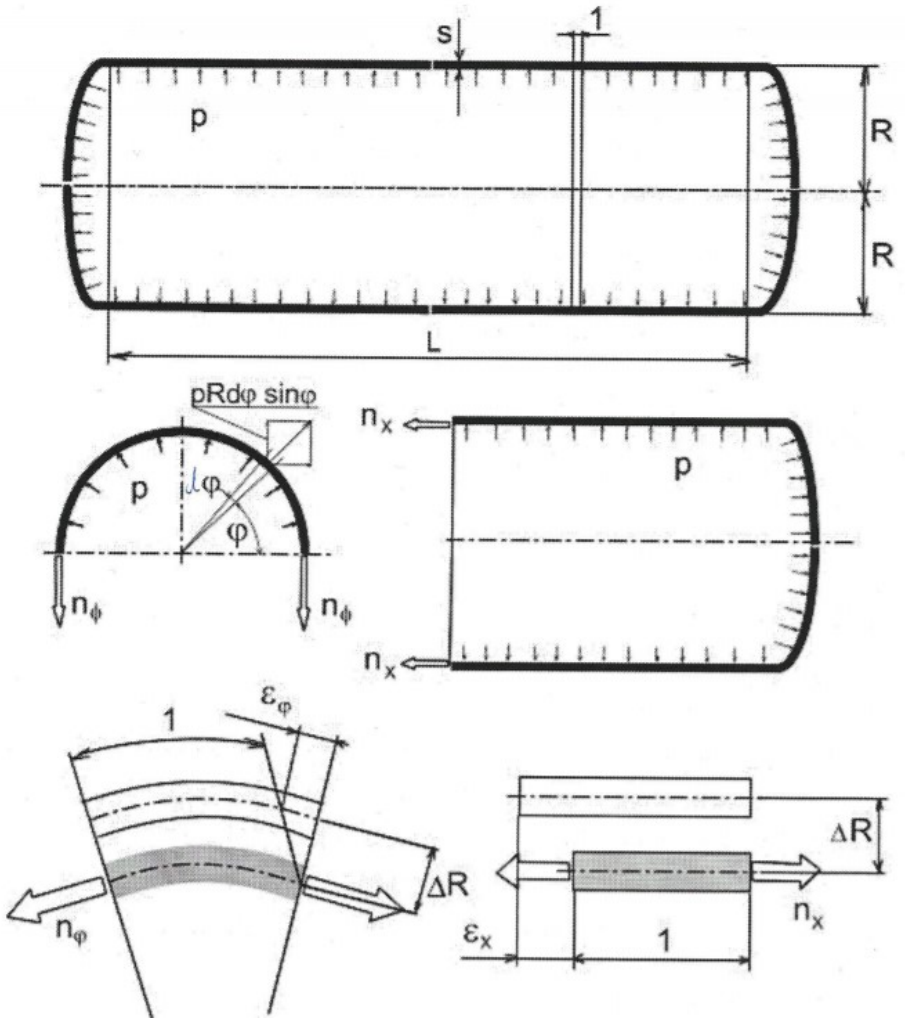
$$\varepsilon_x^M = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_\varphi),\ \varepsilon_\varphi^M = \frac{1}{E}(\sigma_\varphi - \nu\sigma_x) \tag{7}$$

Po osazení ze složky napětí

$$\varepsilon_x^M = \frac{pr}{Es}(0{,}5 - \nu),\ \varepsilon_\varphi^M = \frac{pr}{Es}(1 - \frac{\nu}{2}) \tag{8}$$

Odtud je např. radiální posunutí, tj. změna poloměru válcového pláště vlivem vnitřního přetlaku

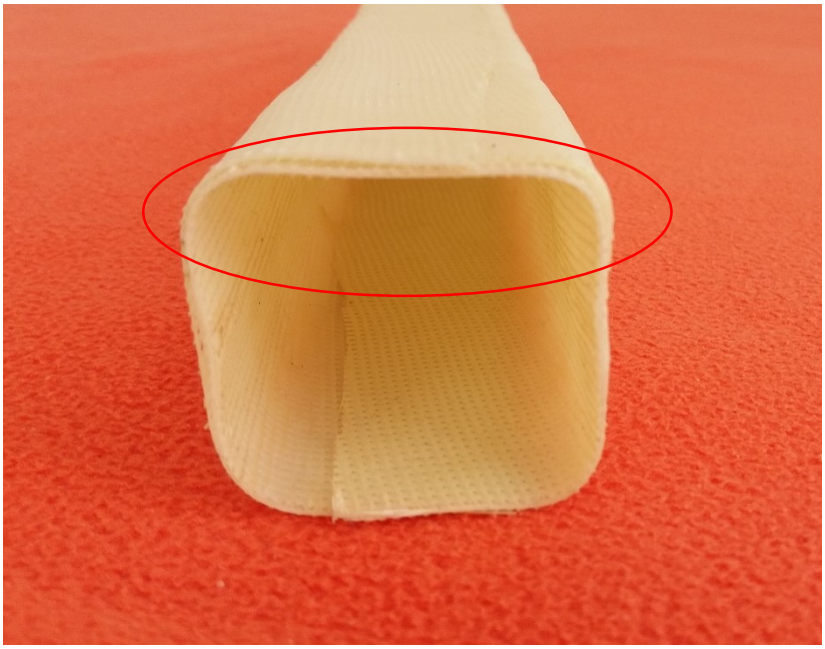
$$\Delta r = \varepsilon_\varphi^M r = \frac{pr^2}{Es}\left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \tag{9}$$



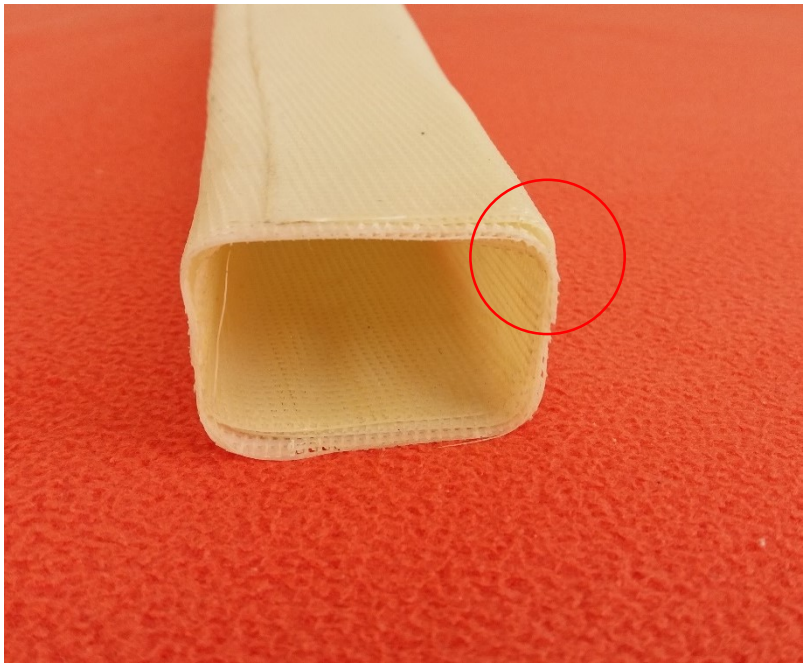
Obrázek 23 Schéma membránové napjatosti skořepin [24]

Na obrázku 23 je vidět schéma membránové napjatosti skořepin. Ve vrchní části schématu je vidět celková skořepina a znázornění působícího tlaku v dutině. Pod celkovou skořepinou je vidět rozříznutí, znázornění silového působení a kompenzace sil n_φ a n_x. A v třetí části je znázorněna elementární část skořepiny a silové účinky.

Tento případ platí pouze u rotačních symetrických profilů. Pokud bychom pomocí membrány vyráběli dutý profil například čtvercový nebo obdélníkový, nastávají technologické problémy. Jedním z největších je nekonstantní tlak v celém průřezu membrány a to hlavně v rozích membrány. Prepreg technologie s využitím vzduchové membrány se velmi často využívá při výrobě rámu závodních kol. Pro minimalizaci nepřesností, delaminace a jiných vad v ostrých přechodech, rámy kol jsou v drtivé převaze ováných tvarů. Při výrobě jiných profilů např. čtvercových nebo obdélníkových, mohou nastat defekty, jako jsou vidět na obrázku 24 a 25.



Obrázek 24 Defekty při výrobě nekruhových dutých profilů

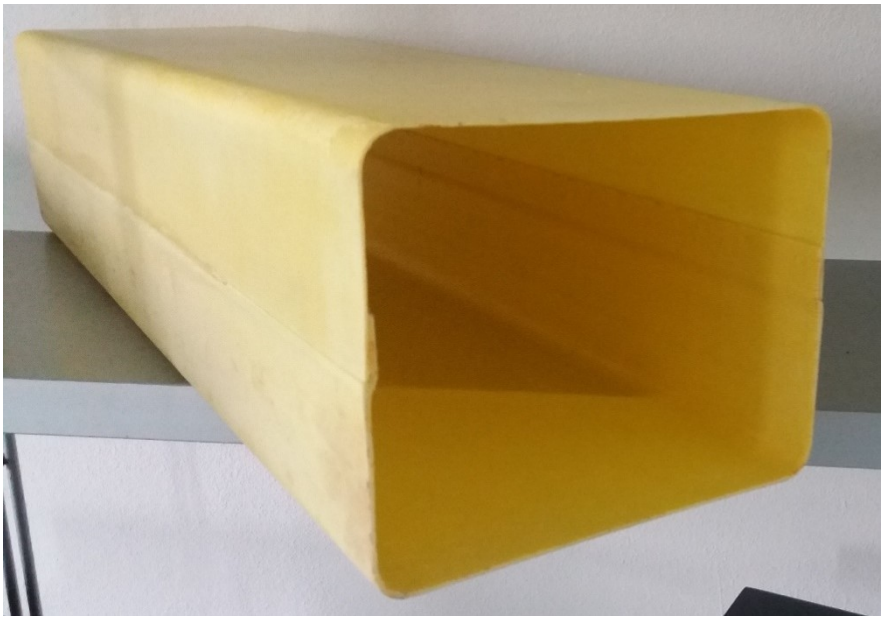


Obrázek 25 Defekt odseparování (delaminace)

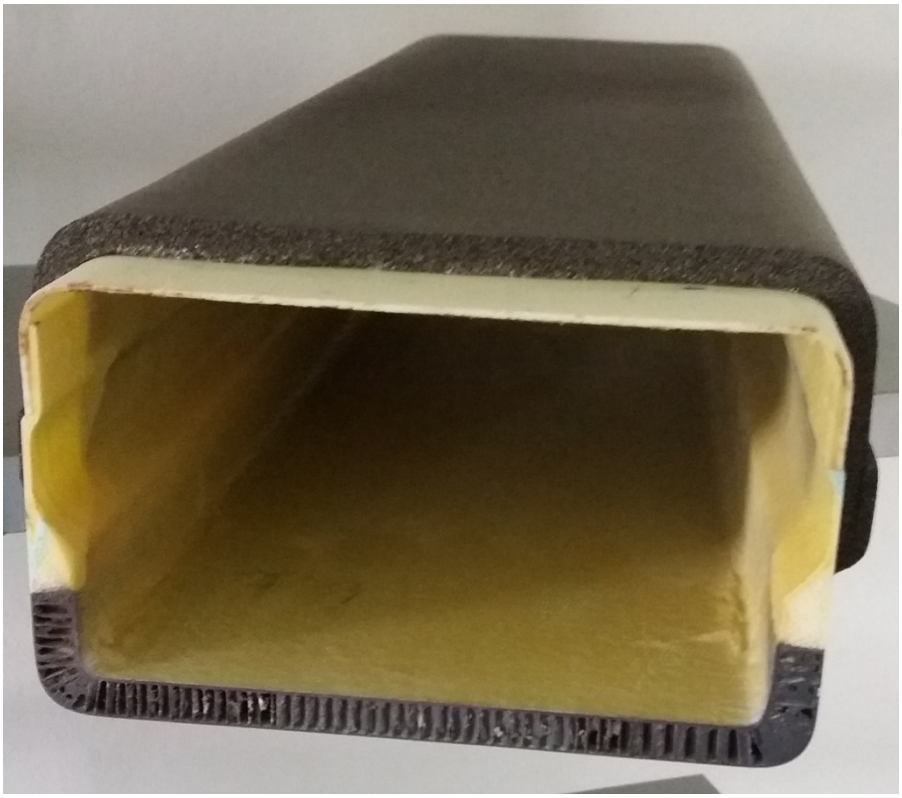
3.4 Výroba děleného dutého profilu

Při výrobě děleného dutého profilu je postup značně jednodušší. Forma je dvoudílná a na jedné z nich je vytvořeno odsazení o rozměru tloušťky stěny vyráběného dutého profilu. Postup je stejný jako při ručním kladení prepregu. Po výrobě obou částí profilu se následně

slepí. Nevýhodou této technologie je poměrně velká pracnost a zkušenost pracovníků. Mechanické vlastnosti ovlivňuje i spoj, který po slepení vznikne. Naopak výhodou je možnost vyztužit profil pomocí voštiny, pěny nebo jiných výztužných materiálů, jak je vidět na obrázku 27.



Obrázek 26 Dělený profil



Obrázek 27 Dělený profil vyztužený voštinou ve spodní části

4 APLIKACE DUTÝCH PROFILŮ

4.1 Výroba rámů silničních kol

Kompozitní materiály se velkou mírou uplatňují ve sportu. Mezi jejich hlavní výhody patří poměr pevnosti a váhy. Duté kompozitní profily se ve sportovním odvětví objevují zejména v cyklistice, a to v rámech závodních kol. Jejich výroba je poměrně složitá a nákladná. Nejnákladnější je výroba formy, která bývá hliníková. Na formu jsou kladeny vysoké nároky na přesnost a kvalitu povrchu. Do formy je vkládán prepreg navinutý na nylonové vzduchové polštáře. Orientace vláken při kladení je velice důležitá. Orientace vláken ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného produktu, ať už je to rám kola nebo jiný namáhaný výrobek z kompozitu. Po navíjení prepregu na polštáře se napojí k vysokotlakému vzduchovému systému, aby přitiskly tkaninu k formě a aby bylo docíleno požadovaných vnějších i vnitřních rozměrů. Po uložení tkaniny do formy se forma uzavře a zamkne. Následně se forma vloží do vytvrzovací pece, kde je teplota cca 155 °C, což způsobí, že se viskozita pryskyřice sníží natolik, že se může rozptýlit ve formě. Při výrobě může docházet k několika efektům:

- Efekt vytečení (Wet-out efekt)- požadovaný efekt. Při tomto efektu dojde ve vytlačení 4-8% pryskyřice z formy.
- Vznik míst s nižším množstvím pryskyřice, což způsobí oslabení konstrukce rámu při nižším než požadovaný tlak
- Vznik míst s vyšším množstvím pryskyřice, zvyšující hmotnost při snížením než požadovaném tlaku.

Po vytvrzování v peci následuje ochlazování 20 – 30 min. Následně se forma otevře a vyjme se výrobek. Následuje vizuální kontrola. Následně je kus schválen popřípadě vyřazen jako zmetek.[22]

Obrázek 28 Kompozitový rám kola

4.2 Kompozitní duté profily v letectví

Kompozitní materiály se uplatňují v odvětvích, kde jde v první řadě o úsporu váhy. Z toho důvodu nelze zapomenou na uplatnění v letectví. S nástupem dronů a ultra lehkých letadel jsou kompozitní materiály nedílnou součástí. Například aplikací 681 kg kompozitních dílců na drak dopravního letadla Boeing 737, byla hmotnost konstrukce letadla snížená o 272 kg. Znamená to, že při náhradě kovových dílců kompozitními materiály lze zredukovat hmotnost o 20 až 30%. Obecně se také většinou jedná o tvrdé, otěruvzdorné materiály, které jsou odolné vysokým teplotám. Na obrázku 29. je vidět dron, na kterém bylo použito takřka výhradně kompozitních materiálů. Ramen dronu, na kterých jsou vrtule, jsou vyrobeny z pultruzního profilu. Celá kostra, na které jsou namontovaná příslušenství dronu, jsou vyrobeny z pultruzních desek, které jsou z největší pravděpodobností vyřezány na vodním paprsku, popřípadě vyřezány jinou CNC technologii. Na obrázku 30. lze vidět ultra lehké letadlo prazvláštní konstrukce, u kterého byla využita technologie membránového rozfukování. Vrtule jsou namontovány na konstrukci z dutých kompozitních profilů. Dle konstrukčního řešení je velice pravděpodobné, že konstrukce byla vyrobena prepreg technologii za využití vzduchové membrány. Toto řešení konstrukce bylo zřejmě řešeno hlavně kvůli ušetření váhy.

Obrázek 29 Použití pultruzních profilů v letectví

Obrázek 30 Použití dutých profilů v letectví

5 ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Výztuž kompozitu z velké části určuje mechanické vlastnosti. Pevnost vláken lze měřit pouze ve směru vláken a to stejně velni obtížně, protože upnutí působí jako slabé místo. Ve směru na kolmo na vlákno se prakticky nedá měřit. Anizotropie vláken se tedy vyjadřuje snadněji než pružnost. Z vláken využívaných k vyztužení plastů jsou izotropní pouze skleněná vlákna. Nejvyšší tabulkovou pevnost v tahu mají výztuže z uhlíkových vláken, následují aramidová vlákna a nejnižší pevnost mají vlákna skleněná. Mezi sledované vlastnosti patří například: pevnost v tahu, pevnost v ohybu, pevnost v tlaku, houževnatost, maximální teplota, hustota a modul pružnosti v ohybu. Kompozity mají menší hustotu než kovy a jejich slitiny, velkou měrnou pevnost σ vztaženou k hustotě a velký modul pružnosti E, který je také vztažený k hustotě. Mezi základní mechanické zkoušky v oblasti kompozitu jsou zkoušky tahem, tlakem, tříbodovým a čtyřbodovým ohybem.[13][15][20]

5.1 Zkouška ohybem

5.1.1 Průběh zkoušky

Stanovení veličiny mají v první řadě význam srovnávací. Také zde je nutné sledovat druh porušení. Akceptovatelný druh porušení ohýbaného nosníku je porucha vzorku lomem vyvolaným tlakem nebo tahem. Rovněž při ohybu existuje řada norem pro různé druhy výztuže např. ČSN EN ISO 14125. Měření je třeba provádět na dostatečně štíhlých vzorcích. S rostoucím štíhlostním poměrem (poměr rozteče podpor a tloušťky vzorku) až do úrovně rovné 10 výrazně stoupají naměřené hodnoty pevnosti a modulu pružnosti. [25]

5.1.2 Stanovení a vyhodnocení zkoušky

Měření probíhá na stejných zařízeních a za stejných podmínek jako zkouška pevnosti v tahu/tlaku. Síla, která působí na těleso, je zaznamenána během celé zkoušky. Pomocí této zkoušky jsou stanoveny: pevnost v ohybu, průhybu, deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Modul pružnosti se určí obdobně jako modul pružnosti v tahu. Napětí v ohybu se vypočítá:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \tag{10}$$

Kde σ_f… je napětí v ohybu [MPa]

F… je působící síla [N]

L… je rozpětí [mm]

b… je šířka zkušebního tělesa [mm]

h… je tloušťka zkušebního tělesa [mm]

Deformace ohybu je pak vyjádřena vztahem:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \tag{11}$$

Kde ε_f… je příslušná deformace ohybem [-]

s… je průhyb [mm]

h… je tloušťka vzorků [mm]

L… rozdělení podpěr na měřícím zařízení [mm]

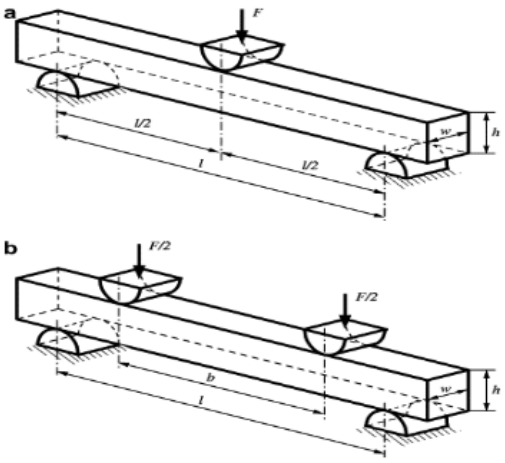
Průhyb je vzdálenost, o kterou se vychýlí horní nebo spodní plocha zkoušeného tělesa mezi rozpěrami ze své původní polohy. Rozměry tělesa jsou určeny příslušnou normou, která stanovuje i poměry délky a tloušťky zkoušeného tělesa, kdy nemohly být dodrženy předepsané rozměry.[15][20]

Tříbodový ohyb

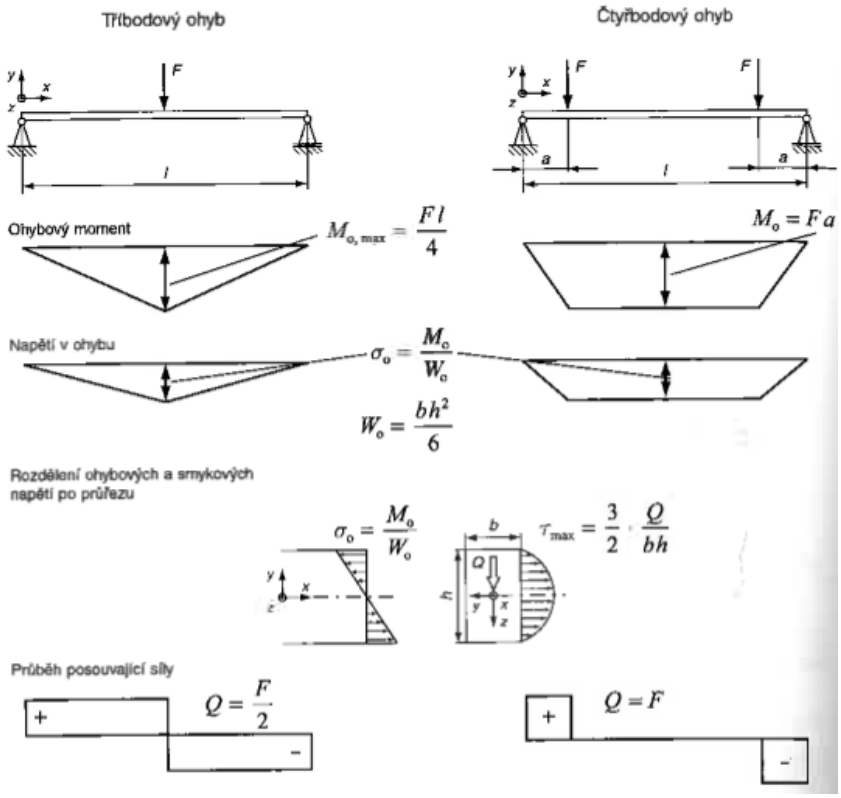
Při zkoušce tříbodovým ohybem je zkušební těleso zatíženo osamělou silou F, která působí uprostřed mezi dvěma podporami tak dlouho, dokud se těleso nezlomí. Ohybový moment vyvolaný silou F způsobí v horních vláknech průřezu tlakové napětí, ve spodních vláknech napětí tahové. Výhodou této zkoušky je, že můžeme změnou vzdálenosti podpor dosáhnout velkých ohybových momentů při malé zatěžující síle.[27]

Čtyřbodový ohyb

Při zkoušce čtyřbodovým ohybem je zkušební těleso prohýbáno dvěma trny působícími v jedné třetině vzdálenosti podpěrných trnů. Rozložení ohybového napětí na povrchu vzorku během čtyřbodového ohybu napětí není lokalizováno do úzké oblasti povrchu vzorku, ale je rozloženo na určité délce vzorku. Tato délka je rovna vzdálenosti zatěžovacích trnů. [27]



Obrázek 31 Tříbodový a čtyřbodový ohyb [27]



Obrázek 32 Průběh ohybových momentů u tříbodového a čtyřbodového ohybu [27]

5.2 Vzpěr kompozitních sloupů

Z důvodů nebezpečí ztráty stability při určování pevnosti v tlaku musí být zkušební vzorek pečlivě navržen. Vhodná jsou pravoúhlá prizmata, válce trubky, neboť zajišťují symetrické zatížení. Při dobré adhezi vlákno – matrice nastává lom vlivem smyku, při špatné adhezi

vlivem delaminace. Aby se odstranilo rozvrstvení v kontaktní rovině se zatěžovacím zařízením, byly navrženy různé opěrné přípravky sloužící také k vyloučení vybočení zkušebního tělesa. Při zatížení tlakem je obtížné v celém zkušebním tělese realizovat jednoznačně čistý stav napjatosti během celé zkoušky. Plochy sloužící k zavedení vnějšího zatížení musí být zcela rovné a rovnoběžné. Zeslabení tloušťky stěny vede k rozdílům k v odolnosti vůči ztrátě stability. Musí existovat jednoznačně homogenní stavy napjatosti i přetvoření a dobrá přístupnost k měření oblasti. Zkušební tělesa jsou pro zkoušku tahem stabilizována připevněním k jejich koncům. Tvar zesílení může významně ovlivnit výsledky zkoušek, zejména při zkouškách za zvýšených teplot.[25]

Pro namáhání na vzpěr jsou vhodné profily I, L, kruhová trubka, čtvercová trubka. Sloupy z profilů dělíme na krátké a dlouhé sloupy. Štíhlost profilů se určuje:

$$\lambda = \frac{K.l}{r} \tag{12}$$

Kde: l… délka sloupu

r… kvadratický poloměr průřezu

K… koeficient typu vzpěru (viz. Tabulka 3)

Dovolené napětí v tlaku pro všechny doporučené profily jak pro krátký tak pro dlouhý sloup se určí takto

Krátký sloup

$$\sigma_{DdK} = \frac{\sigma_{Dk}}{n} \tag{13}$$

Dlouhý sloup

$$\sigma_{Ddd} = \frac{\sigma_{Dk}}{n} \leq \sigma_{Ddk} \tag{14}$$

Dovolené zatížení sloupu pro všechny doporučené profily

Krátký sloup

$$P_{k,dov} = \sigma_{Ddk}.A \tag{15}$$

Dlouhý sloup

$$P_{d,dov} = \sigma_{Ddd}.A \tag{16}$$

Kde: A…plocha průřezu

V praktické části budu provádět měření na tlak na kruhové kompozitové trubce, takže zde uvedu výpočet pouze pro tuto variantu průřezu zkoušeného vzorku. Mezní napětí v tlaku pro kruhové trubky

Krátký sloup

$$\sigma_{Dk} = \frac{E}{16.\left(\frac{D_1}{t}\right)^{0,85}} \leq 210MPa \tag{17}$$

Dlouhý sloup

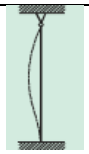
$$\sigma_{Dd} = \frac{13.E}{\left(\frac{K.l}{r}\right)^{1,5}} \leq 210MPa \tag{18}$$

Kde: D_1… je vnější průměr

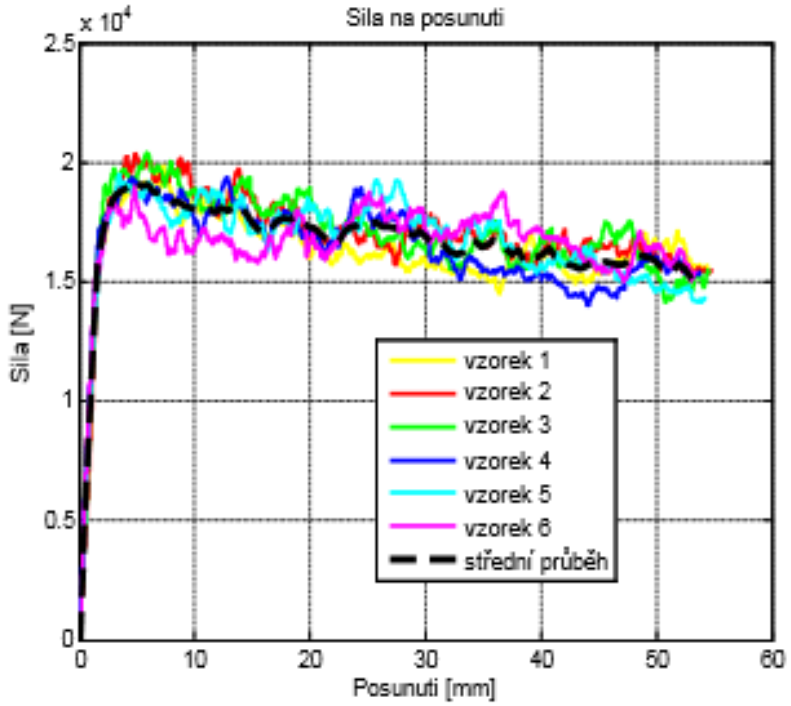
t… tloušťka stěny

[28]

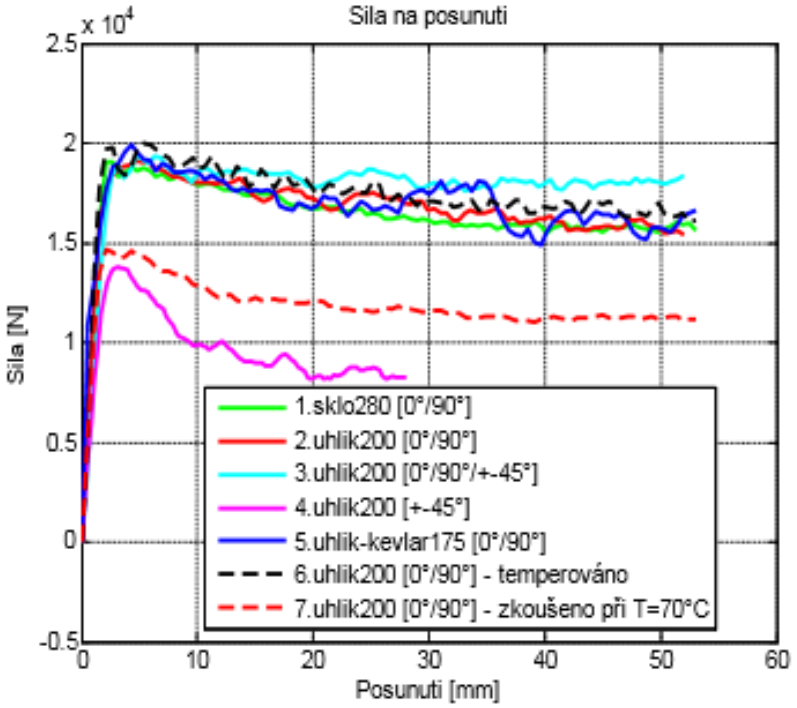
Tabulka 5 Koeficient K [28]

Způsob uložení		Koeficient K
	Oba konce jsou uloženy otočně	1,00
	Oba konce jsou pevně vetknuty	0,65
	Jeden konec je uložen otočně, druhý je vetknutý	0,80
	Jeden konec je vetknutý, druhý je volný	2,10
	Jeden konec je vetknutý, druhý je posunutý	1,20
	Jeden konec je uložený otočně, druhý je posunutý	2,00

Výsledky statických zkoušek jsou porovnávány na středních průbězích prezentovaných na obrázcích 33 a 34. Pro následné vyhodnocení různých vlivů jsou vybrány a popsány různé křivky. [28]



Obrázek 33 Příklad vyhodnocení průběhu síla na posunutí [28]



Obrázek 34 Porovnání středních průběhů závislosti síla na posunutí jednotlivých zkoušených sérií [28]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V praktické části této práce se budu zabývat výrobou kruhových profilů pomocí prepreg technologie s využitím vzduchové membrány, včetně všeho co k technologii výroby patří. Během výroby budu měnit orientaci vláken v jednotlivých vrstvách. Následnými mechanickými zkouškami na tříbodový ohyb a tlak, budu zjišťovat vliv orientace na mechanické vlastnosti profilů. V druhé části se budu zabývat výrobou nekruhového profilu, a problémům které technologii výroby pomocí membrány doprovází.

6.1 Cíle experimentální části

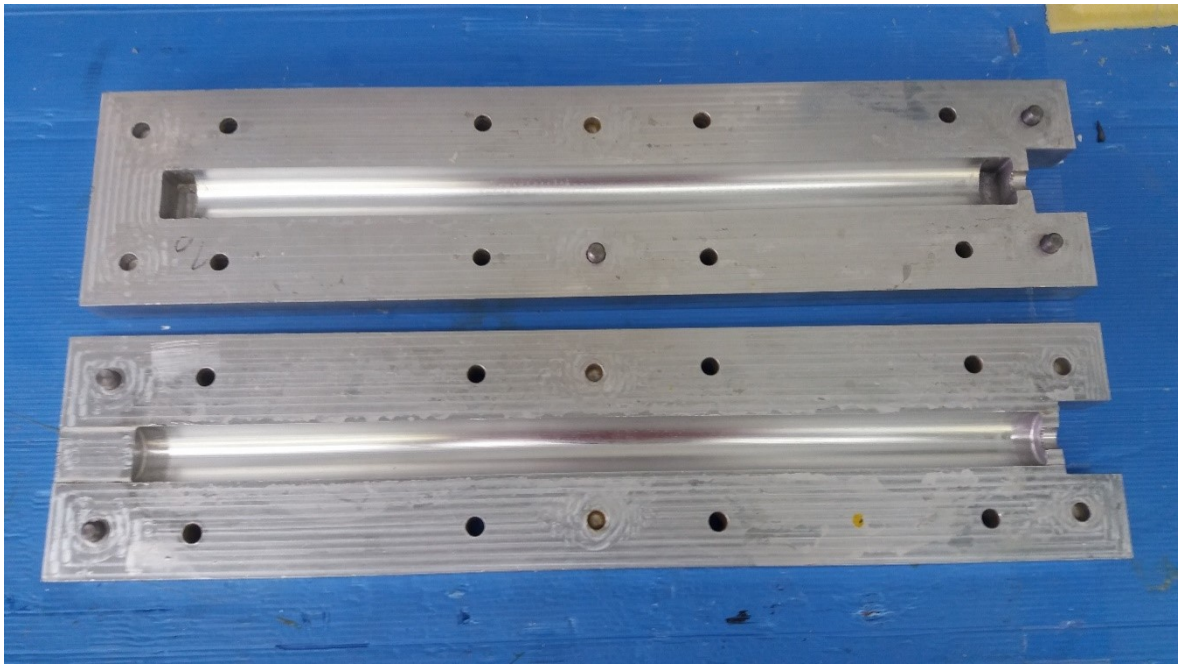
1. Návrh prototypové formy pro výrobu kompozitního profilu
2. Návrh materiálového složení pro jednotlivé prototypy profilů
3. Technologický postup výroby a doporučené podmínky zpracování
4. Experimentální výroba navrhnutých prototypů
5. Zhodnocení vhodnosti zvoleného postupu pro dosazení kompozitního profilu v souladu s výkresovou dokumentací
6. Testování kompozitního profilu dle zvolených standardů
7. Vyhodnocení dosažených výsledků
8. Závěr a doporučení kroků pro pokračování ve výzkumné oblasti výroby kompozitních profilů

7 NÁVRH PROTOTYPOVÉ FORMY PRO VÝROBU KOMPOZITNÍHO PROFILU

K druhé části práce jsem vyrobil dva druhy vzorku. Pro testování to byly vzorky s kruhovým profilem a pro zjištění problematiky technologie a bližšího prozkoumání to byly vzorky čtvercového průřezu.

7.1 Forma pro výrobu kruhového profilu

Pro výrobu vzorků pro testování jsem zvolil kruhový průřez profilu. Technologie je podstatně jednodušší oproti nekruhovým profilům na prototypové úrovni, i nástroje jsou daleko lépe k sehnání. Díky možnosti zapůjčení prototypové formy ze společnosti FORM s.r.o. jsem mohl zkušební tělesa vyrábět. Forma je hliníková, dvoudílná o rozměrech 570x130x60 mm. Jednotlivé části jsou k sobě spojeny a zajištěny osmi šrouby. Dutina formy je broušená na Ra 0,8 a neporézní. Díky tomu nebylo při výrobě vzorků potřeba plniče k vyrovnání pórů a mikro nerovností. Povrch byl k výrobě vzorků dostačující. K přesnému usazení obou částí formy slouží šest kolíků, které jsou situovány po rozích a uprostřed formy. Podrobný výkres formy naleznete v příloze. Při výrobě došlo k menší úpravě formy, která měla za následek zjednodušení a zkvalitnění práce s formou. Pomocí odfrézování materiálu v čele formy se zjednodušil přístup k ventilu membrány a tedy jednodušší manipulace a kontroly tlaku v membráně. Uvnitř dutiny jsou vyfrézovány zahloubení z důvodu zapuštění hadicových svorek, které používám k utěsnění membrány a hladkému dosednutí částí na sebe.

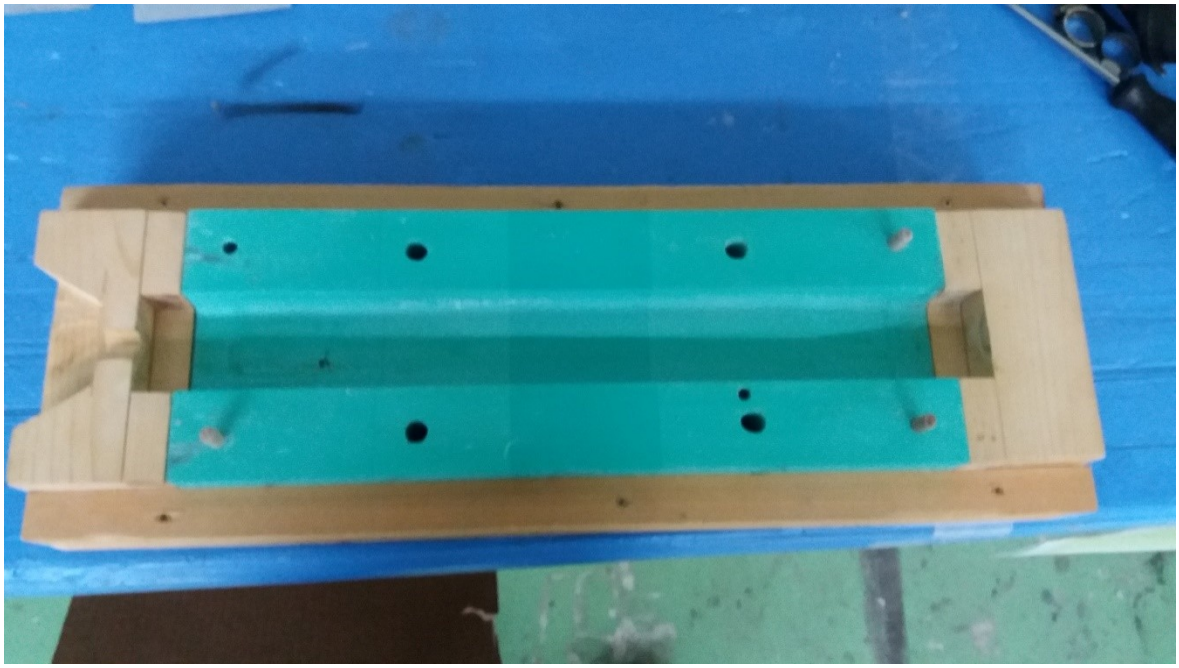


Obrázek 35 Hliníková forma pro výrobu kruhových profilů

Obrázek 36 Úprava formy

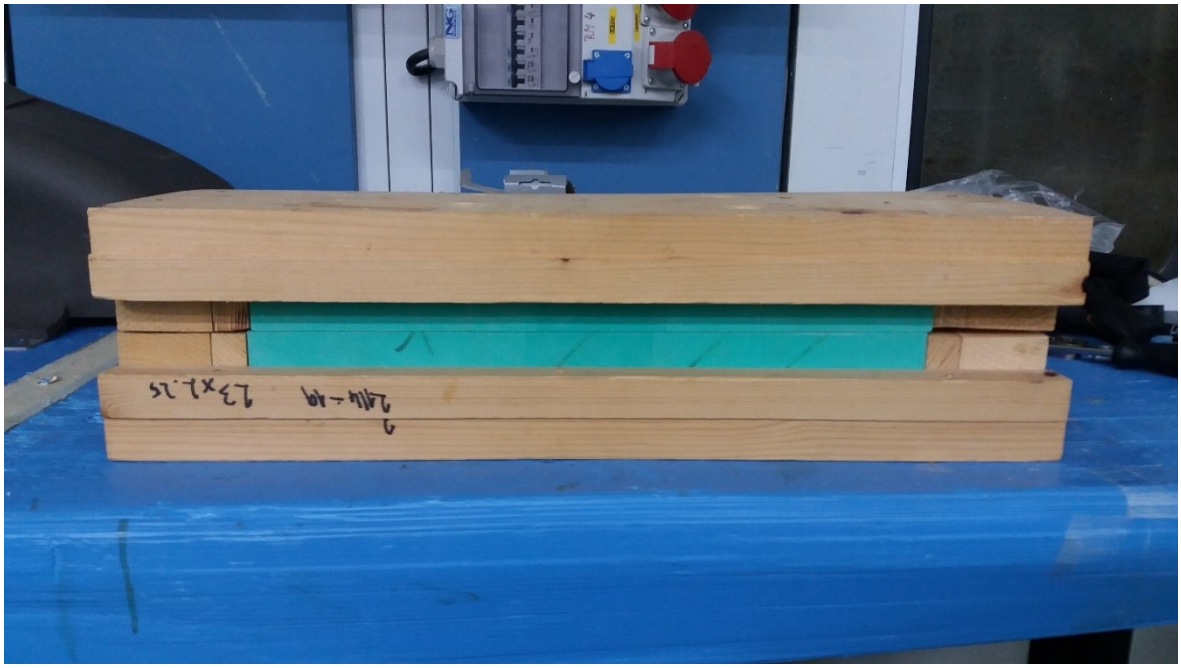
7.2 Forma pro výrobu čtvercového profilu

Forma pro výrobu čtvercového profilu byla vyrobena z materiálu Ebablock EP 138, což je uměle dřevo s tepelnou odolností do 140°C pro použití na nástroje pro prepreg. Zasazena do dřevěného rámu. Ustavení obou částí zajišťovali, stejně jako u formy na kruhový profil, sada čtyř kolíků umístěných v rozích formy. Přitažení částí formy bylo realizováno pomocí 4 šroubů. U formy se vyskytoval stejný problém jako u hliníkové formy, a to špatný přístup k ventilu membrány. Problém byl odstraněn podobně jako u hliníkové formy. Jelikož je materiál dutiny formy porézní, musel se před použitím naseparovat.



Obrázek 37 Dutina formy čtvercového profilu

Obrázek 38 Dřevěný rám formy



Obrázek 39 Složená forma

8 NÁVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ PRO JEDNOTLIVÉ PROTOTYPY PROFILŮ

8.1 Vzorky kruhového profilu

Pro testování jsem zvolil kruhové profily, jelikož výroba byla poměrně jednodušší a daleko lépe reprodukovatelná s uspokojivými výsledky. Složení jednotlivých vzorků jsem volil po konzultaci s vedoucím diplomové práce. Zkoušené vzorky mají tloušťku stěny 2 mm, délka je 450 mm a vnější průměr je 30 mm. Z délky 450 mm se zkušební vzorky naformátovaly na délky 200 mm pro zkoušku ohybem a 50 mm na zkoušku tlakem.

Jednotlivé zkušební vzorky se skládají z 9 vrstev. U prvních tří vzorků je orientace vláken [0;0], u druhého vzorku je orientace [45;45] a u třetího vzorku [45;0]. Vzorky jsou vyrobeny z prepregu z uhlíkových vláken a plátnovou vazbou, o gramáži 200 g/cm^3.

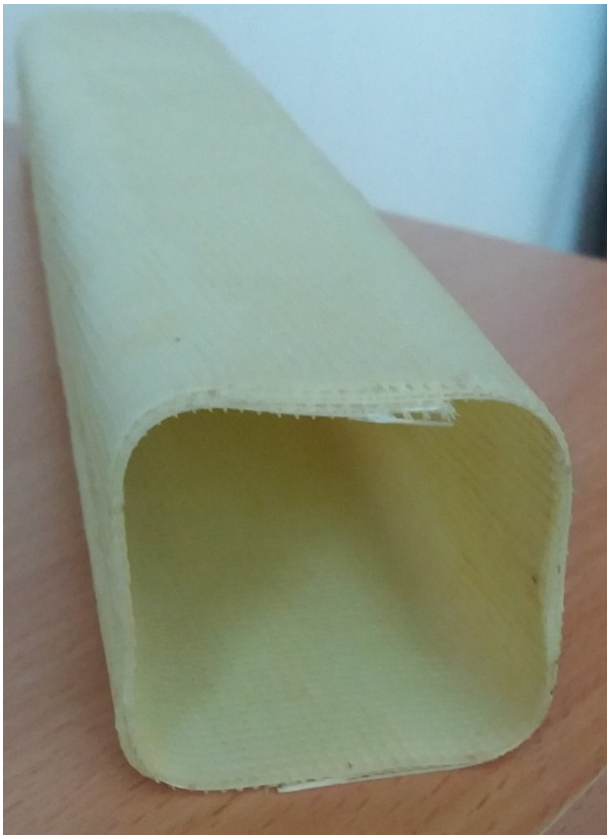
Tabulka 6 Přehled testovaných vzorků

Číslo vzorku	Skladba vzorku
Vzorek č. 1	[0;0]
Vzorek č. 2	[45;45]
Vzorek č. 3	[45;0]

Obrázek 40 Vzorek po vytažení z formy neopracovaný

8.2 Vzorky čtvercového průřezu

Vzorky čtvercového průřezu byly vyrobeny pouze pro odzkoušení technologie, zjištění problematiky, vad a následného pokusu o vyřešení a zdokonalení technologie. První vzorek by vyroben z fenolického prepregu o gramáži 600 g/cm^3. Prepreg byl nanášen ve třech vrstvách. Druhý vzorek byl vyroben ze stejného materiálu jako vzorky kruhového profilu. Naneseny byly opět tři vrstvy.



Obrázek 41 Vzorek č. 1 čtvercového průřezu

9 TECHNOLOGICKÝ POSTUP A DOPORUČENÉ PODMÍNKY ZPRACOVÁNÍ

9.1 Technologický postup zpracování kruhového profilu

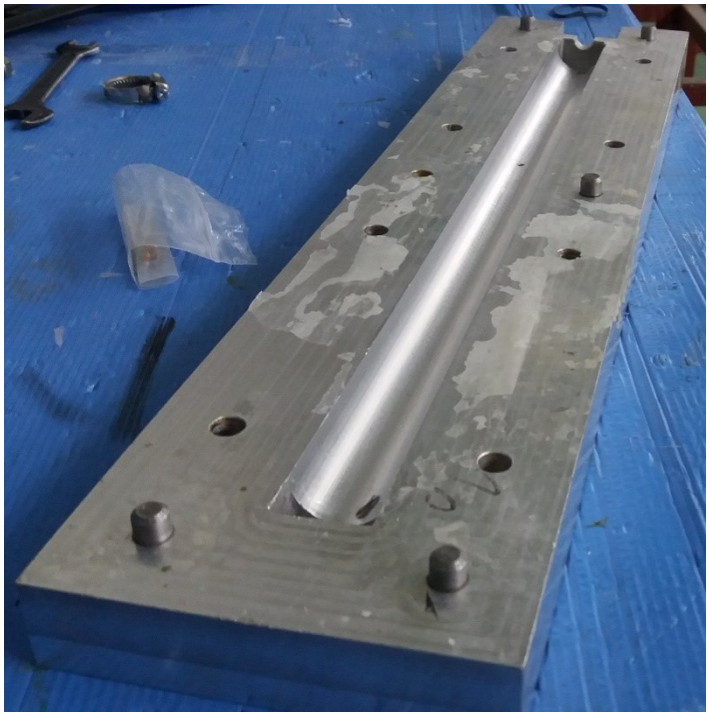
Při výrobě vzorků kruhového průřezu jsem použil běžně dostupné materiály, které se dají koupit v obchodech specializovaných na cyklistiku, popř. domácí potřeby. Jediná specifická a nejdůležitější pomůcka je forma, která mi byla zapůjčena ve firmě FORM s. r. o., a také separátor. Další pomůcky byly:

- Duše ze silničního kola
- Ventil připojený na záslepku (obrázek 40.)
- Hadicová spona průměru 12-22 a 16-27 mm
- Záslepka průměru 20 mm
- Kleště
- Klíč velikosti 7 a 17
- Separátor Frekote 700 NC
- Chirurgické rukavice
- Šroubovák

Základní postup byl takřka u všech vzorků stejný.

1) **Očištění a naseparování formy:** forma byla pokaždé znečistěná z předchozího použití. Ať jsem přitáhl formu, jak silně jsem chtěl, vždy pryskyřice při vytvrzování vytekla z dutiny formy. Vytečení pryskyřice z dělící roviny značilo, že vše proběhlo bez problémů a vzorek byl vyroben bez větších defektů, pórovitosti a že během vytvrzení neunikal z membrány vzduch. Formu bylo potřeba před dalším použitím očistit a naseparovat. Pro separaci jsem použil separátor Frekon 700 NC, který se běžně ve firmě FORM s.r.o. používá při výrobě prepregových součástí. Materiálový list separátoru je v příloze diplomové práce
2) **Příprava prepregu:** Prepreg je možné nařezat ručně nebo pomocí CNC plotru. V případě výroby vzorků byl použit plotr Zünd M-1600. Nástřihový plán byl vypracován v programu AutoCad ve formátu DXF.

Obrázek 42 Plotr Zünd M-1600



Obrázek 43 Znečištěná forma

Obrázek 44 Očištěná a naseparovaná forma

3) **Příprava membrány:** Improvizovaná membrána vyrobená z duše od silničního kola. Jako první krok jsem si odměřil cca 450 mm a ustřihl jsem duši. Následně jsem si ustřihnul ještě další dva kousky o délce cca 30 mm pro lepší utěsnění spoje mezi záslepkou a membránou jak je vidět na Obrázku 45. Na konci záslepky jsem použil hadicovou sponu o velikosti 12-22 mm.

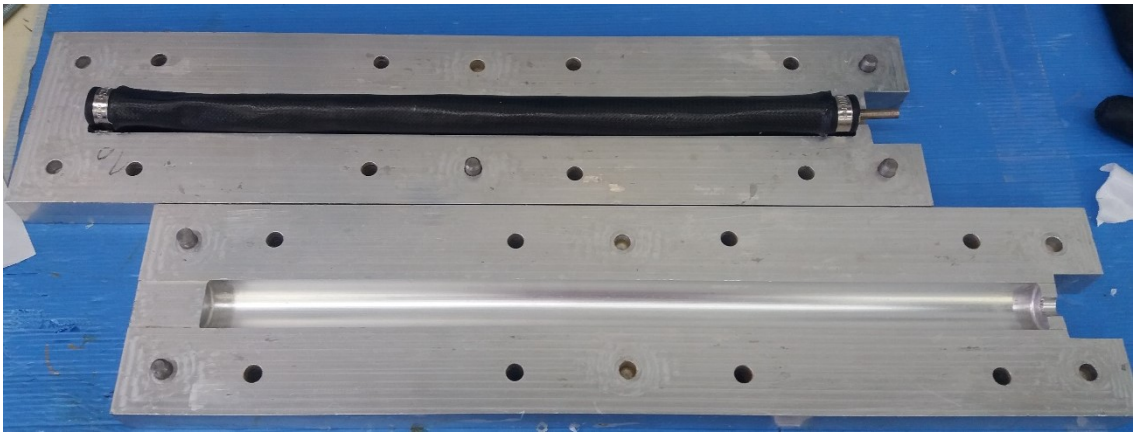
Obrázek 45 Utěsnění konce membrány

Na straně ventilu jsem provedl tu samou operaci s tím rozdílem, že jsem použil sponu velikosti 16-27 mm, z důvodu většího průměru válce ventilu. Duši o délce 30 mm následně nasunu do půlky její délky na záslepku a membránu, a druhou půlku, která přesahuje do prostoru následně ještě přehnout, pro co nejlepší utěsnění. Při dotažení hadicové spony se může stát, že ostré hrany protrhnou membránu až na záslepku a touto trhlinou bude ucházet vzduch. Přehnutím těsnícího kroužku snížím riziko protrhnutí membrány.

Obrázek 46 Spojení a utěsnění ventilu v membráně

Po dotažení obou stran nafoukneme membránu a ponořením do vody zkontrolujeme, zda těsní. Pokud ne, dotáhneme spony, popřípadě jinak zabráníme úniku vzduchu.

4) **Separace membrány:** Separace membrány je velice důležitá pro následné odformování. Pro separaci použijeme stejně jako u formy separátor Frekote 700 NC. Pro jednodušší aplikaci je dobré si membránu lehce nafouknout.
5) **Kladení prepregu:** Pro výrobu jsem zvolil metodu, kdy se jednotlivé vrstvy prepregu navrství na sebe. Následně se vytvarují do tvaru U a vloží se do něj membrána. Membrána je stále lehce nafouknutá. Následuje tvarování na membránu. Plátnová vazba je asi nejhůře tvarovatelná, takže 9 vrstev není tak jednoduché vytvarovat. Tvar by měl bez problémů zapadnout do dutiny formy a přiložením vrchní části formy by prepreg neměl nikde zasahovat do dělící roviny a forma by měla bez problémů dosednout. Spony zapadnou do speciálně vyfrézovaných drážek.



Obrázek 47 Vzorek připraven k zaformování

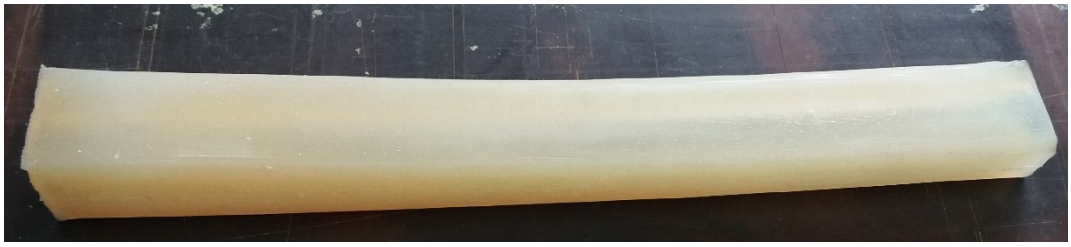
Pokud forma dosedá, následuje zajištění obou částí formy pomocí 8 šroubů M8 a matic. Šrouby dotahujeme do kříže jako při výměně kola u auta.

6) **Natlakování membrány:** Po zajištění formy je vše připraveno k natlakování membrány. Po několika zkušenostech jsem odhadl ideální tlak membrány na 4 bar. Při vyšším natlakování se může stát, že z důvodu vytvrzovací teploty a roztažnosti vzduchu za vyšší teploty membrána nevydrží a praskne. Následně klesne tlak na nulu, stěny se zhroutí, vzniká pórovitost a jiné vady, které vzorky, popřípadě výrobky znehodnotí.
7) **Vložení do vytvrzovací pece:** Vytvrzování probíhalo při výrobě ve firmě FORM s.r.o. ve vytvrzovací peci. Program pece byl nastavený na hodinový náběh na teplotu 130 °C, výdrž na této teplotě po dobu 2 hodin a následné vypnutí pece. Po vypnutí pece byla forma vyjmuta a chladla na volném vzduchu po dobu 2 hodin.
8) **Odformování:** Po vychladnutí formy na teplotu manipulace se forma rozmontovává. Z důvodů zatečené pryskyřice do dělící roviny je potřeba použít páčidlo ve formě šroubováku. Spony jsou ve většině případů zatečeny pryskyřicí, a pro demontáž je potřeba pomocí kladiva je uvolnit. Membrána a hadicové spony jsou po procesu výroby dále nepoužitelné, takže při odformování je není potřeba brát zřetel na neporušení.

Obrázek 48 Vzorek po odformování

9.2 Technologický postup pro čtvercový profil

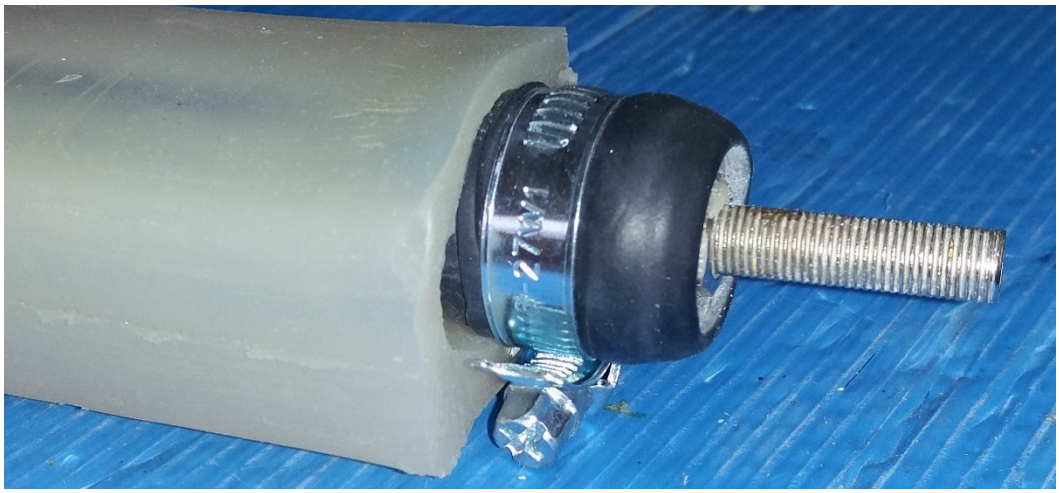
Technologický postup u výroby čtvercového profilu se liší od toho u kruhového pouze v několika bodech. Příprava prepregu, separace formy, zakládání prepregu. U přípravy membrány je jiný postup, jelikož se na membránu vyrobenou z duše z kola nasouvá další mezikus, který je vidět na obrázku 49. Mezikus je vyroben ze silikonu 13 MOULD WT 45 (dvě složky 1:1). Tento mezikus má za úkol kompenzovat napětí v rozích formy.



Obrázek 49 Silikonový mezikus

Silikonový mezikus se nasunul na membránu. Následně se na jednu stranu membrány nasadil ventil a na druhou stranu záslepka. Následně se nainstaluje těsnění v přesném postupu jako u kruhového průřezu. Je důležité vše dělat, tak aby přesahy na konci a začátku mezi membránou a silikonovým mezikusem byli co nejmenší. Při nafouknutí se membrána roztáhne. Připravenou membránu je vidět na obrázku 50 až 52.

Obrázek 50 Záslepka membrány se silikonovým mezikusem



Obrázek 51 Ventil membrány se silikonovým mezikusem

Obrázek 52 Připravená membrána s mezikusem na zakládání prepregu

Membrána je následně naseparována a připravena na zakládání prepregu. Zakládání prepregu je stejné jako u kruhového profilu, nejprve je prepreg navrstven na sebe a následně je nabalen na membránu, tak jak je to vidět na obrázku 53.

Obrázek 53 Založený prepreg a připraven na vložení do formy

Takto připravený prepreg vložíme do dvoudílné formy, která je naseparována stejně jako v případě kruhového profilu. Forma se zavře a zajistí šrouby. Následně je membrána natlakovaná a vložená do vytvrzovací pece na 130°po dobu dvou hodin a hodinovým náběhem na danou teplotu. Po dokončení vytvrzování se forma z pece vyjme, nechá se zchladnout na volném vzduchu a následně odformuje.

10 EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA NAVRHNUTÝCH PROTOTYPŮ

Experimentální výroba byla realizována ve firmě FORM s.r.o. Ve firmě FORM se již dříve experimentovalo s dutými profily, proto byla ve firmě uložena hliníková forma o jedné dutině, na které jsem mohl vzorky vyrábět.

10.1 Dutý profil kruhového průřezu

Při výrobě prvních vzorků byl největší problém, jak správně nahustit membránu, tak aby z ní vzduch neucházel, jelikož forma měla velmi málo prostoru na uchycení hadice kompresoru. Po marném shánění delšího ventilu, jsme se rozhodli formu celkově upravit a přebytečný materiál odfrézovat, jak je vidět na obrázku 54. Následně jsme museli řešit, na jak velký tlak je dobré membránu nahustit pro optimální výsledek. Po několika nezdarech jsme došli k závěru, že tlak o velikosti 4 bary bude optimální. Vzorky se poté vytvrzovaly při teplotě 130 °C po dobu 3 hodin, z toho hodinu byl náběh na danou teplotu. Při těchto podmínkách jsme byli schopni vyrobit několik vzorků. Tím jsme usoudili, že podmínky jsou pro výrobu vzorku přijatelné a již jsme je neměnili.

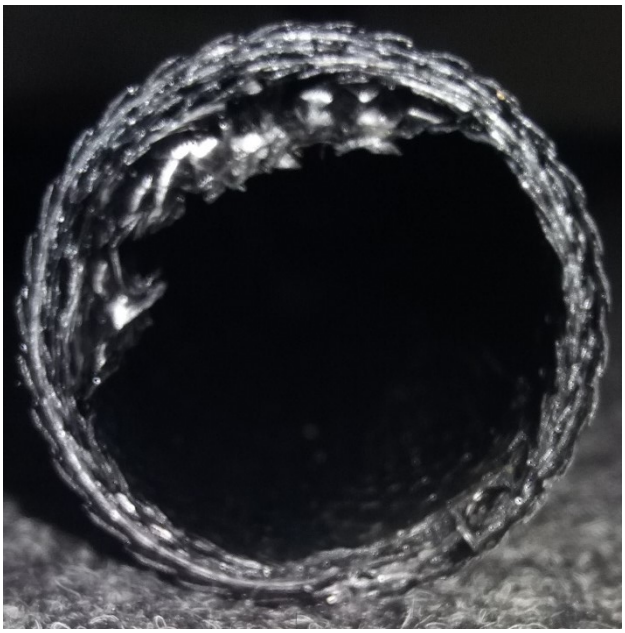
Obrázek 54 Úprava formy

10.1.1 Vady při experimentální výrobě

Při výrobě prvních vzorků se zdařilo vyrobit pár zmetků. Bylo to z důvodu neznalosti dané technologie. Po několika úpravách a dalších změnách v postupu jsme dosáhli optimálního postupu, tak že jsme byli schopni proces replikovat na dalších experimentálních vzorcích. Hlavní problém při výrobě byl únik vzduchu z membrány a tedy nekonstantní tlak v průběhu vytvrzování. To mělo za následek vady, jako jsou špatné prosycení pryskyřice, delaminace spoje, pórovitost. Tyto vady byly viditelné na povrchu vzorku, jak je vidět na obrázku 55 a 56. Na vnitřní straně docházelo taktéž k delaminaci a pokud tlak klesl na minimum již při vložení do pece, zhroutil se celý vnitřní průměr vzorku. Tyto závady, byly vyřešeny pomocí

zdvojeného těsnění jak na straně ventilu, tak na straně záslepky. Dále po každých dvou vyrobených vzorcích byl preventivně vyměněn ventil z toho důvodu, že při vytvrzovací teplotě 130 °C ventil ztrácel své těsnící schopnosti a začínal propouštět vzduch a tím se snižoval tlak v membráně.

Obrázek 55 Pórovitost



Obrázek 56 Delaminace

Další vada, která se vyskytla při výrobě vzorku je vidět na obrázku 57. Při výrobě se prepreg dostal do dělící formy. Tato vada vznikla nepozorností při výrobě. Po vzniku této vady se při zakládání každého dalšího vzorku opětovně zkontrolovalo, zda je prepreg správně uložen v dutině formy a nezasahuje do její dělící roviny.

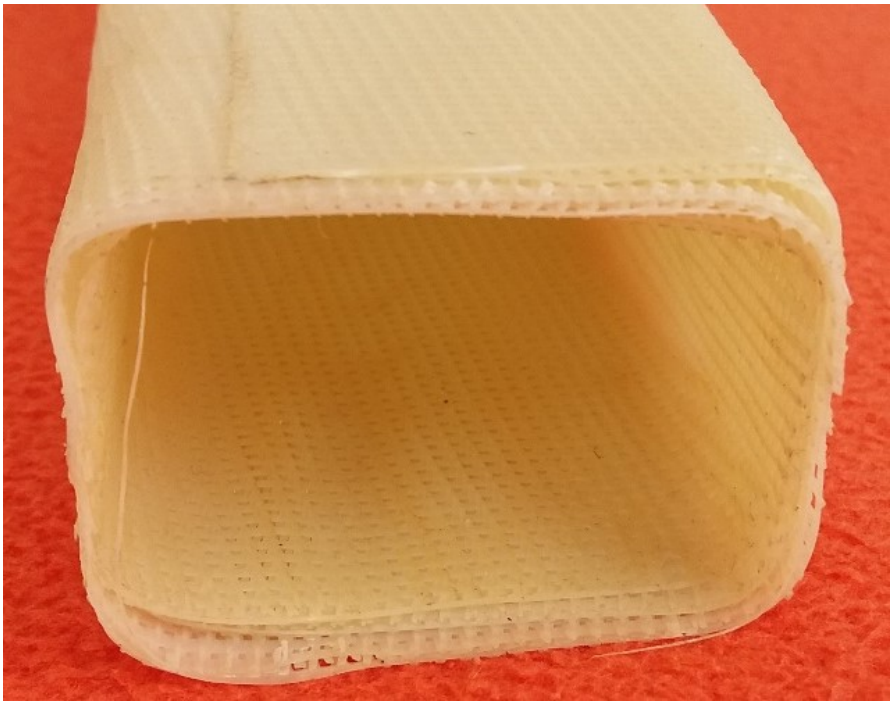
Obrázek 57 Prepreg v dělící rovině

10.2 Dutý profil čtvercového průřezu

Stejně jako u výroby kruhového průřezu byl největší problém nahuštění membrány. V případě čtvercového průřezu byl také problém v konstrukci formy. Při výrobě v hliníkové formě bylo minimum místa, kde by se nahuštěná membrána mohla vyboulit. Tím nevznikl uvnitř dutiny pokles tlaku a membrána vykonávala svou funkci. U formy čtvercového průřezu nastával efekt poklesu tlaku tím, že natlakovaný vzduch si našel cestu mezi membránou a vytvořil výduť mimo dutinu formy. To mělo za následek nedoléhání prepregu v rozích formy a vznikaly vady, které jsou vidět na obrázku 58.

Obrázek 58 Vady při nízkém tlaku v membráně

Na obrázku je vidět vzorek z uhlíkového prepregu s plátnovou vazbou. Na rozích vzorku je vidět efekt, kdy membrána správně nedoléhala a pryskyřice byla vytlačena pouze na stěnách, kde byl tlak dostačující. Při výrobě jiného vzorku z fenolického prepregu o gramáži 600 g, ale stejném technologickém postupu vznikl jiný problém, a to v delaminaci jednotlivých vrstvách v rozích vzorku, jak je vidět na obrázku 59. Tyto vady byly taktéž zapříčiněny nedostatečným a nestálým tlakem v dutině formy.



Obrázek 59 Delaminace v rozích vzorku

11 ZHODNOCENÍ VHODNOSTI ZVOLENÉHO POSTUPU PRO DOSAŽENÍ KOMPOZITNÍHO PROFILU V SOULADU S VÝKRESOVOU DOKUMENTACÍ

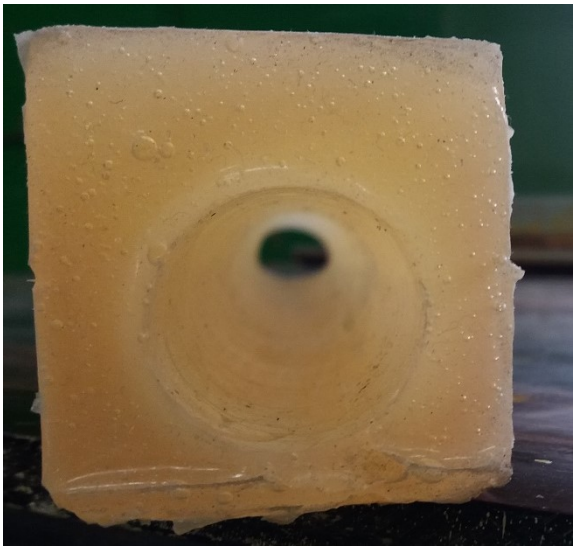
11.1 Zhodnocení postupu při výrobě kruhového profilu

Výroba profilu byla zvolena s ohledem na skutečnost, že ve firmě FORM s.r.o. již bylo experimentováno s výrobou dutých profilů. Po výrobě vzorků nebyla jednotná tloušťka stěny v celém průřezu. A to z důvodu zvolené technologie, kdy byl prepreg nejprve navrstven na sebe, a až následně byl vytvarován a umístěn na membránu. Tím vznikl překlad prepregu anebo jinak řečeno šev. V tomto místě byla tloušťka stěny větší.

Postup byl zvolený správně. A to hlavně z toho hlediska, že se nám podařilo vyrobit potřebný počet vzorků o stejné jakosti, ať už z hlediska dosažení povrchové jakosti vzorku, tak i z hlediska rozměrového. Z naměřených hodnot, které jsou v bodě 12. Je patrné, že hodnoty se od sebe prakticky nijak výrazně neliší. Z toho vyplývají také stejné mechanické vlastnosti. Tyto důkazy ukazují opakovatelnost celého procesu.

11.2 Zhodnocení postupu při výrobě čtvercového profilu

Výroby byla stejně jako u kruhového profilu realizována ve firmě FORM s.r.o., ale na rozdíl od kruhového profilu nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. Problematika výroby čtvercových průřezů je daleko větší než u kruhových a s dostupnými prostředky jsme nebyli schopni vyrobit uspokojivý prototyp. Jednou z hlavních příčin bylo nedostatečné vybavení, na rozdíl od výroby kruhových profilů, forma pro výrobu čtvercových byla zasazena v rámu ze dřeva a přesnost rámu byla nedostačující. Vlivem nepřesností formy, a následném tlakováni membrány nebylo dosaženo konstantního tlaku v dutině formy. Druhým faktorem, který hrál velkou roli, byl silikonový mezikus. Jak je vidět na obrázku 60. dutina pro zavedení membrány není ve středu silikonového mezikusu, což následně ovlivní rozložení tlaku v dutině formy.



Obrázek 60 Silikonový mezikus

Jedním z řešení výroby je, kvalitnější forma pro výrobu. Vyrobení druhé membrány, u které bude kladen větší důraz na přesnost. Důležité je, aby otvor pro zavedení membrány byl přesně vycentrován pro lepší rozložení tlaku v dutině. Pokud by ani toto řešení, nebylo účelné, je dobré vyhledat firmu, která se výrobou podobných membrán zabývá a má potřebné know-how.

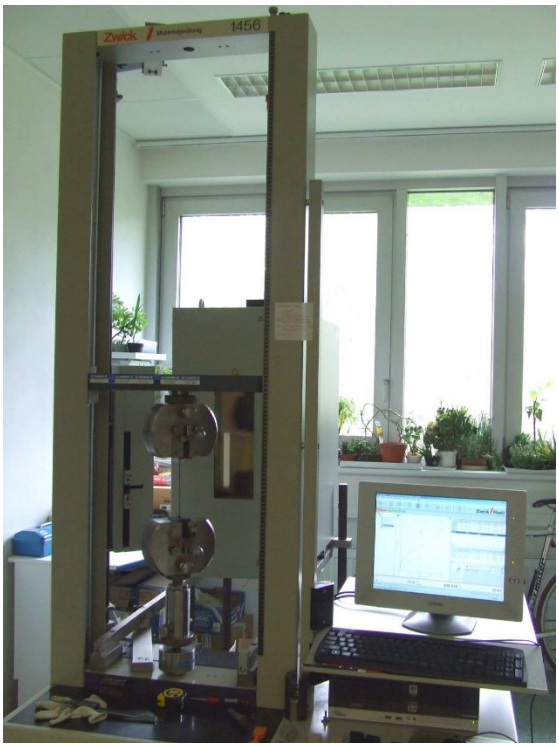
12 TESTOVÁNÍ KOMPOZITNÍHO PROFILU DLE ZVOLENÝCH STANDARDŮ

Testování kruhového profilu bylo prováděno na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně na fakultě technologické. K testování jsme zvolili dva druhy mechanických zkoušek, zkoušku ohybem a zkoušku tlakem.

12.1 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem probíhala na měřícím zařízení ZWICK 1456 s parametry.

- Maximální posuv příčníku 80 mm/min
- Spínači síly 2,5 – 20 kN
- Teplotní komora -80/250 °C
- TestExpert software Tah/ohyb/tlak



Obrázek 61 Zkušební stroj ZWICK 1456

Při průběhu zkoušky byly atmosférické podmínky:

Teplota: 23,8 °C

Tlak vzduchu: 1002 hPa

Vlhkost vzduchu: 62%

Typ zkoušky byl tříbodový ohyb. Zkušební těleso bylo ustaveno na dvou podpěrách vzdálených od sebe 165 mm. Trn tlačil na vzorek ve vzdálenosti 82,5 mm. Výška podpěr byla 100 mm.

Obrázek 62 Zkouška ohybem kruhového profilu

12.1.1 Zkušební tělesa

Zkouška byla prováděna na vzorcích kruhové průřezu vyrobených prepreg technologií využitím vzduchové membrány. Rozměry zkušebních těles byly:

Délka l = 200 mm

Průměr D = 30 mm

Průměr d = 26 mm

Vzorky se od sebe lišily skladbou jednotlivých vrstev a úhlem natočení vazeb. Skladby vzorků byly [0;0], [45;45], [45;0]. Od každé skladby byly vyrobeny 4 vzorky a následně

otestovány. Do testování byl zahrnut i vzorek s vadami, které vznikly při nesprávném postupu při výrobě. Důvodem bylo zjistit, do jaké míry tyto vady ovlivní mechanické vlastnosti vzorku.

12.1.2 Průběh zkoušky

Zkušební těleso bylo ustaveno na podpěry, tak aby přesah tělesa za podpěrami byl stejný na obou stranách. Jelikož profil tělesa byl zesílen na jednom místě díky postupu při výrobě, bylo toto míst natočeno směrem dolů, jak je vidět na obrázku 63. Následně byl spuštěn stroj. Zkouška skončila při přetržení vzorku. Veškerá data byla uložena a vyhodnocena ovládací jednotkou měřícího stroje.

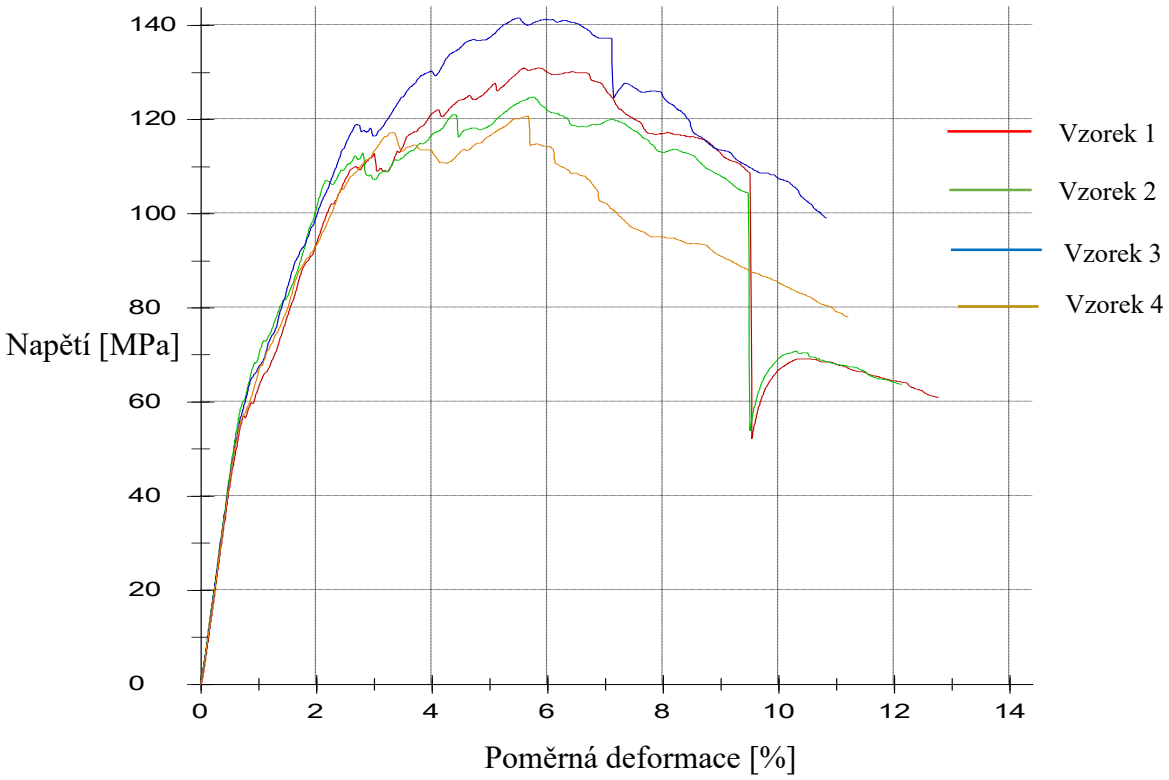
Obrázek 63 Uložení zkušebního tělesa

12.1.3 Vyhodnocení průběhu zkoušky ohybem

12.1.3.1 Těleso se skladbou [0;0]

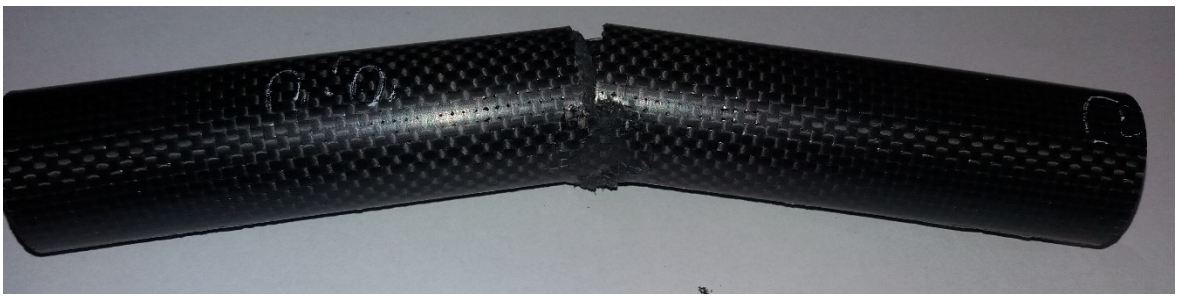
Tabulka 7 Statistika pro skladbu [0;0]

	E_O [MPa]	σ_{Fm}[MPa]	ε_{OFM}[%]	W_{FM}[Nmm]
$\bar{x}$	8814,70	129,60	5,70	23564,48
s	134,75	9,10	0,10	726,18
υ	1,53	7,03	2,61	3,08

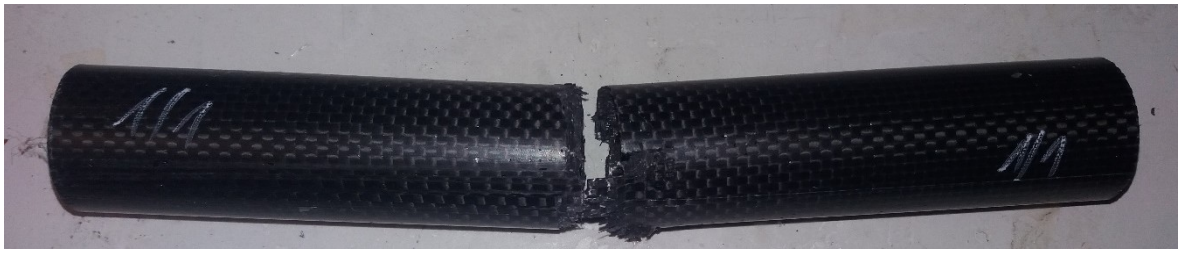


Graf 1Závislost napětí na poměrné deformaci u skladby [0;0]

Při měření prvních vzorků se skladbou vrstev [0;0] byly naměřeny hodnoty a vyneseny v grafu 1. Z grafu lze vyčíst, že největší modul pevnosti byl naměřen u vzorku č 3. Při měření vzorků č. 1 a 2 lze vidět přetržení matrice při poměrné deformaci v okolí 9,5%. Následuje skokový pokles napětí cca o 50%. Měření dále pokračovalo. Napětí mírně vzrostlo na hodnotu kolem 70 MPa, a to z důvodu soudružnosti výztuže. Při průběhu zkoušky byla jako první deformována vrchní část profilu, tedy část, která byla v přímém kontaktu s trnem. Tato část byla u třech vzorků zdeformována, avšak výztuž byla stále neporušená viz. obrázek 64. U vzorku č. 1 došlo ke křehkému lomu jak je vidět na obrázku 65.



Obrázek 64 Vzorek po dokončení zkoušky

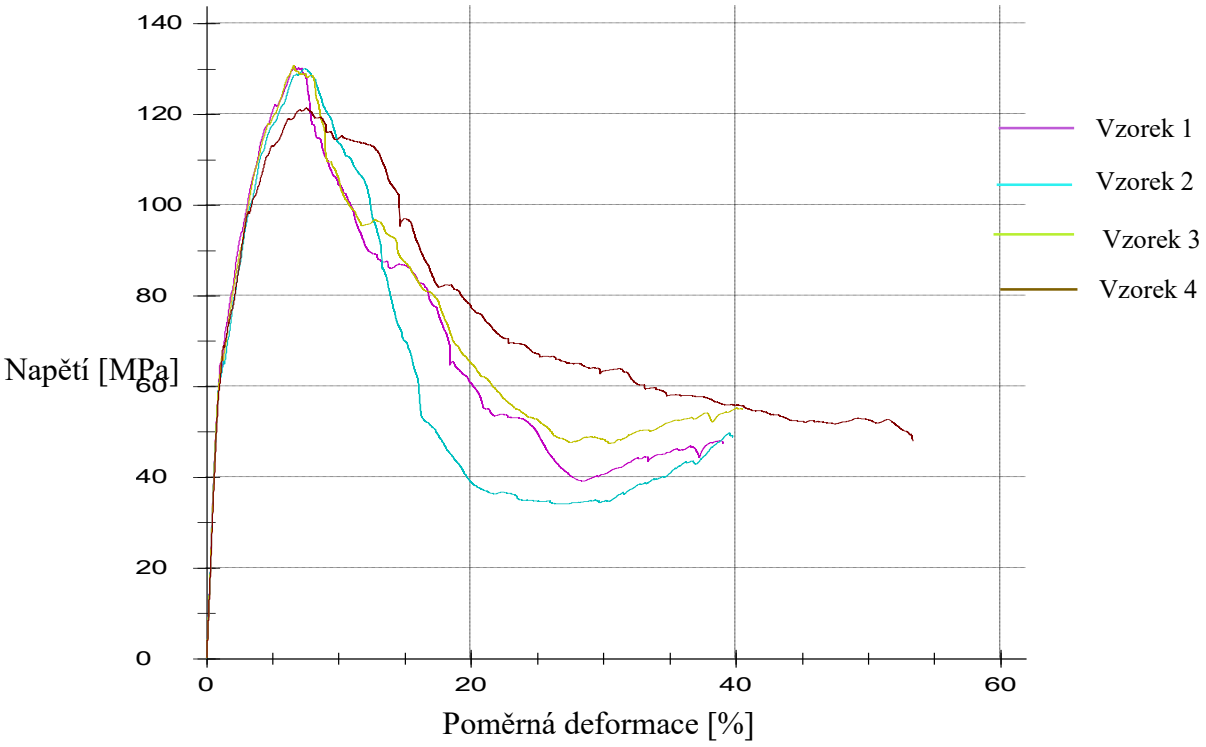


Obrázek 65 Křehký lom u vzorku č.1

12.1.3.2 Těleso se skladbou [45;45]

Tabulka 8 Statistika pro skladbu [45;45]

	E_O [MPa]	σ_{Fm}[MPa]	ε_{OFM}[%]	W_{FM}[Nmm]
$\bar{x}$	7141,50	128,30	7,00	27988,59
s	236,37	4,58	0,50	1969,67
υ	3,31	3,58	6,92	7,04



Graf 2 Závislost Napětí na poměrné deformaci u skladby [45;45]

V grafu 2 jsou hodnoty naměřeny u vzorků se skladbou [45;45]. Na rozdíl od skladby [0;0] byly naměřeny daleko větší poměrné deformace a to mezi 50-55 %. Nejvyšší napětí bylo naměřeno u vzorku č. 3, avšak u vzorků č. 1 a 2 bylo naměřeno téměř stejné. Do zkoušky

byl zahrnut i vzorek č. 3, který obsahoval vady zapříčiněné nesprávným postupem při výrobě. Vada pórovitosti je vidět na obrázku č. 66 a vada špatného zatečení pryskyřice na obrázku 50. Dále nedošlo k řádnému zatečení ve spoji při výrobě. Tyto vady byly nejspíš zapříčiněny poklesem tlaku v membráně při vytvrzování. Z grafu 2 je patrné, že vady měly vliv na hodnotu meze pevnosti, která je nižší než u ostatních vzorků, ovšem hodnota poměrné deformace je vyšší.

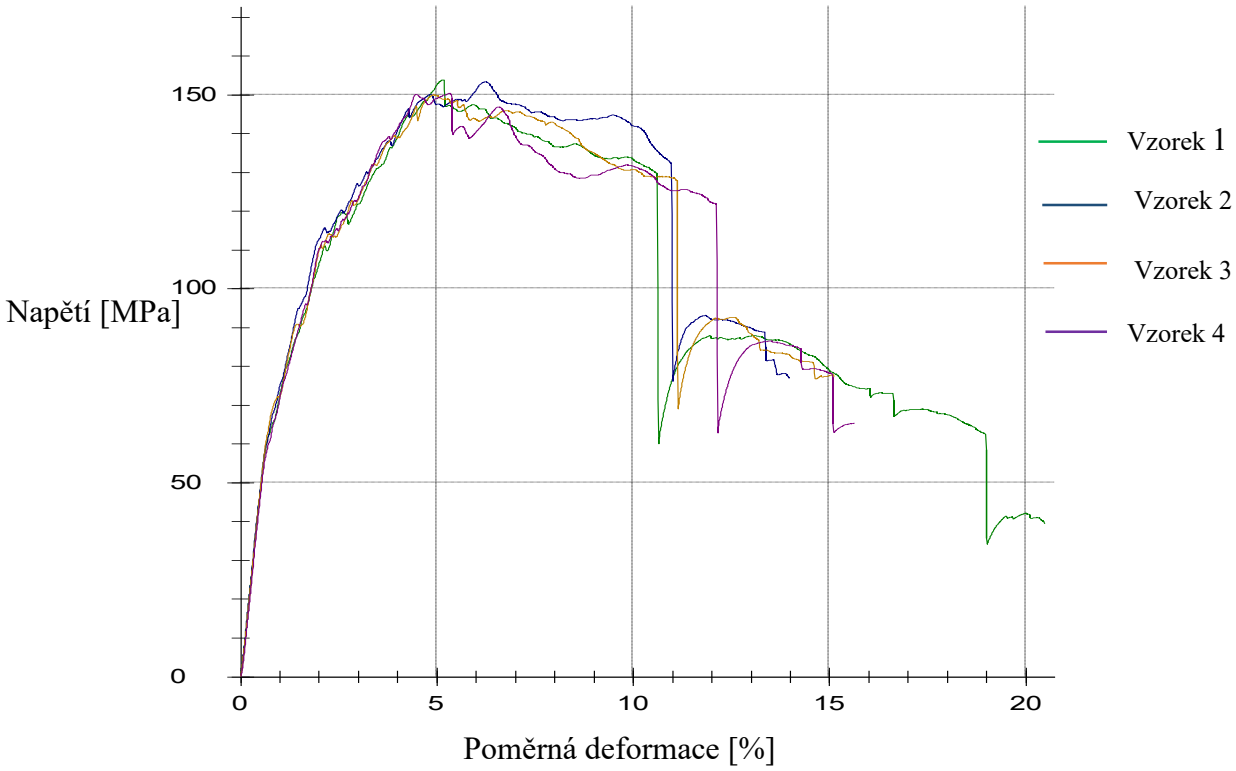
Obrázek 66 Vada vzorku č. 4 pórovitost

Obrázek 67 Vada vzorku č. 4 špatné prosycení vzorku pryskyřicí

12.1.3.3 Těleso se skladbou [45;0]

Tabulka 9 Statistika pro skladbu [45;0]

	E_O [MPa]	σ_{Fm}[MPa]	ε_{OFM}[%]	W_{FM}[Nmm]
$\bar{x}$	9814,80	151,90	5,40	25110,46
s	103,95	1,96	0,60	3829,18
υ	1,06	10,63	10,63	15,25

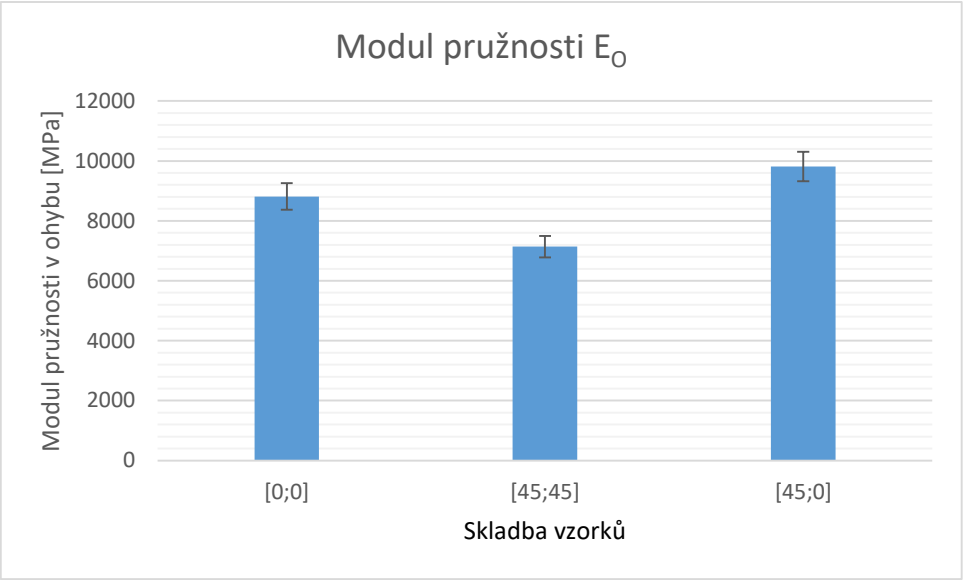


Graf 3 Závislost napětí a poměrné deformace u skladby [45;0]

Třetí skladba byla [45;0]. Při tomto měření byly naměřeny nevyšší hodnoty meze pevnosti ze všech tří měření. V grafu 3 je názorně vidět porušení matrice, což mělo za následek skokové snížení napětí o cca 50%. Porušení matrice nastalo u všech vzorků mezi 10 a 15 % poměrné deformace. Matrice byla porušená v horní části profilu v přímém kontaktu s trnem. Následně zkouška dále pokračovala, napětí opět stoupla a to vlivem výztuže, která si zachovala soudružnost. Konec zkoušky nastal při porušení matrice ve spodní části profilu.

Obrázek 68 Vzorek se skladbou [45;0]

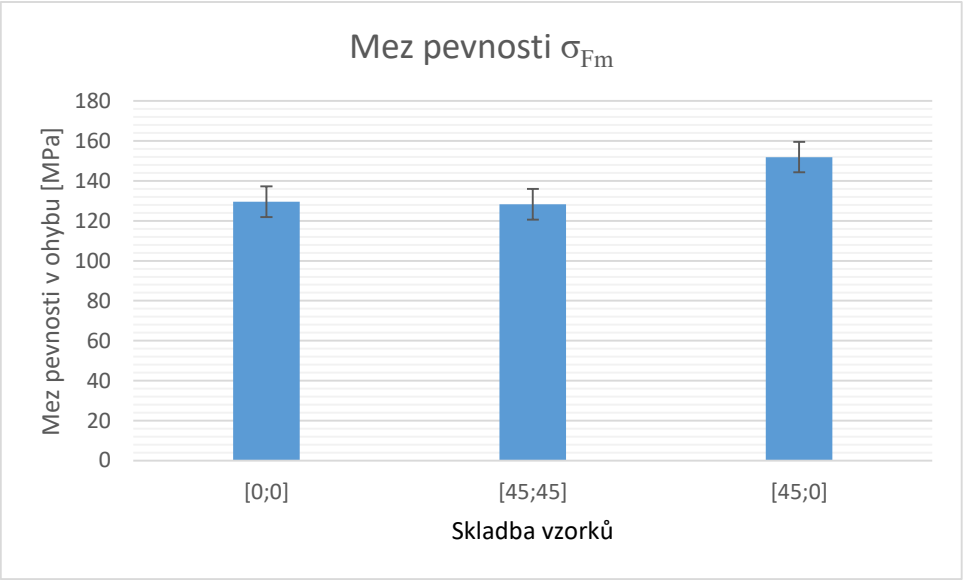
12.1.4 Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu Eo



Graf 4 Porovnání modulu v ohybu mezi jednotlivými vzorky

Při srovnání naměřených modulů pružnosti v ohybu z grafu 4 vyplývá, že nejvyšší hodnotu měla struktura s orientací vláken [45;0] o hodnotě 9814,8 MPa. Nejnižší naopak struktura [45;45] 7141,5 MPa. To tedy znamená, že u vzorku [0;45] musíme vyvinout vetší napětí než u vzorků [0;0] a [45;45] k tomu, abychom vyvolali deformaci.

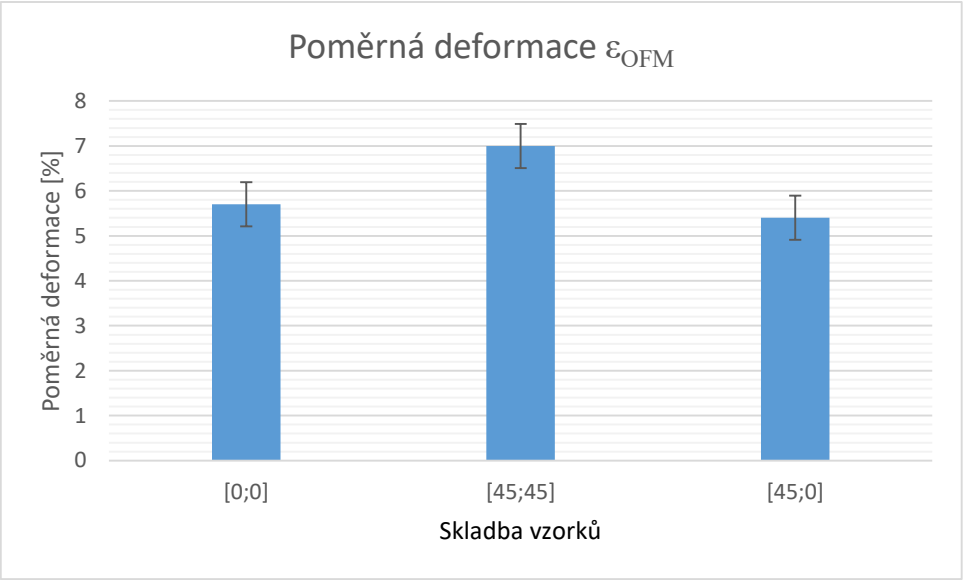
12.1.5 Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu σ_{Fm}



Graf 5 Porovnání meze pevnosti v ohybu mezi jednotlivými vzorky

V grafu 5 jsou vyneseny hodnoty meze pevnosti v MPa mezi jednotlivými vzorky. U vzorku s orientací vláken [45;0] byla naměřena hodnota 151,9 MPa, což je v porovnání s ostatními vzorky poměrně velký rozdíl. Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku [45;45] 128,3 MPa. U vzorku [0;0] byla naměřená hodnota 129,6 MPa. Mezi strukturami [0;0] a [45;45] je velice malý rozdíl.

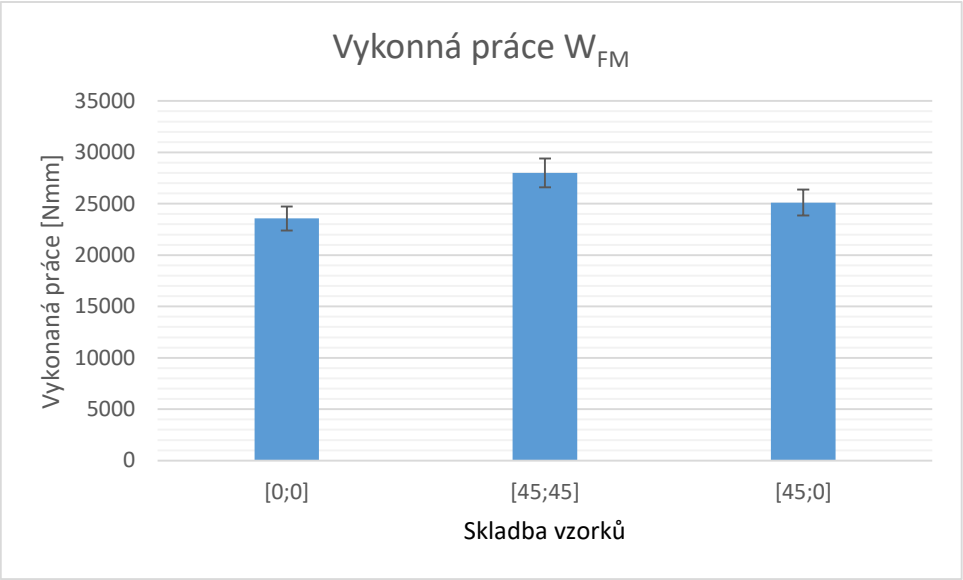
12.1.6 Vyhodnocení poměrné deformace ε_{OFM}



Graf 6 Porovnání poměrné deformace mezi jednotlivými vzorky

Největší poměrné deformace bylo naměřeno u vzorku [45;45] a to 7%. Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku [45;0] 5,4 %. Mezi vzorky [0;0] a [45;0] je velice malý rozdíl jenom 0,3%. z měření vyplývá, že nejhouževnatější je vzorek s orientací vláken [45;45].

12.1.7 Vyhodnocení vykonané práce k dosažení meze pevnosti W_{FM}



Graf 7 Porovnání vykonané práce k dosažení meze pevnosti mezi jednotlivými vzorky

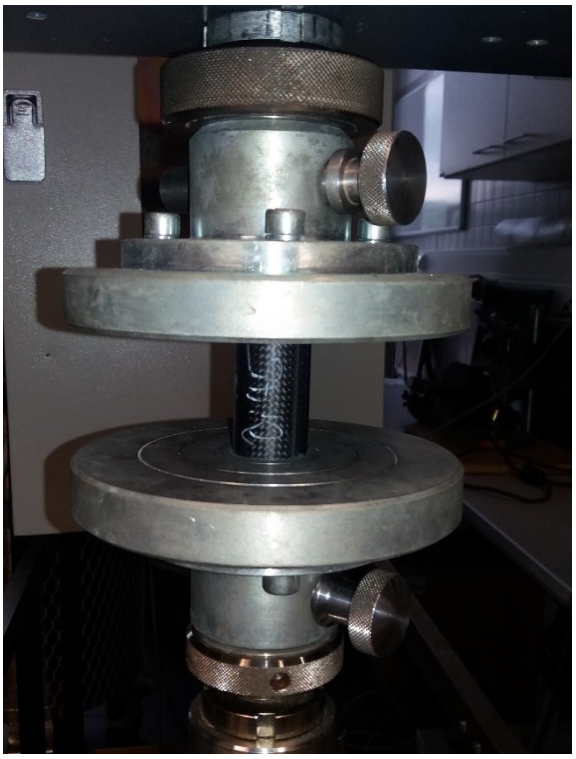
Vykonaná práce k dosažení meze pevnosti je obsah plochy pod křivkou měření do bodu meze pevnosti. Z měření vyplývá, že největší práce byla naměřena u vzorku s orientací vláken [45;45] 27 988,59 Nmm. Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorků s orientací vláken [0;0] 23 564,78 Nmm.

12.2 Zkouška tlakem

Zkouška tlakem probíhala na měřícím zařízení ZWICK 1456 s parametry.

- Maximální posuv příčníku 80 mm/min
- Spínači síly 2,5 – 20 kN
- Teplotní komora -80/250 °C
- TestExpert software Tah/ohyb/tlak

Zkouška probíhala na stejném stroji jako zkouška ohybem po vyměnění čelistí. Jelikož maximální tlak, který dokáže měřící stroj ZWICK 1456 vyvinout je 20 kN, nebylo možné provést zkoušku a vyhodnotit všechny naměřené hodnoty, které jsou ke zkoušce tlaku potřeba. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem na stroji ZWICK 1456 naměřil a vyhodnotil modul pružnosti v tlaku. Vzorky tedy nebyly porušeny. Další měření následovalo na měřícím stroji Shimadzu AG-20kN/50kNNICD jenž dokáže vyvinout tlak až 50 kN.



Obrázek 69 Zkouška na tlak po výměně čelistí

Měřící stroj Shimadzu AG-20kN/50kNNICD

- Maximální posuv příčníku 1000 mm/min
- Spínači síly 20-50 kN
- TestExpert software Tah/ohyb/tlak

Obrázek 70 Shimadzu AG-20kN/50kNNICD

12.2.1 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky byly vyrobeny stejnou technologií jako pro zkoušku ohybem. Orientace vláken je stejná jako u zkoušky ohybem [0;0], [45;45], [45;0]. Od každé skladby bylo vyrobeno 5 vzorků. Do testování byl zahrnut i vzorek s vadami, které vznikly při nesprávném postupu při výrobě. Důvodem bylo zjistit, do jaké míry tyto vady ovlivní mechanické vlastnosti vzorku.

Rozměr vzorků byly

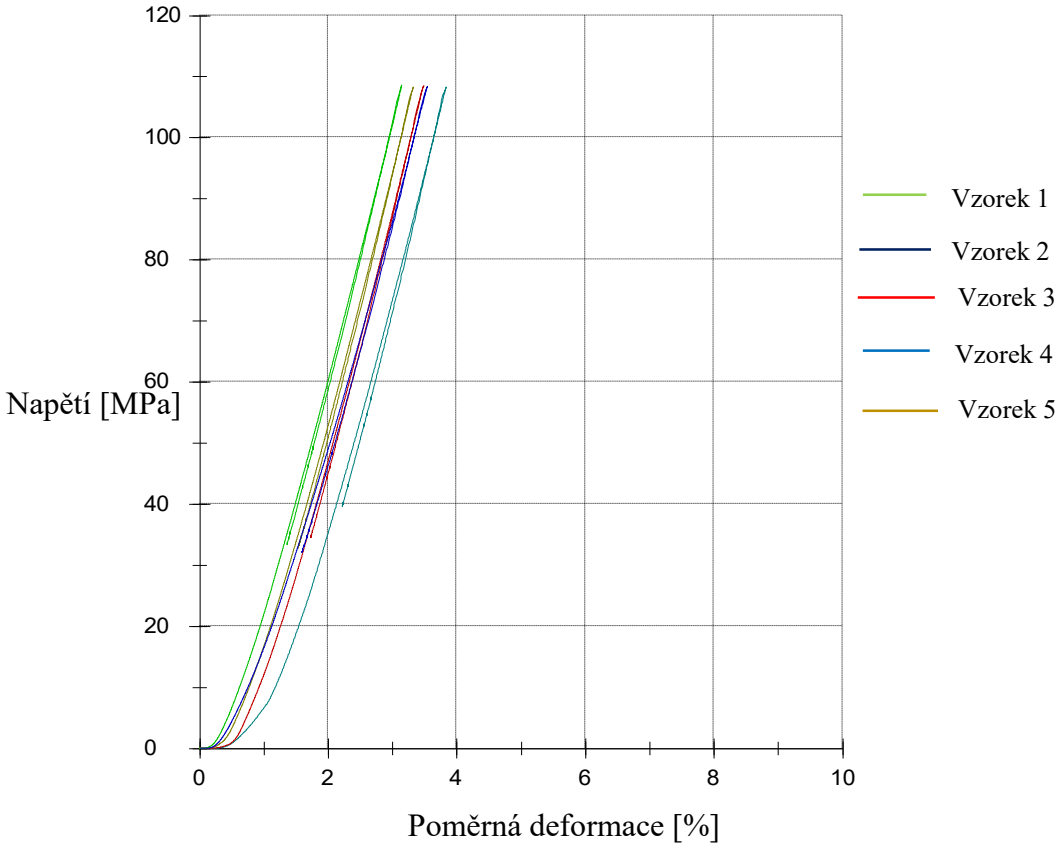
Délka l = 50 mm

Průměr D = 30 mm

Průměr d = 26 mm

12.2.2 Vyhodnocení grafů zkoušky modulu pružnosti v tlaku

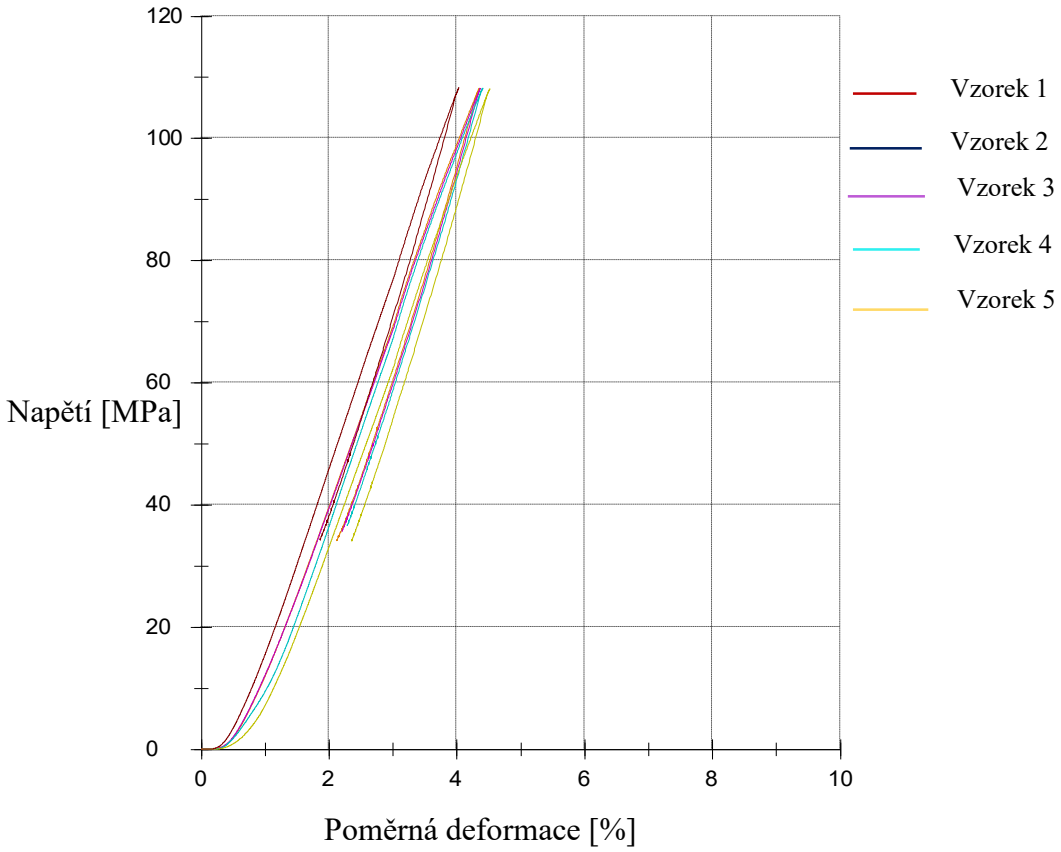
12.2.2.1 Těleso se skladbou [0;0]



Graf 8 Závislost napětí na poměrné deformaci v tlaku u struktury [0;0]

V grafu 8 je patrný ve spodní části mírný náběh. Ten je zapříčiněný nerovnostmi, které vznikly při řezání vzorků na potřebnou délku ke zkoušce. Z tohoto grafu můžeme také vyhodnotit, že ani tlak o hodnotě 20 kN není dostačující pro dosažení meze pevnosti při průřezu o ploše 175,9 mm^2.

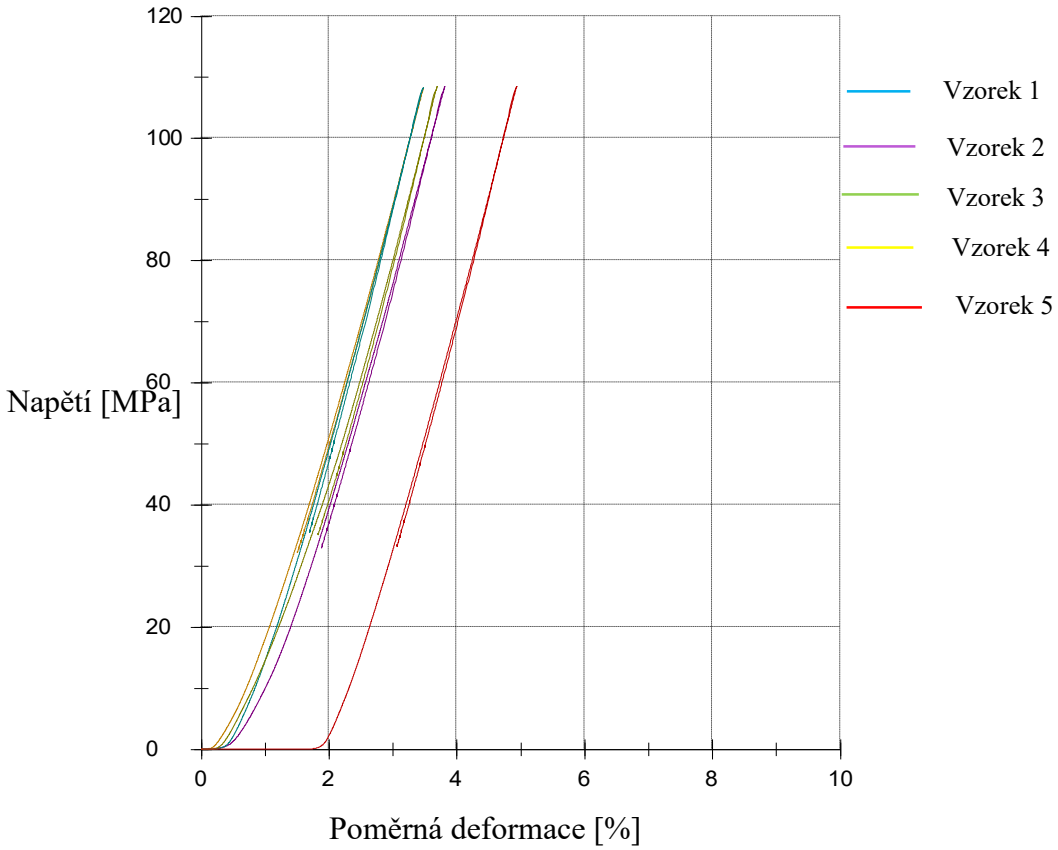
12.2.2.2 Těleso se skladbou [45;45]



Graf 9 Závislost napětí na poměrné deformaci v tlaku u skladby [45;45]

Měřeno bylo 5 vzorků. I když byly u vzorku 1, 2 a 3 stejné vady jako u vzorku 4 při zkoušce v ohybu, to znamená pórovitost, špatné zatečení pryskyřice a také špatné zatečení spoje. Z grafu 9 není nijak patrné, že by při zkoušce tyto vady nějak výrazně ovlivňovaly pružnosti v tlaku.

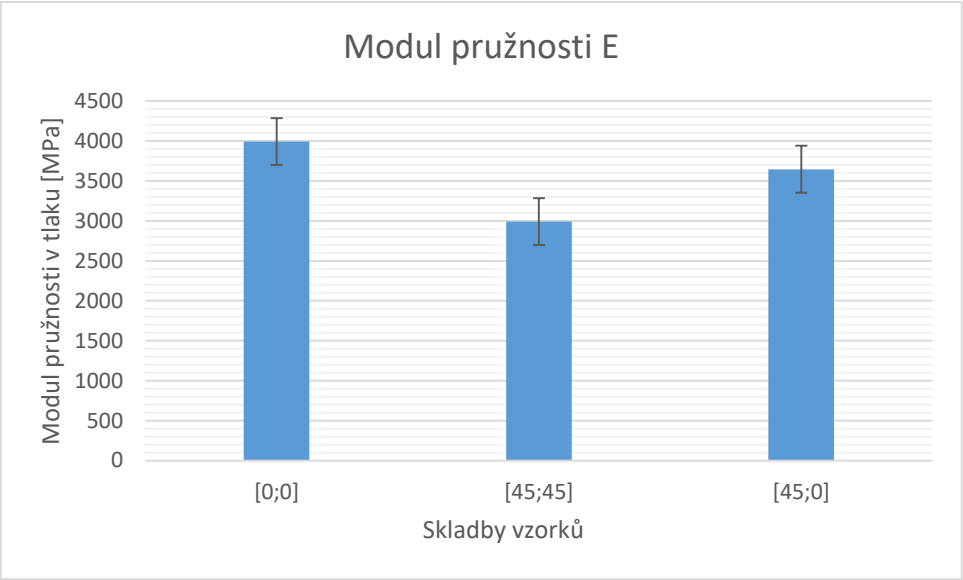
12.2.2.3 Těleso se skladbou [45;0]



Graf 10 Závislost napětí na poměrné deformaci v tlaku u skladby [45;0]

U vzorku 5 stoupalo napětí až od hodnoty 2 % poměrné deformace. Toto bylo zapříčiněno nejspíš velkou nerovností při formátování zkušebního vzorku. Ostatní hodnoty měření jsou velice podobné a odchylky jsou minimální, jak je vidět v grafu 10.

12.2.3 Vyhodnocení modulu pružnosti v tlaku E



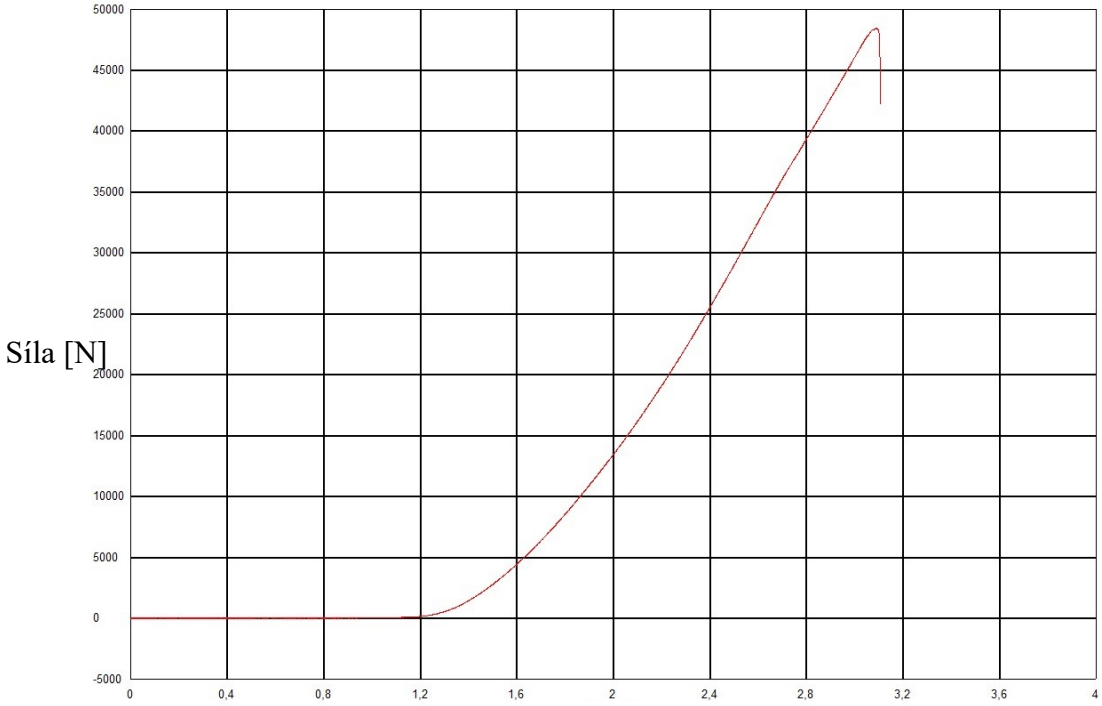
Graf 11 Porovnání modulu pružnosti v tlaku u jednotlivých vzorků

Z grafu 11 jasně vyplývá, že nejvyšší hodnota modulu pružnosti v tlaku byla naměřena u skladby [0;0] o hodnotě 3990,9 MPa. Nejnižší hodnotu modulu pružnosti má materiál o skladbě [45;45].

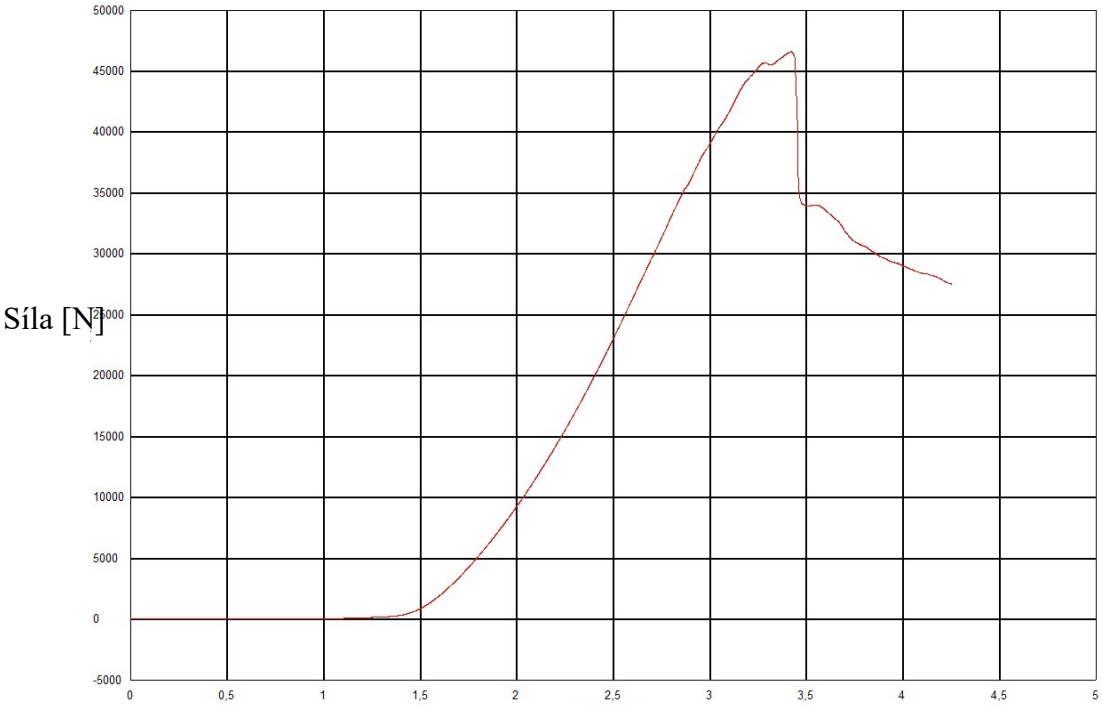
12.2.4 Vyhodnocení grafů působící síly na deformaci

Měření meze pevnosti v tlaku probíhalo na měřícím stroji Shimadzu AG-20kN/50kNNICD, který disponuje možností vyvinout tlak až 50 kN. Výsledky z tohoto přístroje jsou vyhodnocovány v závislosti působící síly v N na deformaci v mm. Měření bylo provedeno na všech třech vzorcích o skladbách [0;0], [45;45] a [45;0]. U skladby s orientací vláken [0;0] nebylo možné měření provést, jelikož ani maximální síla zkušebního stroje nestačila na provedení měření. Měření jednotlivých vzorků nebyly vynášeny do jednoho grafu stejně jako u předchozích měření. Z toho důvodu ve vyhodnocení uvedu pouze dva grafy. Výsledky si byly ovšem velmi podobné.

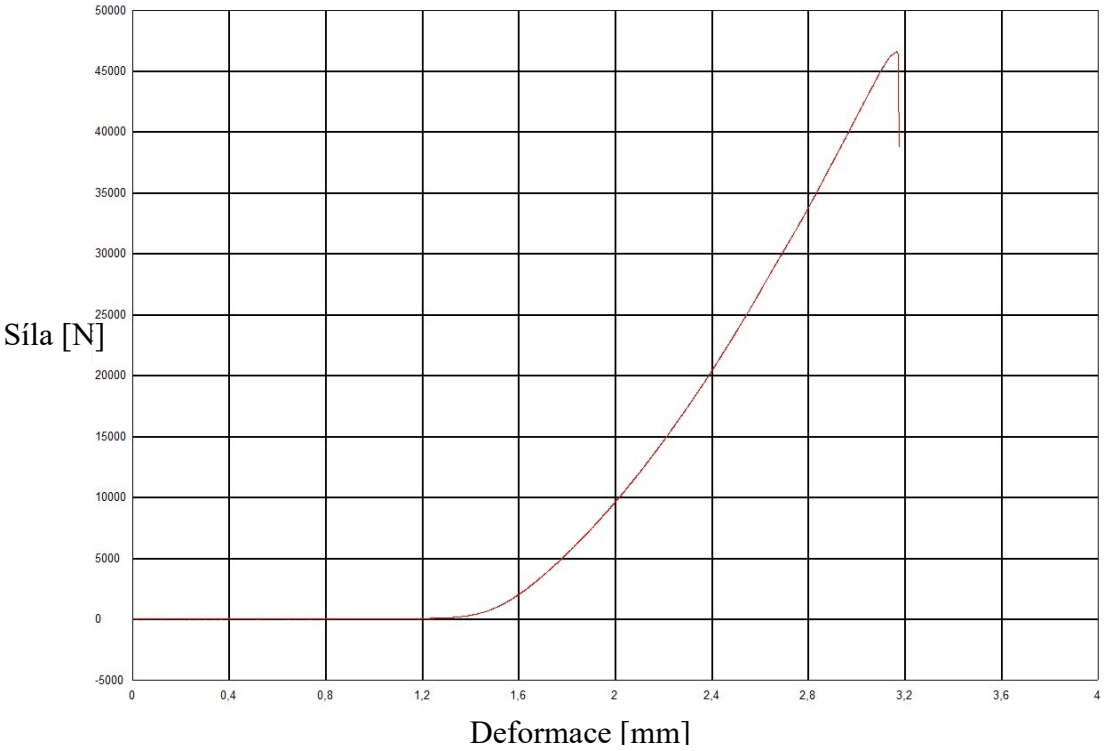
12.2.4.1 Naměřené grafy u skladby [45;0]



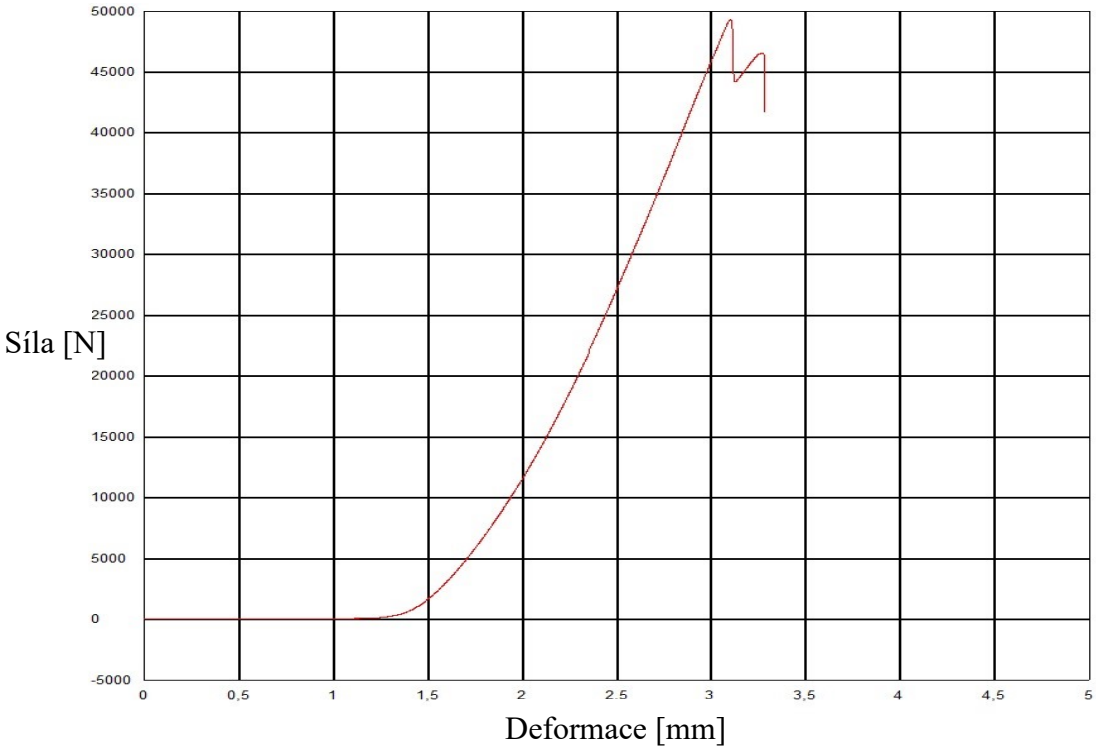
Graf 12 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 1



Graf 13 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 2



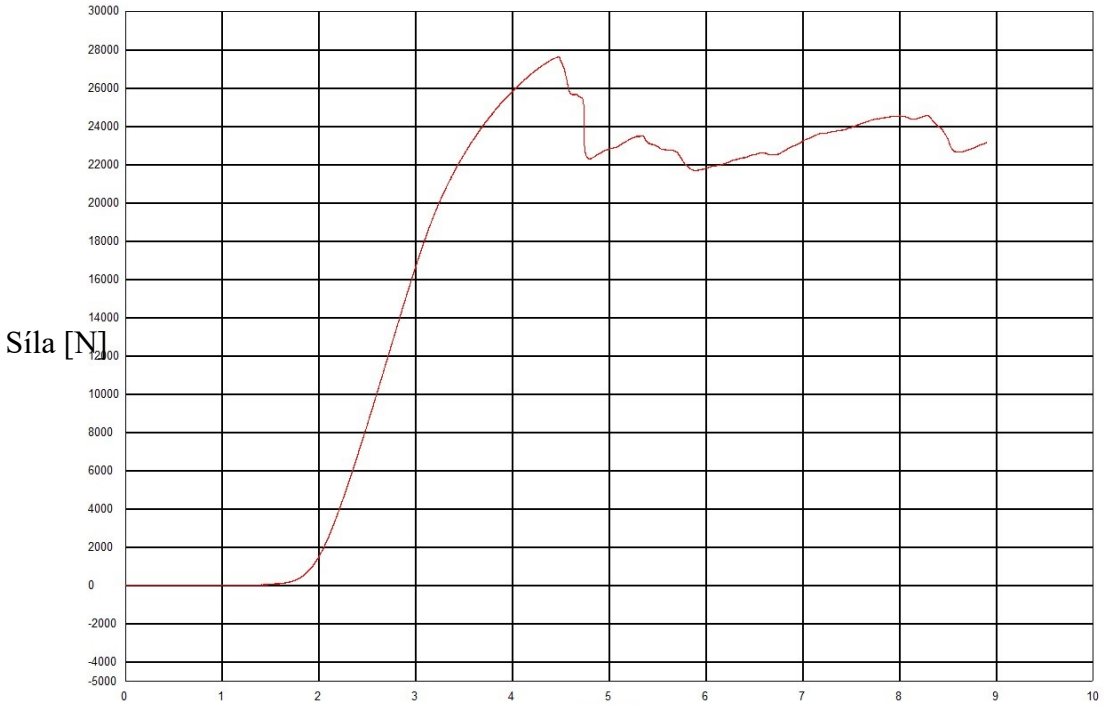
Graf 14 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 3



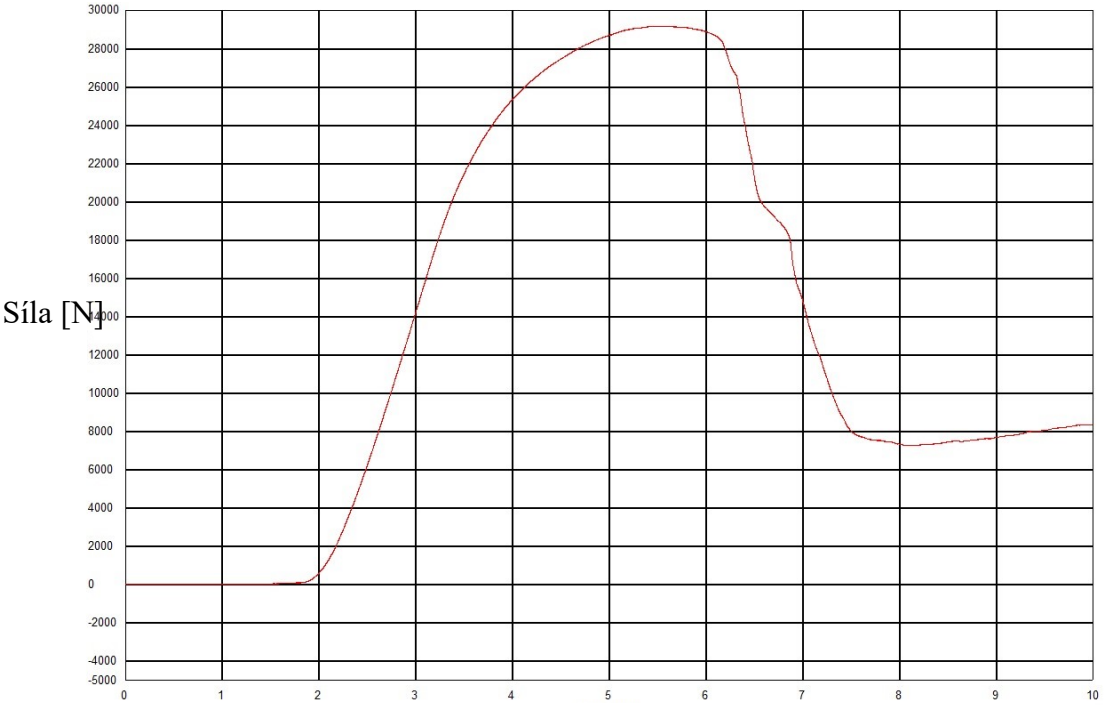
Graf 15 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 4

Z naměřených hodnot zanesených v grafech 12 až 15 je vidět stejný průběh zkoušky u obou vzorků. Působící síla narůstá mezi 1 – 1,5 mm deformace až do hodnoty mezi 45 000 – 50 000 N. Z naměřených hodnot následně vypočteme mez pevnosti v tlaku ze znalosti působící sily a ploše testovaného vzorku.

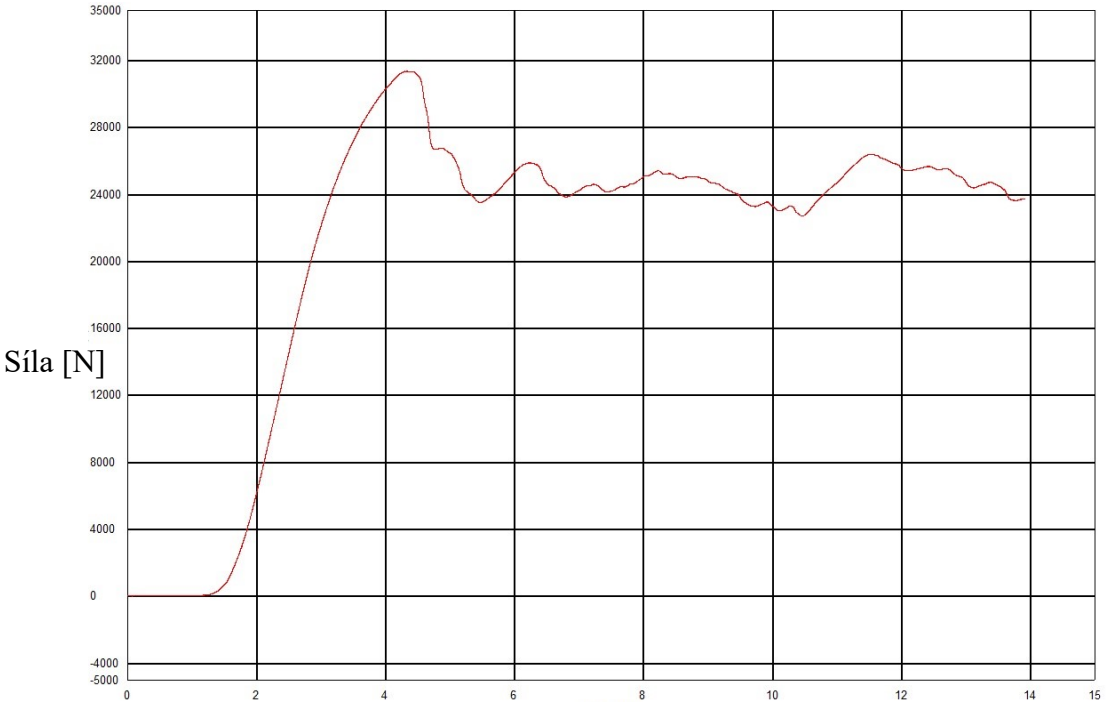
12.2.4.2 Naměřené grafy u skladby [45;45]



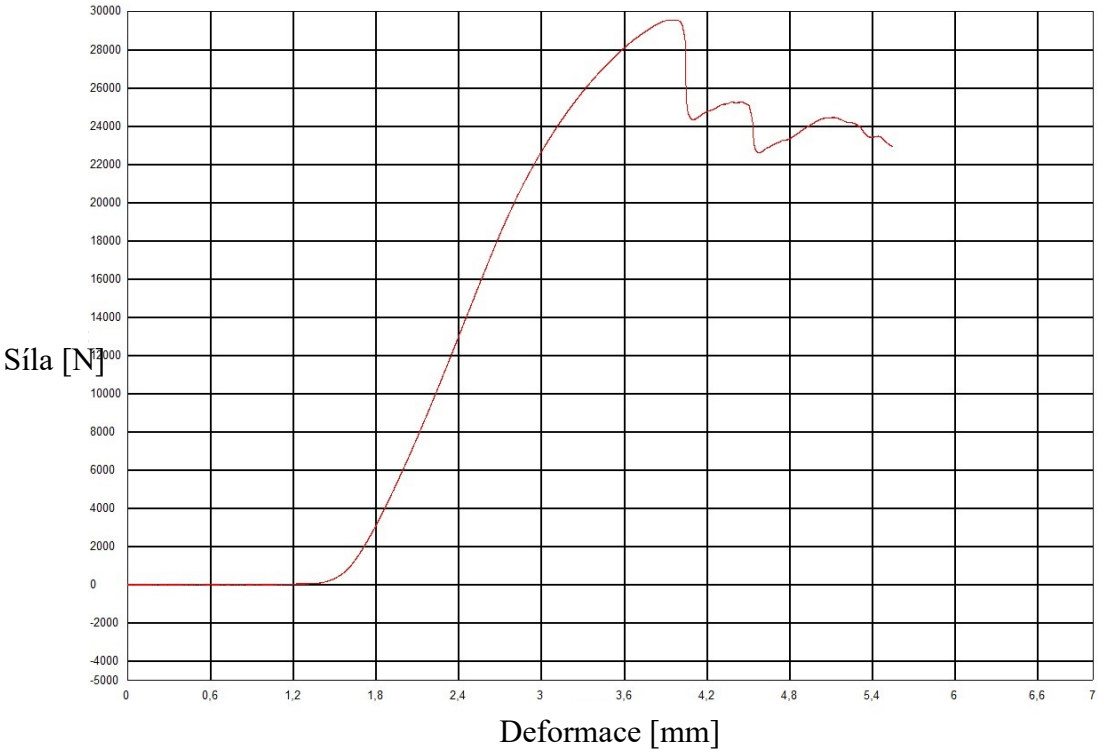
Graf 16 Závislost tlakové síly a deformace u vzorku 1



Graf 17 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 4



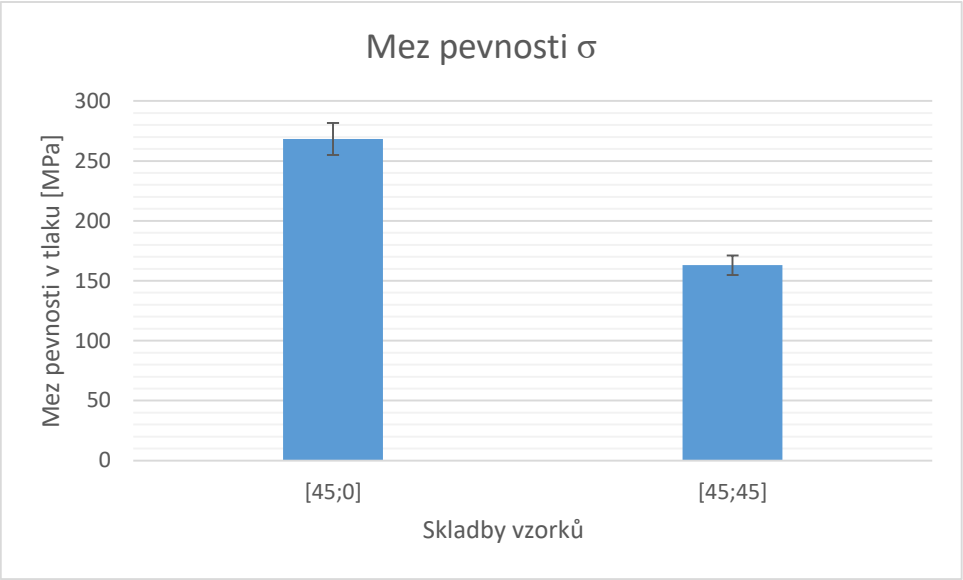
Graf 18 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 3



Graf 19 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 4

Z grafů 16 a 19 je patrný nárůst síly od hodnoty 2 mm a roste lineárně, až do hodnoty cca 20000 N. K porušení je dosaženo u všech vzorků kolem hodnoty 28000 N. Z naměřených hodnot následně vypočteme mez pevnosti v tlaku ze znalosti působící sily a ploše testovaného vzorku.

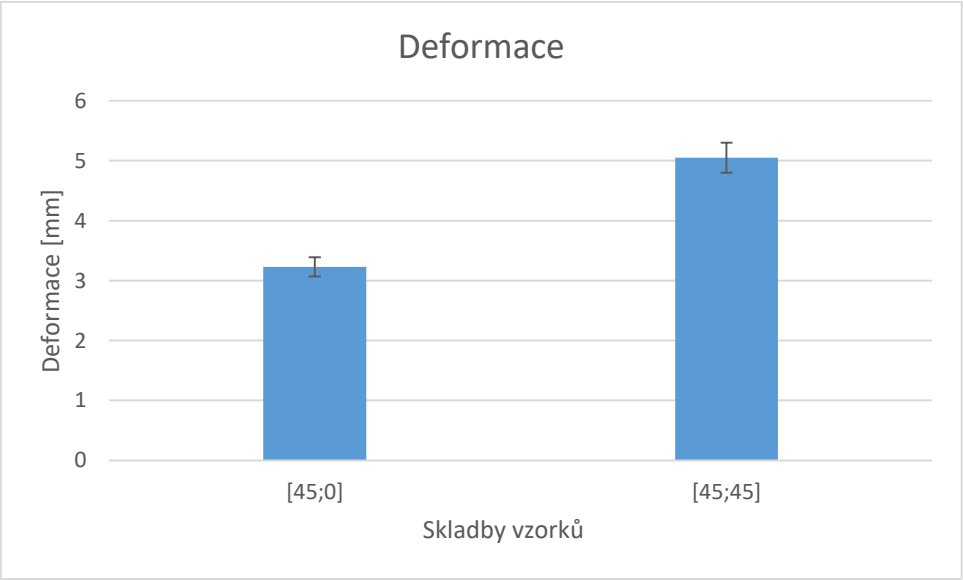
12.2.5 Vyhodnocení meze pevnosti v tlaku



Graf 20 Porovnání meze pevnosti v tlaku mezi skladbou [45;0] a [45;45]

Z naměřených hodnot byly vypočítány hodnoty pro mez pevnosti v tlaku. Následným zanesením do grafu a porovnáním vyšlo, že skladba vzorku [45;0] měla vyšší hodnotu a to 268,3 MPa. Houževnatější skladba vzorku [45;45] měla naměřenou hodnotu meze pevnosti 163 MPa.

12.2.6 Vyhodnocení deformace



Graf 21 Porovnání deformace

Z grafu 17 je zřejmé, že vazba [45;45] je daleko houževnatější než vazba [45;0]. U vazby [45;45] byla naměřená hodnota 5,05 mm a u druhé skladby 3,23 mm.

13 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Ekonomické zhodnocení zahrnuje několik faktorů, které úzce souvisí s konečnými náklady, jako jsou například náklady na materiál, práci, spotřebované energie během výroby, provoz, nástroje a odpisy vzniklé během výroby. Náklady na pracovní sílu se budou lišit podle místa a kraje, kde je práce vykonávaná. Ve Zlínském kraji činí na dělnickou práci průměrně 193 Kč na 1 odpracovanou hodinu. Ze získaných hodnot sestavuji relativní náklady, na výrobu dutého kruhového profilu, na kterém se testovaly mechanické zkoušky. Celou polovinu nákladu tvoří materiál. V případě prototypů to byl prepreg epoxid + uhlík. Cena byla poměrně vysoká a to z důvodu nákladné výroby uhlíkových vláken. Zpracování dochází při zvýšené teplotě 130 – 150 °C, což vysvětluje téměř 20% spotřebované energie. Vzhledem k ručnímu zakládání prepregu a přípravě membrány tvoří asi 25 %. Zbylých 5 % tvoří jednorázové materiály, jako jsou hadicové svorky, membrána a odpad při řezání prepregu.

Tabulka 10 Kalkulace spotřeby materiálu

Prepreg 1m^2 = 1000Kč	Dutý profil kruh profilu ϕ30x450 mm
Spotřebovaný materiál	0,4m^2
Cena	400 Kč

Spotřebovaný materiál je s 5-ti % přídavkem pro přesahy a dosažená požadované tvaru výrobku.

Tabulka 11 Kalkulace výrobních nákladů

Výrobní náklady		Dutý kruhový profil ϕ30x450 mm
Materiál	Polotovar	400 Kč
	Energie	150 Kč
	Práce	48 Kč
	Odpisy	59 Kč
	Ostatní	42 Kč
Výrobní proces	Nástroje a zařízení	120 Kč
	Práce	115 Kč
	Ostatní	195Kč
Celkem		1129 Kč

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo optimalizovat výrobu dutých profilů, hlavně kruhového průřezu a také průřezu nekruhového. Následně vyrobené vzorky kruhového profilu byly otestovány na ohyb, tlak a byly vyhodnoceny naměřené hodnoty. Hlavním faktorem, který ovlivnil výsledky zkoušek, byla orientace vláken v jednotlivých vzorcích při výrobě.

Vzorky byly vyrobeny ve firmě FORM s.r.o. pomocí prepreg technologie s využitím vzduchové membrány. Bylo vyrobeno celkem 9 zkušebních prototypů ve formě profilu kruhové průřezu o vnějším průměru 30 mm a tloušťce stěny 2mm a celkové délce 450 mm. Následně byly pomocí kotoučové pily nařezány na požadované délky a to pro zkoušku ohybem, na délku 200 mm a pro zkoušku tlakem 50 mm. Celkový počet zkušebních těles byl 12 pro zkoušku ohybem a 15 pro zkoušku tlakem. Skladby jednotlivých vzorků se lišily orientací vláken pod odlišnými směry a to [0;0], [45;45] a [45;0]. K výrobě vzorků byl využit prepreg z firmy FIBERPREG s označením KORDCARBON-CPREG-200-T-3K-EP-TR-120-42. Výztuž prepregu měla plátnovou strukturu a celková gramáž prepregu byla 200 g/cm^3. Testování proběhlo na zkušebním stroji ZWICK 1456. Na tomto zkušebním stroji proběhly zkoušky na tříbodový ohyb a na tlak. Testování probíhalo za pokojové teploty. Při testování vzorků na tlak nebyla na stroji ZWICK 1456 dosažena potřebná zatěžující síla pro plnohodnotné vyhodnocení zkoušky. Byla tedy vyhodnocena pouze veličina modul pružnosti v tlaku. Zkouška byla následně dokončena na stroji Shimadzu AG-20kN/50kNNICD, maximální zatěžující síla byla 50 kN, ovšem pro vzorek se skladbou [0;0] nebyla ani tato hodnota zatěžující síly dostatečná a měření nebylo možné provést.

Při zkoušce na tříbodový ohyb byly vyhodnocovány veličiny modul pružnosti, mez pevnosti, poměrná deformace a vykonaná práce spotřebovány při mezi pevnosti. Při měření modulu pružnosti byla naměřená nejvyšší hodnota u skladby vzorku [45;0] 9814,8 MPa a nejnižší hodnota u skladby [45;45] 7141,5 MPa. Při měření hodnoty meze pevnosti byly naměřeny nejvyšší hodnoty u skladby [45;0] 151,9 MPa a nejnižší hodnota u skladby [45;45] 128,3 MPa. Tato hodnota byla pouze o 1,3 MPa menší oproti hodnotě skladby [0;0]. Nejvyšší hodnoty naměřené u veličiny poměrné deformace byly u vzorku skladby [45;45] 7% a nejnižší u skladby [45;0] 5,4 %. Vykonaná práce spotřebovaná při mezi pevnosti byla nevyšší naměřena hodnota u skladby [45;45] 27 988,59 Nmm a nejnižší u skladby [0;0] a to 23564,48 Nmm. Při měření vzorku na zatížení tlakem byly vyhodnocovány vzorky na modul pružnosti v tlaku, mez pevnosti v tlaku a deformaci. Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti

byly naměřeny u vzorku se skladbou [0;0] 3 990,9 MPa a nejnižší hodnota u skladby [45;45] 2992,5 MPa. Tato hodnota byla až o 1000 MPa nižší než u skladby [0;0]. Při měření meze pevnosti a deformace byly měřeny pouze dva vzorky a to se skladbou [45;45] a [45;0]. Vyšší hodnota meze pevnosti byla naměřena u vzorku se skladbou [45;0] a to 268,3 MPa u skladby [45;45] to byla hodnota 163 MPa. Vyšší naměřená deformace v milimetrech, byla u vzorku se skladbou [45;45] 5,05 mm. U vzorku se skladbou [45;0] to byla hodnota 3,23 mm.

Z naměřených dat a jejich porovnáním vyplývá, že nejhouževnatější, jak při zkouškách ohybem, tak tlakem, byla orientace vláken pod úhly [45;45]. U skladby [45;45] byly naměřeny nejvyšší hodnoty u poměrné deformace a vykonané práce při zkoušce ohybem. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u veličin modulu pružnosti a meze pevnosti. Tyto výsledky znamenají největší houževnost ze tří měřených skladeb. Naměřené hodnoty u skladby [45;0] byly největší u modulu pružnosti a u meze pevnosti. Nejnižší hodnota pak byla naměřena u poměrné deformace. Z těchto výsledků plyne, že vzorky se skladbou vláken [45;0] mají největší pevnost a nejmenší houževnatost. U skladby [0;0] v níž jsou vlákna rovnoběžná, byly naměřeny hodnoty veličin meze pevnosti a poměrné deformace a tyto hodnoty jsou mezi hodnotami ostatních dvou skladeb testovaných vzorků. U veličiny vykonané práce byla hodnota nejnižší ze všech třech skladeb a u hodnoty modulu pružnosti v tlaku byly hodnoty nejvyšší. U vzorků s orientací vláken [0;0] bylo provedeno pouze měření zkoušky v ohybu a vyhodnocení modulu pružnosti v tlaku, ani 50kN zátěže nestačilo pro vykonání zkoušky na zkušebním tělese o daných rozměrech. Z naměřených hodnot na stroji Shimadzu AG-20kN/50kNNICD plyne, že mez pevnosti je vyšší u skladby [45;0] než u skladby [45;45]. Naopak u deformace byly naměřeny vyšší hodnoty u skladby [45;45]. To ukazuje na vyšší houževnatost u skladby [45;0], stejně jako u zkoušek v ohybu.

Při výrobě čtvercové profilu nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. V technologii je mnoho úskalí. Pro vyřešení některých technologických problémů jsou zapotřebí kvalitnější nástroje, jako je přesnější forma, přesnější silikonový mezikus. V této práci jsem nastínil základní problematiku při výrobě. Největší problém je v konstantním rozložení tlaku v membráně a v dutině formy. Vývoj bude ve firmě FORM s.r.o. dále pokračovat. Jedna z možných cest a optimalizací je výroba nového, přesnějšího silikonového mezikusu nebo kontaktování firmy, která se zabývá výrobou podobných membrán a využití jejich zkušeností a know-how.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] VNOUČEK, M. *Přednáška SMA: Kompozitní materiály*, [On-line].

[Cit. 2016-11-12] Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf

[2] GPD KORAL COMPOSITE. [On-line]. [Cit. 2016-11-12] Dostupné z:

http://www.gdpkoral.cz/co-jsou-kompozitni-materialy/w6

[3] KOMPOZITNÍ MATERIÁLY, *Přehled*. [On-line]. [Cit. 2016-11-12] Dostupné z: https://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/Kompozitn%C3%AD-materi%C3%A1ly.pdf

[4] BOUCHAL, P. *Technologie výroby a zpracování uhlíkových kompozitů*: diplomová práce. Brno: Vysoké Učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 42 s., 0 přil, Vedoucí diplomové práce. Miroslav Piška. [On-line] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84979

[5] LATECOERE, *Výroba dílů z kompozitních materiálů* [On-line]. [Cit. 2017-3-3] Dostupné z: http://www.letov.cz/vyrobni-technologie/vyroba-dilu-z-kompozitnich-materialu/

[6] KOŘÍNEK, *Z Kompozity*, 2005. České Vysoké Učení Technické v Praze, Ústav Materiálového Inženýrství. [On-line]. [Cit. 2017-3-3] dostupné z: http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf

[7] HAVEL COMPOSITES, *Technologie výroby kompozitů*. [On-line]. [Cit. 2017-3-3] dostupné z: http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html

[8] ČVUT, *Kompozitní materiály*. [On-line]. [Cit. 2017-3-3] Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf

[9] AZO MATERIALS, *Composite prepregs-manufacturing,benefits and applications* [On-line]. [Cit. 2017-3-3] Dostupné z: http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8353

[10] MANUFACTURING PROCESSES, *Prepregs* [On-line]. [Cit. 2017-3-3] Dostupné z: http://www.fisica.unige.it/~rocca/Didattica/Material%20Science/SERP%2013%20-%20COMPOSITE%20PREPREGS%2009-12-13.pdf

[11] COMPOSIT FABRICATION METHOD [On-line]. [Cit. 2017-3-3] Dostupné z: http://abdmatrix.com/site/openrepository/files/Composite%20Fabrication%20Method.pdf

[12] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI,

mechanika kompozitních materiálů [On-line]. [Cit. 2017-3-3] Dostupné z: http://www.kme.zcu.cz/kmet/mkm/999_p02_ta.php

[13] JASTRZEMBSKA, A. *Vlastnosti kompozitních profilů s dlouhovláknovou výztuží a polymerní matricí*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2013, 92 stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

[14] JANDERA, Tomáš. *Diagnostický systém kompozitních materiálů*: diplomová práce. Plzeň: Západočeská univerzita v plzni, Katedra technologií a měření, 2015, 117 s., 0 příl., Vedoucí diplomové práce. Václav Metlík [On-line]. [Cit. 2017-4-5] Dostupný z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/18890/DP_JanderaTomas_E13N0009P_Diagnosticky%20system%20kompozitnich%20materialu.pdf?sequence=1

[15] MECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, *analytické metody výpočtu stabilních úloh kompozitních desek a sendvičových panelů a jejich porovnání s mkp*. [On-line]. [Cit. 2017-4-8] Dostupné z: http://www.kompozity.info/clanky/compdb/ztrata_stability_kompozitu.pdf

[16] MM SPEKTRUM, *Problémy při obrábění kompozitních materiálů*. [On-line]. [Cit. 2017-4-10] Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html

[17] TRČKA, R. *Obrábění součásti z kompozitního materiálu*: diplomová práce. Brno: Vysoké Učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 41 s., 0 příl, Vedoucí diplomové práce. Milan Kalivoda. [On-line] [Cit. 2017-4-10]

Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83554

[18] TŮMA, J. *Postup lepení kompozitního rámu horského kola*: diplomová práce. Brno: Vysoké Učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 35 s., 0 přil, Vedoucí diplomové práce. Jaroslav Kubíček. [On-line]. [Cit. 2017-4-12] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5551

[19] HAVEL COMPOSITES, *Výroba rámu z uhlíkových vláken*. [On-line]. [Cit. 2017-4-12] Dostupné z: http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/133-Vyroba-ramu-kola-z-uhlikovych-vlaken.html

[20] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobku z polymeru*: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2013. 113 s., ISBN 978-80-7318-948-8

[21] PREFA KOMPOZITY, *Kompozitní profily* [On-line]. [Cit. 2017-4-12] Dostupné z: http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/pultruze-tazeni/

[22] TŮMA, J. *Postup lepení kompozitního rámu horského kola*: Balaklářská práce. Brno: Vysoké Učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 35 s., 0 přil, Vedoucí diplomové práce. Jaroslav Kubíček [On-line]. [Cit. 2017-4-14] Dostupná z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5551

[23] FIBRE GLAST, *What are prepregs*. [On-line]. [Cit. 2017-4-14] Dostupná z: http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center

[24] ŠUBA, O. *Mechanické chování těles.* 4. vyd., UTB Zlín, 2009.

[25] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s ISBN 978-80-86960-29-6

[26] Hexcel [On-line]. [Cit. 2017-4-16] Dostupná z: http://hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf?w=500

[27] HROMADA, P. *Mechanické vlastnosti pultruzních profilů*: diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2013, 98 stran. Vedoucí diplomové práce Soňa Rusnáková, [On-line]. [Cit. 2017-4-29] Dostupný

z:http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25117/hromada_2013_bp.pdf?sequence=1

[28] PREFA KOMPOZITY, *Dimenzování kompozitních profilů* [On-line]. [Cit. 2017-5-1] dostupné z: http://www.prefa-kompozity.cz/produkty/kompozitni-profily-prefen/

[29] HAUFLER COMPOSITES, *Carbonfaserprepregs* [On-line]. [Cit. 2017-5-1] dostupné z: http://www.haufler.com/content/carbonfaser/carbonfaserprepregs/

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

LOI	Limitní oxidační číslo
F_{max}	Maximální síla
S_m	Míra deformace
δ_p	Mez pevnosti
σ_f	Napětí v ohybu
F	Působící síla
L	Rozpětí
b	Šířka zkušebního tělesa
h	Tloušťka zkušebního tělesa
σ	Napětí v tahu
S	Obsah průřezu zkoušeného tělesa
Δl	Prodloužení materiálu
l_o	Původní délka zkoušeného tělesa
E	Youngův modul pružnosti
E	Poměrné prodloužení napětím
ε_f	Příslušná deformace ohybem
λ	Štíhlost profilu
l	Délka sloupu
r	Kvadratický poloměr průřezu
K	Koeficient typu sloupu
σ_{Ddk}	Dovolené napětí v tlaku krátký sloup
σ_{Ddd}	Dovolené napětí v tlaku dlouhý sloup
$P_{k,dov}$	Dovolené zatížení krátký sloup
$P_{d,dov}$	Dovolené zatížení dlouhý sloup

σ_{Dk}	Mez pevnosti krátký sloup
σ_{Dd}	Mez pevnosti dlouhý sloup
D_l	Vnější průměr
t	Tloušťka stěny
E_o	Modul pružnosti v ohybu
σ_{Fm}	Mez pevnosti v ohybu
ε_{OFM}	Poměrná deformace na mezi pevnosti
W_{FM}	Práce spotřebována při mezi pevnosti
$\bar{x}$	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
υ	Poissonův součinitel

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Druhy výztuže v kompozitním materiálu [2] 12
Obrázek 2 Druhy kompozitních materiálů [2] 12
Obrázek 3 Kompozitní materiál druhého druhu [3] 13
Obrázek 4 Kompozitní materiály třetího druhu [3] 14
Obrázek 5 Ukázka rovingu [4] 15
Obrázek 6 Rohož [4] 16
Obrázek 7 Vazba plátnová, keprová, saténová [2] 16
Obrázek 8 Pramen [4] 17
Obrázek 9 Příze [3] 17
Obrázek 10 Střiž [4] 18
Obrázek 11 Elementární vlákno [5] 18
Obrázek 12 Vytvrzování v autoklávu [5] 20
Obrázek 13 Schéma vakuového lisování prepregu [6] 21
Obrázek 14 Vytvrzovací režim (charakteristika) pro vakuové lisování prepregu [26] 21
Obrázek 15 Uhlíkový prepreg [29] 23
Obrázek 16 Metoda výroby prepregu pomocí horké taveniny [11] 27
Obrázek 17 Rozpouštědlový způsob výroby prepregu [11] 27
Obrázek 18 Zavakuovaný díl připravený na vytvrzování [12] 29
Obrázek 19 Vkládání zavakuovaného dílu do autoklávu [12] 29
Obrázek 20 Pultruzní linka [27] 31
Obrázek 21 Šroubovicové navíjení 32
Obrázek 22 Pólové navíjení za mokra [6] 33
Obrázek 23 Schéma membránové napjatosti skořepin [24] 35
Obrázek 24 Defekty při výrobě nekruhových dutých profilů 36
Obrázek 25 Defekt odseparování (delaminace) 36
Obrázek 26 Dělený profil 37
Obrázek 27 Dělený profil vyztužený voštinou ve spodní části 37
Obrázek 28 Kompozitový rám kola 39
Obrázek 29 Použití pultruzních profilů v letectví 40
Obrázek 30 Použití dutých profilů v letectví 40
Obrázek 31 Tříbodový a čtyřbodový ohyb [27] 43

Obrázek 32 Průběh ohybových momentů u tříbodového a čtyřbodového ohybu [27] 43
Obrázek 33 Příklad vyhodnocení průběhu síla na posunutí [28] 47
Obrázek 34 Porovnání středních průběhů závislosti síla na posunutí jednotlivých zkoušených sérií [28] 47
Obrázek 35 Hliníková forma pro výrobu kruhových profilů 51
Obrázek 36 Úprava formy 51
Obrázek 37 Dutina formy čtvercového profilu 52
Obrázek 38 Dřevěný rám formy 52
Obrázek 39 Složená forma 53
Obrázek 40 Vzorek po vytažení z formy neopracovaný 54
Obrázek 41 Vzorek č. 1 čtvercového průřezu 55
Obrázek 42 Plotr Zünd M-1600 57
Obrázek 43 Znečištěná forma 57
Obrázek 44 Očištěná a naseparovaná forma 58
Obrázek 45 Utěsnění konce membrány 58
Obrázek 46 Spojení a utěsnění ventilu v membráně 59
Obrázek 47 Vzorek připraven k zaformování 60
Obrázek 48 Vzorek po odformování 61
Obrázek 49 Silikonový mezikus 61
Obrázek 50 Záslepka membrány se silikonovým mezikusem 62
Obrázek 51 Ventil membrány se silikonovým mezikusem 62
Obrázek 52 Připravená membrána s mezikusem na zakládání prepregu 62
Obrázek 53 Založený prepreg a připraven na vložení do formy 63
Obrázek 54 Úprava formy 64
Obrázek 55 Pórovitost 65
Obrázek 56 Delaminace 65
Obrázek 57 Prepreg v dělící rovině 66
Obrázek 58 Vady při nízkém tlaku v membráně 66
Obrázek 59 Delaminace v rozích vzorku 67
Obrázek 60 Silikonový mezikus 69
Obrázek 61 Zkušební stroj ZWICK 1456 70
Obrázek 62 Zkouška ohybem kruhového profilu 71

Obrázek 63 Uložení zkušebního tělesa 72
Obrázek 64 Vzorek po dokončení zkoušky 73
Obrázek 65 Křehký lom u vzorku č.1 74
Obrázek 66 Vada vzorku č. 4 pórovitost 75
Obrázek 67 Vada vzorku č. 4 špatné prosycení vzorku pryskyřicí 75
Obrázek 68 Vzorek se skladbou [45;0] 76
Obrázek 69 Zkouška na tlak po výměně čelistí 81
Obrázek 70 Shimadzu AG-20kN/50kNNICD 82

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti nejčastěji používaných organických matric [3] 15
Tabulka 2 Výhody a aplikace matric [26] 25
Tabulka 3 Přehled organických matric a jejich vlastnosti [13] 26
Tabulka 4 Závislost času na teplotě při vytvrzování [12] 28
Tabulka 5 Koeficient K [28] 46
Tabulka 6 Přehled testovaných vzorků 54
Tabulka 7 Statistika pro skladbu [0;0] 72
Tabulka 8 Statistika pro skladbu [45;45] 74
Tabulka 9 Statistika pro skladbu [45;0] 75
Tabulka 10 Kalkulace spotřeby materiálu 92
Tabulka 11 Kalkulace výrobních nákladů 93
Tabulka 12 Hodnoty naměřené v ohybu pro skladbu [0;0] 108
Tabulka 13 Hodnoty naměřené v ohybu pro skladbu [45;45] 108
Tabulka 14 Hodnoty naměřené v ohybu pro skladbu [45;0] 108
Tabulka 15 Hodnoty naměřené v tlaku pro skladbu [0;0] 108
Tabulka 16 Hodnoty naměřené v tlaku pro skladbu [45;45] 109
Tabulka 17 Hodnoty naměřené v tlaku pro skladbu [45;0] 109

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1Závislost napětí na poměrné deformaci u skladby [0;0] 73
Graf 2 Závislost Napětí na poměrné deformaci u skladby [45;45].....74
Graf 3 Závislost napětí a poměrné deformace u skladby [45;0].....76
Graf 4 Porovnání modulu v ohybu mezi jednotlivými vzorky 77
Graf 5 Porovnání meze pevnosti v ohybu mezi jednotlivými vzorky 78
Graf 6 Porovnání poměrné deformace mezi jednotlivými vzorky 79
Graf 7 Porovnání vykonané práce k dosažení meze pevnosti mezi jednotlivými vzorky 80
Graf 8 Závislost napětí na poměrné deformaci v tlaku u struktury [0;0] 83
Graf 9 Závislost napětí na poměrné deformaci v tlaku u skladby [45;45] 84
Graf 10 Závislost napětí na poměrné deformaci v tlaku u skladby [45;0] 85
Graf 11 Porovnání modulu pružnosti v tlaku u jednotlivých vzorků 86
Graf 12 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 1.....87
Graf 13 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 2.....87
Graf 14 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 3.....88
Graf 15 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 4.....88
Graf 16 Závislost tlakové síly a deformace u vzorku 1 89
Graf 17 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 4.....89
Graf 18 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 3.....90
Graf 19 Závislost tlakové síly na deformaci u vzorku 4.....90
Graf 20 Porovnání meze pevnosti v tlaku mezi skladbou [45;0] a [45;45] 91
Graf 21 Porovnání deformace.....91

SEZNAM PŘÍLOH

P I Naměřené hodnoty vzorků

P II Materiálový list KORDCARBON-CPREG-200-T-3K-EP-TR-120-42

P III Materiálový list separátoru FREKETEN 700-NC

P IV Výrobní výkres spodní části formy

P V Výrobní horní části formy

P VI Sestava formy, kusovník

P VII Výrobní výkres profilu kruhového průřezu

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY VZORKŮ

Tabulka 12 Hodnoty naměřené v ohybu pro skladbu [0;0]

	E_O	σ_{Fm}	ε_{OFM}	W_{FM}
Číslo vzorku	MPa	MPa	%	Nmm
1	8697,3	131	5,9	24122,2
2	8973,5	124,8	5,8	23645,43
3	8879,4	141,7	5,5	23973,31
4	8708,4	120,8	5,7	22516,97

Tabulka 13 Hodnoty naměřené v ohybu pro skladbu [45;45]

	E_O	σ_{Fm}	ε_{OFM}	W_{FM}
Číslo vzorku	MPa	MPa	%	Nmm
1	7352,7	130,7	6,6	26649,35
2	7234,8	130,1	7,4	29729,00
3	7173,4	130,9	6,6	25952,82
4	6805,0	121,4	7,5	29623,18

Tabulka 14 Hodnoty naměřené v ohybu pro skladbu [45;0]

	E_O	σ_{Fm}	ε_{OFM}	W_{FM}
Číslo vzorku	MPa	MPa	%	Nmm
1	9876,6	153,9	5,2	23462,25
2	9922,1	153,4	6,2	30624,98
3	9767,2	150	4,9	21875,92
4	9693,1	150,4	5,3	24478,7

Tabulka 15 Hodnoty naměřené v tlaku pro skladbu [0;0]

	E
Číslo vzorku	MPa
1	3818,4
2	4139,9
3	4060,5
4	4181,2
5	3754,6

Tabulka 16 Hodnoty naměřené v tlaku pro skladbu [45;45]

	E	σ	ε
Číslo vzorku	MPa	MPa	mm
1	2959,9	154,9	4,5
2	2925,6	161,7	5,5
3	3061,6	177,4	4,3
4	2908,9	166,3	3,9
5	3106,3	165,8	4,1

Tabulka 17 Hodnoty naměřené v tlaku pro skladbu [45;0]

	E	σ	ε
Číslo vzorku	MPa	MPa	mm
1	3812,3	264,6	3,1
2	3679,2	257,9	3,3
3	3961,3	261,8	3,1
4	3691,7	272,9	3,1
5	3085,1	271,8	3,0

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST KORDCARBON-CPREG-200-T-3K-EP-TR-120-42

Mar. 2017

FIBERPREG

Technical Datasheet

KORDCARBON-CPREG-200-T-3K-EP-TR-120-42

NOMENCLATURE

Kordcarbon$_1$ – Cpreg$_2$ – 200$_3$ – T$_4$ – 3K$_5$ – EP-Tr$_6$ – 120$_7$ – 42$_8$

1: Trade Mark

2: Fiber Material impregnated (Cpreg… Carbon)

3: Area Weight in [g/m²]

4: Fiber Orientation (T…Twill)

5: Yarn (3.000 Filaments)

6: Resin (EP…Epoxy, Transparent)

7: Glass Transition Temperature Tg in [°C]

8: Resin Content ±2 in [Mass.-%]

DESCRIPTION

This product is a carbon fabric impregnated with Epoxy based resin for manufacturing as prepreg material.

- Solvent free
- Curing at 120 °C
- Good drape ability
- Good flow properties
- Excellent fiber wetting
- Excellent thermal and mechanical properties
- Short curing time

FIELD OF APPLICATION

This material is developed for following applications:

- Structural parts
- Body panels
- Automotive & Motorsports
- Prosthesis
- Visible parts
- Design engineering

Fiberpreg GmbH, Carl Zeiss Str. 7, 89231 Neu-Ulm, Germany
Tel.: +49 (0) 731 / 921 533 – 0
info@fiberpreg.com

Fiberpreg CZ, a.s., Velká nad Veličkou 890, 696 74, Czech Republic
Tel.: +420 518 312 193
info@fiberpreg.com

Mar. 2017

FIBERPREG

UNCURED RESIN PROPERTIES

Property	Symbol	Unit	Value
Density at 22 °C	ρ	g/cm³	1,23
Glass Transition Temperature	Tg	°C	110
Content in prepreg	ψM	Mass-%	42*
Shelf life		Months	2 (20 °C)

*content can be set from 30 – 50 %

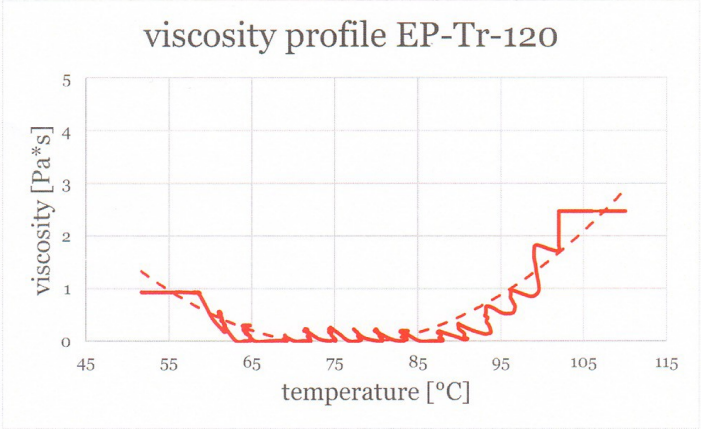


Figure 1: Viscosity profile depending on temperature for resin system EP-Tr-120 (temperature ramp 3 °C/min)

DRY FABRIC PROPERTIES

Property	Symbol	Unit	Value
Material	C	Carbon	
Fiber Diameter	Ø	µm	7
Fiber Density	ρF	g/cm³	1,76
Yarn	3K, 200 tex		
Fabric Weave	T	Twill 2/2	
Area Weight	-	g/m²	200
by DIN EN 1049 - 2			
Sett of Warp		n/cm	5
Sett of Weft		n/cm	5

Fiberpreg GmbH, Carl Zeiss Str. 7, 89231 Neu-Ulm, Germany
Tel.: +49 (0) 731 / 921 533 – 0
info@fiberpreg.com

Fiberpreg CZ, a.s., Velká nad Veličkou 890, 696 74, Czech Republic
Tel.: +420 518 312 193
info@fiberpreg.com

Mar. 2017

FIBERPREG

PREPREG PROPERTIES**

Property	Symbol	Unit	Value
Layer Thickness	h	mm	0,23
by ASTM D3171 – Method II			
Fiber Volume Content	φ	%	49,9
by DIN EN ISO 527 – 5 / A / 2			
Tensile Strength	σ_m	MPa	683
Strain to Failure	ε_B	%	1,2
Young's Modulus	E_t	MPa	54.800
by ASTM D3410 - HCCF			
Compression strength	F^{cu}	MPa	459
by DIN EN 2563			
Inter-Laminar Shear Strength	τ	MPa	68,20

**cured in press at 110 °C, 1,5 h, 235 kN/m²

PREPREG CURING AUTOCLAVE

1. apply -1 bar vacuum to laminate, simultaneously increase autoclave-cavity pressure to 5 bar
2. increase temperature at 2 °C/min to 110 ± 5 °C, hold temperature and pressure for 90 ± 5 min
3. decrease temperature at 15 ± 3 °C/min to 40 °C
4. release vacuum and pressure - below 40 °C – to atmospheric pressure

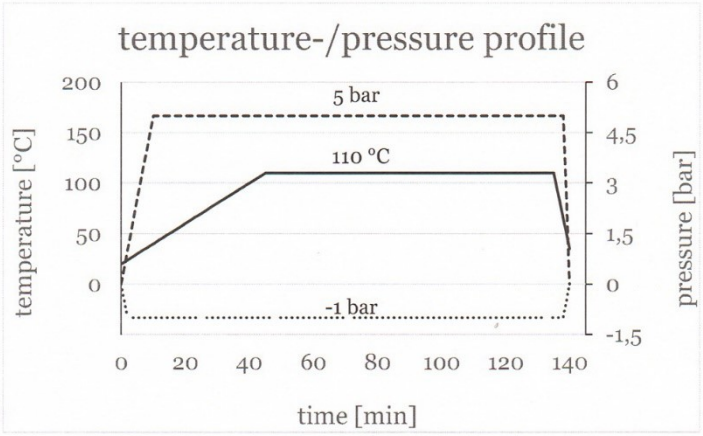


Figure 2: recommended temperature and pressure for curing resin system EP-Tr-120 in autoclave

Fiberpreg GmbH, Carl Zeiss Str. 7, 89231 Neu-Ulm, Germany
Tel.: +49 (0) 731 / 921 533 – 0
info@fiberpreg.com

Fiberpreg CZ, a.s., Velká nad Veličkou 890, 696 74, Czech Republic
Tel.: +420 518 312 193
info@fiberpreg.com

Mar. 2017

FIBERPREG

PREPREG CURING PRESS

1. increase pressure to 235 kN/m²
2. increase temperature at 2 °C/min to 110 ± 5 °C
3. hold temperature and pressure for 90 ± 5 min
4. reduce temperature at 15 ± 3 °C/min to 40 °C
5. release pressure

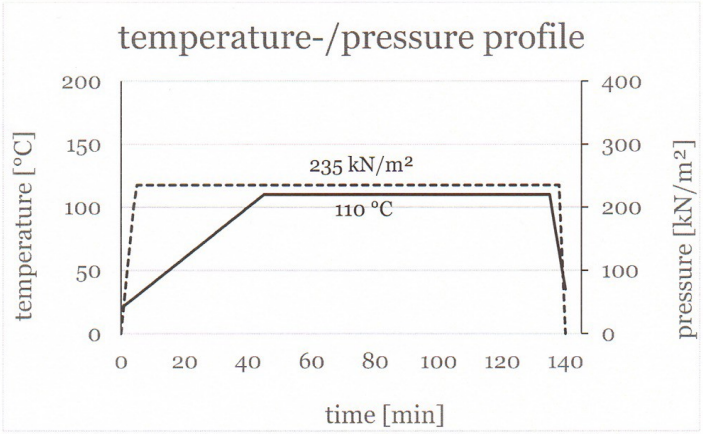


Figure 3: recommended temperature and pressure for curing resin system EP-Tr-120 in press

These technical information result from accurately testing and investigations. Regarding to various specific processes, they must be seen as nonbinding values for orientation. Therefore, a claim for warranty can not be derived from this information.

Fiberpreg GmbH, Carl Zeiss Str. 7, 89231 Neu-Ulm, Germany
Tel.: +49 (0) 731 / 921 533 – 0
info@fiberpreg.com

Fiberpreg CZ, a.s., Velká nad Veličkou 890, 696 74, Czech Republic
Tel.: +420 518 312 193
info@fiberpreg.com

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST SEPARATORU FREKETEN 700-NC

Technical Data Sheet

FREKOTE®

700-NC™

October 2009

PRODUCT DESCRIPTION

700-NC™ provides the following product characteristics:

Technology	Mold Release
Appearance	Clear, colorless[LMS]
Chemical Type	Solvent Based Polymer
Odor	Solvent
Cure	Room temperature cure
Cured Thermal Stability	≤400 °C
Application	Release Coatings
Application Temperature	13 to 135 °C
Specific Benefit	• No chlorinated solvents • High gloss finish • High slip • No contaminating transfer • No mold build-up

700-NC™ offers excellent release properties for the most demanding applications and is a great all-purpose release agent. 700-NC™ releases epoxies, polyester resins, thermoplastics, rubber compounds and most other molded polymers.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity @ 25 °C 0.755 to 0.764[LMS]

Flash Point - See MSDS

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials

For safe handling information on this product, consult the Material Safety Data Sheet (MSDS).

Mold Preparation
Cleaning:

Mold surfaces must be thoroughly cleaned and dried. All traces of prior release must be removed. This may be accomplished by using Frekote® PMC or other suitable cleaner. Frekote® 915WB™ or light abrasives can be used for heavy build-up.

Sealing New/Repaired Molds:

Occasionally, green or freshly repaired molds are rushed into service prior to complete cure causing an increased amount of free styrene on the mold surface. Fresh or "production line" repairs, new fiberglass and epoxy molds should be cured per manufacturer's instructions, usually a minimum of 2 -3 weeks at 22°C before starting full-scale production. Fully cured previously unused molds should be sealed before use. This can be accomplished by applying one to two coats of an appropriate Frekote® mold sealer, following the directions for use instructions. Allow full cure of the appropriate Frekote® mold sealer before you apply the first coat of 700-NC™ as outlined in the directions of use.

Directions for use:

1. 700-NC™ can be applied to mold surfaces at room temperature up to 135°C by spraying, brushing or wiping with a clean lint-free, cloth. When spraying ensure a dry air source is used or use an airless spray system. Always use in a well ventilated area.
2. Wipe or spray on a smooth, thin, continuous, wet film. Avoid wiping or spraying over the same area that was just coated until the solvent has evaporated. If spraying, hold nozzle 20 to 30cm from mold surface. It is suggested that small areas be coated, working progressively from one side of the mold to the other.
3. Initially, apply 2 to 3 base coats allowing 5 to 10 minutes between coats for solvent evaporation .
4. Allow the final coat to cure for 15 to 20 minutes at 22°C.
5. Maximum releases will be obtained as the mold surface becomes conditioned to 700-NC™. Performance can be enhanced by re-coating once, after the first few initial pulls.
6. When any release difficulty is experienced, the area in question can be "touched-up" by re-coating the entire mold surface or just those areas where release difficulty is occurring.
7. **NOTE**: 700-NC™ is moisture sensitive, keep container tightly closed when not in use. The product should always be used in a well ventilated area.
8. **Precaution:** Users of closed mold systems(rotomolding) must be certain that solvent evaporation is complete and that all solvent vapors have been ventilated from the mold cavity prior to closing the mold. An oil-free compressed air source can be used to assist in evaporation of solvents and ventilation of the mold cavity.

Mold Touch up

Touch up coats should only be applied to areas where poor release is noticed and should be applied using the same method as base coats. This will reduce the possibility of release agent or polymer build-up. The frequency of touch ups will depend on the polymer type, mold configuration, and abrasion parameters.

Loctite Material Specification[LMS]

LMS dated May 10, 2006. Test reports for each batch are available for the indicated properties. LMS test reports include selected QC test parameters considered appropriate to specifications for customer use. Additionally, comprehensive controls are in place to assure product quality and consistency. Special customer specification requirements may be coordinated through Henkel Quality.

Henkel

Storage
The product is classified as flammable and must be stored in an appropriate manner in compliance with relevant regulations. Do not store near oxidizing agents or combustible materials. Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may also be indicated on the product container labelling.
Optimal Storage: 8 °C to 21 °C. Storage below 8 °C or greater than 28 °C can adversely affect product properties. Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representive.

Conversions
(°C x 1.8) + 32 = °F
kV/mm x 25.4 = V/mil
mm / 25.4 = inches
µm / 25.4 = mil
N x 0.225 = lb
N/mm x 5.71 = lb/in
N/mm^2 x 145 = psi
MPa x 145 = psi
N·m x 8.851 = lb·in
N·m x 0.738 = lb·ft
N·mm x 0.142 = oz·in
mPa·s = cP

Note
The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage
Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Reference 0.0