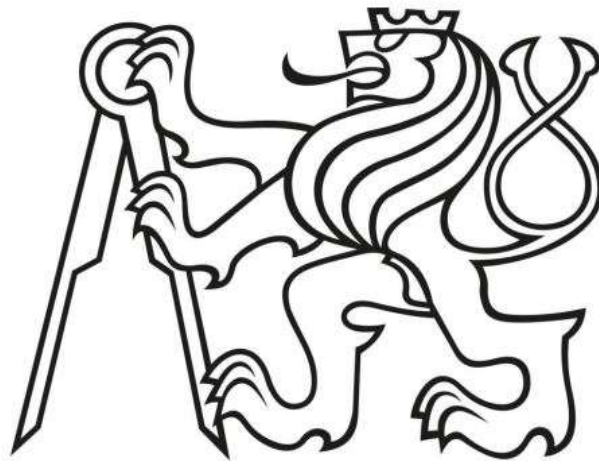


**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2022

**VÍT
HORÁK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horák** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **495473**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů s různou skladbou matic.

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical Properties Analysis of composite materials with different composition of matrices.

Pokyny pro vypracování:

Rozdělení kompozitních materiálů a jejich oblasti využití. Popis stávajících technologií výroby kompozitních materiálů. Návrh experimentu - porovnání vlastností různě kladených komp. materiálů. Vyhodnocení výsledků a závěr.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Bareš, R., Kompozitní materiály : SNTL Praha., 1988
- [2] Krebs, S. Bryksí-Stunová, B., Kolařík, L.: Podklady k výuce předmětu Technologie zpracování plastů a kompozitů, FS ČVUT v Praze, 2019
- [3] Motyčka, M., Technologie výroby kompozitních materiálů, ZČU v Plzni, 2007
- [4] Brent Strong, A., Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, Society of Manufacturing Engineers, Michigan 2008, USA

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Holub, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

Ing. Lukáš Holub, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a veškeré citované literární či jiné zdroje informací uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Lukáši Holubovi Ph.D. za rady a ochotu při vedení mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Karolíně Výletové a Ing. Vítu Novákovi za cenné rady, čas a pomoc při experimentu. Poděkování rovněž náleží mé rodině za podporu během celé délky tohoto studia.

Anotace

Autor: Vít Horák

Název práce: Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů s různou skladbou matic

Vedoucí BP: Ing. Lukáš Holub, Ph.D.

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Školní rok: 2021/22

Klíčová slova: prepreg, matrice, autokláv, kompozit, tahová zkouška, kompozity

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývala rozdělením kompozitních materiálů a jejich oblasti využití. Následně popisovala stávající technologie výroby kompozitních materiálů.

V praktické části byly vytvářeny 4 kompozitní vzorky s různými orientacemi výztuže, konkrétně orientace 45° a 90°. Z každé kompozitní desky o 12 vrstvách, která byla vytvořena za pomoci autoklávové technologie. Pomocí vodního paprsku byla vyříznuta 4 zkušební tělesa. Následně byly porovnávány jejich výsledky z tahové zkoušky s přihlédnutím k jejich struktuře, kterou bylo možné pozorovat z metalografického výbrusu za pomoci mikroskopu.

Anotation

Author: Vít Horák

Thesis title: Mechanical Properties Analysis of composite materials with different composition of matrices

Supervisor: Ing. Lukáš Holub, Ph.D.

Institute: Ústav strojírenské technologie

School year: 2021/22

Key words: prepreg, matrix, autoclave, composite, tensile testing, composite

Annotation:

This bachelor thesis deals with distribution of composite materials and their areas of application. Further on it describes the building and production technologies of composites.

In practical part i've made 4 composite samples with various orientation of reinforcement, particularly 45° and 90°. From each composite sample of 12 layers, which was made using autoclave technology, using a high-pressure water jet machine i've made 4 test samples. Each made sample has been subjected to a tensile strength test which, when comparing it to their respective structure gave me insight into analysing the results. The structural analysis has been conducted using a metallographic grinding and a microscope.

Obsah

Úvod	9
1. Kompozitní materiály	10
1.1. Výhodné vlastnosti kompozitních materiálů	10
1.2. Negativní vlastnosti kompozitních materiálů	11
2. Klasifikace kompozitních materiálů	11
2.1. Dělení dle disperzní fáze	11
2.2. Kompozity III. druhu	11
2.3. Kompozity II. druhu	12
2.4. Kompozity I. druhu	12
2.4.1. Rozdělení dle typu použité matrice	12
2.4.2. Rozdělení dle typu použité výztuže	12
3. Matrice	12
4. Výztuž	12
4.1. Vlákna	13
4.1.1. Skleněné vlákno	13
4.1.2. Uhlíkové vlákno	14
4.1.3. Aramidové vlákno	14
4.2. Prepreg	14
5. Tkaniny	15
5.1. Plátňová vazba	15
5.2. Vazba panama	16
5.3. Keprová vazba	16
6. Výroba	17
6.1. Ruční laminování	17
6.1.1. Ruční kladení	17
6.1.2. Výroba formy	18
6.2. Lisování	18
6.3. Lisování za studena	18
6.4. Lisování pomocí vakua	19
6.5. Nanášení postřikem	19
6.6. Navíjení	20

6.7.	RTM-metoda lisování se vstřikem matrice	21
6.7.1.	Výrobní postup se skládá z následujících operací:	21
6.8.	L-RTM.....	21
6.9.	Pultruze.....	22
6.9.1.	Výhody.....	22
6.9.2.	Nevýhody.....	22
6.10.	Vytvrzování v autoklávu	23
7.	Destruktivní a nedestruktivní zkoušky materiálu.....	23
7.1.	Defekty v kompozitních materiálech.....	23
8.	Praktická část bakalářské práce	25
8.1.	Výroba kompozitních vzorků pro tahovou zkoušku a metalografický výbrus.....	25
8.1.1.	Dělení materiálu užitím metody vodního paprsku	29
8.2.	Zkouška tahem.....	32
8.3.	Metalografický výbrus	36
8.3.1.	Mikroskopické vyhodnocení struktury vzorků	37
9.	Závěr	40

Úvod

V dnešní době je v průmyslové praxi stále více upřednostňován kompozitní materiál díky svým výborným vlastnostem a nízké hmotnosti. Těchto vlastností nejvíce využívá letecký a automobilový průmysl společně s medicínskými aplikacemi.

V teoretické části se tato BP zabývá rešerší kompozitních materiálů a jejich oblastí využití. Následně popisuje stávající technologie výroby kompozitních materiálů.

Praktická část BP měla za cíl provést mechanickou analýzu kompozitních materiálů při různých orientacích výztuže. Experiment byl navrhnout tak, že byla zkoumána výztuž při orientaci 45° a 90°.

Byly vyrobeny 4 kompozitní desky za použití autoklávové technologie. Každá takto vyrobená deska měla 12 vrstev.

Následně byla za pomoci technologie řezání vodním paprskem z každé desky vyříznuta 4 zkušební vzorky. Tyto vzorky byly následně podrobeny tahové zkoušce až do jejich porušení. Poté z každé ze 4 desek byly odebrány doprovodné vzorky pro metalografický výbrus. Tato metoda destruktivního testování měla za cíl odhalit defekty ve struktuře.

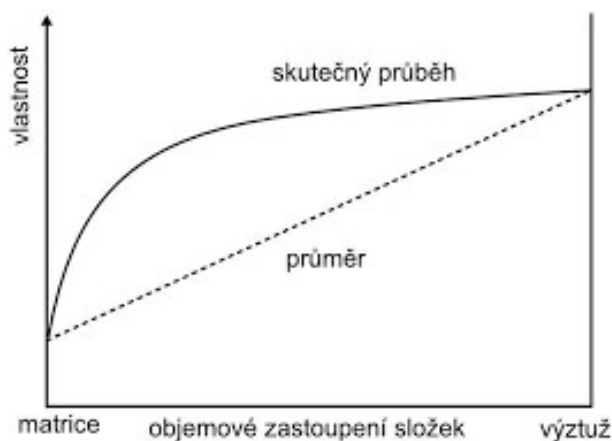
S přihlédnutím k mikroskopickým snímkům a výsledkům z tahové zkoušky bylo možné vyhodnotit určité mechanické vlastnosti jednotlivých kompozitních vzorků.

1. Kompozitní materiály

Definice těchto materiálů říká, že kompozitem je každá směs materiálu, která se skládá alespoň ze dvou hlavních složek (fází), které se navzájem odlišují fyzikálními, chemickými a mechanickými vlastnostmi. Takto lišící se materiály jsou navzájem kombinované za účelem vytvoření materiálu nového. Vlastnosti výsledného kompozitu se odvíjejí od kombinace použitých materiálů a jejich objemových podílů ve výrobku. Obecně platí, že výsledné vlastnosti takto vytvořeného materiálu, by měly předčít vlastnosti jednotlivých použitých fází. Tento jev je také známý jako synergický efekt (viz.obr.1). Kompozitní materiály jsou tvořeny ze dvou složek, tzv. komponentů. Jedná se o matici a výztuž.

Hlavní úlohou matrice je spojení a obklopení výztuže, tímto je schopná matrice přenášet zatížení mezi jednotlivými vlákny. Funguje také jako plnivo a pojivo, před vytvrzením je formovatelná a může se tak přizpůsobit tvaru námi zadaného profilu.

Úkolem výztuže je pak přenesení hlavního zatížení materiálu na matici. Kombinací výztuže a matrice, které tvoří heterogenní soustavu, vzniká materiál homogenní. Takový materiál má různé mechanické vlastnosti podle typu zatížení vláken materiálu. Nejedolnější je materiál ve směru kladení vláken matrice. Výhodou je, že vlastnosti můžeme ovlivňovat různou orientací těchto vláken a můžeme tak materiál přizpůsobit naší aplikaci. Každý podnik, který kompozity využívá si je připravuje tzv. „na míru“ a je obeznámen se všemi pozitivními a negativními vlastnostmi procesu. [1, 2, 3]



Obrázek 1: Synergický efekt složek kompozitu [4]

1.1. Výhodné vlastnosti kompozitních materiálů

- Nízká hmotnost
- Výborné mechanické vlastnosti (pevnost a tuhost)
- Odolnost vůči korozi a chemickému poškození (díky polymerní matrici)
- Usnadnění montáže, můžeme nahradit několik součástí jedním kompozitním materiálem
- Vyšší odolnost vůči únavě než hliníkové slitiny a oceli (při správném směru zatížení)
- Dobré výsledky při mechanickém a statickém zatížení

1.2. Negativní vlastnosti kompozitních materiálů

- Vysoká cena, rozdíl oproti klasickým ocelím a slitinám je třeba až 20x vyšší
- Kvůli způsobu výroby a použitých materiálu matrice je tepelná odolnost značně nižší než u oceli či jiných slitinách
- Špatné mechanické vlastnosti při zatížení mimo zadané využití (kolmo k orientaci uložení vláken), toto platí pro kompozitní materiály vyztužené vlákny
- Nákladné při dimenzování náročných konstrukcí
- Horší identifikace lokálního poškození (při nárazu) v porovnání s běžně používanými materiály [2, 3]

2. Klasifikace kompozitních materiálů

Kompozity lze dělit podle mnoha kritérií:

- podle typu matrice
- podle disperzní fáze
- podle tvaru disperze

2.1. Dělení dle disperzní fáze

- I. druhu – pevná disperze
- II. druhu – kapalná disperze
- III. druhu – plynná disperze

2.2. Kompozity III. druhu

Řadí se sem typy pěnových hmot:

- Kovové pěny – hliníková pěna
- Pěnokeramika – pěnokorund
- Pěnoplasty – pěnový polystyren [1, 3]



Obrázek 2: Hliníková pěna [5]

2.3. Kompozity II. druhu

Jedná se o málo rozšířenou variantu kompozitních materiálů. Do těchto materiálů spadají například materiály použité na výrobu samomazných ložisek, které se vyrábějí spékáním kovu s disperzí oleje. Také se využívají pro výrobu ložisek motorů a strojů pracujících pod vodou, např. čerpadla. [3, 6]

2.4. Kompozity I. druhu

Jedná se o nejvyužívanější druh kompozitních materiálů v technických aplikacích. Jsou zpravidla rozdělovány podle typu použité matrice a výztuže

2.4.1. Rozdělení dle typu použité matrice

Kompozity s polymerní matricí (PMC)

Kompozity s kovovou matricí (MMC)

Kompozity s keramickou matricí (CMC)

2.4.2. Rozdělení dle typu použité výztuže

Kompozity vyztužené vláknem (s dlouhým nebo krátkým)

Kompozity vyztužené částicemi (s malými nebo velkými)

Kompozity strukturní (vrstvené) [3, 6]

3. Matrice

Je to spojitá a poddanější složka, která v materiálu plní funkci pojiva a výztuže. Účelem matrice je:

- správná distribuce napětí,
- ochrana výztuže před abrazivním poškozením,
- zajištění interlaminární pevnosti
- zajištění elektrických a elektrochemických vlastností.

Důležité je zajištění dostatečné přilnavosti (adheze) na rozhraní fází vlákno-matrice. [1, 3]

4. Výztuž

Jedná se o nespojitou fázi kompozitu, která by měla být v kompozitu rovnoměrně dispergována. V zásadě se využívají dva druhy výztuže, buď se jako zpevňovací fáze využívají vlákna, nebo částice. Vlákna mají lepší mechanické vlastnosti než částice, a proto se využívají především v aplikacích, kde je třeba přenesení určité mechanické zátěže. Částice se dodávají v různých tvarech např. koule, krychle, kvádr či jiné druhy polygonu. Ty se také v určité míře podílejí na přenosu zatížení, avšak jejich hodnoty nejsou srovnatelné s hodnotami v tahu a

tlaku vláknové výztuže. Částice se používají především v elektrikářských aplikacích, anebo třeba tam, kde je třeba zvýšit koeficient tření nebo zvýšení odolnosti proti opotřebení.

Pevnost vláken se zvyšuje se snižujícím průměrem, protože přirozeně vyskytující se defekty v jejich struktuře jsou u malých průřezů také menší. Většinou se průměry vláken pohybují v rozsahu 5–20 μm . Menší průměry se z technologických důvodů nevyužívají. [1, 3]

4.1. Vlákná

Vlákná se obecně dělí na organická a anorganická. Mezi organické spadají vlákná polymerní. Mezi anorganická vlákná se dále řadí vlákná skleněná, uhlíková či borová.

Vyztužující vlákná mají v kompozitu za úkol zajištění především mechanických vlastností materiálů tzn. modul pružnosti, který ovlivňuje tuhost, dále pevnost v tahu, teplotní a elektrickou vodivost, hustotu a tažnost. [1, 3]

4.1.1. Skleněné vlákno

Hlavní výhodou tohoto vlákna je jeho nízká cena oproti svým konkurentům. Má dobré mechanické vlastnosti, v porovnání s uhlíkovými vlákny vykazují mnohem horší mechanické vlastnosti. Skleněná vlákna výborně odolávají korozi, této vlastnosti se nejvíce využívá v leteckém průmyslu. Konstrukce takových dílů je často situována tak, že vnitřní část kompozitu je tvořena z mechanicky pevnějších uhlíkových vláken a vnější část je vyrobena z vláken skleněných. Toto spojení jednotlivých vláken propůjčuje dílu větší korozní odolnost. [1, 3]



Obrázek 3: Skleněná vlákna [6]

4.1.2. Uhlíkové vlákno

Jedná se o nejpoužívanější typ výztuže. Díky svým mechanickým vlastnostem (jeden z nejlepších poměrů pevnosti, modulu pružnosti a tuhosti ku měrné hmotnosti) mají u výrobců preferenci při využití ve výrobě. Uhlíkové vlákno je vyráběno z prekurzoru, který vzniká buď tavným zvlákňováním, nebo zvlákňováním z roztoku. Struktura prekurzoru ovlivní výstupní strukturu vláken. Před karbonizací je třeba provést oxidaci při relativně nízkých teplotách 200–450 °C na 20–30 minut. Následuje karbonizace v inertní (N₂) atmosféře. Při teplotách v rozmezí 1000–2000 °C dojde k rozkmitání vlákna a tím je většina neuhlíkových atomů odstraněna, Výsledné vlákno obsahuje 85–95 % uhlíku.

Pokud potřebujeme, aby vlákno mělo vyšší modul pružnosti, zařazujeme za karbonizaci ještě grafitizaci. Provádí se v inertní atmosféře v teplotách mezi 2400–3000 °C. Při tomto procesu dojde ke zvýšení obsahu uhlíku až na cca 99 %.

Výsledný povrch karbonového vlákna špatně váže epoxidy a další látky užívané při výrobě kompozitních materiálů. Z tohoto důvodu se povrch vlákna ještě mírně oxiduje. Oxidace zajistí lepší přilnavost dalších látek a zhrubnutí povrchu, které umožní lepší mechanické spojení s danými látkami. Okysličení se provádí například: přístupem plynů (vzduch, oxid uhličitý nebo ozon), nebo ponořením do různých kapalin (chlornan sodný, kyselina dusičná).

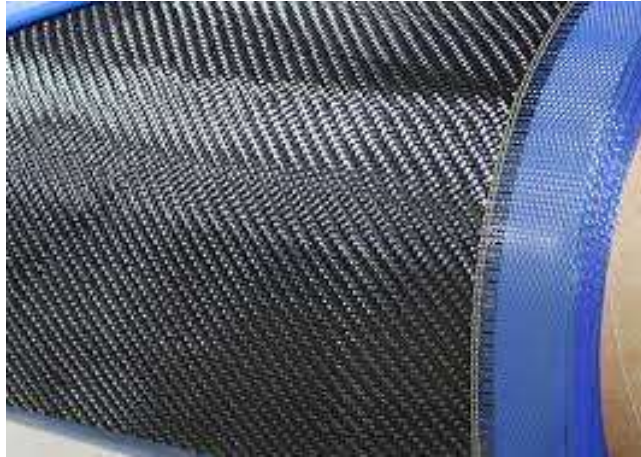
Výsledné vlákno je několik mikronů tenké (5-8 μm). [1, 3]

4.1.3. Aramidové vlákno

Toto organické vlákno je tvořené z lineárních polymerů, které jsou orientovány podle osy vlákna. Tyto silně anizotropní vlákna (vlastnosti směru vlákna jsou odlišné, nižší, než ve směru vlákna) se většinou využívají jako náhrada azbestu ve třecích a brzdových obloženích, pro balistické aplikace nebo jako výztuž pro pneumatiky. Je to nejlehčí vyztužující vlákno, díky vysokým hodnotám pevnosti v tahu a modulu pružnosti funguje skvěle jako prostředek odolný vůči rázům. Z tohoto důvodu se vyskytuje hojně v letectví, ale také v neprůstřelných vestách, proto je aramidové vlákno především známe pod obchodním názvem kevlar. Nejčastějšími zástupci jsou kevlar 29, 49 a 129. Kevlar 29 se využívá na ochranné oděvy, lana a ochranné vesty. Kevlar 49 má větší modul než skleněné vlákno a používá se nejčastěji v letectví. Kevlar 129 má oproti kevlaru 29 o 15-20 % vyšší pevnost a o 30-35 % větší modul. Tento druh se využívá především v balistických aplikacích (neprůstřelné vesty). [1, 3]

4.2. Prepreg

Neboli předimpregnovaná vlákna či tkanina. Využívá se jako polotovar při výrobě kompozitních dílů. Matrice takové tkaniny je tvořena z částečně vytvrzených pryskyřic. Prepreg je tvárný a lze ho tvarovat podle potřeb aplikace. U pojiva dochází k samovytvrdování, tudíž má polotovar omezenou trvanlivost. Jednou z hlavních výhod prepregu je minimální poměr matrice k výztuži. Díky tomu lze zaručit dobrou opakovatelnost výrobního procesu a stabilitu. [2, 3]



Obrázek 4: Prepreg – předimpregnovaná tkanina v ochranné folii [8]

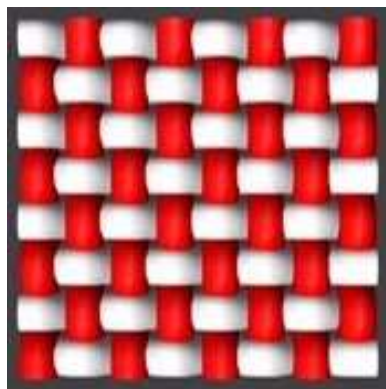
5. Tkaniny

Pro impregnaci, jak již bylo zmíněno, se nejčastěji využívají 2D tkaniny, tkanina je tvořena osnovou a útkem jen v jedné plošné rovině. Samozřejmě tkaniny se dají ve formě vrstvit, abychom dosáhli požadované tloušťky. Tkaniny dělíme podle typu jejich vazby, která je důležitá při tvarování ve formě. [9]

5.1. Plátnová vazba

Plátnová vazba je nejzákladnějším typem vazby. Je nejhustěji provázaná a má nejmenší střihu (plošná část textilie, kde se vzor pravidelně opakuje) 2x2 body vazby. Střídá se provazování útkového a osnovního vazného bodu. Husté vzájemné provázání útku a osnovy zaručuje minimální posuv a má za následek tužší tkaninu.

Tato vazba není vhodná pro prostorové tvarování, ale lze ji využít například ve stavebnictví, pro filtrační účely, anebo pro aplikace, kde je potřeba zaručit mechanickou odolnost proniknutí cizího tělesa. [9]



Obrázek 5: Plátnová vazba [9]

5.2. Vazba panama

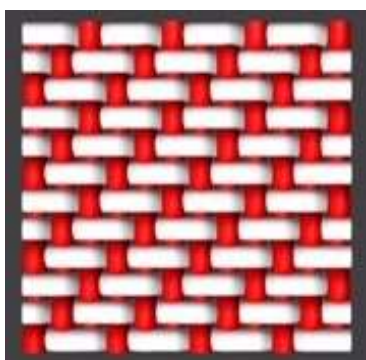
Vazba je odvozená z plátnové, základní, techniky. Nejmenší střída vazby je 4x4. Střída může této vazby může být i větší, ale musí být dělitelná dvěma, aby byl zachován stejný poměr nití. Vazba má menší počet přechodů než plátno. A protože je možný vzájemný posuv osnovních a útkových nití tak je vazba méně pevná, ale je tvárnější při aplikaci do forem. [9]



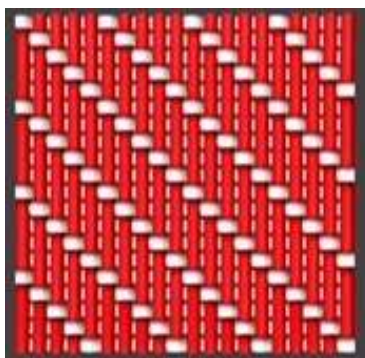
Obrázek 6: Vazba panama [9]

5.3. Keprová vazba

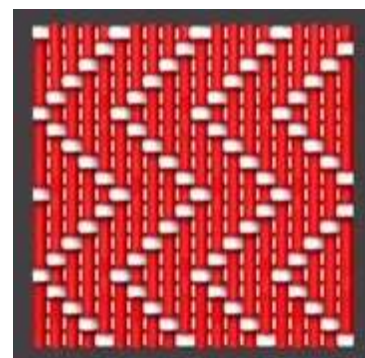
Vazba má nejmenší střídu 3x3. Útková nit je kladena nad dvěma osnovními nitěmi a pod jednou sousední osnovní nití. Každá další útková nit je posunuta o jednu nit do strany. Útková nit je kladena nad dvěma osnovními nitěmi a vedle je pouze jeden osnovní bod a následující útky jsou posunuty vždy o jednu stranou, vytváří se vzhledový efekt šikmých řádků. Další příklady keprových vazeb (viz. obrázek 7). [9]



a)



b)



c)

Obrázek 7: Příklady keprových vazeb a) útková 3x3 b) osnovní 5x5 levý c) osnovní 5x10 lomený [9]

6. Výroba

Výroba kompozitních materiálů nepředstavuje problém, dokud se bavíme o produkci v malém měřítku. Jakmile by šlo o větší výrobní objemy, tak nastávají mnohé obtíže. Především jde o materiál vyztužený uhlíkovými vlákny, kterými se tato bakalářská práce v praktické části zabývá. Například při využití kompozitních materiálů v „Automotive“, se musí rozlišovat kompozity na interiér vs na exteriér, tudíž na karosérii. Materiály použité uvnitř auta mají především odlehčovací a designový charakter. Proto není kladen důraz na jejich mechanické vlastnosti, a z tohoto důvodu se zde nemusí využívat různých vyztužovacích vrstev a složitých výpočtů na zajištění vlastností, jak je tomu u součástí exteriéru.

Pokud výrobu kompozitních materiálů nenecháme na externí firmě, tak je třeba myslet na problémy, které sebou nese obrábění kompozitních dílů. Například vrtání představuje riziko. Při klasickém vrtání dochází k tzv. delaminaci, tj. nerovnoměrné poškození vláken, které působí znehodnocení díry (viz. obr. 8.). Aby se tomuto jevu předešlo, je třeba použít speciální nástroje. Jejich využitím lze delaminaci eliminovat a zároveň vyřešit i problém s nízkou tepelnou vodivostí kompozitních materiálů, což jinak může způsobit např. pálení pryskyřice. Existuje mnoho postupů, kterých může firma při výrobě použít. [1, 10]

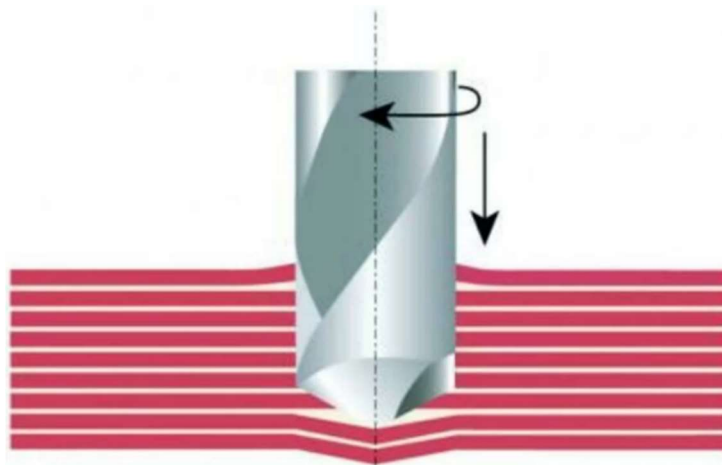
6.1. Ruční laminování

Pod toto označení výroby spadá technologie ručního kladení, lisování, stříkání [1, 11]

6.1.1. Ruční kladení

Ruční kladení je nejjednodušší a nejrozšířenější způsob fabrikace. Je hojně využíván především v malých sériích, v prototypové výrobě, ale také při vytváření velkoplošných dílů.

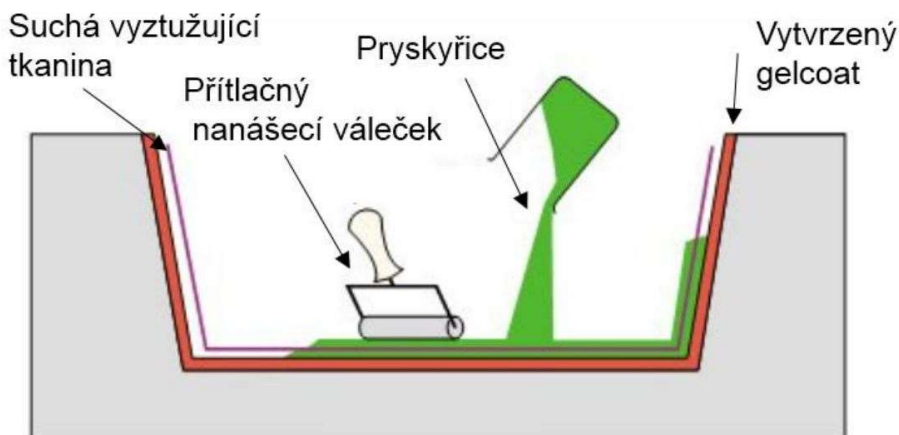
[1, 3]



Obrázek 8: Delaminace [12]

6.1.2. Výroba formy

Výroba formy je z časového hlediska nejnáročnější a při výrobě velkoplošných dílů může být technologicky obtížná. Materiál na produkci formy se odvíjí od požadovaného počtu výrobků. V kusové výrobě se využívají především formy ze dřeva či polystyrenu. Kvalita vyrobeného povrchu je díky typu použité technologie kvalitní pouze z jedné strany, což značně ovlivňuje způsoby využití finálního produktu.



Obrázek 9: Ilustrace ručního kladení [14]

Ruční kladení vyniká v jednoduchosti výroby oproti jiným alternativám produkce kompozitních materiálů. Dále má minimální náklady na nástroje a velice širokou škálu výrobitelných tvarů. Jednou z velkých nevýhod je velké množství nerecyklovatelného odpadu, který při výrobě vzniká. Další nevýhodou, jak již bylo zmíněno v předchozích odstavcích, je dlouhý výrobní čas jednotlivých kompozitních materiálů. Výsledná kvalita výrobku do jisté míry závisí i na zručnosti pracovníků, takže kvalita se může lišit.

Nejčastěji se tento typ výroby využívá v lodním průmyslu. [1, 13]

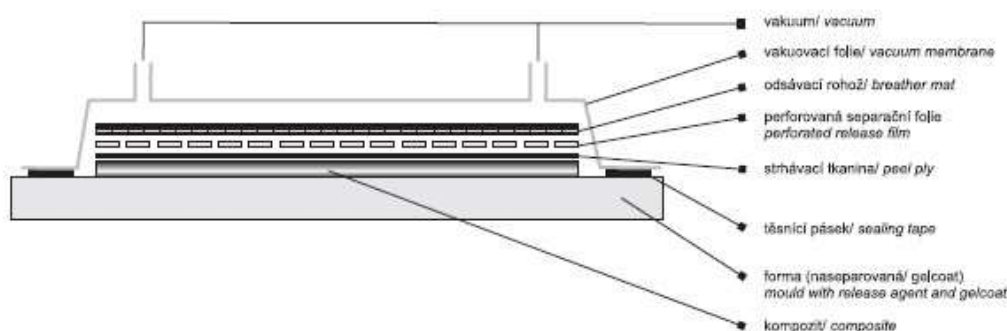
6.2. Lisování

Tento krok následuje po samotné výrobě kompozitu. Většinou slouží k odsátí vzduchových bublin a tím i ke zlepšení mechanických vlastností materiálu. Dá se ale samozřejmě využít například pro zvýšení obsahu výtzuže, a to tak, že vakuem odsajeme přebytečnou pryskyřici. [15, 16]

6.3. Lisování za studena

Provádí se za působení nízkého tlaku $0.3\text{--}10\text{ kg/cm}^2$ za pokojové teploty. Formy nejsou nijak vyhřívány, proto mohou být zhotovené z běžných materiálů (plech, dřevo, dřevotříska, laminát), které nejsou nějak zvláště nákladné. Tlak se většinou získává jednoduše, a to pomocí šroubových svěrek nebo hydraulických válců v rámcové konstrukce (viz. obr. 10) [15, 16]

Lisování pomocí vakua/ vacuum bagging



Obrázek 10: Vakuové lisování za studena [17]

6.4. Lisování pomocí vakua

Metoda využívaná hlavně pro zvýšení mechanických vlastností odsátím přebytečné pryskyřice a tím zvýšení obsahu výztuže v kompozitu. Především se aplikuje ve výrobě sendvičových materiálů, pro výrobu pěn a voštin se taktéž volí přítlak tlakem. Při použití měkkých sendvičových materiálů, které jsou prosycovány pryskyřicí, je rovněž možné použít vakuového lisování. Je ale nutné volit menší pracovní podtlak.

Při výrobě je výztuž aplikována do formy jako při ručním kladení. Na svrchní (poslední) konstrukční vrstvy se klade strhávací tkanina ze syntetických vláken, která usnadňuje následné operace (lepení, laminování nebo následné povrchové úpravy). Slouží především jako ochranná vrstva, protože při další manipulaci není třeba povrch odmašťovat, brousit anebo zdršňovat. Poté se aplikuje perforovaná separační folie a odsávací rohož, která má za úkol vstřebávat přebytečné pojivo a zároveň musí umožnit odsátí vzduchových bublin. V posledním kroku je aplikována pružná vakuovací folie, která je na obvodu formy přilepená těsnícím agentem (nejčastěji tmelem) a je použita jako těsnění pro zajištění správné funkce vakua.

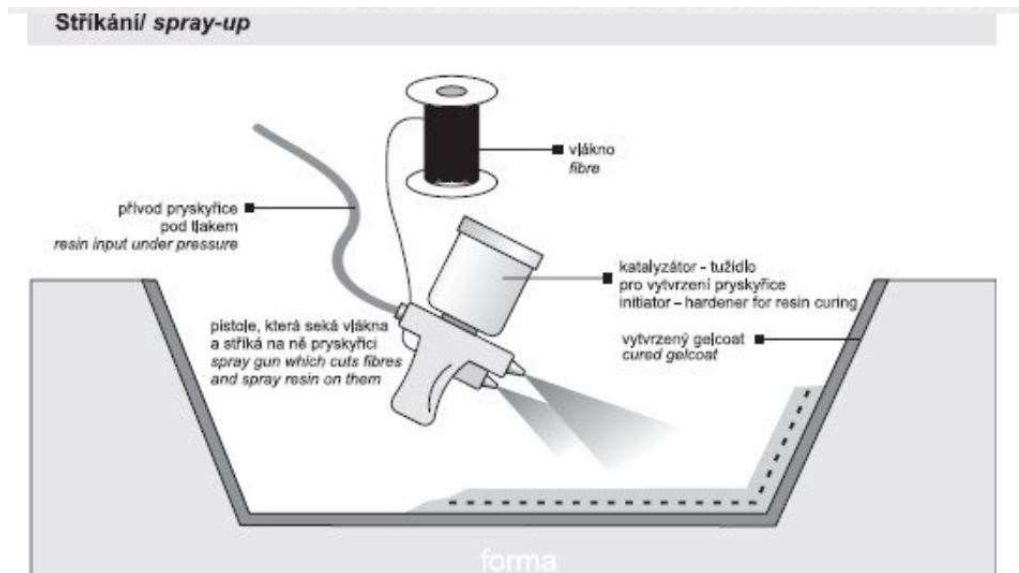
Většinou technologie probíhá při malých tlacích (0,3 – 0,9 baru) a normálních teplotách. Pokud jsou ovšem použity prepregy, tak je třeba dosáhnout výrobcem předepsané vytvrzovací teploty, a to například umístěním do vyhřívaného tunelu, vytápěné komory nebo autoklávu. [2, 15]

6.5. Nanášení postřikem

Tímto procesem výroby se pneumaticky nanáší na formu speciální pistolí zároveň sekaný roving a aktivovaná pryskyřice. Nanášení se provádí prakticky pouze ručně.

Formy použité při výrobě jsou nenákladné a praktický identické s formami užitými pro ruční kladení.

Jako první je nanesená gelcoatová vrstva. Stříkání se uskutečňuje v mnoha vrstvách. Jednotlivé aplikované vrstvy se ještě dodatečně zhutňují rýhovanými nebo štětinovými válečky, přičemž toto tzv. zhutňování zároveň vytlačuje vzduchové bubliny z vrstvy. Při použití této technologie je důležité, aby byla místnost, kde jsou vrstvy aplikovány dodatečně odvětrávaná. Protože pro tuto technologii se téměř z pravidla využívají polyesterové pryskyřice, které obsahují styren. [18]



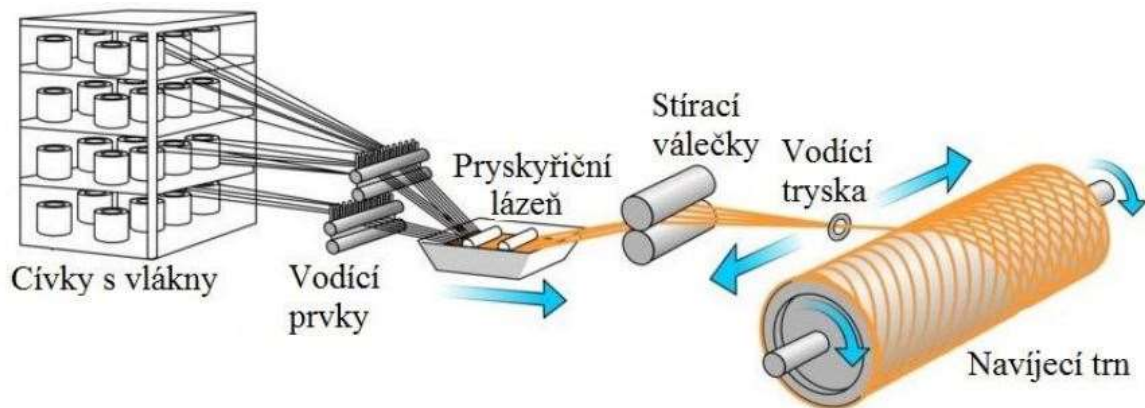
Obrázek 11: Ilustrace technologie stříkáním [18]

6.6. Navíjení

Technologie navíjení je jednou z nejvíce progresivních metod pro výrobu dutých těles z kompozitních materiálů. Jedná se o navíjení výztuže (většinou uhlíkové, skleněné nebo aramidové pramence impregnované pojivem) na jádro ve tvaru daného výrobku. Tímto způsobem se vyrábí především dutá tělesa tzn. trubky, nádoby různých velikostí a nádrže.

Pohyb ukládacího ramene podél osy za současné rotace trnu a poloha ukládacího oka dovolují přesné kladení vláken v několika osách a umožňují vytváření i relativně složitých tvarů. Proces navíjení je plně řízen počítačem.

Naváděcí zařízení předpíná výztuž a v kooperaci s naváděcím zařízením umožňuje poměrně přesné uložení na jádro. [16]



Obrázek 12: Schéma zobrazení výroby kompozitních materiálů navíjením [19]

6.7. RTM-metoda lisování se vstřikem matrice

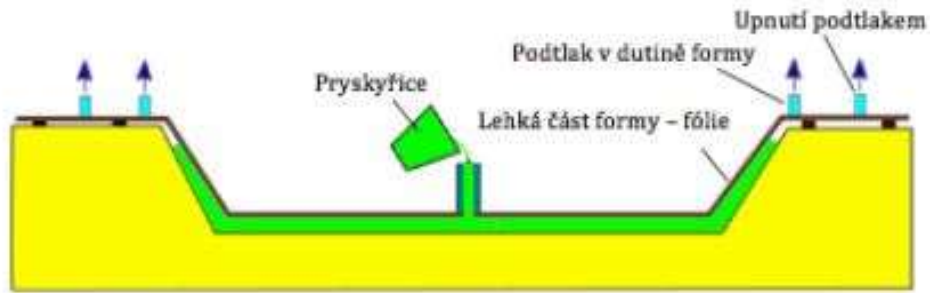
Při procesu RTM je výztuž impregnována pryskyřicí. Díky použití uzavřené formy je na obou stranách výsledného komponentu čistý povrch. V podstatě se dá proces rozdělit do dvou částí. Nejdříve je vyroben vláknový předlisek (vlákna mohou být rozličně uspořádána), v druhé části je předlisek v uzavřené formě zalit pryskyřicí. [10]

6.7.1. Výrobní postup se skládá z následujících operací:

- Na vnitřní dutinu formy je nanесena dělicí látka
- Dovnitř je vložen vláknový předlisek
- Uzavření formy
- Do dutiny je pod tlakem vstřikována směs pryskyřice a vytvrzovacího činidla
- Vytvrzování pryskyřice.
- Otevření formy.
- Vyjmutí výrobku.
- Vyčištění dutiny formy.
- Kontrola výrobku a případné konečné úpravy výrobku. [10]

6.8. L-RTM

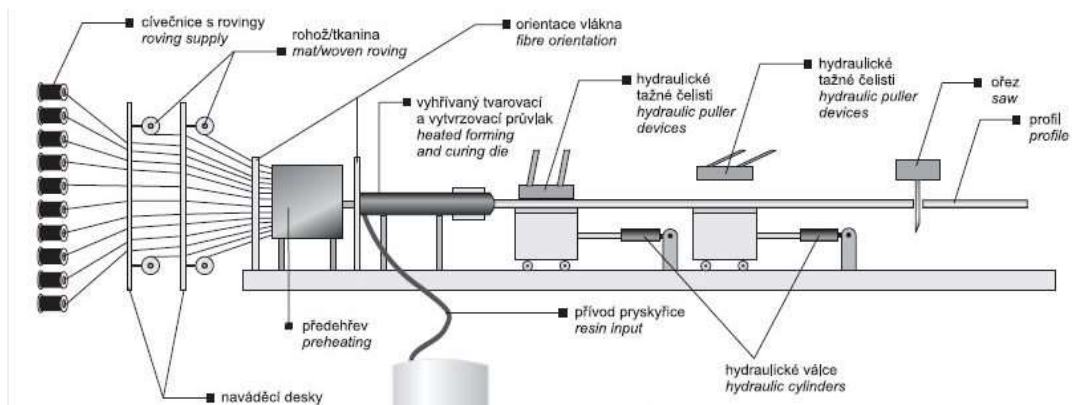
Modifikací metody RTM je metoda L-RTM (Light), polovina uzavřené formy je nahrazená fólií a funkce vstřikovacího tlaku je nahrazená atmosférickým tlakem. Nutnou součástí procesu je nahrazení podtlaku odsávacími ventily na okrajích formy. [10]



Obrázek 13: Metoda L-RTM [11]

6.9. Pultruze

Tento typ fabrikace kompozitu je založen na tažení jednotlivých svazků vláken pryskyřičnou lázní, kde dochází k prosycování výztuže. Touto metodou lze vyrábět plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem použité výztuže (a to až do 80 %). Po prosycení následuje tvarování výztuže do zadaného průřezu. Kompozit je kontinuálně vytvrzován ve vytvrzovací hlavě. [5,6] Mezi výhody se řadí: rychlost produkce výrobku, dobré mechanické vlastnosti a nízké nároky na lidskou obsluhu. [1, 20]



Obrázek 14: Ilustrace výroby kompozitních mater tažením [19]

6.9.1. Výhody

- Homogenní rozložení vláken v materiálu zajišťuje dobré mechanické vlastnosti komponentu.
- Nejnižší náklady na výrobu jednotlivého kusu
- Vysoká rychlost výroby

6.9.2. Nevýhody

- Vysoké vstupní náklady na vytlačovací hlavici a její vyhřívání
- Výsledný povrch není hladký
- Vysoké pořizovací náklady stroje [1, 20]

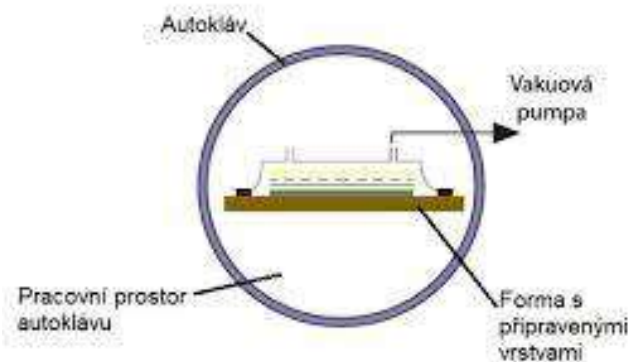
6.10. Vytvrzování v autoklávu

Technologie vytvrzování v autoklávu je velmi náročná a velmi nákladná. Jako výchozí materiál vždy slouží prepregy, které je nutné vytvrzovat za zvýšených teplot. Kladení prepregu probíhá buď ručně, anebo v případě velkosériové výroby kosmických a leteckých dílů jsou ukládány speciálními zařízeními řízenými počítačem.

Skladba vrstev je prakticky identická jako při lisování pomocí vakua, forma pokrytá pružnou folií nebo pryžovou plachetkou se umístí do vyhřívaného autoklávu. Nejdříve je provedena evakuace pod tlakem přibližně 0,8 bar a pak je autokláv natlakován na požadovanou hodnotu. Receptura nastavení autoklávu použitá u jednotlivých výrobků se může lišit na základě použitého materiálu a na základě zkušeností pracovníků s ním. Obsah výztuže se poté pohybuje přes 60 %.

Mezi výhody se řadí dokonalá eliminace vzduchových bublinek v materiálu, přesná kontrola receptury a tím i vytvrzení prepregu.

Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, omezená pracovní kapacita kvůli velikosti autoklávu. [3, 14, 15]



Obrázek 15: Vytvrzování v autoklávu [15]

7. Destruktivní a nedestruktivní zkoušky materiálu

7.1. Defekty v kompozitních materiálech

Vady vyskytující se ve výrobcích vznikají při výrobě, nebo při provozu. Do výrobních vad spadá delaminace, neslepené plochy, plochy s přílišným množstvím pryskyřice, vzduchové bubliny, tepelné poškození, pády při nesprávné manipulaci aj. Původcem těchto vad je zpravidla

chybné vytvrzování, broušené (obrábění povrchu), znečištění/nedostatečné očištění povrchu před výrobou. Nejčastěji vyskytující se vada ve výrobcích z kompozitních materiálů je delaminace. Při delaminaci dochází k separaci jednotlivých slepených vrstev. K tomuto jevu může dojít např. malou adhezí jednotlivých vrstev kompozitu, nesprávnou manipulací při výrobním procesu (vyvrtávání otvorů do materiálu bez řádných přípravků, chybnou skladbou do formy).

Polotovary a výrobky je nutné podrobovat zkouškám z důvodu: zjišťování vstupních a výstupních vlastností, poškození provozem atd. Zkoušky mohou být destruktivní (DT), kdy dochází ke zničení vzorku a nedestruktivní (NDT), v takovém případě se jedná o defektoskopii. Z ekonomického hlediska není vždy realizovatelné provádět zkoušky destruktivní. Proto se ve většině případů využívá zkoušek nedestruktivních. Většina NDT metod testování polymerních kompozitních materiálů je přejato z testování kovů, avšak mnoho těchto metod nebere v potaz nehomogenní a anizotropní struktury. Proto mají pro testování kompozitních materiálů řadu nedostatků. Jednou z perspektivních metod je například infračervená termografie (IRNDT) a její obdoby. Teplotní odezvy jsou vyvolávány ultrazvukovou stimulací (vibro-termografie). V praxi jsou pro testování polymerních kompozitních materiálů především užívány tyto metody: [13]

- Vizuální a optické kontroly
- Ultrazvuková spektroskopie (v praxi jedna z nejpoužívanějších metod)
- Laser-ultrazvuková defektoskopie
- Laserová vibrometrie
- infračervená defektoskopie.
- Laser-shearografie
- kapilární metoda
- radiografická metoda
- zkoušení těsnosti
- magnetická prášková metoda

Pro zjištění mechanických vlastností se používají destruktivní metody testování (DT)

- Tahová zkouška
- Zkouška tlakem
- Zkouška vrubové houževnatosti (Charpyho kladivem)
- Zkouška ohybem
- Zkouška tvrdosti
- Únavové zkoušky (cyklické)
- Metalografický výbrus

Z destruktivních zkoušek je pro nás hlavním výstupem:

- Mez pevnosti (R_m)
- Mez kluzu (R_p)
- Z metalografického výbrusu můžeme rozpoznat vzniklé dutiny ve vzorku [13]

8. Praktická část bakalářské práce

V praktické části bakalářské práci se zabývám porovnáním mechanických vlastností kompozitních materiálů s různou orientací výztuže. Kompozitní materiály, jak je známo, mají nejlepší vlastnosti, pokud se materiál zatěžuje ve směru kladení vláken. Z tohoto důvodu je důležité vědět, jakým způsobem se projevuje variace mechanických vlastností kompozitního výrobku při různé orientaci vláken výztuže.

8.1. Výroba kompozitních vzorků pro tahovou zkoušku a metalografický výbrus

Pro experimentální testování mechanických vlastností byly vytvořeny 4 desky ze 2 typů kompozitních materiálů. Použitý prepreg pro první část vzorků byl kombinací uhlíkového vlákna T300 a termosetové matrice ER 38 (označeno jako vzorek Txx). Pro druhý zkušební vzorek (označeno jako vzorek Hxx) byl použit materiál HexPly®M26/M26T 120 °C Curing Epoxy Matrix (6K T300J 370 gsm). Všechny zkušební vzorky byly vyhotoveny z 12 vrstev.

Vzorek H45 byl vyroben, tak aby jeho orientace všech vrstev výztuže byla 45°. Zatímco vzorek H90 byl proveden, tak aby orientace vláken byla 90°. Obdobně byly z druhého prepregu vyhotoveny zkušební vzorky T45 a T90 (viz obr. 16).



Obrázek 16: Nastříhané vzorky

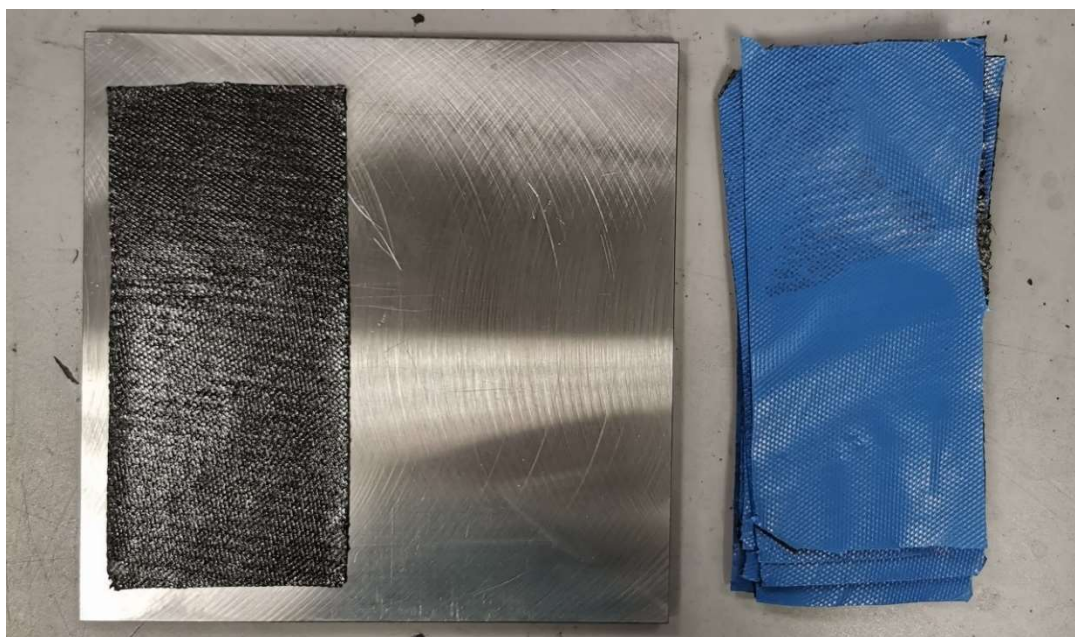
Tabulka 1: Vlákno T300J (materiál HexPly®) [11]

Mez pevnosti v tahu	4210 MPa
Modul pevnosti v tahu	230 GPa
Hustota	1,78 g/cm ³
Prodloužení	1,8 [%]

Tabulka 2: Vlákno T300 [11]

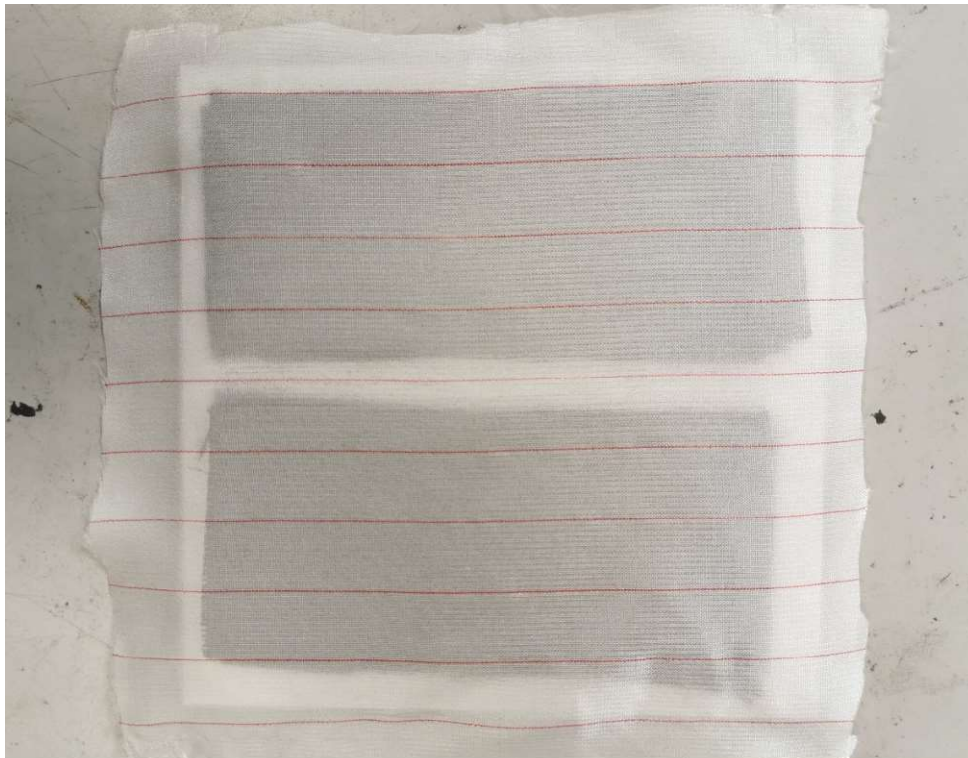
Mez pevnosti v tahu	3530 MPa
Modul pevnosti v tahu	230 GPa
Hustota	1,76 g/cm ³
Prodloužení	1,5 [%]

Po vytvoření všech předepsaných vrstev vzorků byly kladeny tyto jednotlivé vrstvy na hliníkové desky. Al deskové přípravky musely být odmaštěny a očištěny, aby nedocházelo k přilepení kompozitního materiálu k Al přípravku (viz obr. 17).



Obrázek 17: Hliníkové desky, použité k zaformování. (Vzorek T45 vlevo, vzorek T90 vpravo)

Každá vrstva musela být důkladně urovňována hladítkem a musela být před navrstvením odstraněna ochranná folie. Po vyhotovení všech 24 vrstev jedné sady vzorků, byla na vzorek nejprve aplikována strhávací tkanina, která usnadňuje odstraňování dalších vrstev a zamezuje znečištění vzorků.



Obrázek 18: Vzorky se strhávací tkaninou



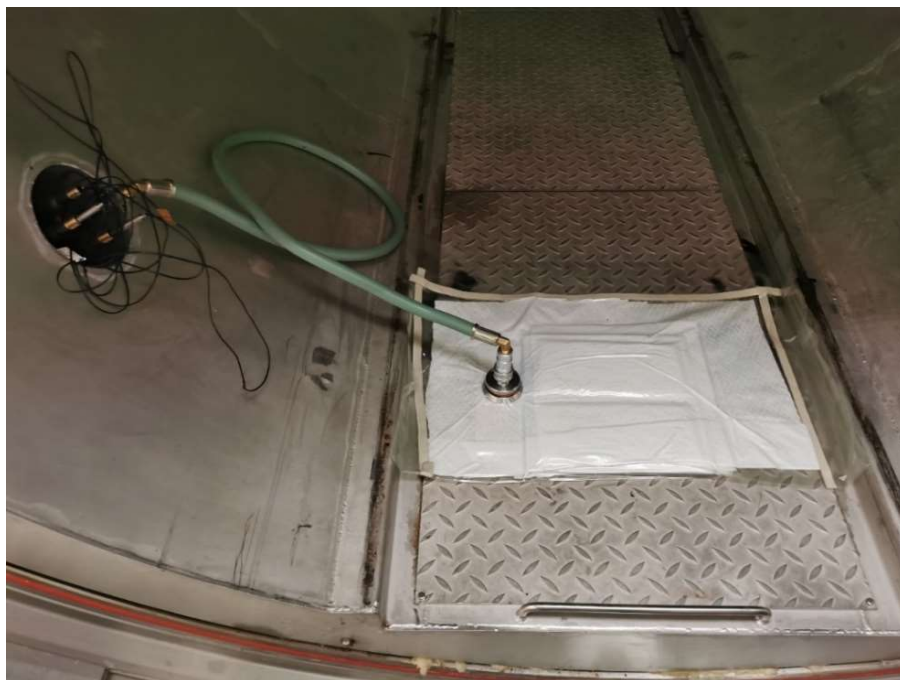
Obrázek 19: Vzorky s děrovací fólií

Na tuto tkaninu byla dále umístěna děrovaná vakuovací fólie (viz. obr. 19) a na ní dále bavlněná odsávací rohož, která zároveň sloužila také pro absorbování nadměrného množství pojiva (viz obr. 20.).



Obrázek 20: Odsávací rohož

Poté byly vzorky vloženy do vakuovacího pytle, který byl utěsněn tmelem. Takto utěsněné vzorky byly vloženy do autoklávu a připojeny na vývěvu vakuové pumpy pro zajištění lepšího přitlaku a odsátí vzduchu a pro prevenci vzniku možné delaminace vzorků (viz obr. 21.)



Obrázek 21: Vzorek ve vakuovém pytli zapojen do vývěvu v autoklávu

Po zavakuování bylo možné provést vytvrzování materiálu za pomoci autoklávu. Podle výrobcem doporučené receptury, byly nastaveny parametry ohřevu a tlakování. Postupně byl autokláv natlakován až na teplotu 110 °C a tlak 3 bar. Tato teplota a tlak byly udržovány po dobu 240 minut. Následně byly tlak a teplota snižovány na počáteční hodnotu (viz tabulka 3).

Tabulka 3: Receptura užitá pro vytvoření kompozitních desek

Krok	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Doba kroku [min]
1.	35	0,2	2
2.	45	1	5
3.	75	3	50
4.	110	2	240
5.	60	0,2	60
6.	50	0	60
7.	38	0	0

8.1.1. Dělení materiálu užitím metody vodního paprsku

Po vyjmutí z vakuovacího pytle a provedení vizuální kontroly byly z každého ze 4 vzorků vodním paprskem vyříznuty a označeny 4 zkušební tělíška. Tato technologie dělení materiálu byla uskutečněna za pomoci Technické fakulty České Zemědělské Univerzity, k těmto účelům bylo využito zařízení typu AW – CT 0806 od firmy AWAC spol. s.r.o. (viz. obr. 22). Z důvodů porovnání výsledků ze zkoušky tahem, byla vyhotovena 2 zkušební tělíška podle ČSN EN ISO 6892-1 a 2 zkušební tělíška byla ponechána ve formě pásku, bez patřičného tvaru (viz. obr. 23.)

Na dvou vzorcích 3H45CH a 4H45CH vyhotovených z materiálu Hexply® s orientací výztuže 45°, bylo možné pozorovat silnou delaminaci na místě nájezdu vodního paprsku (viz. obr. 24.). Zejména z důvodu nenalezení stejných defektů na dalších zkušebních vzorcích, ať už z rozdílného materiálu, nebo na vzorku s jinou orientací výztuže, je výskyt této strukturální vady možné přiřadit k použité technologii dělení materiálu, tzn. technologii řezání vodním paprskem.



Obrázek 22: Zařízení AW – CT 0806 na řezání vodním paprskem



Obrázek 23: Vyříznuté zkušební vzorky



Obrázek 24: Delaminace vzorků způsobená řezáním vodním paprskem

Poté byly vzorky zdrsňeny, odmaštěny a na jejich konce přilepeny, dvojsložkovým konstrukčním epoxidovým lepidlem Loctite EA 9466, hliníkové plíšky (viz. obr. 25).



Obrázek 25: Vzorky s hliníkovými plíšky

8.2. Zkouška tahem

Takto vytvořené vzorky byly umístěny do zkušebního zařízení LabTest 5.100SP1 (viz. obrázek 26). Vzorky byly následně po jednom upínány a zatěžovány až do jejich porušení. Tahová zkouška byla realizována na zařízení Fakulty strojíni ČVUT v Praze.

Hodnoty použité k výpočtu maximálního zatížení každého vzorku jsou uvedené v tabulkách 4 a 5.



Obrázek 26: Zařízení LabTest 5.100SP1 určené na vykonání tahové zkoušky

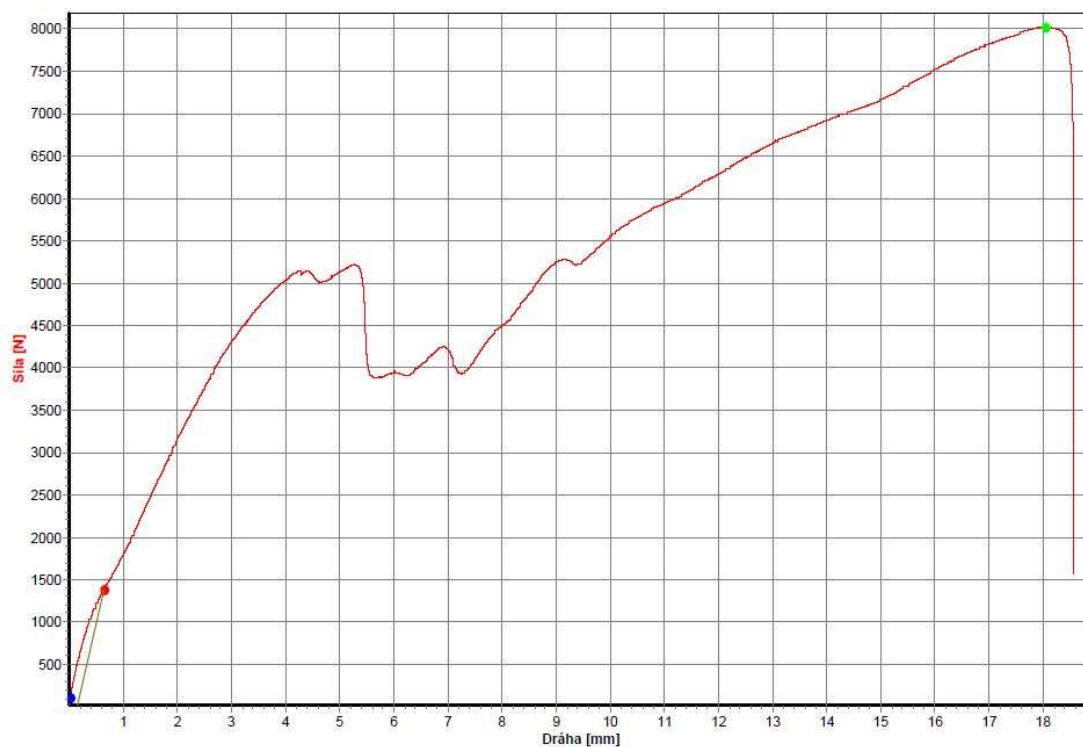
Tabulka 4: Rozměry vzorků s orientací matrice 90° na tahovou zkoušku s finálním prodloužením a maximální silou

Vzorek	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Prodloužení [%]	Maximální síla [N]	Vzorek	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Prodloužení [%]	Maximální síla [N]
T 90					H 90				
1T90	3	9,3	2,8	12 422,90	1H90	3	9,3	5,5	12 803,90
2T90	3,1	9,2	2,2	9 511,80	2H90	3	9,3	3,5	16 033,30
3T90CH	3,1	9,2	4,3	14 845,10	3H90CH	3	9,3	3,6	17 627,00
4T90CH	3,1	9,1	2,6	11 652,80	4H90CH	3	9,3	3,8	17 788,00

Tabulka 5: Rozměry vzorků s orientací matrice 45° na tahovou zkoušku s finálním prodloužením a maximální silou

Vzorek	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Prodloužení [%]	Maximální síla [N]	Vzorek	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Prodloužení [%]	Maximální síla [N]
T 45					H 45				
1T45	3,1	9,3	4,6	6 366,40	1H45	3	9,4	5,5	7 914,80
2T45	3,1	9,4	5,8	6 212,50	2H45	3	9,2	5,2	7 694,30
3T45CH	3	9,3	7,3	6 147,60	3H45CH	3	9,3	8,1	8 188,80
4T45CH	3,1	9,3	7,5	5 953,80	4H45CH	3	9,2	12,4	8 026,70

Výstupy z tahové zkoušky nám potvrdily předpokládaný výsledek ze strany maximálního zatížení. A to že vzorek s výztuží v matrici s orientací 90 ° bude mít lepší výsledky z tahové zkoušky než vzorek s výztuží v matrici s orientací 45°. Avšak u zkušební vzorku s orientací 45° se ukázalo, že i když dosahuje zhruba polovičnických výsledku na zkoušku tahem, tak zároveň vykazuje někdy i více než dvojnásobné zlepšení v relativním prodloužení materiálu před jeho porušením.



Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	Rp0,2 N/mm ₁	Fp0,2 N	ReH N/mm ₁	ReL N/mm ₁	Rm N/mm ₁	Fm N
12	x	28.07.22	10:51			50	1376,30	0	0	291	8026,70

Graf 1: Průběh zkoušky tahem vzorku 4H45CH

U vzorků s označením 1H90 a 3H45CH došlo při jejich upínání do čelistí zařízení LabTest k potenciaálnímu narušení vláken vlivem manipulace obsluhy. Proto je třeba zohlednit ve výsledné úvaze i tuto skutečnost.

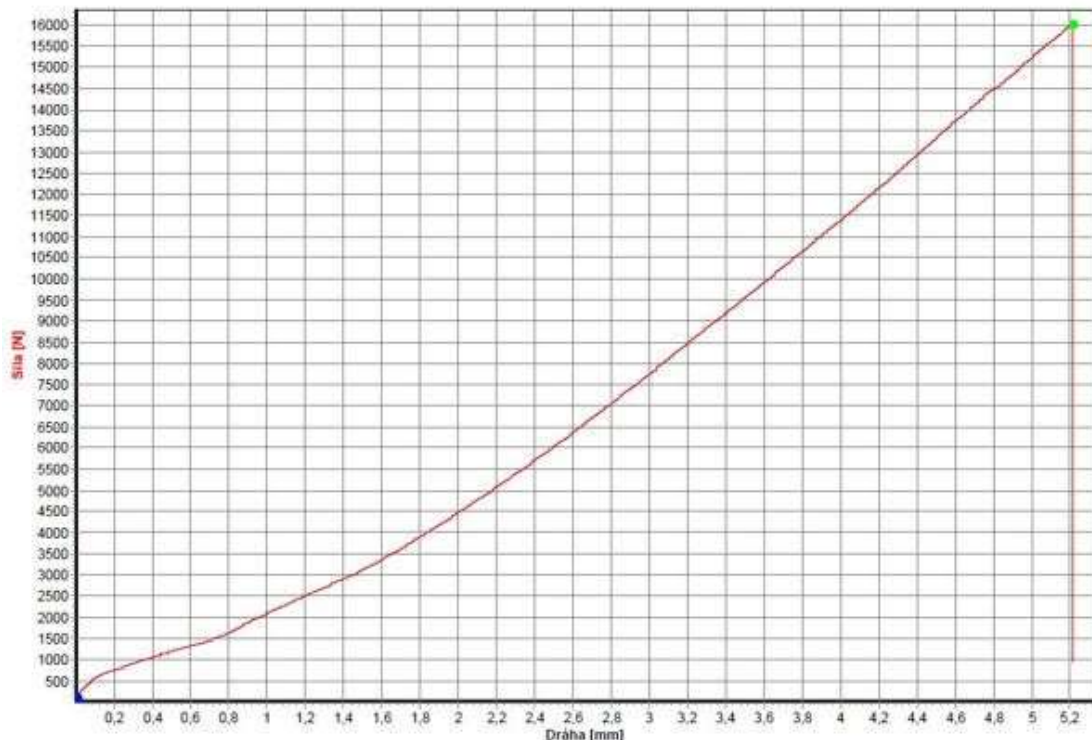
Grafy tahové zkoušky těchto dvou vzorků (viz. příloha), měly značně nelineární průběh (viz. graf 1.). Tento fakt přisuzují špatné manipulaci při upínání do čelistí zařízení. Zároveň se na vzorcích s označením 3H45CH a 4H45CH vyskytovala silná delaminace způsobená užitou technologií dělení materiálu (vodním paprskem). Přestože tyto dva vzorky byly postiženy delaminací, výsledná maximální síla byla porovnatelná s ostatními vzorky z téhož materiálu (viz. tabulka 4).

Dále byly v praktické části bakalářské práce porovnávány výsledky tahové zkoušky u vzorků s řádným tvarem pro zkoušku tahem se vzorky, které byly vyříznuty do tvaru pásku. Přestože vzorky ve tvaru pásku praskaly u, anebo přímo mezi místy nalepení hliníkového plíšku, tak jejich hodnoty byly porovnatelné s výsledky vzorků s řádným tvarem pro tahovou zkoušku. Z toho lze usoudit, že tvar, který je podle ČSN EN ISO 6892-1 daný pro tuto zkoušku, je nutný zejména pro materiály s vysokou tažností a naše kompozitní vzorky nesprávný tvar výrazně neovlivnil.



Obrázek 27: Roztrhané vzorky 45° a 90°

Orientaci vláken našich vzorků lze poznat již z tvaru grafu zkoušky tahem. Vzorky s orientací výztuže 45° mají oblast lomu níže, než bylo jejich naměřené maximální zatížení. Zatímco u vzorků s orientací 90° (viz. obrázek 27.) lze pozorovat porušení materiálu při dosáhnutí maximální hodnoty. Tento jev je daný orientací výztuže. Při orientaci 90° dojde k náhlému přetržení vláken ve směru zatížení a lom materiálu následuje tento trend. Zatímco při orientaci 45°, měl zkušební vzorek lom pozvolný a následoval směr orientace vláken (viz. obrázek 27). Z toho lze usuzovat, že důvodem většího relativního prodloužení těchto vzorků je právě tento jev.



Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	ReH N/mm	ReL N/mm	Rm N/mm	Fm N
6	x	28.07.22	10:13			0	0,00	0	0	575	16033,30

Graf 2: Zkouška tahem vzorku 2H90

8.3. Metalografický výbrus

Z každého ze 4 vzorků, použitých pro vytvoření zkušebních tělísek, byla odebrána část pro metalografický výbrus. Kvůli obavám z tepelného ovlivnění při zaformování, byla zvolena pryskyřice s označením VersoCit-2, která je vytvrzována chemickou reakcí a ohřeje pryskyřici pouze na 70 °C (viz. obrázek 23).



Obrázek 28: Pryskyřice využitá pro vytvoření vzorku

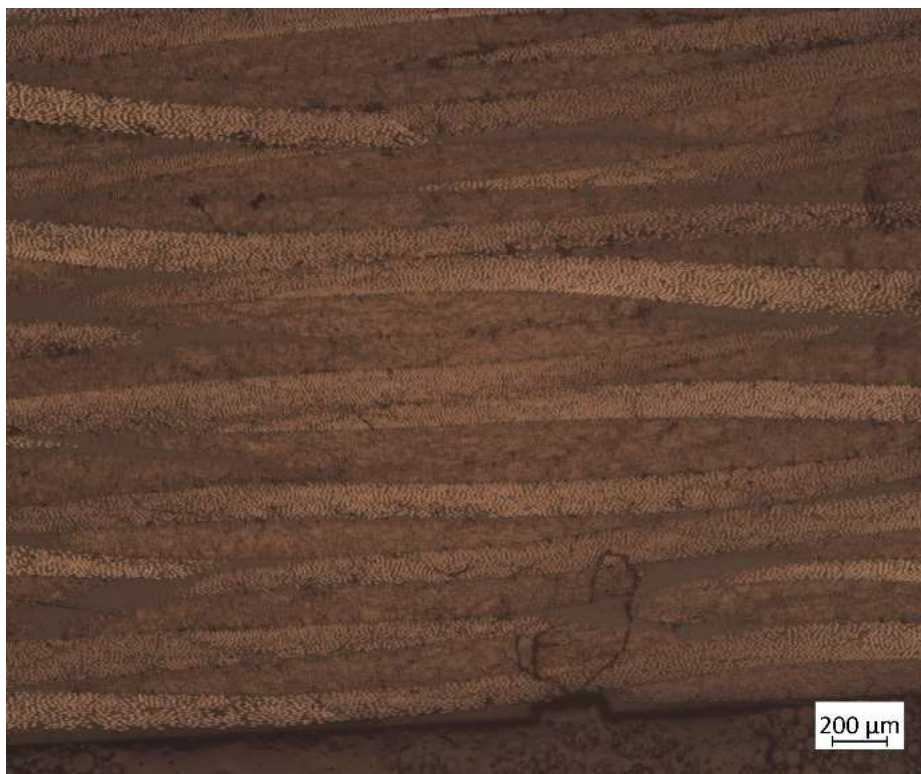
Metalografické výbrusy byly následně zality pryskyřicí a 15 minut vytvrzovány (viz. obrázek 29). Po vytvrzení byly vzorky broušeny na brusce Beuhler Phoenix Beta. K tomuto účelu byly použity brusné papíry o hrubostech 500, 1200 a 4000 z karbidu křemíku (SiC- Silicon carbide). Po vybroušení povrchu byl zapomocí leštidla Masterprep a leštícího kotouče Nanocloath povrchyleštěn.



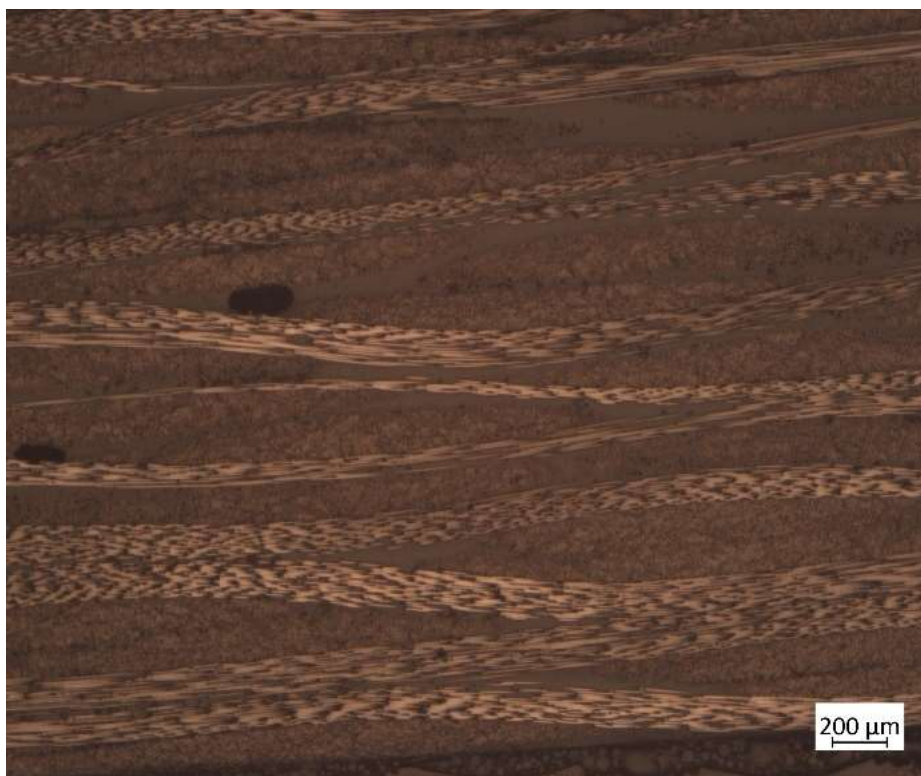
Obrázek 29: Vzorok zalité akrylátovou pryskyřicí

8.3.1. Mikroskopické vyhodnocení struktury vzorků

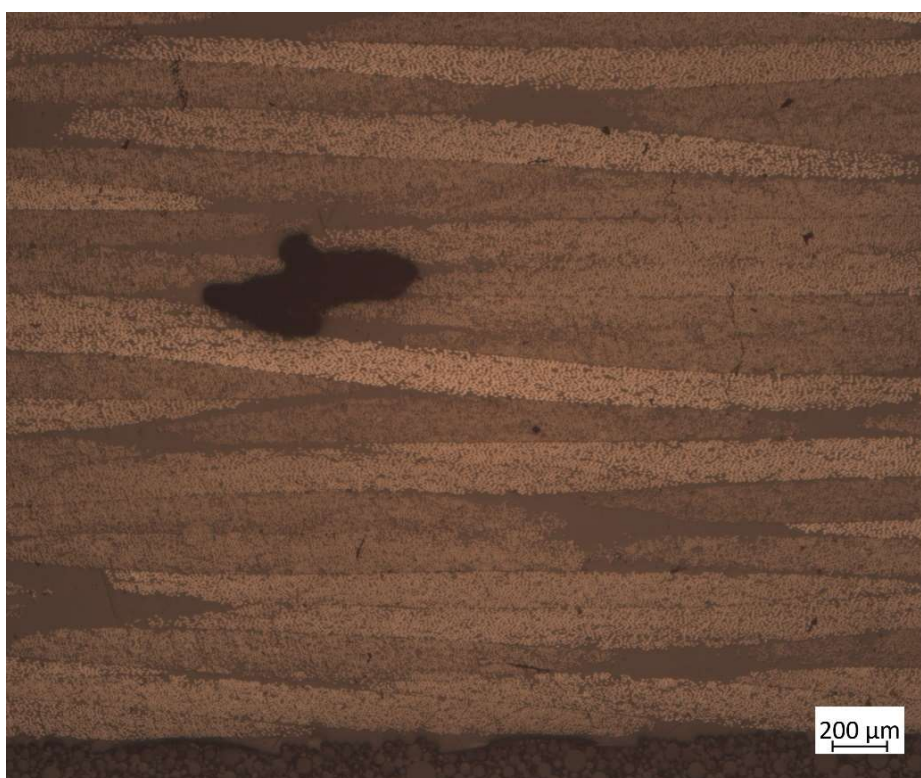
Po vyleštění byly za pomoci mikroskopu pořízeny fotografie struktury jednotlivých vzorků materiálu (viz. obrázek 30, 31, 32)



Obrázek 30: Vzorek H45, zvětšení 25x



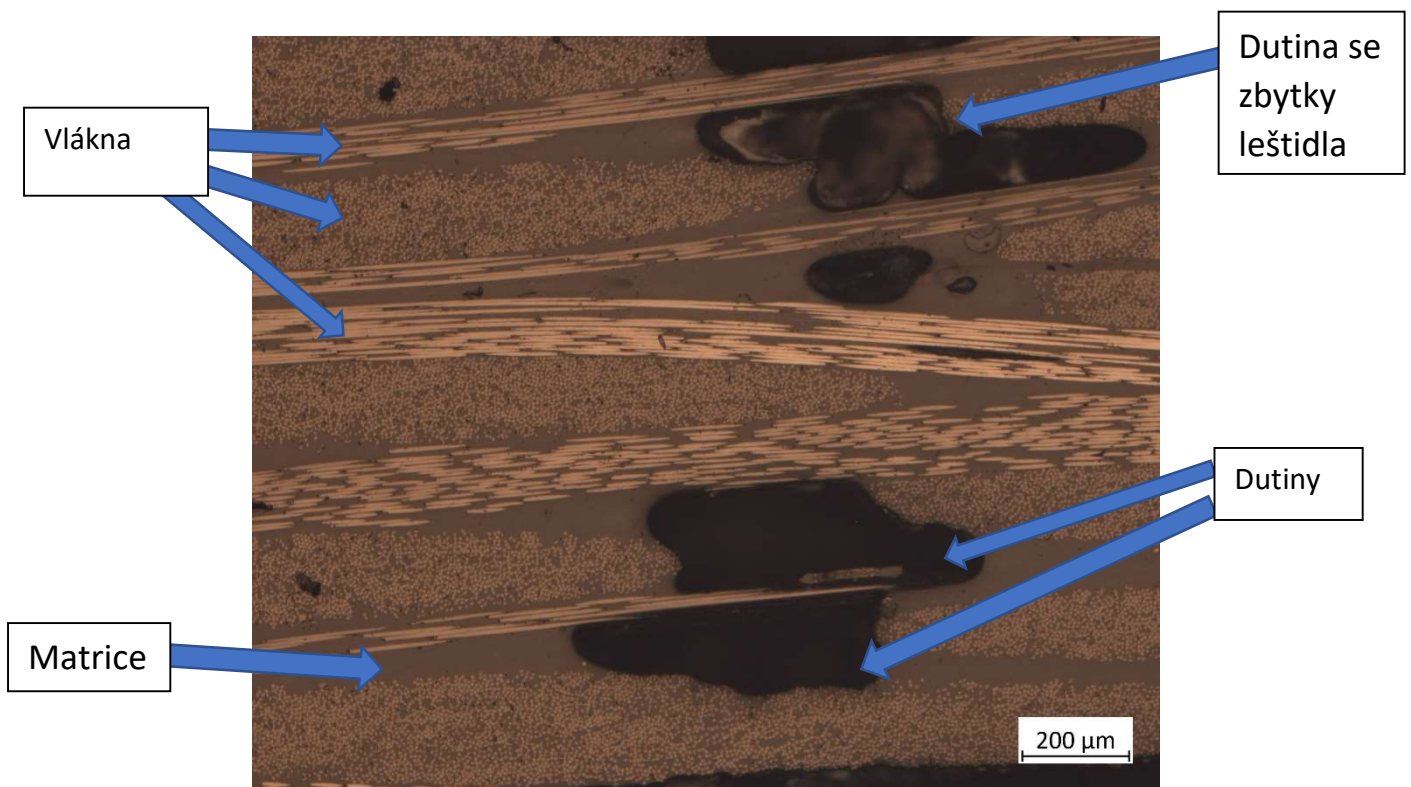
Obrázek 31: vzorek H90, zvětšení 25x



Obrázek 32: Snímek vzorku T45, zvětšení 25x

Na fotografiích je zřetelně rozpoznatelná struktura a tím i orientace skladby matrice. Na vzorku s orientací 45° lze pozorovat minimální pórovitost, což značí dobrou zabíhavost matrice v prepregu a zároveň správný postup skládání a vytvrzování materiálu. Všechna vlákna mají na snímku stejné průřezy. Zatímco vzorek s orientací 90° lze rozpoznat podle alternujícího průřezu vláken na snímku. Tento jev je způsoben použitou vazbou panama, která je při tkaní prepregu používána. Na snímku také můžeme vidět dutiny, které se nepodařilo vyplnit pryskyřicí. V takto malém počtu mají ovšem defekty zanedbatelný vliv na mechanické vlastnosti kompozitu.

U vzorků T90 a T45 se objevovala mnohem větší pórovitost materiálu, tento jev mohl být způsobený špatným skládáním či uchováváním prepregu. Tím že se defekty vyskytují ve zvýšeném počtu v obou vzorcích z tohoto materiálu, ale přisuzují větší počet dutin nekvalitnímu materiálu, konkrétně nedostatečné zabíhavosti matrice.



Obrázek 33: Vzorek T90, zvětšení 50x

9. Závěr

V teoretické části se bakalářská práce zabývala rozdělením a vlastnostmi kompozitních materiálů. Byla provedena rešerše metodiky výroby a byly popsány metody jejich defektoskopie.

V praktické části se bakalářská práce zabývala vytvořením kompozitních vzorků z prepregu, za účelem analýzy jejich mechanických vlastností při různé orientaci výztuže. Tyto vzorky byly vytvořeny s orientací 45° a 90° ze dvou různých materiálů a 12 vrstev prepregu. Po vytvrzení v autoklávu podle výrobcem dané receptury, byly řezány vodním paprskem do dvou zkušebních rozměrů. Jedním typem vzorku byl tvar dle ČSN EN ISO 6892-1, čili řádný tvar pro zkoušku tahem. Druhým typem vzorku byl pásek. Z každé ze 4 desek kompozitu byly vytvořeny následně 4 zkušební vzorky, 2 s řádným tvarem a 2 ve tvaru pásku. Cílem tohoto tvarového rozdělení zkušebních těles, bylo porovnat vlastnosti obou těchto tvarů při zkoušce tahem a vyhodnotit, zdali je tento tvar pro zkoušku nutný.

Při této metodě dělení základního materiálu byla na dvou vzorcích viditelná delaminace v místě nájezdu vodního paprsku. Z tohoto poznatku bych doporučil možnou doprovodnou analýzu, zda by nebylo vhodné uvažovat o jiných metod dělení tohoto základního materiálu, či jiným způsobem optimalizovat dělicí proces kompozitních materiálů, a to zejména při přípravě zkušebních tělísek.

Následně byl proveden metalografický výbrus, který byl vyhotoven zalitím odebraných vzorků z kompozitních desek do pryskyřice VersoCit-2, která tuhne chemickou reakcí, a nikoliv tepelným vytvrzováním v peci. Tato opatření byla podniknuta ve snaze snížit tepelné ovlivnění materiálu. Tato metoda destruktivního testování materiálu nám ukázala dutiny a póry v materiálu. Ze snímků byla také velmi dobře znatelná orientace vláken výztuže každého ze vzorků. Dle použité vazby a řezu vláken lze správně rozpoznat jednotlivé orientace.

S přihlédnutím k výsledkům z metalografického výbrusu a také k výsledkům z tahové zkoušky bylo možné vyhodnotit, že kompozitní materiál s orientací 90° výztuže měl lepší mechanické vlastnosti v porovnání s materiálem, který měl orientaci výztuže 45°. Tyto výsledky byly dle teoretické části BP očekávatelné. Z analýzy zkušebních vzorků s orientací 45° bylo zjištěno, že dosahuje přibližně polovičních výsledných hodnot při zkoušce tahem. Při porovnání se zkušebními vzorky s orientací vláken 90° bylo zjištěno i více než dvojnásobné zlepšení v relativním prodloužení zkušebních vzorků.

Zkušební vzorky s orientací výztuže 90° vykazovaly „čistý lom“, kde prasknutí bylo vykázáno na hranici vláken. Z tohoto důvodu je možné usuzovat menší výsledné prodloužení vzorků. Zkušební vzorky s orientací výztuže 45° vykazovaly lom probíhající většinou do hloubky následných vláken, které měly orientaci ve směru kladené výztuže. Na základě těchto typů

lomů a dat získaných ze zkoušky tahem lze usuzovat, že vzorky vytvořené s orientací výztuže 45° vykazují větší relativní prodloužení v porovnání se vzorky druhého typu.

Při porovnání mezí pevností v tahu daných výrobcem, se více přiblížily reálným hodnotám zkušební tělíska s řádným tvarem pro tahovou zkoušku, než ty ve tvaru pásku. Z toho vyplývá, že ačkoliv na výsledné hodnoty tahové zkoušky tvarové rozdělení nemělo patrný vliv, tak hodnoty tělísek s řádným tvarem mohou mít větší vypovídací hodnotu o mechanických vlastnostech kompozitních materiálů. Pro tento závěr bych ovšem doporučil možný následný výzkum s přípravou většího počtu vzorků s možným rozšířením o další doprovodné destruktivní testování.

Dále lze z naměřených hodnot vyhodnotit, že kompozitní materiál s kladenou orientací výztuže 90°, lze spíše použít pro aplikace, při kterých je důležité dosažení co nejvyšší meze pevnosti v tahu. Oproti tomu kompozitní materiál s orientací výztuže 45°, a to díky svému většímu relativnímu prodloužení, bude spíše lépe odolávat cyklickému zatěžování a každodennímu zacházení.

Výše uvedené výsledky a poznatky bakalářské práce dále otevírají další možnosti následného výzkumu aplikace těchto typů základních materiálů s možnou variací výztuže v praxi dohromady s kombinací kladení různého množství vrstev kompozitního materiálu. Za tímto účelem by došlo k porovnání účinnosti vzniklých vzorků, kde by se vyhodnotila otázka, jestli množství vrstev, takto vytvořených, podléhá zákonu klesajících výnosů – respektive jestli od určitého množství vrstev neklesá jejich účinnost.

Na závěr bych ještě jednou zdůraznil, že v případě využití jakýchkoliv výše uvedených námětů budoucího výzkumu, je nutné podpořit všechny analýzy výrobou většího počtu zkušebních vzorků, než bylo provedené v této bakalářské práci, čímž bude zabezpečeno širší spektrum výsledků za účelem zvýšení vypovídající úrovně výsledků z destruktivního testování.

Bibliografie

- [1.] TECHNOLOGIE VÝROBY A ZPRACOVÁNÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84979. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [2.] Výroba kompozitních materiálů autoklávovou technologií [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97273/F2-BP-2021-Ritschel-Vit-BP_Vit_Ritschel.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [3.] Kompozity s uhlíkovými vlákny [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/79503?show=full>. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [4.] STRÁDAL, Milan. Porovnání dvou přístupů k určení celkové odezvy kompozitů s viskoelastickou maticí. Praha, 2011. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Zeman, Ph.D.
- [5.] Kompozitní materiály. In: Nanoed [online]. [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/9258/mod_resource/content/1/peny-89-n.pdf
- [6.] Kompozity s náhodně orientovanou výztuží [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/69926>. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [7.] Skleněná textilní vlákna. In: Wikiwand [online]. [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/cs/Skleněná_textilní_vlákna
- [8.] Prepreg In: Fibreglast [online]. [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center
- [9.] 2-d tkaniny[online]. Broumov [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <http://www.veba.cz/cs/2d- tkaniny>
- [10.] POUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU [online]. Brno, 2012 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/9810>. Bakalářská práce.
- [11.] Ruční lamování [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/rucni-laminovani>
- [12.] Problémy při obrábění kompozitních materiálů [online]. In: . [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [13.] Problémy při obrábění kompozitních materiálů [online]. 2007. 2007 [cit. 2022-04-10]. ISSN 70451. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [14.] Carbon fiber guru [online]. [vit. 2022-03-28]. Dostupné z: <http://www.carbonfiberguru.com/carbon-fiber-processing-part-1-wet-hand-lay-up>
- [15.] Lisování pomocí vakua [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>

- [16.] Navíjení [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>
- [17.] Press moulding [online]. In: . [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>
- [18.] Nanášení nástřikem [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/spray-up/>
- [19.] NÁVRH UPRAVENÉ TECHNOLOGIE NAVÍJENÍ KOMPOZITNÍCH TRUBEK [online]. Brno, 2016 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/59614>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.
- [20.] Pultruze [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>
- [21.] Destruktivní a nedestruktivní zkoušky materiálu [online]. České Budějovice, 2018 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: https://is.vstecb.cz/th/regid/Bakalarska_prace__Jiri_Zdenek_-_finalni_verze__automaticky_obnoveno___2_.pdf. Bakalářská práce. Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích.
- [22.] Technologie zpracování plastů [online]. 2016. Svitavy, 2016 [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>
- [23.] Materiály [online]. Broumov [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.veba.cz/cs/materialy>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Synergický efekt složek kompozitu [4].....	10
Obrázek 2: Hliníková pěna [5]	11
Obrázek 3: Skleněná vlákna [6]	13
Obrázek 4: Prepreg – předimpregnovaná tkanina v ochranné folii [8]	15
Obrázek 5: Plátňová vazba [9].....	15
Obrázek 6: Vazba panama [9]	16
Obrázek 7: Příklady keprových vazeb a) útková 3x3 b) osnovní 5x5 levý c) osnovní 5x10 lomený [9]	16
Obrázek 8: Delaminace [12]	17
Obrázek 9: Ilustrace ručního kladení [14]	18
Obrázek 10: Vakuové lisování za studena [17].....	19
Obrázek 11: Ilustrace technologie stříkáním [18]	20
Obrázek 12: Schéma zobrazení výroby kompozitních materiálů navíjením [19].....	21
Obrázek 13: Metoda L-RTM [11].....	22
Obrázek 14: Ilustrace výroby kompozitních mater tažením [19].....	22
Obrázek 15: Vytvrzování v autoklávu [15]	23
Obrázek 16: Nastříhané vzorky	25
Obrázek 17: Hliníkové desky, použité k zaformování. (Vzorek T45 vlevo, vzorek T90 vpravo)26	
Obrázek 18: Vzorky se strhávací tkaninou	27
Obrázek 19: Vzorky s děrovací fólií	27
Obrázek 20: Odsávací rohož.....	28
Obrázek 21: Vzorek ve vakuovém pytli zapojen do vývěvu v autoklávu	28
Obrázek 22: Zařízení AW – CT 0806 na řezání vodním paprskem	30
Obrázek 23: Vyříznuté zkušební vzorky	30
Obrázek 24: Delaminace vzorků způsobená řezáním vodním paprskem	31
Obrázek 25: Vzorky s hliníkovými plíšky	31
Obrázek 26: Zařízení LabTest 5.100SP1 určené na vykonání tahové zkoušky.....	32
Obrázek 27: Roztrhané vzorky 45° a 90°	35
Obrázek 28: Pryskyřice využité pro vytvoření vzorku	36
Obrázek 29: Vzorky zalité akrylátovou pryskyřicí	37
Obrázek 30: Vzorek H45, zvětšení 25x	37
Obrázek 31: vzorek H90, zvětšení 25x	38
Obrázek 32: Snímek vzorku T45, zvětšení 25x	38
Obrázek 33: Vzorek T90, zvětšení 50x.....	39

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlákno T300J (materiál HexPly®) [11].....	26
Tabulka 2: Vlákno T300 [11].....	26
Tabulka 3: Receptura užitá pro vytvoření kompozitních desek.....	29
Tabulka 4: Rozměry vzorků s orientací matrice 90° na tahovou zkoušku s finálním prodloužením a maximální silou	33
Tabulka 5: Rozměry vzorků s orientací matrice 45° na tahovou zkoušku s finálním prodloužením a maximální silou	33

Seznam Grafů

Graf 1 Průběh zkoušky tahem vzorku 4H45CH	34
Graf 2 Zkouška tahem vzorku 2H90	35

Přílohy

Příloha 1: Výsledky zkoušky tahem