





ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**Ústav strojírenské technologie**

Technologie výroby kompozitových dílů  
s termoplastickou maticí

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Tomáš Kovařík

Studijní obor: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Marek Česal

Praha 2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Tomáše KOVAŘÍKA**

Program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Název: Technologie výroby kompozitních dílů s termoplastickou maticí

Název anglicky: Technology of making composite parts with thermoplastic matrix

### Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky kompozitů
2. Kompozity s termoplastickou maticí
3. Návrh technologie výroby vzorků pro ověření mechanických vlastností
4. Výroba vzorků s termoplastickou maticí
5. Ověření mechanických vlastností vyrobených vzorků
6. Závěr

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Česal

Konzultant: Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 31.10.2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 18.12.2014

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

Zadání bakalářské práce převzal dne:

  
-----  
Student

  
-----  
Vedoucí ústavu



  
-----  
Děkan

V Praze

dne 18. 12. 2014

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

podpis

Chtěl bych poděkovat Ing. Marku Česalovi za jeho cenné rady a postřehy, které mi pomáhaly při tvorbě této práce a za praktické vedení při výrobě.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem technologie výroby kompozitních vzorků z uhlíkové tkaniny a termoplastické matrice pro ověření mechanických vlastností.

V teoretické části jsou popsány základní poznatky o uhlíkové výztuži, historické souvislosti a rozdělení uhlíkových vláken dnes používaných. Je popsána mikrostruktura uhlíkových vláken a shrnutí vlastností uhlíkových vláken. Dále jsou shrnuty poznatky o termoplastické matrici a její funkci v kompozitním materiálu.

V praktické části se tato práce věnuje návrhu výroby zkušebních vzorků, jejich výrobou a ověření mechanických vlastností zkouškou tahem a následném zpracování naměřených hodnot.

Klíčová slova: kompozit, laminát, uhlíkové vlákno, termoplastická matrice, zkouška tahem kompozitu

## **Annotation**

This thesis describes manufacturing technology of composites samples of carbon fiber and thermoplastic matrix to verify the mechanical properties.

In the theoretical section the basic knowledge of the carbon reinforcement is described. Historical context and sorting of carbon fibers using today. It is described microstructure of carbon fibers and the summary of carbon fiber. A summary of the facts of the thermoplastic matrix and its function in the composite material.

In the practical part, this work is focused on the design manufacture and testing of samples, their production and verification of the mechanical properties of tensile test and subsequent processing of the measured values.

Keywords: composite, laminate, carbon fiber, thermoplastic matrix, tensile test of composite



## Obsah

Obsah.....	9
1 Úvod .....	11
2 Kompozitní materiály .....	12
3 Kompozitní materiály s termoplastickou matricí .....	13
3.1 Historie kompozitů s termoplastickou matricí .....	14
3.2 Důvody k použití termoplastických kompozitů .....	15
4 Shrnutí poznatků o uhlíkové výztuži.....	16
4.1 Historie uhlíkového vlákna .....	16
4.2 Uhlíková vlákna dnes.....	17
4.3 Mikrostruktura uhlíkových vláken.....	18
4.4 Výroba uhlíkového vlákna .....	20
4.5 Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN .....	21
4.6 Vlastnosti uhlíkových vláken .....	22
5 Shrnutí poznatků o termoplastických matricích.....	23
5.1 ABS matrice .....	23
5.1.1 Mechanické vlastnosti .....	24
5.1.2 Chování za zvýšených teplot.....	26
5.1.3 Stárnutí a environmentální rezistence .....	27
5.2 PLA matrice.....	28
5.2.1 Mechanické vlastnosti .....	28
5.2.2 Chování za zvýšených teplot.....	29
5.2.3 Stárnutí a environmentální rezistence .....	29
6 Experiment .....	29
6.1 Mechanika kompozitů a jejich zkoušení.....	29
6.2 Zkušební tělesa .....	30
6.3 Výroba zkušebních těles .....	30

6.3.1	Vytištění termoplastických fólií na 3d tiskárně .....	31
6.3.2	Prosycení jednotlivých vrstev kompozitu v peci.....	31
6.3.3	Nastřihání kompozitových pásků .....	32
6.3.4	Nalepení hliníkových příložek.....	33
6.4	Metalografické výbrusy .....	33
6.5	Zkouška Tahem.....	34
6.5.1	Zkouška vzorků s ABS matricí .....	35
6.5.2	Zkouška vzorků s PLA matricí .....	36
6.6	Statistické zpracování naměřených dat.....	37
6.6.1	Průměrná hodnota naměřených veličin .....	37
6.6.2	Směrodatná odchylka .....	37
6.7	Stanovení mechanických vlastností vzorků .....	38
6.7.1	Pevnost v tahu .....	38
6.7.2	Modul pružnosti v tahu .....	38
7	Závěr .....	40
8	Seznam použité literatury .....	41
9	Seznam obrázků .....	42
10	Seznam tabulek .....	42
11	Seznam rovnic .....	43
12	Seznam grafů .....	43

## 1 Úvod

V dávné historii ovlivňovaly její průběh vynálezy vhodných kompozitových materiálů, jako jsou například vysušená hlína s kousky slámy s pevností 7 MPa, na něž odkazuje Bible a byly nalezeny v Izraeli z doby 800 let před naším letopočtem. Mongolské luky laminované kombinací dřeva a vláken s dostřelem až 300 m, které tvořily podstatnou součást výzbroje tatarských nájezdníků. Neméně podstatným historickým kompozitem byla také damascenská ocel, která kombinuje vlastnosti nízkouhlíkové a vysokouhlíkové oceli. (1 str. 3)

Od doby, kdy lidstvo začalo vytvářet umělé předměty, bylo nezbytné řešit problém nevhodnějšího materiálu. Volba byla většinou založena na mechanických vlastnostech, potřebných pro jistý účel. S rozvíjející se technologií se zvyšoval význam dalších vlastností, i když mechanické vlastnosti zůstaly pro řadu aplikací rozhodující. (2 str. 37)

Původně cesta k lepším materiálům znamenala hledání mezi existujícími materiály. Dnes na základě zkušeností a znalostí základních mechanismů působících v pevných materiálech začínáme konstruovat nové materiály. Tento vývoj začal, když se zjistilo, že je možno zlepšit některé vlastnosti existujících materiálů jistým ošetřením, a pokračoval, když se začaly vyrábět nové materiály neexistující v přírodě, např. cihly. Když se objevily kovy, vývoj se urychlil a nabyl důležitosti. Metody a postupy, jak zlepšit jisté vlastnosti materiálů a kovů, se staly přísně střeženým tajemstvím řemeslníků. Většina zlepšení byla ovšem kauzálními nálezy. Na počátku průmyslového věku již znalosti stačily k tomu, aby bylo možno stanovit pravidla, jak získat reprodukovatelné materiály s lepšími nebo rozdílnými vlastnostmi. (2 str. 37)

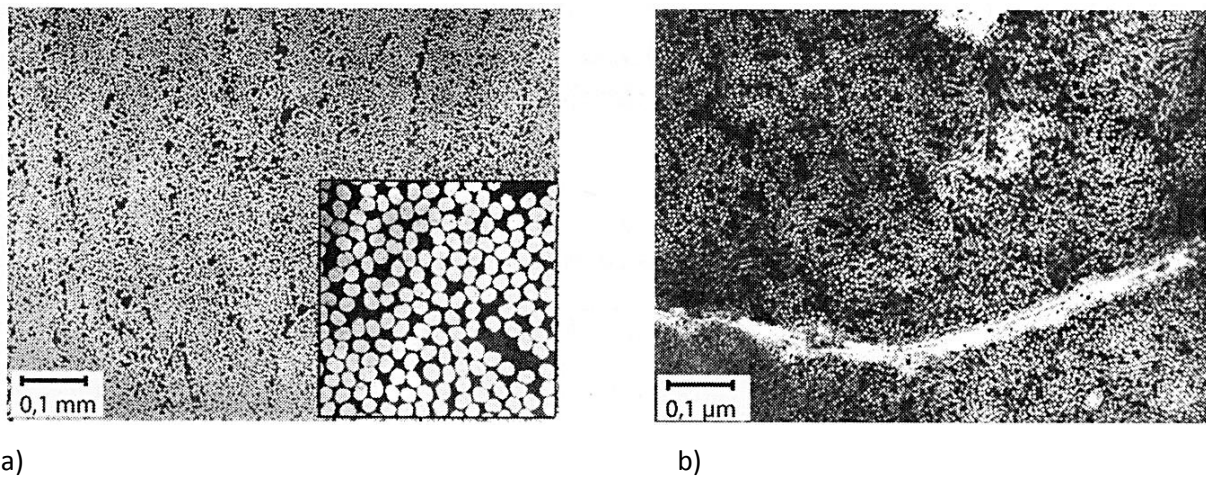
Každá etapa ve vývoji vědy se dovršuje tehdy, když se stává zřejmé, že vznikla nová disciplína. V tomto okamžiku se zvyšuje zájem o předmět a vývoj se podstatně urychlí. Podíváme-li se zpět, nalezneme potvrzení tohoto vývoje u řady věd: např. pomalý vývoj metalurgie během staletí a následující velký skok v posledních 100 letech. Zatím nesouvislé poznatky jsou spojovány a izolovaná pozorování jsou uspořádána do nových obecných závěrů. V posledních letech tak vznikla biochemie, astrofyzika, chemické inženýrství, elektronika. (2 str. 37)

Věda o materiálech vznikla nedávno jako nová disciplína, která zahrnuje většinu z toho, co dříve tvořila metalurgie, keramika, technologie skla, technologie polymerů a jiné materiálové technologie. S růstem materiálových věd se ukázalo, že materiály je třeba studovat jako třídu, jako samostatný obor. Je to důsledek nejen evolučního vývoje samotného poznání materiálů, ale i probíhající materiálové revoluce, která je podmíněna i rostoucím nedostatkem surovin a energie. Tato revoluce může mít na rozvoj civilizace tak velký dopad jako materiálová revoluce, k níž došlo při přechodu

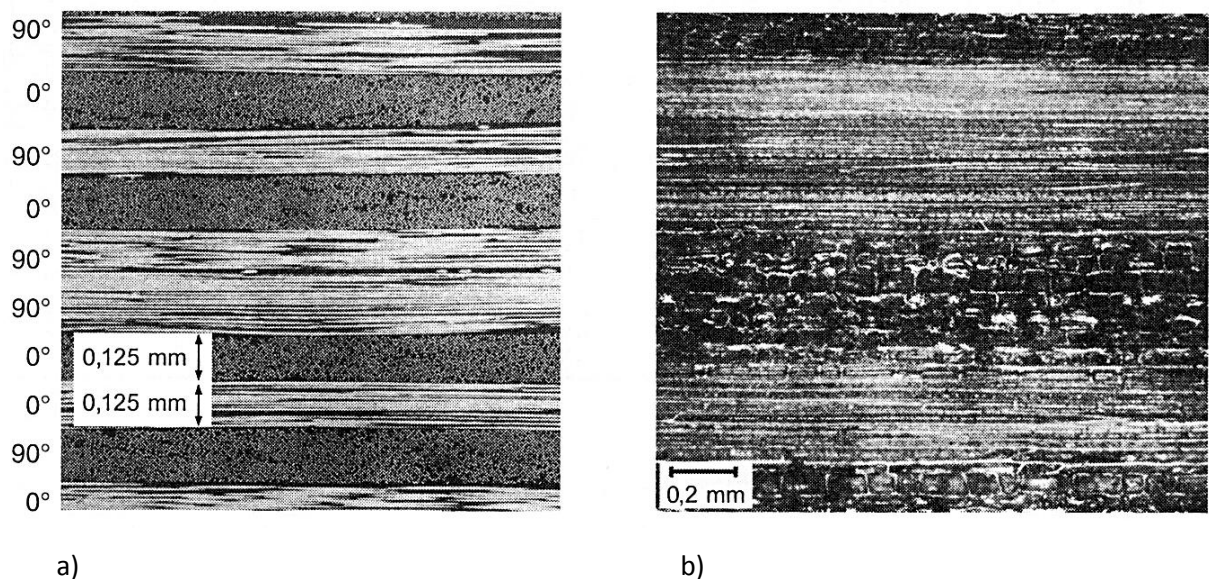
z bronzového do železného věku. Je založena především nabízené přípravě složených materiálů kompozitů materiálů nových vlastností s podstatně účinnějším využitím hmoty a energie. (2 str. 38)

## 2 Kompozitní materiály

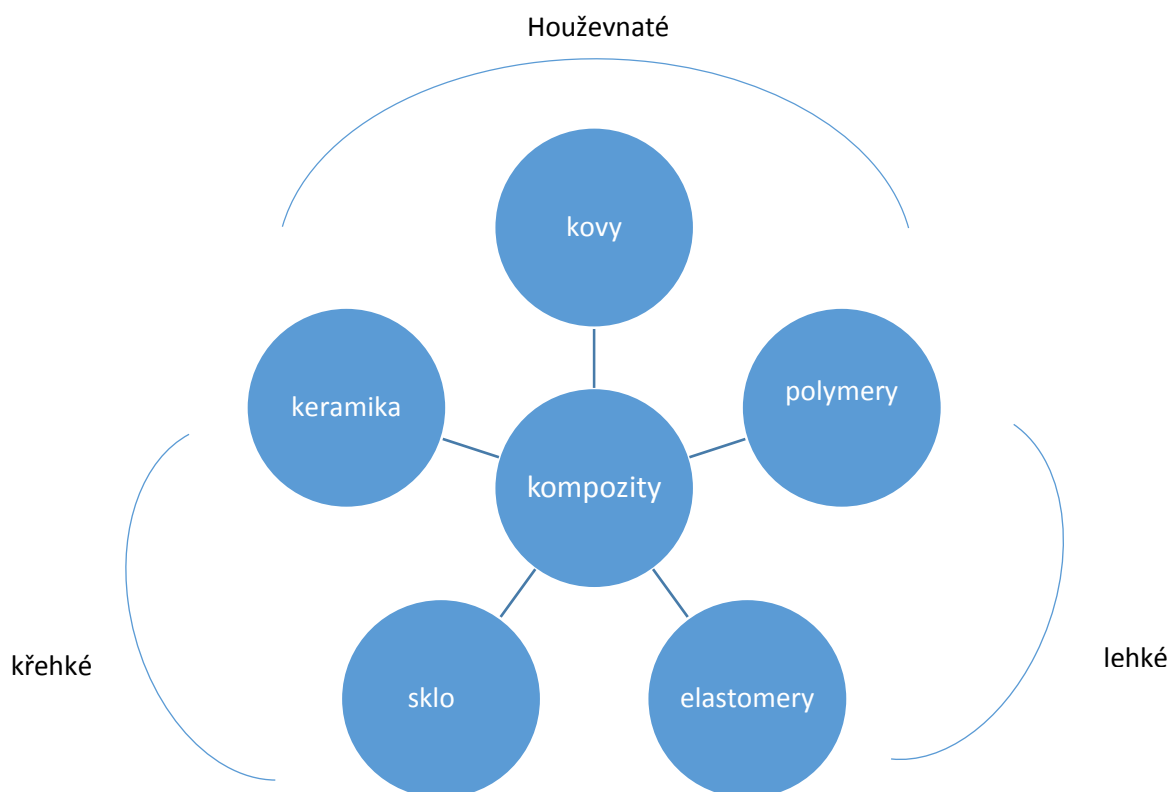
Je běžné, že příroda využívá synergických účinků různorodých materiálů pro dosažení lepších vlastností a vytváří materiály připomínající materiály kompozitní. Například řez buňkou vlny merino a příčný výbrus epoxidové pryskyřice jednosměrně vyztužené uhlíkovými vlákny mají podobnou strukturu, liší se ovšem rozměrem (Obrázek 1). Obdobně lze porovnávat vrstvenou strukturu epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny se strukturou bambusového stonku (Obrázek 2).



**Obrázek 1 - Řez kompozitem z epoxidové pryskyřice jednosměrně vyztužené uhlíkovými vlákny (a) a buňkou vlny merino (b) (3 str. 19)**



**Obrázek 2 - Řez laminátem z epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken (a) a bambusovým stonkem (b) (3 str. 19)**



**Obrázek 3 - Základní rozdělení technických materiálů**

### 3 Kompozitní materiály s termoplastickou maticí

Termoplastové polymery pro matici mohou značně redukovat cenu kompozitu (o 25% až 80% proti reaktoplastovým) a v poslední době je jim věnována zvýšená pozornost. Cenové úspory jsou především výsledkem snadnější výroby i složitých tvarů. Výsledkem může být poměrně dobrá dimenzionální stabilita, malý obrus (zejména s použitím C vláken, s nimiž se sníží též součinitel tření asi na 1/3), zvýšená pevnost, modul a houževnatost. (2 str. 279)

Z termoplastů, které přicházejí v úvahu pro vyztužování vláken, jsou nejčastější polyamidy (nylon), polyethylen, polypropylen, polykarbonát, styren – akrylonitril acetáty, polybutylentereftelát (polystyren), polysulfon, polyethersulfon, polyfenylsulfid, polyvinylidenfluorid, tavitelné kopolymery tetrafluorethylenu. (2 str. 279)

Vlastnosti těchto kompozitů (jež jsou nehomogenní a anizotropní) velmi závisí na výrobním postupu (který ovlivňuje rozložení vláken, orientaci vláken, distribuci délek, stupeň porušení vláken), na pevnosti a na jiných vlastnostech vláken (např. teplotní vodivosti, houževnatosti), na povrchové úpravě (2 str. 279)



Termoplastické kompozity se v posledních letech objevily jako vážní kandidáti pro použití v pokročilých aplikacích jako je letectví a dalších vysoce výkonných průmyslových odvětvích. V těchto aplikacích dominovaly do nedávné doby reaktoplastické matrice. Termoplastické polymery a jejich krátké vláknové kompozity ovládly pole formovacích materiálů díky schopnosti rychle vyrábět složité tvary technologiemi jako je vstřikování. (4 str. 43)

Ke vzniku termoplastických kompozitů jako pokročilých materiálů došlo v důsledku vývoje materiálů a technologického poptávky. US Office of Technology Assessment identifikovala zlepšení houževnatosti a snížení nákladů na výrobu jako dva hlavní požadavky na kompozitní materiály používané v leteckých a vojenských aplikacích. Materiáloví vědci pracují na dosažení těchto cílů s kompozity s reaktoplastickými maticemi. Nicméně, je zde paralelní vývoj s termoplastickými polymery a impregnačními technologiemi, které vedou až do bodu, kdy termoplastické matrice nyní plně splňují požadavky pro letecké aplikace. (4 str. 43)

Oblast použití vyspělých termoplastických kompozitů se rychle rozšiřuje. Za vyspělé termoplastické kompozity se považují kompozity, které obsahují alespoň 50% objemových dlouhých vláken výztuže. (4 str. 43)

Jako kompozitní matrice je k dispozici velké množství polymerů. Mohou být seskupeny podle morfologie do amorfni, částečně krystalické a kapalně krystalických polymerů. Kompozitní materiály jsou k dispozici ve formě pásků nebo zcela impregnované látky (pre-pregů) a v jiných formách, včetně hybridních forem polymerových a výztuhových vláken nebo práškem impregnované tkaniny. V některých případech je stejný polymer k dispozici v mnoha různých formách impregnace s rozdílnými požadavky na zpracování. Některé pre-pregy obsahují zcela polymerizovaný termoplast, zatímco jiné budou obsahovat pre-polymery. V takovém případě musí být polymerace dokončena v průběhu fáze zpracování/zhotovení. Tyto materiály jsou obvykle označovány jako "pseudo-termoplasty". (4 str. 44)

Termoplastické polymery jsou obvykle plně polymerované a mají relativně vysokou viskozitu taveniny, což způsobuje obtížnou impregnovatelnost do malých průměrů vláken (5-15  $\mu\text{m}$ ) v požadovaném obsahu vláken (> 50% objemových). (4 str. 44)

### 3.1 Historie kompozitů s termoplastickou maticí

Hlavní důvod pro použití termoplastických kompozitů je ekonomický. Termoplastické matrice nabízí potenciál pro značné snížení počátečních a provozních nákladů na komponenty. Letectvo a námořnictvo USA v roce 1970 sponzorovalo program výzkumu relativních nákladů na hotové díly

vyrobené z reaktoplastických a termoplastových kompozitů. Výsledky prokázaly, že termoplastické kompozity mohou nabídnout významné snížení nákladů ve srovnání s reaktoplasty pro část letadlových dílů. To je způsobeno rychlou výrobou z termoplastických kompozitů. Některé aplikace z těchto počátečních studií byly vyvinuty hlavně pro malý objem specializovaných dílů, jako jsou kryty radarových antén. (4 str. 44)

### 3.2 Důvody k použití termoplastických kompozitů

Některé z výhod a problémů termoplastických kompozitů jsou zřejmé z předchozí části a jsou shrnuty v tabulce (***Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.***). Reaktoplastické kompozity mají vyšší "trvanlivost", v důsledku chemických reakcí, které se v těchto pryskyřicích vyskytují. Pre-pregy musí být skladovány pod pokojovou teplotou a čas pro kladení je časově omezen. Je proto nutné důsledně řídit a plánovat zásoby a mít zvláštní podmínky pro skladování což zvyšuje náklady. To není případ termoplastických kompozitů, které za normálních okolností mají neomezenou skladovatelnost a nevyžadují žádné zvláštní podmínky uchovávání. Reaktoplastické pre-pregy jsou lepidivé, což může být výhodou v manipulaci a kladení. Plně impregnované termoplastické pre-pregy jsou tuhé, což značně komplikuje kladení a zpracování. (4 str. 46)

Termoplastické kompozity obecně nabízejí kombinaci vysoké houževnatosti a dobré odolnosti vůči prostředí. Houževnatost pochází z kombinace vrozené houževnatosti s vysokou molekulovou hmotností a lineárně zřetěženými polymery v kombinaci s dobrou impregnací a mezifázovými vlastnostmi. Tato vysoká houževnatost také přispívá ke snížení provozních nákladů, vzhledem k menším požadavkům na nákladné nedestruktivní zkoušky a nižší frekvence oprav. Epoxidová pryskyřice plastifikuje v prostředí horké vody, ale má vynikající odolnost vůči více agresivním prostředím, které se vyskytují v leteckých aplikacích. Většina termoplastických polymerů mají malou citlivost vůči vodě, i když některé z nich mohou být ovlivněny prostředím, jako jsou ředidla a hydraulické kapaliny. (4 str. 47)

Reaktoplastové matricové materiály vyžadují dlouhou dobu vytvrzování, typicky mnoho hodin v důsledku chemických reakcí v pryskyřici. Termoplastická matrice může být zpracována velmi rychle, je vyžadováno pouze ohřátí, tvarování a chladnutí. Teploty zpracování jsou zpravidla vyšší u termoplastů než u reaktoplastů, ale doba zpracování je obvykle v minutách spíše než v hodinách. K polymeraci reaktoplastických matric dochází během výroby dílu a proto je možné ověřit kvalitu dílu až po v posledních fázích výroby. Termoplasty mohou být zpracovány s použitím široké škály výrobních technologií, ale je třeba dále prokázat praktičnost a ekonomičnost technologie ve výrobě. Pro termoplastické kompozity je chemický proces kompletní již před výrobou dílu a proto je možné

ověřit kvalitu polymeru již před výrobním procesem. K dispozici je také potenciál pro opětovné zpracování nedokonalé části a recyklace nepoužitého materiálu pro další aplikace, z nichž ani jeden není možný s reaktoplasty. (4 str. 47)

	<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
<b>Skladování a manipulace</b>	Neomezená trvanlivost. Žádné speciální podmínky pro skladování.	Tuhost pre-pregu bez lepidlosti.
<b>Vlastnosti</b>	Vysoká houževnatost. Dobrá environmentální odolnost	Omezené možnosti vyhodnocování dlouhodobých vlastností (creep, únava) a odolnosti vůči prostředí.
<b>Zpracování</b>	Výroba bez přídavné chemie. Potenciálně rychlé zhotovení při nízkých nákladech. Potenciál pro znovuzpracovatelnost. Možnost recyklace. Potenciál pro snadnou kontrolu kvality.	Výrobní procesy se stále vyvíjí. Vysoká teplota zpracování a s tím související dražší materiály nutné ke zpracování. Může být nutná kapitálová investice do nového zařízení.

*Tabulka 1 - výhody a nevýhody termoplastických kompozitů (4 str. 46)*

## 4 Shrnutí poznatků o uhlíkové výztuži

### 4.1 Historie uhlíkového vlákna

Oficiálně je za otce uhlíkových vláken považován Edison, neboť v roce 1879 zveřejnil svůj vynález žárovky s karbonizovaným bambusovým vláknem. První vědecké pojednání zahrnující vláknité formy uhlíku se objevuje v roce 1890. O půl století později byla vypěstována vlákna rozkladem metanu, propanu a etylenu při 1200°C na křemenných podložkách krátce poté byla získána zkroucená vlákna délek v jednotkách milimetrů na vyzdívice vysokých pecí pro výrobu železa. Současně probíhaly pokusy o pyrolýzu viskózních vláken, které vyvrcholily tím, že firma Union Carbide Corporation zavedla na trh kontinuální vlákna pod označením Thornel 25. Práce na využití pyrolýzy plynů pokročily k využití vyšších uhlovodíků. Již při 1000°C se podařilo rozkladem n-heptanu v křemenné trubici připravit širokou paletu vláken s délkami do 5 cm a průměrem do 200 μm. (5 str. 32)



Počátek šedesátých let zaznamenává úspěšné pokusy o karbonizaci dalších organických vláken. Nejlepším prekurzorem se jeví vlákna polyakrylonitrilová. Vlivem napětí při teplotách nad 2000°C se zlepšily mechanické vlastnosti vláken z viskóзовého prekurzoru – Thornely 40, 50, 75 a 100 mají pevnost v tahu i modul pružnosti vhodný pro vyztužování polymerů a kovů. Nezávisle na japonských pracích využívá skupina v Royal Air Force ve Farnborough UK polyakrylonitril stabilizovaný oxidačním způsobem a dosahuje nečekaně vynikajících mechanických vlastností. Počátek sedmdesátých let znamená nástup uhlíkových vláken z isotropaních smol. Následovaly experimenty na vylepšování kvality PAN prekurzoru se současným růstem mechanické pevnosti vláken a počátky uplatnění mezofázových smol. Uhlíková vlákna z par, díky rozpracování katalytických vlivů přechodných kovů, obzvláště železa, na kvalitu růstu vláken, postupně přecházely do průmyslových objemů. Po objevu fullerenu přicházejí na svět uhlíkové nanotrubičky a vzniká tak plynulý přechod od kontinuálních uhlíkových vláken až po vlákna v nanopodobě. Technologický vývoj v oblasti uhlíkových vláken pokračuje neustále dál k vyšším mechanickým parametrům a k jejich lepšímu využití. (5 str. 32)

## 4.2 Uhlíková vlákna dnes

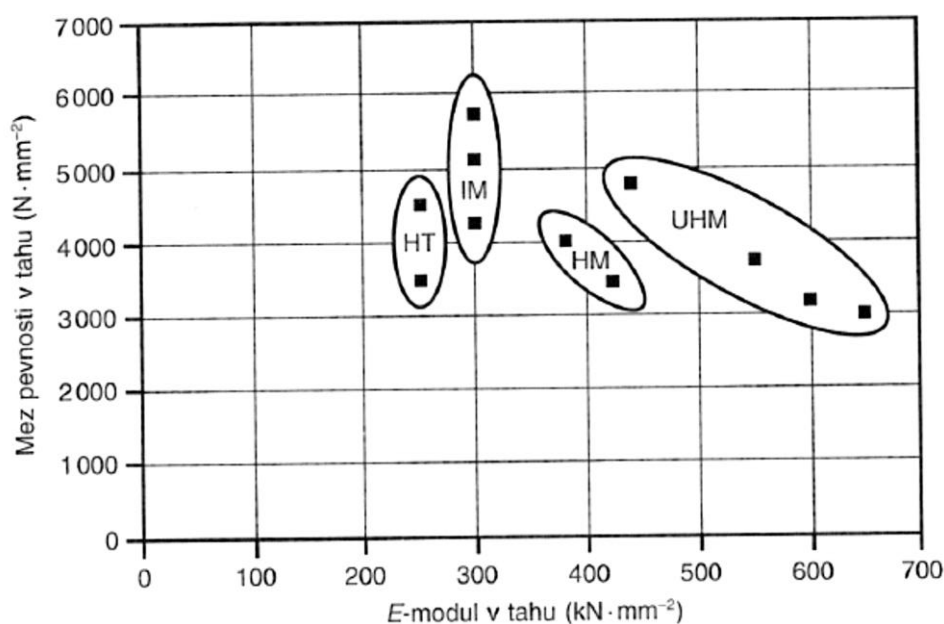
Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fibres) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. Přitom se odštěpují téměř všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující grafitizací, se zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800°C je tvorba grafitové struktury ukončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v čistém grafitu. (5 str. 12)

Uhlíková vlákna jako technický materiál jsou známa zhruba 50 let. Postupně byly vyvíjeny nové typy vláken se speciálními vlastnostmi, původní materiál sloužící pouze pro vysokoteplotní izolace získával stále vyšší pevnost, modul pružnosti, elektrickou a tepelnou vodivost respektive adsorpční vlastnosti. V současné době je třeba rozlišovat:

- Uhlíková vlákna nižších parametrů - pevnost v tahu < 1000 MPa, modul pružnosti v tahu < 100 GPa. Tato vlákna jsou obvykle připravována přímo ve formě textilních útvarů - tkanin, pásků, apod. Prekurzorem je viskóza nebo izotropní smoly. Používají se jako tepelná izolace, elektromagnetické stínění, odstraňování elektrostatických nábojů v povrchových vrstvách kompozitních struktur. (5 str. 12)
- Uhlíková vlákna s vysokými mechanickými parametry (high performance carbon fibers) - pevnost v tahu 3,5 - 7 GPa, modul pružnosti 230 - 930 GPa. Do této skupiny zahrnujeme vlákna připravená z polyakrylonitrilové suroviny, z mezofázových smol a vlákna charakteru whiskerů připravených katalytickým rozkladem plynných uhlovodíků (VGCF – vapor grown CF). Podle

konkrétních mechanických vlastností je tato skupina dále členěna na vysocepevná vlákna (high tensile or high tenacity – HT fibers), vysokomodulová vlákna označená HM, středně modulová vlákna (intermediate modulus – IM fibers) a vlákna se supervysokým modulem (ultrahigh modulus – UHM fibers). (5 str. 12)

- Standardní HT uhlíková vlákna mají pevnost v tahu mezi 3 až 4 GPa, modul pružnosti 230-300 GPa (typická vlákna mají označení T300 od firmy Toray). Nové typy těchto vláken mají obdobný modul pružnosti, ale pevnost značně vyšší (firma Toray typy T800 a T1000). (5 str. 12)
- IM vlákna mají pevnost nad 4 GPa a modul pružnosti nad 290 GPa (M30SC fy Toray, IM 8 fy Hexcel, IMS fy Tenax a MR nebo MS fy Pyrofil). (5 str. 12)
- HM a UHM vlákna mají obvykle pevnost v tahu 2,5–4 GPa, modul elasticity nad 400 GPa, respektive nad 550 GPa (UHM). (Typická HM vlákna: M46 – M60 fy Toray, UMS fy Tenax; UHM fiber: UHM fy Hexcel). Nejvyšších modulů pružnosti dosahují vlákna z mezofázových smol (Mitsubishi Dialed, BP Amoco K 1100 – modul elasticity 910 GPa). (5 str. 12)
- VGCF centimetrových délek se vyznačují vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí až  $2,6 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , respektive  $1900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . (5 str. 13)



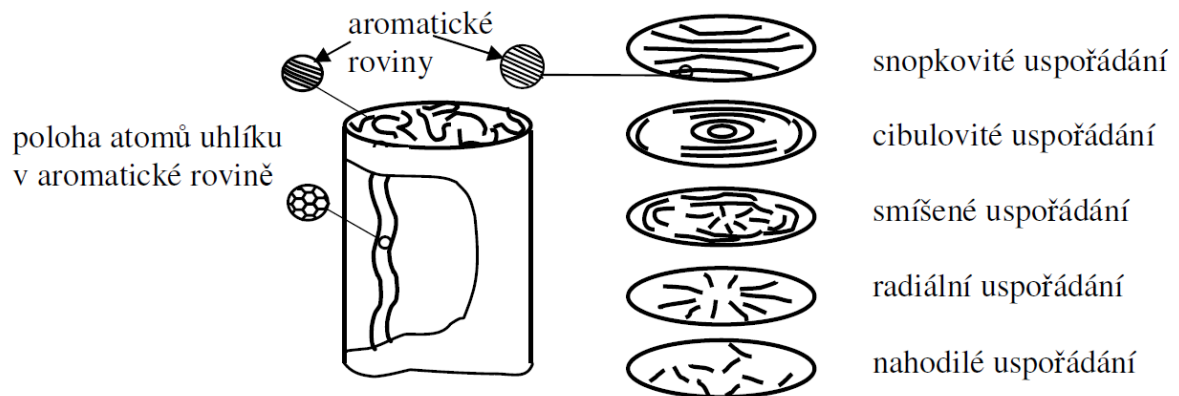
**Obrázek 4 - Rozdělení uhlíkových vláken (ve stavu bezprostředně po výrobě) (3 str. 57)**

### 4.3 Mikrostruktura uhlíkových vláken

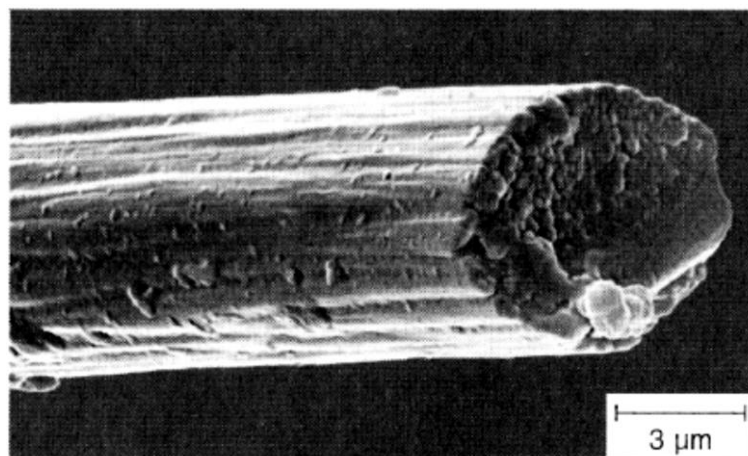
Je známo, že krystal grafitu je vysoce anizotropní, ve směru kolmém k bazálním rovinám šesterečné mřížky působí jen slabé Van der Waalovy vazby, kdežto v rovinách bazálních vrstev, v tzv. „aromatických“ rovinách, jsou atomy vázány velmi pevnými kovalentními vazbami. Teoretická

pevnost grafitového monokrystalu namáhaného tahem ve směru rovnoběžném s bazálními rovinami činí přibližně 100 GPa a teoretický modul pružnosti v tahu je přibližně 1000 GPa. (6 str. 24)

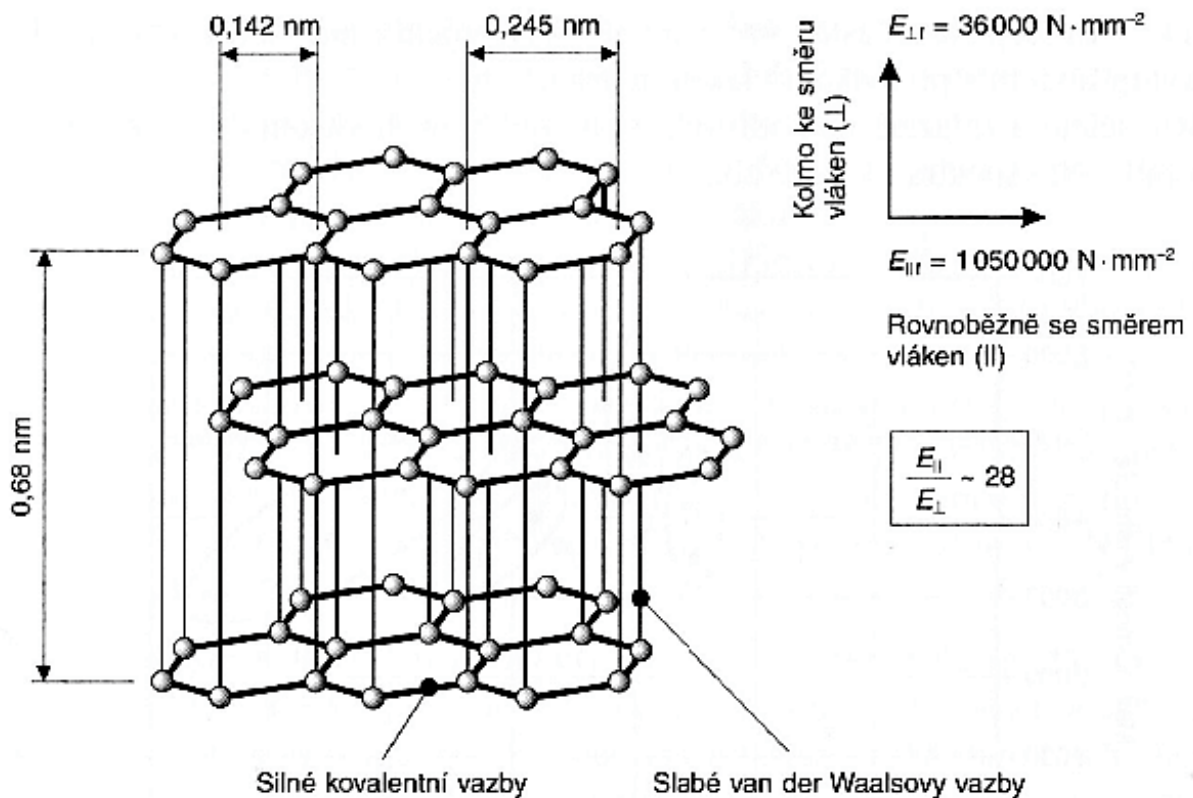
Vysoké pevnosti a tuhosti aromatických rovin je využito v uhlíkových vláknech, ve kterých jsou bazální roviny orientovány převážně rovnoběžně s podélnou osou vlákna. (6 str. 24)



**Obrázek 5 - Mikrostruktura uhlíkových vláken kruhového průřezu je - vlevo vlákno z PAN, vpravo vlákna z mezofázových dehtů (pouze příčné řezy) (6 str. 25)**



**Obrázek 6 - Snímek uhlíkového vlákna rastrovacím elektronovým mikroskopem (3 str. 58)**



Obrázek 7 - Ideální grafitová struktura uhlíkového vlákna (3 str. 58)

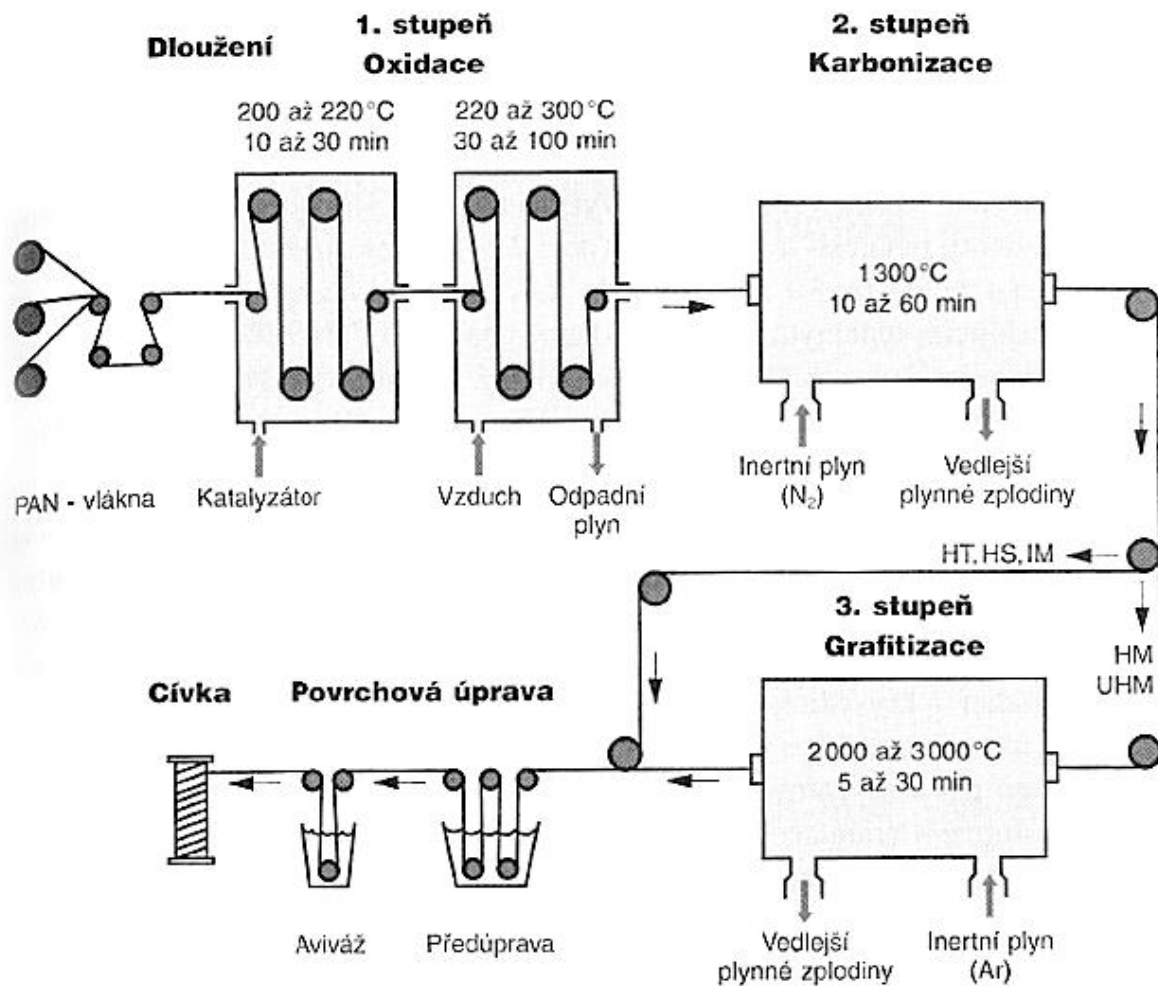
#### 4.4 Výroba uhlíkového vlákna

Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály:

- Celulóza – vyrobená vlákna však mají méně dokonalou strukturu, používají se převážně jako izolační materiál pro vysoké teploty. (3 str. 56)
- Polyakrylonitril (PAN) – používá se od roku 1980 stále častěji, vlákna z něj vyrobená jsou považována za standardní vlákna. (3 str. 56)
- Smola, ze které se nákladným způsobem připravují vlákna, jejichž konečná cena je vzhledem k nízké ceně výchozí suroviny příznivá. Tato vlákna mají vysokou hodnotu modulu pružnosti v tahu a velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti. Jejich pevnost v tlaku je ve srovnání se standardními vlákny podstatně nižší, protože vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami jsou řidší. Na trhu mají pouze malý podíl. Většina vláken s vysokým modulem pružnosti (HM) a vysokou pevností (HT) se používá pro speciální účely. (3 str. 56)

#### 4.5 Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN

- **Stabilizace** – při teplotách 200 až 300 °C, za působení tahového napětí a v oxidačním prostředí je PAN vlákno stabilizováno. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN (vytvoření paralelních žebříkovitých makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vlákno při této etapě zčerná a stane se netavitelným. (6 str. 22)
- **Karbonizace** – při teplotách od 1000 °C do 1800 °C v inertním prostředí (velice čistý dusík) ve vláknu proběhne karbonizace (odstraní se vodík a sníží obsah dusíku a kyslíku, 80 až 95 % hmoty tvoří uhlík). Vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu. (6 str. 22)
- **Grafitizace** – nemusí vždy následovat. Při teplotách do 3000 °C v inertním prostředí (argon). Ještě více se zvětší obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokrystalů. Vyvinutější mikrokrystaly vedou k zvětšení tuhosti vlákna. U vláken z PAN je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokrystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. U nejtěžších vláken je používáno dloužení při grafitizaci. Při dloužení se zmenší úhel odklonu mikrokrystalů od osy vlákna (tzv. „vysokomodulová“ (UHM) vlákna z PAN). (6 str. 22)



Obrázek 8 - Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken (3 str. 59)

#### 4.6 Vlastnosti uhlíkových vláken

- Progresivní deformační chování, tzn. se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota modulu pružnosti v tahu.
- Vysoká pevnost i hodnoty modulu pružnosti v tahu až do teploty 500°C:  
 $\sigma_{PIIf} = 1\,500 \text{ až } 3\,500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ,  $E_{PIIf} = 180\,000 \text{ až } 500\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
- Nízká hustota:  
 $\rho_f = 1,6 \text{ až } 2,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- Mimořádně vysoká korozní odolnost (neodolávají pouze silně oxidačnímu prostředí).
- Dobrá elektrická ( $\sigma$ ) a tepelná vodivost:  
 $\sigma \sim 6,7 \cdot 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
- Snášenlivost s tělesnými tkáněmi, lze je použít jako implantáty (umělé kyčelní klouby)

- Uhlíková vlákna jsou ve srovnání se skleněnými vlákny silně anizotropní. Typická hodnota poměru:  

$$E_{\parallel f} / E_{\perp} = 28, \sigma_{P\parallel f} \gg \sigma_{Pt\perp f}$$
- Anizotropie ovlivňuje také součinitel teplotní roztažnosti, hodnoty měřené ve směru vláken a kolmo na vlákna jsou velmi rozdílné:  $\alpha_{\parallel f} = -0,1$  až  $-1,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$   $\alpha_{\perp f} = 15 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- Uhlíková vlákna jsou za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. Proto se při zpracování povrchově upravují apretační směsí na bázi epoxidové pryskyřice. Ta slouží současně jako prostředek pro zlepšení vazby mezi vláknem a matricí.
- Při delším skladování dochází k vytvrzení apretační povrchové vrstvy a vlákna ztrácejí ohebnost.
- Dobrý průchod pro záření, neodráží radarový paprsek.
- Uhlíková vlákna mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. Dynamické vlastnosti laminátu s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u všech ostatních materiálů (např. hliníku a oceli)
- I když jsou uhlíková vlákna hořlavá, je rychlost hoření kompozitu obsahujícího 90 % uhlíkových vláken velmi nízká. (3 str. 61)

## 5 Shrnutí poznatků o termoplastických matricích

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken, tj.:

- přenos namáhání z vlákna na vlákno
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
- ochrana vlákna před vlivy okolí

Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. (3 str. 71)

### 5.1 ABS matrice

ABS je typicky směs styren-akrylonitrilu (SAN) a polybutadienového kaučuku, ale někdy se jedná o kopolymer. Akrylonitril upravuje lesk, mechanické a chemické vlastnosti. Butadien upravuje rázovou houževnatost, ale mění odolnost vůči prostředí a optické vlastnosti slitiny. (7 str. 329)

Rozsah vlastností ABS je velmi široký v závislosti na poměru jednotlivých prvků (monomerů), které mohou být:

- mezi 40% - 60% styren
- mezi 15% - 35% akrylonitril
- mezi 5% - 30% butadien (7 str. 329)

#### Výhody ABS

- dobré mechanické vlastnosti
- vysoká rázová houževnatost
- dobrá objemová stabilita
- lesk
- dobré vlastnosti za nízkých teplot
- snadné zpracování širokou škálou technologií
- je inertní vůči široké škále chemikálií
- má nízkou absorpci vody
- elektricko-izolační vlastnosti i ve vlhkém prostředí
- svařitelnost

(7 str. 329)

#### Nevýhody ABS

- největší nevýhodou je přirozená citlivost na teplo
- degradace vlivem UV záření
- vysoká cena
- slabší odolnost proti poškrábání
- creep za zvýšených teplot
- vytváří elektrostatický náboj

#### 5.1.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti jsou obecně velmi dobré. Rázová houževnatost je mnohem lepší než u polystyrenu. Abrazivní odolnost a ošetrivost závisí na drsnosti a typu proti-plochy, ale obecně je značně limitující. (7 str. 334)

#### *Dimensionální stabilita*

Smrštění a koeficient tepelné roztažnosti je na nižší nebo průměrné hodnotě polymerů, závisící na příměsi gumy. Absorpce a změny vlivem působení vlhkosti jsou nízké. (7 str. 334)



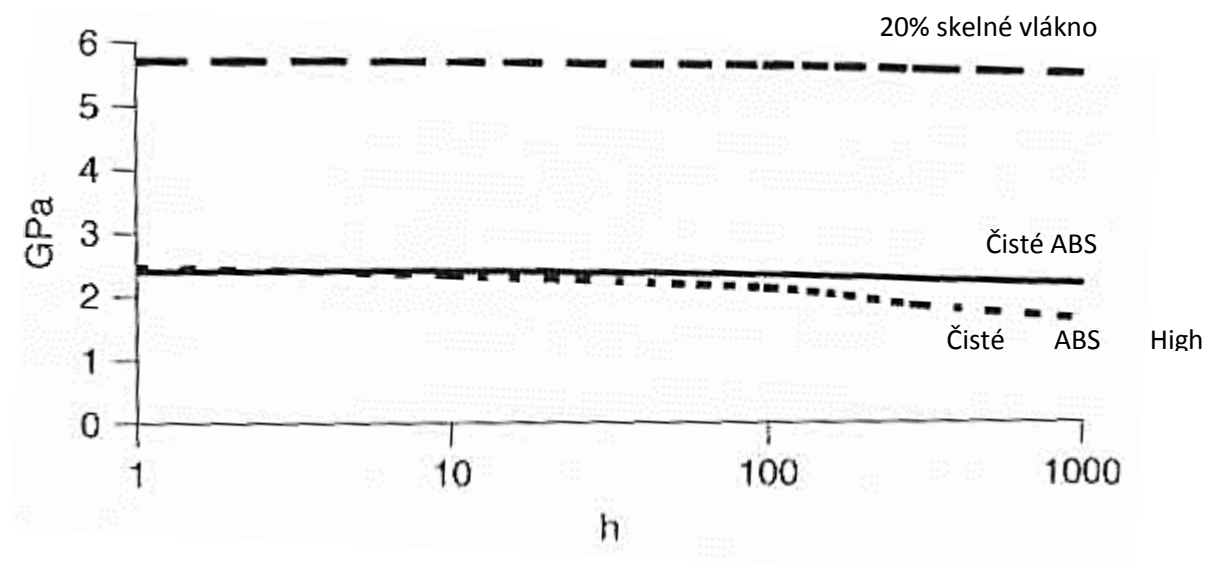
### Poissonův poměr

Závisí na mnoha parametrech týkajících se varianty ABS, jeho zpracování, teplotě a molekulární orientaci, případně orientaci výtzuže. Většinou bývá v rozsahu 0,35 – 0,39. (7 str. 334)

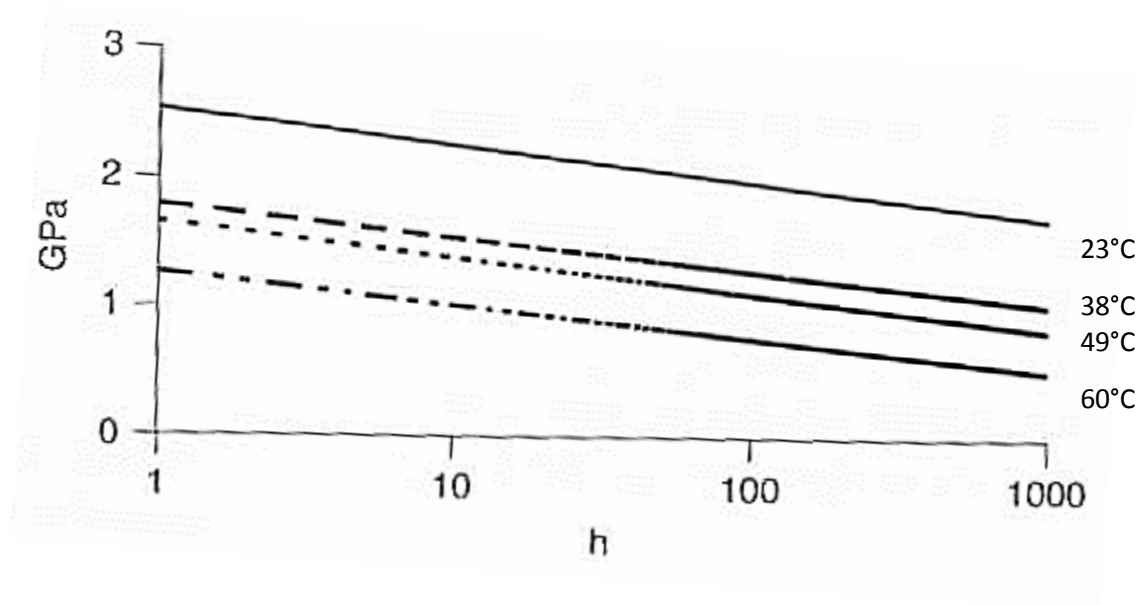
### CREEP

Čistý ABS má dobrý modul při pokojové teplotě spolu s creep modulem.

- 2,0 – 2,5 GPa po jedné hodině v pokojové teplotě pod 7 – 14 Mpa
- 1,4, - 2,1 GPa po 1000 hodinách při pokojové teplotě pod 7 – 14 MPa.



Obrázek 9 - CREEP čistého ABS a s výztuží 20% skelného vlákna: Příklad CREEP modulu [GPa] při pokojové teplotě versus čas [hod] pod zatížením 14MPa (7 str. 334)



Obrázek 10 - CREEP čistého ABS: příklad CREEP modulu [GPa] za různých teplot versus čas [hod] pod zatížením 7MPa (7 str. 334)

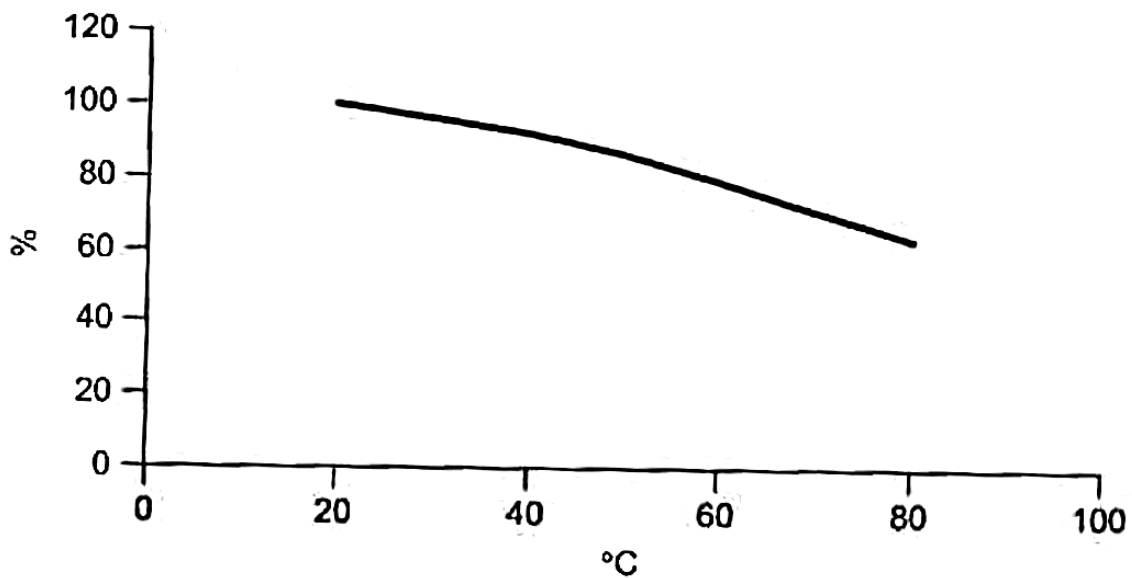
### 5.1.2 Chování za zvýšených teplot

Teplota nepřetržitého používání je u ABS do 100°C, pro teplovzdorné varianty může být až 110°C pokud je jejich teplota změkčení vyšší. (7 str. 333)

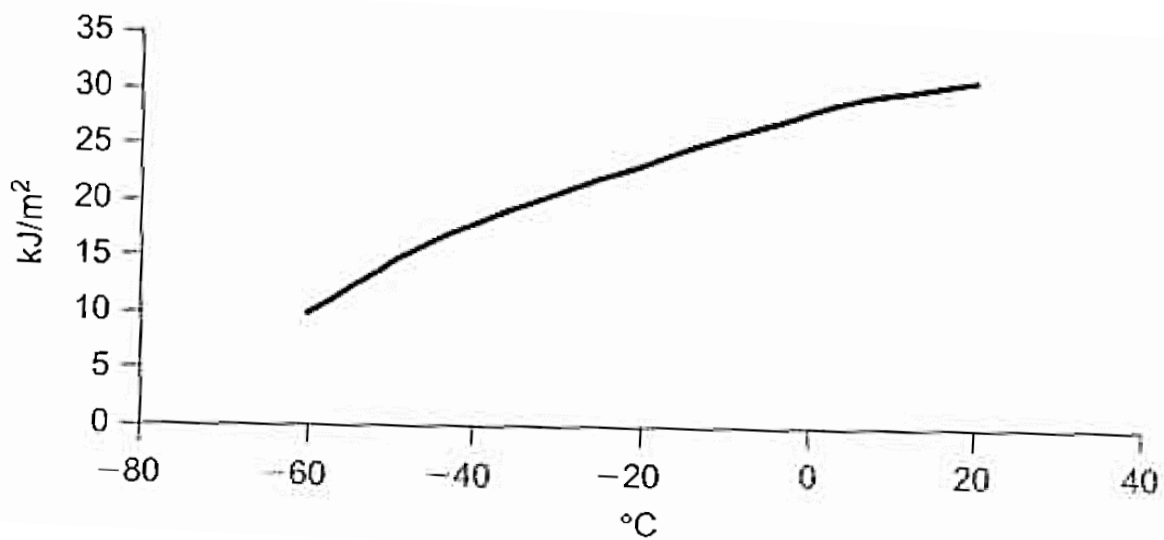
Teplota skelného přechodu ABS je obecně 95°C – 115°C. (7 str. 333)

**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Obrázek 11 zobrazuje příklad modulu pružnosti versus krátkodobý nárůst teploty. Dlouhodobé účinky působení tepla záleží na použitých tepelných stabilizátorech. Charakteristickým rysem je prodloužení při rázu, které je zvláště závislé na teplotě. (7 str. 333)

Za nízkých teplot je ABS mnohem méně křehký než polystyren a funguje bez problémů až do -20°C nebo -40°C v závislosti na kvalitě ABS. (7 str. 333)



Obrázek 11 - Příklad ABS modulu pružnosti [%] versus teplota [°C] (7 str. 333)



Obrázek 12 - ABS: příklad vrubové houževnatosti [kJ/m²] versus nízká teplota [°C] (7 str. 333)

### 5.1.3 Stárnutí a environmentální rezistence

#### *Dynamická únava*

Dynamická únava je příznivá až do namáhání pod úroveň prodloužení.

### *Odolnost vůči prostředí*

ABS odolává hydrolýze, ale je přirozeně citlivé vůči světlu a UV záření tím více, čím více je monomeru polybutadienu. Dá se chránit příměsí anti-UV a jinými přísadami nebo filmem z PVDF a jinými UV resistantními polymery.

### *Chemická odolnost*

Čisté ABS absorbuje vodu a není vůči ní příliš odolné. Je použitelné pro balení potravin. Odolává zředěným organickým i anorganickým kyselinám s výjimkou silně oxidujících. Neuspokojivé výsledky má v kontaktu se silnými kyselinami.

## 5.2 PLA matrice

Polylactic acid (PLA) má řadu zajímavých vlastností, ale tou nejdůležitější a nejsledovanější je jeho biodegradabilita – biologická rozložitelnost. To je schopnost rozkládat se v prostředí bohatém na vlhkost a mikroorganismy na tzv. biomasu. (8 str. 25)

Hustota je vyšší než hustota většiny běžných polymerů, která se pohybuje mezi  $0,8-1,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . PLA je poměrně vysoce transparentní. Jen o něco málo než PET-A, zato více transparentní než například PP,SBS nebo OPS – orientovaný polystyrén. (8 str. 31)

PLA plasty jsou druhým nejpoužívanějším typem bioplastů podobný konvenčnímu polystyrenu s kvalitním povrchem (lesklý a čirý), tuhý a křehký. (7 str. 704)

Podmínky pro zpracování jsou víceméně podobné jako u konvenčních plastů. Nicméně, je nutné vzít v úvahu následující vlastnosti:

- Vysoká citlivost na vodu a vlhkost, která je závislá na teplotě. Suché prostředí je základní podmínka pro stabilitu materiálu v roztaveném stavu. Vlhkost prostředí musí být menší než 0,025% pro prevenci viskózní degradace.
- Nekompatibilita s jinými polymery. Veškerá technika, která při zpracování přijde s výrobkem do kontaktu, se musí před zpracováním PLA důsledně očistit.
- Teplota zpracování musí být co možná nejnižší a časy pro zpracování musí být co možná nejkratší.

### 5.2.1 Mechanické vlastnosti

PLA má dobré mechanické vlastnosti, ve srovnání se standardními termoplasty. Má nízkou rázovou pevnost, srovnatelnou s neměkčeným PVC. Modul pružnosti v tahu je 3834 MPa.

### 5.2.2 Chování za zvýšených teplot

PLA je tuhý při pokojové teplotě. Teplota skelného přechodu je obvykle mezi 55-65 °C a teplota tání polylaktidu je mezi 160-170 °C. (8 str. 31)

### 5.2.3 Stárnutí a environmentální rezistence

PLA je odolný vůči rozpouštědlům, jako jsou například cyklohexan, ethanol nebo methanol. Naopak dobře rozpustné jsou v rozpouštědlech, jako je chloroform, dichlormetan a benzen. (8 str. 34)

Rozpustnost ve vodě – stejně jako většina polymerů, tak i vysokomolekulární PLA je ve vodě nerozpustný. Při styku s vodou však dochází k jeho hydrolyze na oligomery a mono-mery kyseliny mléčné, které už ve vodě rozpustné jsou. (8 str. 31)

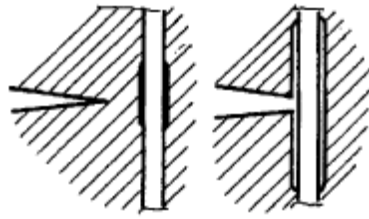
Struktura PLA zajišťuje dobrou odolnost vůči UV záření, která je dokonce lepší než PET. Bariérové vlastnosti jsou v porovnání s PET a HDPE 8-10x horší. To znamená, že PLA má vysokou propustnost pro plyny. (8 str. 37)

## 6 Experiment

### 6.1 Mechanika kompozitů a jejich zkoušení

Pro vláknové kompozity je charakteristické, že negativní mechanické vlastnosti složek se u výsledného materiálu již neprojevují. Například kompozit obsahující křehká vlákna uložená v křehké matrici má dobrou odolnost proti křehkému lomu. Oproti homogennímu materiálu mohou být poruchy vláken i matrice četnější a přesto nevedou ke katastrofickému lomu. Příčinou je odlišný mechanismus šíření poruch. Při šíření trhlin v matrici ve směru kolmém k ose vlákna dochází k otupování jejich čel mechanismem znázorněným na Obrázek 13. Trhlina se po interakci s vláknem šíří v mezifázovém rozhraní. (9 str. 192)

Kompozit dosahuje lepších vlastností, než by odpovídalo vlastnostem složek. Jde o tzv. synergický efekt (synergismus = spolupůsobení několika složek vedoucí k zesílení účinku). (9 str. 192)

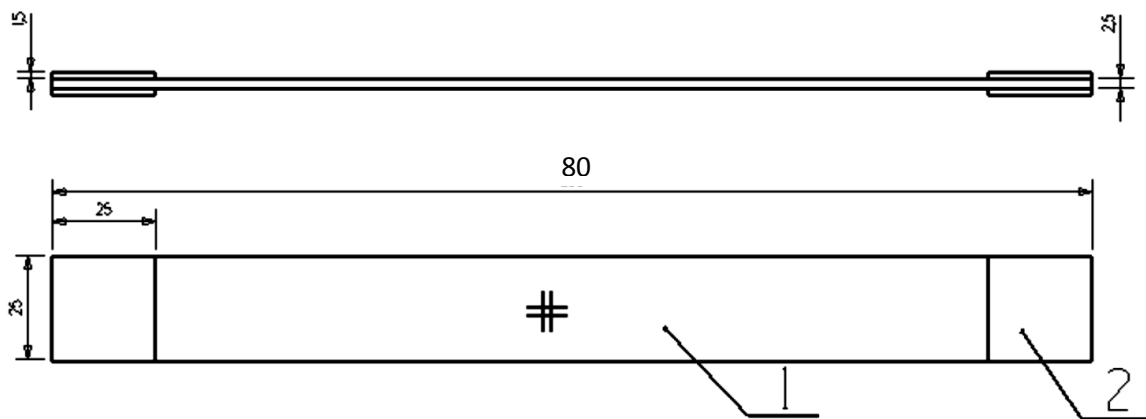


Obrázek 13 - Mechanismus interakce trhliny matrice s vláknem (9 str. 192)

## 6.2 Zkušební tělesa

Zkušebním tělesem je (tenký) pásek o konstantním obdélníkovém průřezu, opatřený na koncích hliníkovými příložkami pro uchycení do čelistí zkušebního stroje. Rozměry zkušebního tělesa jsou závislé na druhu a orientaci vláknové výztuže. (10 str. 5)

Kompozitové tělísko je vyrobeno z pěti vrstev uhlíkové tkaniny 200g/m<sup>2</sup> a šesti vrstev termoplastu.



Obrázek 14 - Rozměry zkušebního tělesa (10 str. 5)

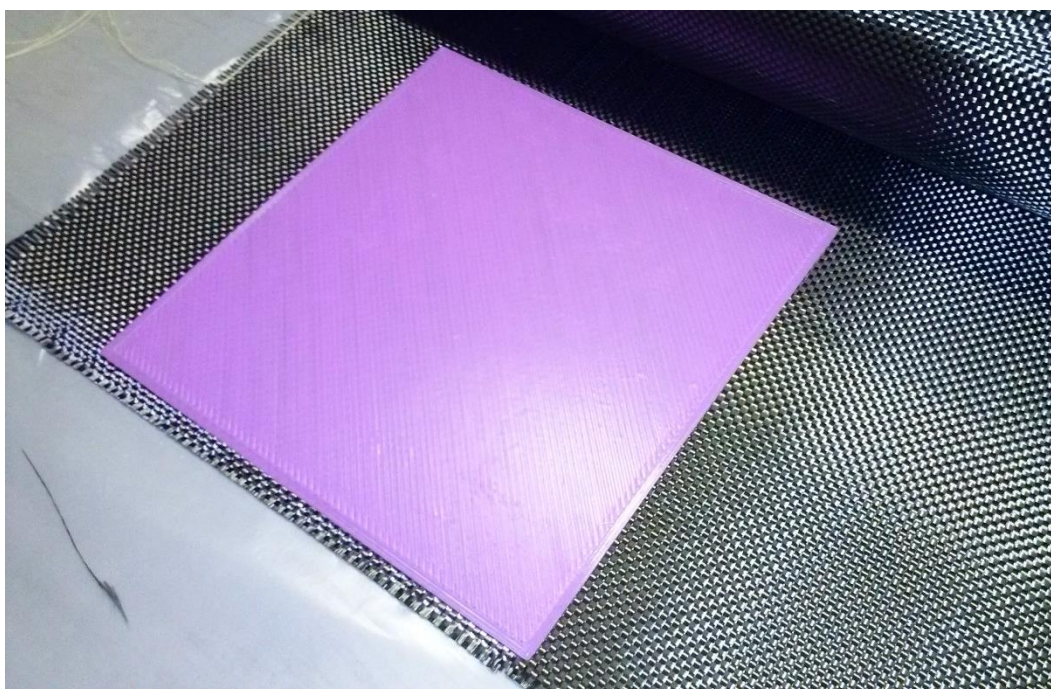
## 6.3 Výroba zkušebních těles

Při navrhování výroby zkušebních tělísek je nutno zohlednit anizotropní vlastnosti kompozitů. Postup výroby zkušebních těles se skládal z vytištění fólií na 3D tiskárně, nastříhání odpovídajících kusů

uhlíkové tkaniny, prosycení vrstev tkaniny a termoplastu v peci, nastřihání pásků kompozitu a přilepení hliníkových příložek.

### 6.3.1 Vytištění termoplastických fólií na 3d tiskárně

Využil jsem běžně dostupných termoplastů používajících se pro 3D tiskárny. Vytiskl jsem fólie odpovídající velikosti a tloušťce zkušebních tělísek a maximálnímu rozměru tisknutého předmětu použité tiskárny – Prusa i3 – 180x180mm.

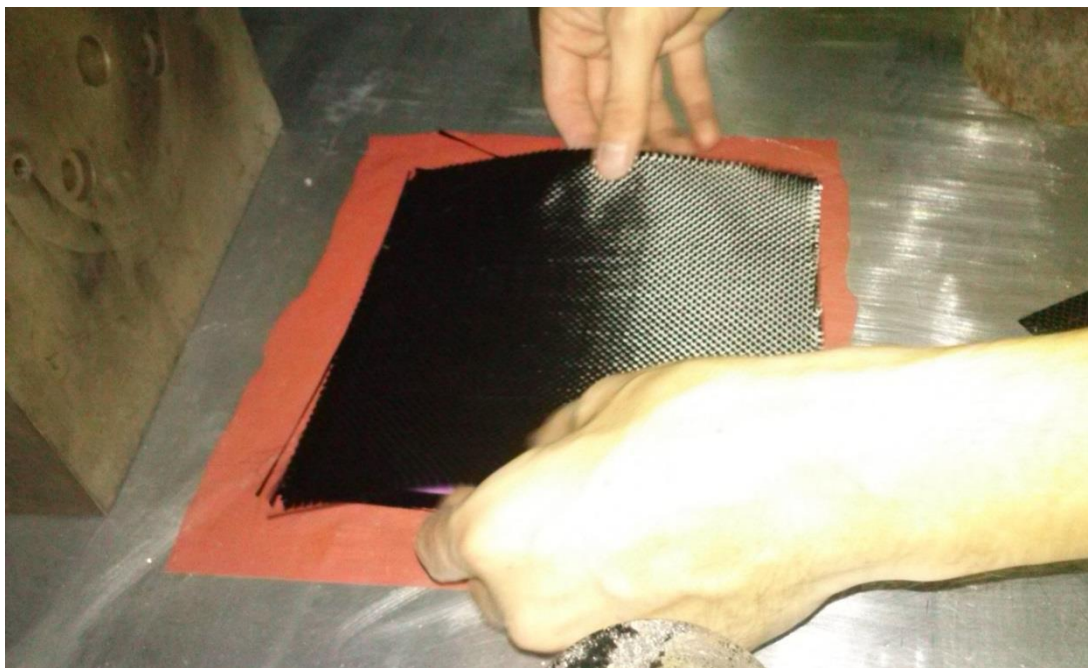


**Obrázek 15 - Fólie z PLA vytištěná na 3d tiskárně**

### 6.3.2 Prosycení jednotlivých vrstev kompozitu v peci

Zkušební tělíska jsou složena z pěti vrstev uhlíkové tkaniny 200g/m<sup>2</sup> a šesti vrstev termoplastu (tloušťky 0,25mm). Prosycení vrstev uhlíkové tkaniny probíhalo za teploty 260 °C pro ABS a 240°C pro PLA.





**Obrázek 16 - skládání vrstev na formě**

### 6.3.3 Nastřihání kompozitových pásků

Desky z kompozitu jsem nastříhal na šířku pásku 25mm a délku 200mm.



**Obrázek 17 - Střihání kompozitových pásků**



#### 6.3.4 Nalepení hliníkových příložek

K lepení hliníkových příložek bylo použito kyanoakrylátové lepidlo a jeho aktivátor.

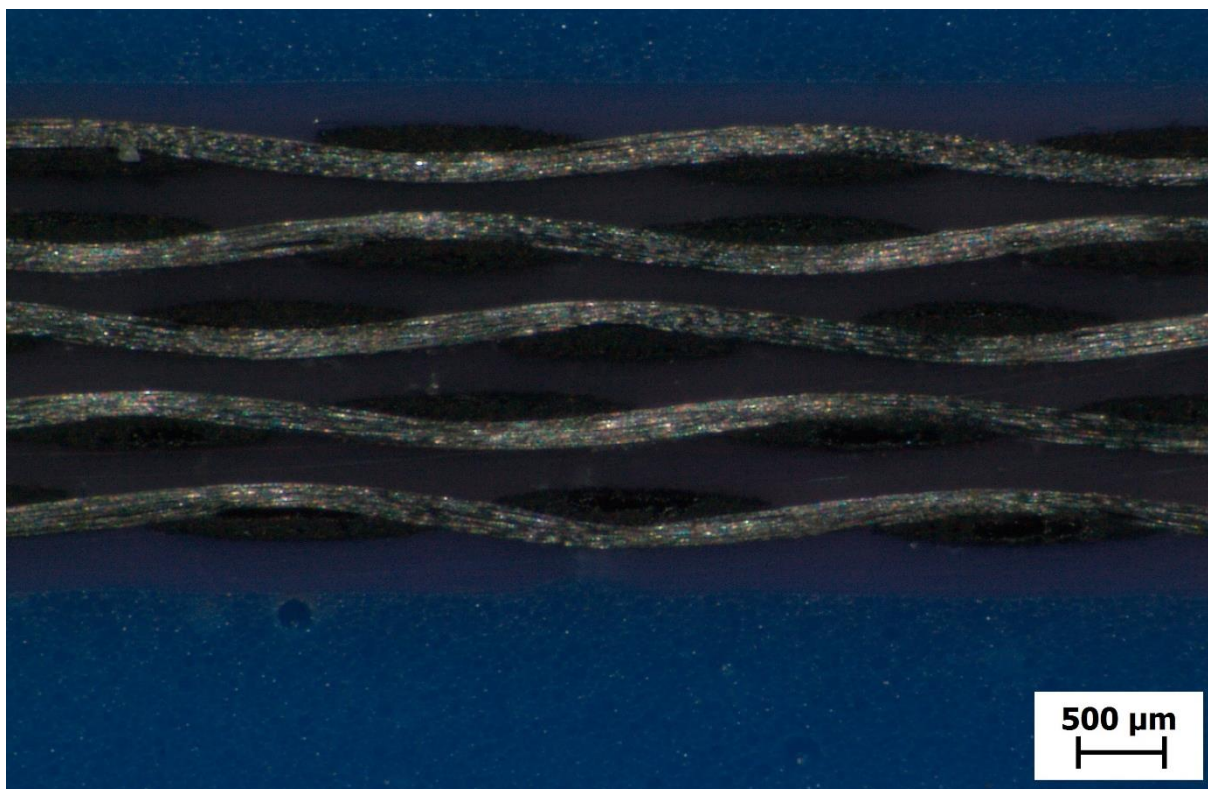


*Obrázek 18 - lepení hliníkový příložek*

#### 6.4 Metalografické výbrusy



*Obrázek 19 - Metalografický výbrus vzorku s ABS matricí*



*Obrázek 20 - Metalografický výbrus vzorku s PLA matricí*

Z metalografického výbrusu je patrné dobré prosycení výztuže s matricí u obou typů termoplastů. Zároveň je patrné, že poměr matrice a výztuže je přibližně 50:50, což je požadovaný poměr pro tento druh kompozitů.

## 6.5 Zkouška Tahem

Tahová zkouška patří mezi zkoušky mechanických vlastností, které určují základní mechanické charakteristiky materiálu.

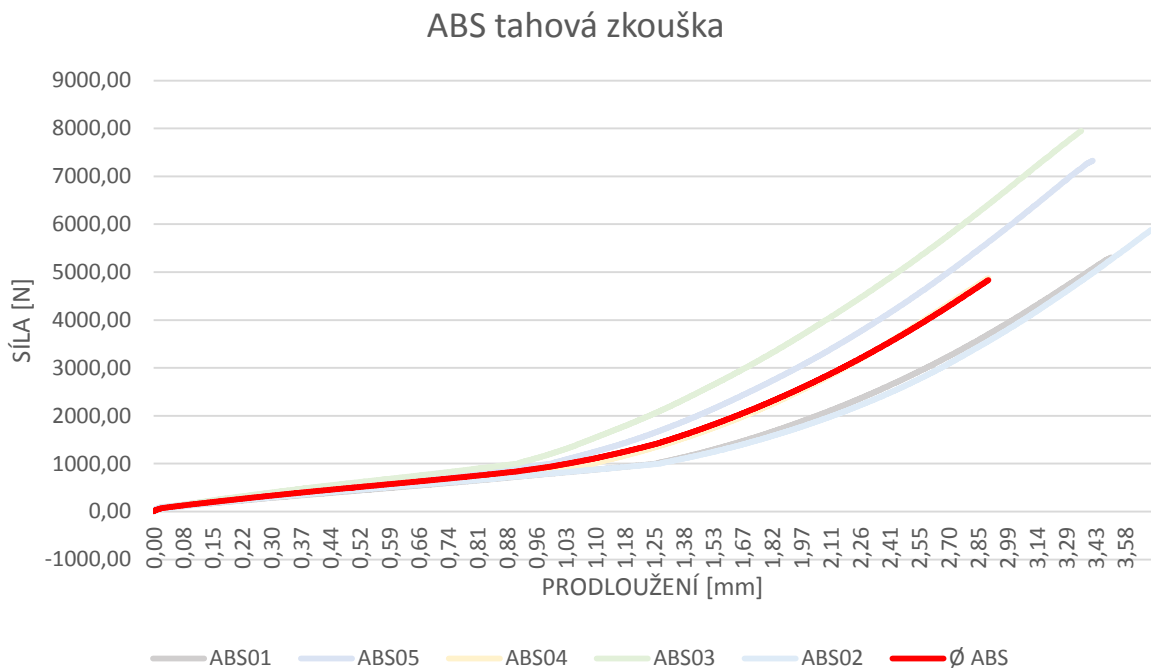
Tato nejčastěji používaná zkouška spočívá v postupném zatěžování zkušebního tělíska obvykle do přetržení pro stanovení mechanických vlastností. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí od 10 °C do 35 °C. Zkušební zařízení umožňuje registrovat během zatěžování tahovou sílu z měřící cely a prodloužení pomocí extenzometru.

Tahová zkouška probíhala na stroji LabTest 5.100SP

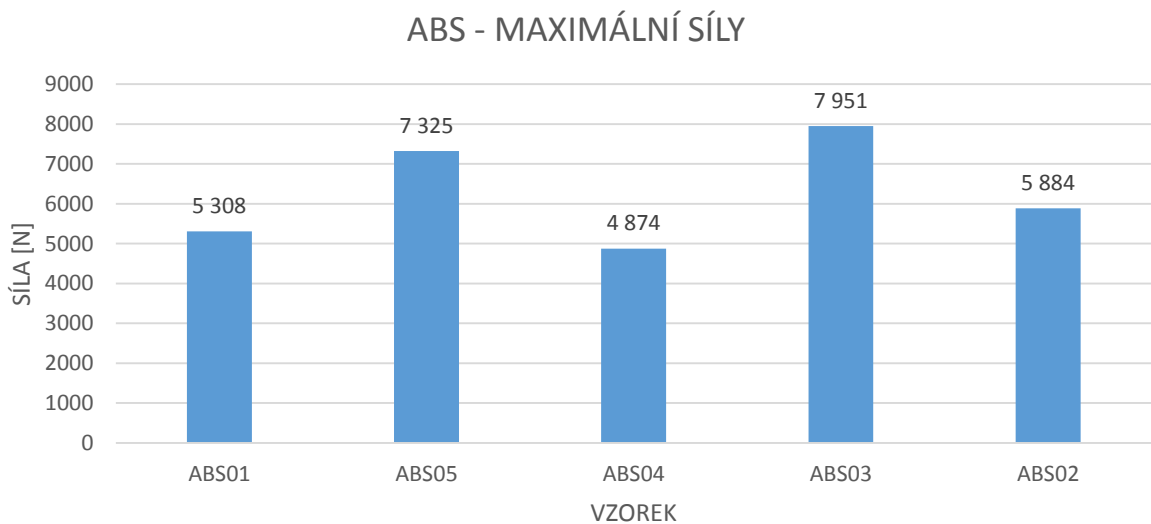
Na základě provedené zkoušky se stanoví

- pevnost v tahu
- modul pružnosti v tahu

### 6.5.1 Zkouška vzorků s ABS matricí

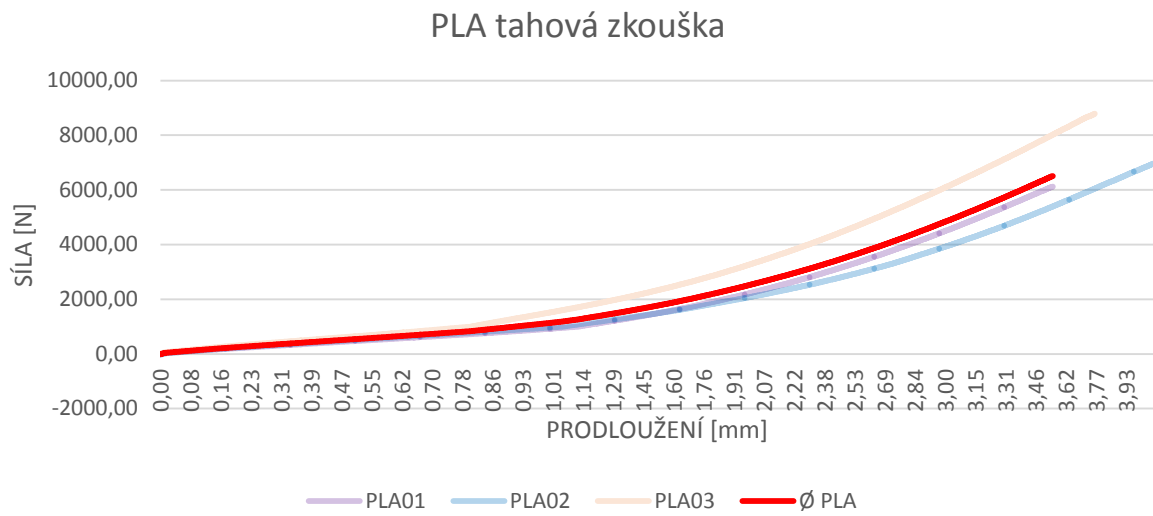


**Graf 1 - Průběh tahové zkoušky vzorků s ABS matricí**

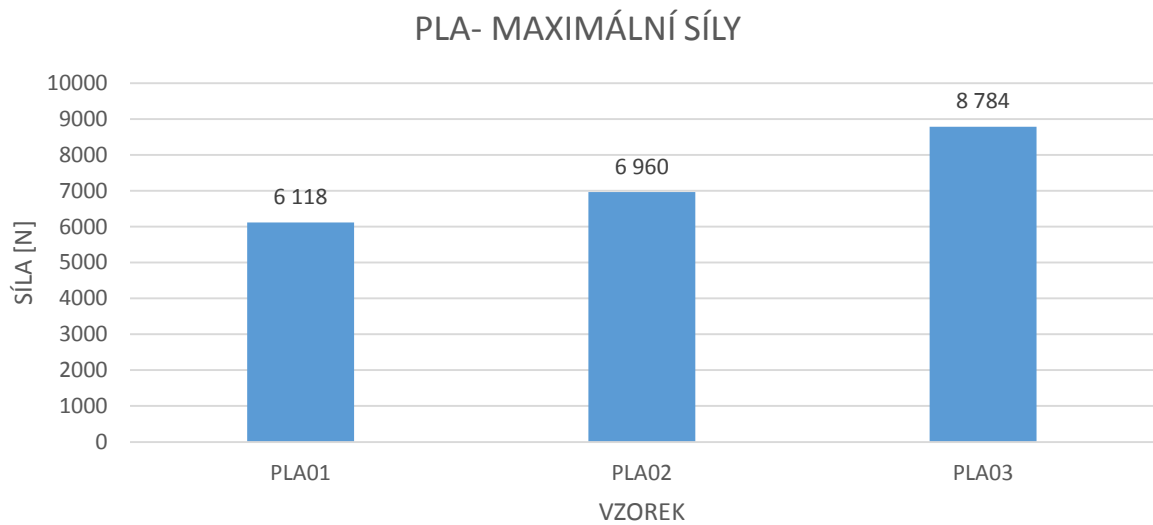


**Graf 2 - Maximální naměřené síly u jednotlivých vzorků s ABS matricí**

## 6.5.2 Zkouška vzorků s PLA matricí



**Graf 3 - Průběh tahové zkoušky vzorků s PLA matricí**



**Graf 4 - Maximální naměřené síly u jednotlivých vzorků s PLA matricí**

## 6.6 Statistické zpracování naměřených dat

### 6.6.1 Průměrná hodnota naměřených veličin

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

*Rovnice 1 - Průměrná hodnota naměřených veličin*

Kde

- x Průměrná hodnota naměřené veličiny  
x<sub>i</sub> naměřená hodnota vzorku  
n počet zkoušených vzorků

Průměrné maximální napětí ABS vzorků **6268 [N]**

Průměrné maximální prodloužení ABS vzorků **3,5 [mm]**

Průměrné maximální napětí PLA vzorků **7287 [N]**

Průměrné maximální prodloužení PLA vzorků **3,9 [mm]**

### 6.6.2 Směrodatná odchylka

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2}{n - 1}}$$

*Rovnice 2 - Směrodatná odchylka*

Kde

- x Průměrná hodnota naměřené veličiny  
x<sub>i</sub> naměřená hodnota vzorku  
n počet zkoušených vzorků

Směrodatná odchylka maximálního napětí ABS vzorků **1180 [N]**

Směrodatná odchylka maximálního prodloužení ABS vzorků **0,2 [mm]**

Směrodatná odchylka maximálního napětí PLA vzorků **1113 [N]**

Směrodatná odchylka maximálního prodloužení PLA vzorků **0,2 [mm]**

## 6.7 Stanovení mechanických vlastností vzorků

### 6.7.1 Pevnost v tahu

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

*Rovnice 3 - Pevnost v tahu*

Kde

$R_m$  Pevnost v tahu  
 $F_m$  maximální síla pevnosti [N]  
 $S_0$  průřezová plocha [mm<sup>2</sup>]

$$R_m \frac{6268}{2,5 \cdot 25} = 100,29 \text{ [MPa]}$$

*Rovnice 4 - příklad výpočtu vzorku ABS*

Pevnost v tahu vzorků z ABS	<b>100,29 [MPa]</b>
Pevnost v tahu vzorků z PLA	<b>116,59 [MPa]</b>

### 6.7.2 Modul pružnosti v tahu

$$E = \frac{\sigma \cdot l_0}{\Delta l}$$

*Rovnice 5 - Modul pružnosti v tahu*

Kde

$E$  modul pružnosti v tahu [GPa]  
 $\sigma$  napětí v tahu [MPa]  
 $\Delta l$  prodloužení [mm]  
 $l_0$  původní délka [mm]

$$E = \frac{100,29 \cdot 200}{3,5} = 5,73 \text{ [GPa]}$$

*Rovnice 6 - Příklad výpočtu vzorku ABS*

Modul pružnosti v tahu vzorků z ABS	<b>5,73 [GPa]</b>
Modul pružnosti v tahu vzorků z PLA	<b>5,98 [GPa]</b>



### 6.7.3 Přehled zjištěných mechanických vlastností

	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>
Maximální napětí	6268 [N]	7287 [N]
Maximální prodloužení	3,5 [mm]	3,9 [mm]
Pevnost v tahu	100,29 [MPa]	116,59 [MPa]
Modul pružnosti v tahu	5,73 [GPa]	5,98 [GPa]

*Tabulka 2 - Přehled zjištěných mechanických vlastností*

## 7 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout metodu výroby vzorků pro ověření mechanických vlastností vláknových kompozitů s termoplastickou maticí

Jako materiál k prosycení byla zvolena tkanina z uhlíkového vlákna, která byla prosycena termoplastickou maticí. Jako výchozí materiál pro matici byly zvoleny termoplastické fólie ABS a PLA vytištěné technologií 3D tisku.

Výrobní postup pro výrobu vzorků zahrnoval vytištění termoplastických fólií na 3D tiskárně, nastřihání uhlíkové tkaniny, seskládání jednotlivých vrstev, ohřátí vrstev na teplotu plastického toku matrice, nastřihání vzorků, nalepení hliníkových příložek.

Zkoušení vzorků zahrnovalo zkoušku tahem, kde byly ověřeny mechanické vlastnosti kompozitu.

Na metalografickém výbrusu byla ověřena dobrá smáčivost termoplastické matrice s vlákny.

Vzorky vykazovaly dobré mechanické vlastnosti – pevnost v tahu kolem 100MPa pro obě použité matrice. Vzhledem k pevnosti v tahu samotných plastů došlo k nárustu na více než dvojnásobek, tedy výsledný kompozitní materiál lze označit za podařený.

Všechny vytyčené cíle byly splněny dle předpokladu.



## 8 Seznam použité literatury

1. **Daďourek, Karel** . Kompozitní materiály. *KMT TU Liberec*. [Online] 2010. [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf).
2. **Bareš, Agarwal, Broutman**. *Kompozitní materiály*. Praha : SNTL, 1987.
3. **EHRENSTEIN, Gottfried W.** *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1.vyd. Praha : Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
4. **Partridge, Ivana K.** *Advanced composites*. New York : Sole dsitributor in the USA and Canada, Elsevier Science Pub, 1989. ISBN: 18-516-6387-8.
5. **Jan Grégr**. Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken. *Výzkumné centrum TEXTIL II*. [Online] říjen 2004. [http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1\\_zaverecne\\_zpravy/\[3.1.09\].pdf](http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/[3.1.09].pdf).
6. **KOŘÍNEK, Zdeněk**. Zdenek Korinek - Kompozity. [Online] České Vysoké Učení Technické v Praze, Ústav Materiálového Inženýrství, 2005. [Citace: 20. 3 2012.] <http://www.volny.cz/zkorinek>.
7. **Biron, Petr**. *Thermoplastics and thermoplastic composites. 1st ed*. Waltham : William Andrew, 2013. ISBN 14-557-7898-2.
8. **Kucharczyk, Pavel**. *Kyselina mléčná a syntéza polylaktidu*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008.
9. **KAREL MACEK, Petr Zuna a kolektiv**. *Nauka o materiálu*. Praha : ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
10. **Informační a vzdělávací centrum kompozitních technologií & Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**. *Zkoušení kompozitních materiálů*. místo neznámé : FS ČVUT v Praze, 2007.

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Řez kompozitem z epoxidové pryskyřice jednosměrně vyztužené uhlíkovými vlákny (a) a buňkou vlny merino (b) (3 str. 19).....	12
Obrázek 2 - Řez laminátem z epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken (a) a bambusovým stonkem (b) (3 str. 19).....	12
Obrázek 3 - Základní rozdělení technických materiálů .....	13
Obrázek 4 - Rozdělení uhlíkových vláken (ve stavu bezprostředně po výrobě) (3 str. 57) .....	18
Obrázek 5 - Mikrostruktura uhlíkových vláken kruhového průřezu je - vlevo vlákno z PAN, vpravo vlákna z mezofázových dehtů (pouze příčné řezy) (6 str. 25) .....	19
Obrázek 6 - Snímek uhlíkového vlákna rastrovacím elektronovým mikroskopem (3 str. 58).....	19
Obrázek 7 - Ideální grafitová struktura uhlíkového vlákna (3 str. 58).....	20
Obrázek 8 - Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken (3 str. 59).....	22
Obrázek 9 - CREEP čistého ABS a s výztuží 20% skelného vlákna: Příklad CREEP modulu [GPa] při pokojové teplotě versus čas [hod] pod zatížením 14MPa (7 str. 334) .....	25
Obrázek 10 - CREEP čistého ABS: příklad CREEP modulu [GPa] za různých teplot versus čas [hod] pod zatížením 7MPa (7 str. 334).....	26
Obrázek 11 - Příklad ABS modulu pružnosti [%] versus teplota [°C] (7 str. 333) .....	27
Obrázek 12 - ABS: příklad vrubové houževnatosti [KJ/m <sup>2</sup> ] versus nízká teplota [°C] (7 str. 333) .....	27
Obrázek 13 - Mechanismus interakce trhliny matrice s vláknem (9 str. 192).....	30
Obrázek 14 - Rozměry zkušebního tělesa (10 str. 5) .....	30
Obrázek 15 - Fólie z PLA vytištěná na 3d tiskárně .....	31
Obrázek 16 - skládání vrstev na formě .....	32
Obrázek 17 - Stříhání kompozitových pásků .....	32
Obrázek 18 - lepení hliníkový příložek .....	33
Obrázek 19 - Metalografický výbrus vzorku s ABS matricí .....	33
Obrázek 20 - Metalografický výbrus vzorku s PLA matricí .....	34

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 1 - výhody a nevýhody termoplastických kompozitů (4 str. 46).....	16
Tabulka 2 - Přehled zjištěných mechanických vlastností.....	40

## 11 Seznam rovnic

Rovnice 1 - Průměrná hodnota naměřených veličin .....	37
Rovnice 2 - Směrodatná odchylka .....	37
Rovnice 3 - Pevnost v tahu .....	38
Rovnice 4 - příklad výpočtu vzorku ABS .....	38
Rovnice 5 - Modul pružnosti v tahu .....	38
Rovnice 6 - Příklad výpočtu vzorku ABS .....	38

## 12 Seznam grafů

Graf 1 - Průběh tahové zkoušky vzorků s ABS matricí.....	35
Graf 2 - Maximální naměřené síly u jednotlivých vzorků s ABS matricí .....	35
Graf 3 - Průběh tahové zkoušky vzorků s PLA matricí .....	36
Graf 4 - Maximální naměřené síly u jednotlivých vzorků s PLA matricí .....	36