

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

KOMPOZITY S TERMOPLASTICKOU MATRICÍ  
COMPOSITES WITH THERMOPLASTIC MATRIX

AUTOR: Bc. FILIP JENÍK

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. RNDr. PETR ŠPATENKA, CSc.

PRAHA 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jeník** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **439003**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Kompozity s termoplastickou maticí**

Název diplomové práce anglicky:

**Composites with thermoplastic matrix**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznámit se s problematikou kompozitů s termoplastickou maticí
- 2) Navrhnout metodu přípravy a připravit vzorky kompozitu s termoplastickou maticí
- 3) Proměřit stupeň prosycení vlákna a stanovit mechanické vlastnosti zhotovených vzorků
- 4) Zhodnotit dosažené výsledky

Seznam doporučené literatury:

K.K. Chawla: Composite materials - Science and Engineering. Springer  
NOVÁČEK, Vojtěch. Aplikace plasmové úpravy pro vláknové kompozity s termoplastovou maticí: disertační práce. FS ČVUT 2018.  
Časopisecká literatura - vyhledání je součástí práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


**prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc., ústav materiálového inženýrství FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **23.10.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



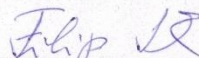
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.10.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce prof. RNDr. Petru Špatenkovi, CSc., za přátelský přístup, cenné rady a připomínky, které mi předal.

Rád bych také poděkoval Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D., za obětavou pomoc při práci v laboratořích a za věcné rady, které mi poskytovala. Zároveň děkuji všem ostatním, kteří se podíleli na vzniku mé diplomové práce, či těm, kteří mě v jejím vytváření podporovali.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které 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

## **Abstrakt**

Diplomová práce pojednává o problematice kompozitních materiálů s termoplastickou matricí. Je provedeno srovnání s matricí reaktoplastickou, jsou shrnuty jejich výhody a nevýhody. Experimentální část se zabývá výrobou kompozitů s matricí z polyethylenu, která je vyztužena krátkými uhlíkovými vlákny, nebo čedičovou tkaninou. Výroba byla realizována s cílem zkoumat vliv různých technologických podmínek. Bylo provedeno testování mechanických vlastností a mikroskopické pozorování prosycenosti.

## **Klíčová slova**

termoplastický kompozit, prepreg, polyetylen, čedičová tkanina, uhlíkové vlákno

## **Abstract**

The thesis discusses the issue of composite materials with thermoplastic matrix. A comparison is made with a thermosetting matrix, their advantages and disadvantages are summarized. The experimental part deals with the production of composites with a matrix of polyethylene, which is reinforced with short carbon fibers, or basalt fabric. The production was realized in order to investigate the influence of various technological conditions. Mechanical properties testing and microscopic observation of saturation were performed.

## **Key words**

thermoplastic composite, prepreg, polyethylene, basalt fabric, carbon fiber

## Seznam zkratek

<b>BF</b>	Světlé pole pozorování
<b>CF</b>	Uhlíková vlákna
<b>DF</b>	Tmavé pole pozorování
<b>DIC</b>	Diferenciální interferenční pole pozorování
<b>DoI</b>	Stupeň prosycení
<b>DOW - P</b>	Dowlex 2629.10UE – plazmovaný
<b>DOW - ZS</b>	Dowlex 2629.10UE – základní stav
<b>DOW 100</b>	Dowlex 2629.10UE – separovaný 100 $\mu\text{m}$
<b>DOW 300</b>	Dowlex 2629.10UE – separovaný 300 $\mu\text{m}$
<b>DP</b>	Stupeň polymerizace
<b>DSC</b>	Diferenční snímací kalorimetrie
<b>E</b>	Modul pružnosti v tahu
<b>ECTFE</b>	Kopolymer ethylenu a chlorotrifluorethylenu
<b>EFTE</b>	Ethen-tetrafluorethen
<b>E<sub>o</sub></b>	Modul pružnosti v ohybu
<b>FEP</b>	Fluorinated ethylene propylene
<b>GF</b>	Skleněná vlákna
<b>GFRP</b>	Kompozit vyztužený skleněnými vlákny
<b>HDPE</b>	Vysokohustotní polyetylen
<b>J</b>	Vektor rychlostí
<b>LDPE</b>	Nízkohustotní polyetylen
<b>MFI</b>	Melt flow index
<b>MFR</b>	Melt mass-flow rate
<b>MIX</b>	Smíšené pole pozorování
<b>MMA</b>	Methylmethakrylát
<b>MU</b>	Molekulární hmotnost
<b>MVR</b>	Melt volume-flow
<b>MW</b>	Molekulová hmotnost
<b>OBQ</b>	Šikmé pole pozorování
<b>p</b>	Tlak lisování
<b>PA (xx)</b>	Polyamid (různé typy)
<b>PAEK</b>	Polyaryletherketone
<b>PBT</b>	polybutylentereftalát
<b>PC</b>	Polykarbonát
<b>PE</b>	Polyetylen
<b>PEEK</b>	Polyetereterketon
<b>PEI</b>	Polyeterimid
<b>PEKK</b>	Polyetherketoneketonen
<b>PES</b>	Polyester
<b>PET</b>	Polyethylentereftalát
<b>PMMA</b>	Polymethylmethakrylát
<b>PO</b>	Polarizované pole pozorování
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PPS</b>	Polyfenylsulfid

<b>PPSU</b>	Polypropylensulfon
<b>PVC</b>	Polyvinylchlorid
<b>PVDF</b>	Polyvinylidenfluorid
<b>PVF</b>	Polyvinylfluorid
<b>RPX</b>	RPX 1001 NATUR LD/70/600 $\mu$
<b>RTF</b>	Resin Transfer Molding
<b>SEM</b>	Skenovací elektronová mikroskopie
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Oxid křemičitý
<b>T<sub>f</sub></b>	Teplota měknutí
<b>T<sub>g</sub></b>	Teplota skelného přechodu
<b>T<sub>k</sub></b>	Teplota krystalizace
<b>T<sub>m</sub></b>	Teplota tání
<b>TPU</b>	Termoplastický polyuretan
<b>w<sub>k</sub></b>	Krystalinita
<b><math>\vartheta</math></b>	Kontaktní úhel
<b><math>\sigma</math></b>	Pevnost v tahu
<b><math>\sigma_{xx}</math></b>	Povrchové napětí (různé kombinace)
<b><math>\tau_i</math></b>	Smykové mezifázové napětí

# Obsah

1. Úvod .....	11
2. Kompozity.....	13
2.1. Matrice.....	14
2.1.1. Reaktoplasty.....	14
2.1.2. Termoplasty.....	15
2.1.3. PE – Polyetylen .....	16
2.2. Výztuž.....	17
2.2.1. Tkanina .....	19
2.2.2. Vlákna .....	21
2.3. Mezifázové rozhraní .....	21
2.3.3. Smáčivost.....	22
2.3.4. Vliv drsnosti povrchů.....	23
2.3.5. Druhy vazeb.....	23
3. Technologické vlastnosti při zpracování plastů.....	24
4. Výroba kompozitů .....	28
4.1. Technologie výroby kompozitů z reaktoplastů .....	28
4.2. Technologie výroby kompozitů z termoplastů .....	29
5. Analýza současného stavu.....	34
5.1. Výrobci .....	34
5.1.1. Evropské společnosti .....	34
5.1.2. Světové společnosti.....	37
5.2. Výzkum termoplastických kompozitů .....	38
6. Návrh a provedení experimentů .....	41
6.1. Použitá zařízení a přípravky .....	41



6.2.	Použité materiály .....	43
6.3.	Charakterizace použitých matricových materiálů .....	44
6.3.1.	Diferenční snímací kalorimetrie (DSC) .....	44
6.3.2.	Naměřené materiálové vlastnosti .....	45
6.4.	Způsoby testování.....	48
6.4.1.	Mikroskopické pozorování .....	48
6.4.2.	Zkouška tahem .....	48
6.4.3.	Ohybová zkouška.....	49
6.5.	Nízkotlaké lisování .....	50
6.6.	Vysokotlaké lisování .....	50
6.7.	Dvoufázové lisování za různých tlaků .....	50
7.	Kompozity s krátkovláknovou výztuží .....	51
7.1.	Vlákna neupravená, nižší teplota, 1. série .....	52
7.1.1.	Výsledky tahových zkoušek .....	52
7.2.	Vlákna neupravená, vyšší teploty, 2. série .....	53
7.2.2.	Výsledky tahových zkoušek .....	54
7.2.3.	Mikroskopické pozorování .....	55
7.3.	Vlákna čištěná, 3. série .....	57
7.3.4.	Výsledky tahových zkoušek .....	58
7.3.5.	Výsledky ohybových zkoušek .....	59
7.3.6.	Mikroskopické pozorování .....	60
8.	Kompozity s tkaninovou výztuží .....	63
8.1.	Prepreg – nízký tlak .....	63
8.1.1.	Mikroskopické pozorování .....	64
8.2.	Prepreg - vysoký tlak.....	64
8.2.2.	Mikroskopické pozorování .....	65

8.3.	Porovnání kompozitů při lisování nízkým a vysokým tlakem .....	66
8.3.3.	Výsledky tahových zkoušek .....	67
8.3.4.	Výsledky ohybových zkoušek .....	68
8.3.5.	Mikroskopické pozorování .....	69
9.	Diskuse.....	72
9.1.	Kompozity s krátkovláknovou výztuží.....	72
9.2.	Kompozity s tkaninovou výztuží .....	75
10.	Závěr .....	78
12.	Bibliografie .....	80
13.	Seznam příloh.....	84

# 1. Úvod

Kompozit s termoplastickou matricí je v dnešní době velmi moderním materiálem, který je podrobován intenzivnímu zkoumání. V popředí zájmu je ze dvou hlavních důvodů, za prvé ze své kompozitní podstaty – tedy schopnosti dosažení, jinak těžko možných, unikátních vlastností. Za druhé je to možnost jeho alespoň částečné recyklace, což je v dnešní době velmi žádaná vlastnost. V tomto druhém bodě představují termoplastické kompozity velkou výhodu před kompozity s matricí reaktoplastickou, u kterých jednoduchým způsobem recyklace možná není.

V teoretické části práce je pojednáno o problematice kompozitních materiálů v obecné rovině, jsou uvedeny rozdíly mezi reaktoplastickou a termoplastickou matricí, jsou srovnány jejich výhody a nevýhody, jednak z hlediska výrobní zpracovatelnosti a dále mechanických či jiných vlastností. Je zmíněno možné dělení termoplastických materiálů a jejich základní materiáloví zástupci. Z důvodu použití v experimentální části práce je podrobněji zpracována kapitola o polyetyleny. Jsou zde uvedeny jednotlivé druhy a jejich vlastnosti.

Druhou neméně podstatnou složkou kompozitních materiálů je výztuž, která se v kompozitních materiálech vyskytuje především ve dvou základních formách - tkanině a samostatných, nespojitých vláknech. V práci jsou uvedeny různorodé používané materiály a jejich vlastnosti. Úspěšnost propojení obou fází a dosažení synergického efektu je klíčově závislé na jejich mezifázovém rozhraní, proto jsou zpracovány faktory ovlivňující jeho stavy a kvalitu.

Kompozity jak reaktoplastické, tak termoplastické, jsou vyráběny mnoha různými technologiemi, ty nejdůležitější jsou popsány. Dále je uveden průřez společnostmi, které se zabývají výrobou termoplastických kompozitů, u většiny z nich je dohledána nabídka materiálů, které nabízejí. V poslední kapitole teoretické části je mapován aktuální výzkum na poli kompozitů s termoplastickou matricí.

V experimentální části je řešena příprava, výroba a testování dvou typů kompozitních materiálů. Prvním jsou kompozity s krátkými vlákny z uhlíku, které pocházejí z recyklace. Jedná se o prvotní výzkum znovupoužití vláken, které by z ekologického hlediska bylo velmi

přínosné. Jsou zkoušeny různé technologické parametry výroby se čtyřmi odlišnými druhy polyetylenové matrice.

Druhým materiálem je kompozit vyztužený čedičovou tkaninou. Ta přináší zajímavou alternativu k zavedeným materiálům používaným pro výztuž. Jedná se o přírodní materiál s velmi dobrými mechanickými vlastnosti a zároveň příznivou cenou.

Cílem práce je v teoretické části uvedení do problematiky termoplastických kompozitů, připravení přehledu společností věnujících se výrobě těchto materiálů a zmapování aktuálního výzkumu z odborné časopisecké literatury.

Cílem práce v experimentální části je navržení metody přípravy a vlastní příprava kompozitních vzorků s termoplastickou matricí. Na připravených vzorcích provedení měření mechanických vlastností a určení prosycení vláken výztuže matricovým materiálem.

## 2. Kompozity

Definování pojmu kompozit není jednoznačné. V literatuře je možné nalézt více definic, které se v určitých oblastech shodují v jiných nikoli. Např. definice uvedená v [1]: „*Jakýkoli materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál.*“ je dle [1] příliš vágní a obecná, proto definuje kompozit daleko exaktněji: „*Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací.*“ Tato definice však již v dnešní době není dostatečná, například z důvodu nanokompozitů, v nichž rozhodně makroskopicky rozeznatelné rozhraní mezi fázemi nenajdeme, ale o kompozity se přesto jedná.

Velmi prostou definici uvádí [2]: „*Definujeme kompozit jako materiál, kde určité komponenty mají určitou funkci.*“ Vzápětí připouští, že této definici by vyhovovaly i např. polymery vyztužené malými částicemi mající izotropní vlastnosti, a tyto se obvykle za kompozity nepovažují.

Z výše uvedeného je možné vyvodit, že neexistuje pouze jedna správná a univerzální definice, vždy záleží na konkrétním úhlu pohledu a na tom, zda daný materiál chceme za kompozit považovat či nikoli. Mnohem důležitější, než nuance v různých formulacích je ovšem samotný princip fungování kompozitů. Tento princip se zakládá na tzv. synergickém efektu. Efektu, který dává vyniknout dobrým vlastnostem jednotlivých fází, zatímco jejich negativní vlastnosti potlačuje. Díky tomuto principu jsou kompozity materiály, které mají naprosto unikátní vlastnosti.

Obvykle jsou v kompozitech přítomny dvě různé fáze (složky): matrice a výztuž. Jak již bylo naznačeno výše, obě se podílejí na chování celku naprosto odlišně, zatímco většinou poddajnější, méně pevná matrice se stará o redistribuci napětí na celý objem, tak výztuž (většinou pevnější a křehčí) zajistí odolnost vůči napětí a jak název napovídá materiál „zpevní“.

## 2.1. Matrice

V případě polymerních materiálů použitých jako matrice je klíčové rozdělení na termoplasty a reaktoplasty. Reaktoplasty jsou polymerní látky, ve kterých během výrobního procesu po přeměně na tuhou fázi, dojde k zesíťování vazeb mezi řetězci. Zesíťování je jev nevratný, proto tento druh plastu nejde zpátky převést do fáze tekuté. Při zahřátí konkrétního reaktoplastu nad určitou teplotu dojde k jeho degradaci. Zatímco v případě termoplastů při přechodu z taveniny do tuhé fáze k žádnému zasíťování nedochází, tudíž tyto plasty lze z tuhé fáze opět převést na kapalnou fázi a při respektování určitých podmínek nedochází ani k žádné degradaci materiálu.

### 2.1.1. Reaktoplasty

Reaktoplasty mají mnoho zajímavých vlastností, které jsou pro využití v oblasti kompozitů výhodné, např. [3]:

- Dobrá smáčivost vláken
- Vysoká pevnost kompozitu
- Nízká viskozita nezasíťovaného polymeru (1 – 10 Pa.s)
- Nehořlavost

Díky zmíněným vlastnostem je většina dnes běžně používaných kompozitů založena na reaktoplastické matici. Na druhé straně však stojí množství nevýhod, které s sebou využití reaktoplastů přináší:

- Pracnost výroby – obtížná automatizovatelnost
- Nutnost uchování polotovarů (pregů) v chladu
- Neekologičnost výrobků – nemožnost recyklace po konci životnosti
- Sklon ke křehkému porušení – malá rázová houževnatost

Obzvláště subjekty působící v Evropě jsou již tradičně konfrontováni s velmi silným tlakem na ekologičnost výroby, omezování spotřeby chemikálií, recyklovatelnost výrobků atd. Zároveň s neustálou snahou o zefektivňování a zlevňování výroby, která jde v ruku v ruce s automatizací a omezováním lidských zdrojů ve výrobě, se jeví jako perspektivní studium a vývoj kompozitů s termoplastickou maticí.

### 2.1.2. Termoplasty

Termoplastické materiály se na základě výše uvedených skutečností stále více dostávají do popředí zájmu i v aplikacích, které ještě do nedávna byly doménou materiálů reaktoplastických, jako např. matrice kompozitních materiálů se spojitou výztuží (kontinuálními vlákny či tkaninou). Nové aplikace termoplastů s sebou přináší pochopitelně řadu specifík [3]:

Výhody:

- Ekologičnost výroby
- V drtivé většině možná recyklace
- Dobrá rázová odolnost
- Jednodušší výroba – možnost automatizace

Nevýhody:

- Špatná smáčivost vláken
- Viskozita větší než u reaktoplastů (o dva až tři řády)
- Horší odolnost vůči vyšším teplotám
- Výroba za vyšších teplot
- Hořlavost

Termoplastické materiály lze rozdělovat dle mnoha kritérií. Základní dělení může být dle nadmolekulární struktury. Jestliže je nadmolekulární struktura neuspořádaná a tvoří ji statistická polymerní klubka tak materiály, s touto strukturou, označujeme za amorfní polymery. Mezi nejvýznamnější zástupce amorfních polymerů patří polystyren (PS), polymethylmethakrylát (PMMA) a polykarbonát (PC).

V případě struktury, kdy se její část uspořádává do pravidelných útvarů – krystalitů, hovoříme o polymerech semikrystalických. Schopnost krystalizovat úzce souvisí např. s pravidelností strukturní jednotky, s tvarem a ohebností polymerního řetězce.

Krystalické oblasti polymerů jsou tvrdé, řetězce jsou zde znehybněny ve stabilním uspořádání. Často se také používá výrazu krystalický polymer, avšak toto označení je pouze

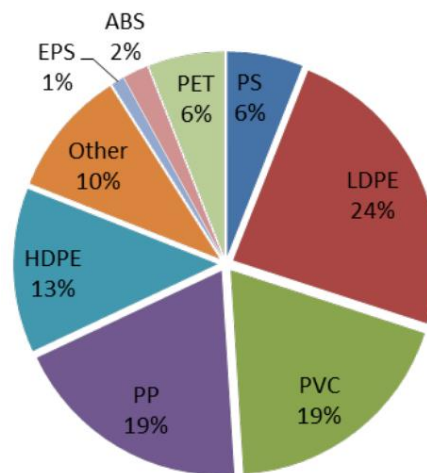
nesprávným označením polymeru semikrystalického, jelikož žádný známý polymer není tvořen čistě krystality. Amorfní fáze je vždy přítomna. [4]

Dalším možným dělením je použití roztřídění dle tvaru polymerního řetězce polymery:

- Lineární
- Rozvětvené
- Zesíťované



Z důvodu zaměření práce se dále podrobnější popis zaměří pouze na v této práci použitý termoplast – polyetylen. Výběr není náhodný, polyetylen je nejpoužívanější plast viz Obr. 1, oblíbený pro svojí nízkou cenu a snadnou zpracovatelnost.



**Obr. 1 Průměrná produkce jednotlivých typů plastů v Evropě (převzato [5])**

### **2.1.3. PE – Polyetylen**

Polyetylen (PE) je semikrystalický termoplast, který patří do skupiny polyolefinů. Jedná se o nejpoužívanější plast vůbec, v Evropě se ho produkuje více než třetina celkového množství vyráběných plastů. Jeho vysoká oblíbenost pramení především z nízké ceny, snadné zpracovatelnosti a vhodných vlastností pro mnoho aplikací. PE je například používán na: obaly, potrubí, textilní vlákna či hračky.



Jedna z charakteristických vlastností polyetylenů je velice špatná odolnost vůči UV záření, při použití v praxi jsou do plastů na bázi polyetylenů přidávána různá aditiva s nejrůznějšími funkcemi. Např. pro potlačení negativních účinků zmíněného UV záření se používají saze. [6]

Polyetylen byl vyvinut v mnoha specifických modifikacích. Pro určitou kategorizaci, lze použít dělení dle hustoty na [6] [7]:

- **Nízkohustotní polyethylen: LDPE (Low-Density Polyethylen)**

Podíl krystalické fáze 45 až 55 %

Teplota skelného přechodu:  $T_g = < -100\text{ °C}$

Teplota tání:  $T_m = 108\text{ až }115\text{ °C}$

Modul pružnosti:  $E \approx 140\text{ MPa}$

- **Vysokohustotní polyethylen: HDPE (High-Density Polyethylen)**

Podíl krystalické fáze 70 až 80 %

Teplota skelného přechodu:  $T_g = < -100\text{ °C}$

Teplota tání:  $T_m = 130\text{ až }140\text{ °C}$

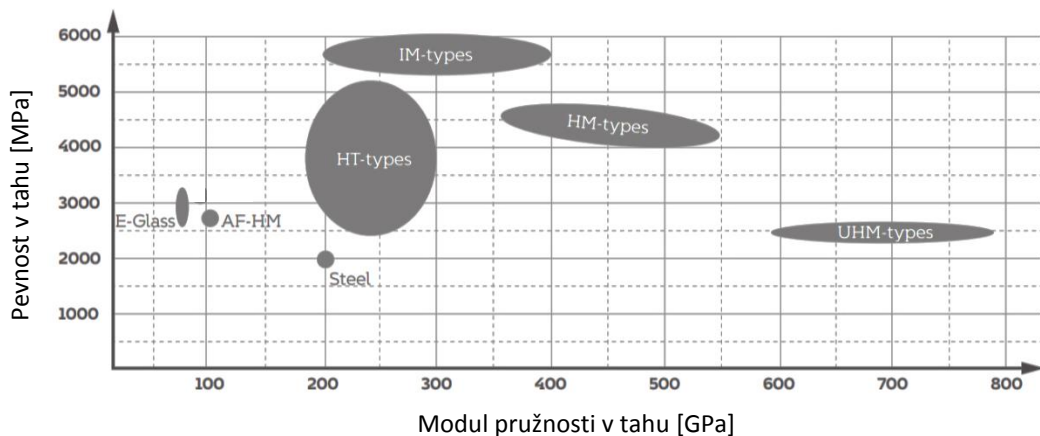
Modul pružnosti:  $E \approx 1400\text{ MPa}$

## 2.2. Výztuž

Vyztužující složkou v kompozitech mohou být různorodé materiály, pochopitelně každý jednotlivý se svými přednostmi a nevýhodami. Nemusí platit absolutně, mohou se lišit v závislosti na kombinaci s materiálem použitým na matrici. Používané vyztužující materiály jsou následující [8] [9]:

- **Uhlík**

Vlákna tvořená uhlíkem se vyznačují vynikající pevností a nízkou hmotností. Avšak jednoznačnou nevýhodou je vysoká cena. Vlastnosti různých druhů karbonových vláken zároveň s porovnáním s vybranými materiály jsou zobrazeny na Obr. 2.



**Obr. 2** Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken s vlastnostmi: HT – velká houževnatost, IM – střední modul, HM – velký modul, UHM – ultra velký modul, E-Glass – E-Sklo, AF-HM – Aramidová vlákna, Steel – ocel [10]

- **Sklo**

Známý materiál, jehož základ tvoří křemík, obsah  $\text{SiO}_2$  se pohybuje v rozmezí 50 až 60 %. Skelná vlákna se vyznačují horšími mechanickými vlastnostmi než vlákna uhlíková, výhodou je menší finanční náročnost.

Existuje celá řada druhů skleněných vláken s různými mechanickými vlastnostmi, chemickým složením a chemickou odolností s označením A-, C-, D-, E-, ECR-, AR-, R-, S-2-sklo. [11]

- **Aramid**

Aromatický polyamid je základem pro velmi moderní materiály jako jsou Kevlar® či Twaron®. Aramidová vlákna, která jsou extrémně pevná, jsou vyrobena z polyamidu s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem. V tomto řetězci alespoň 85 % peptických vazeb spojuje dvě aromatická jádra. Nevýhodou aramidových vláken je nízká odolnost vůči slunečnímu záření. [9]

- **Čedič**

Čedičová vlákna vykazují širokou škálu výhodných vlastností. Jsou jimi vysoká pevnost, chemická odolnost, nenavlhavost, tepelná odolnost, nehořlavost a jiné. Ve většině parametrů je čedič lepším materiálem než sklo, ale zároveň stále o něco horší než uhlík, tento však poráží cenou. Čedičová vlákna jsou přibližně pět krát levnější. Srovnání uvedených materiálů je zobrazeno v Tab. 1. [9]

- **Organické materiály**

Použití materiálů, které lze pěstovat a není na jejich výrobu spotřebován žádný neobnovitelný zdroj, se jeví jako velmi perspektivní, mnoho výzkumů po celém světě se využitím materiálů jako jsou: bambus, bavlna či celulóza intenzivně zabývá.

**Tab. 1 Porovnání vlastností vláken vybraných materiálů**

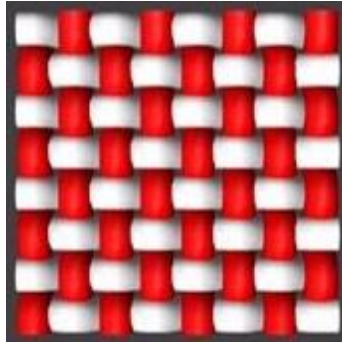
	Uhlík	Sklo			Aramid	Čedič
	Toray	E	S	AR	Kevlar 49	Veba
<b>Hustota [g.cm<sup>-3</sup>]</b>	1,8 - 1,9	2,6	2,5	2,7	1,4	2,7
<b>Modul pružnosti [GPa]</b>	230 - 588	72	87	73	112	90
<b>Pevnost v tahu [GPa]</b>	2,7 - 6,4	3,4	4,9	3,2	3,6	3,6
<b>Tažnost [%]</b>	0,7 - 2,8	4,8	5,6	4,4	2,4	4,0
<b>Tepelná odolnost [°C]</b>	300	846	1056	773	177	1100

### 2.2.1. Tkanina

Častou výztuží kompozitů je tkanina tvořena nekonečnými vlákny. Tkanina je tvořena osnovou a útkem. Existuje mnoho variant vazeb tkanin, mezi nejpoužívanější patří: [9]

- **Plátňová vazba**

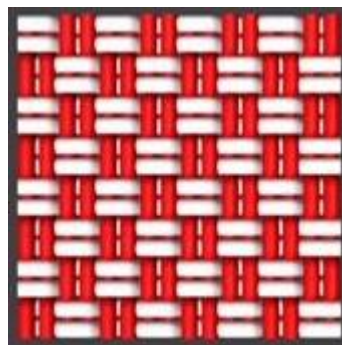
Plátňová vazba má nejmenší střidu (nejmenší oblast, která se opakuje) 2x2 body vazby. Provázání útkového a osnovního vazného bodu se pravidelně střídá, jedná se o základní vazbu s nejhustším provázáním. Z důvodu hustého provázání je tkanina tuhá (vzájemný posuv útku a osnovy velmi omezen). Tkanina není vhodná pro prostorové tvarování, avšak používá se ve stavebnictví, filtrační účely a poskytuje dobrou odolnost proti vniknutí cizího tělesa. Znázornění takové vazby je na Obr. 3.



**Obr. 3 Plátnová vazba [9]**

- **Vazba panama**

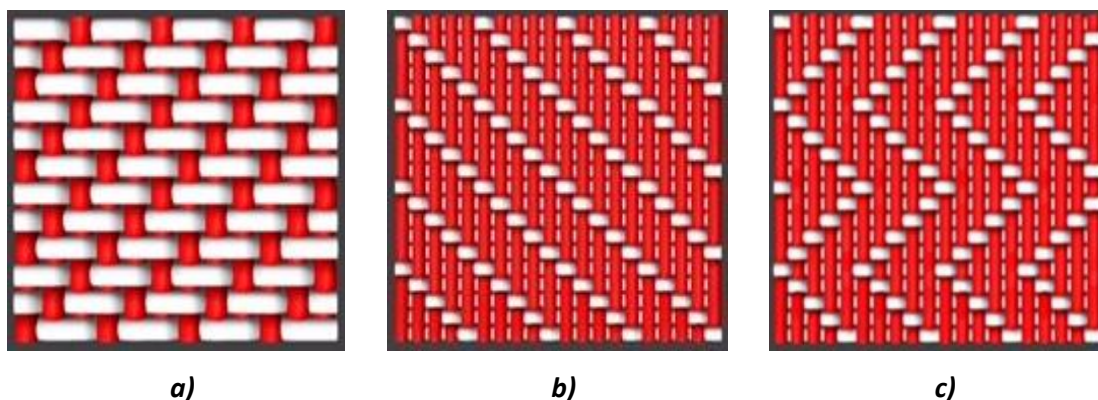
Nejmenší střída panama vazby je 4x4, vazba je odvozena ze základní plátnové. Nalezneme zde zesílení vazby po osnově a po útku stejnou měrou. Střída může být i větší, vždy však musí být dělitelná dvěma. Znárodnění vazby panama je na Obr. 4 Z důvodu menšího počtu přechodů, než u plátnové vazby je posuv útku a osnovy snazší, vazba je méně tuhá, tvárnější a lépe se přizpůsobuje tvarovým formám.



**Obr. 4 Vazba Panama [9]**

- **Keprová vazba**

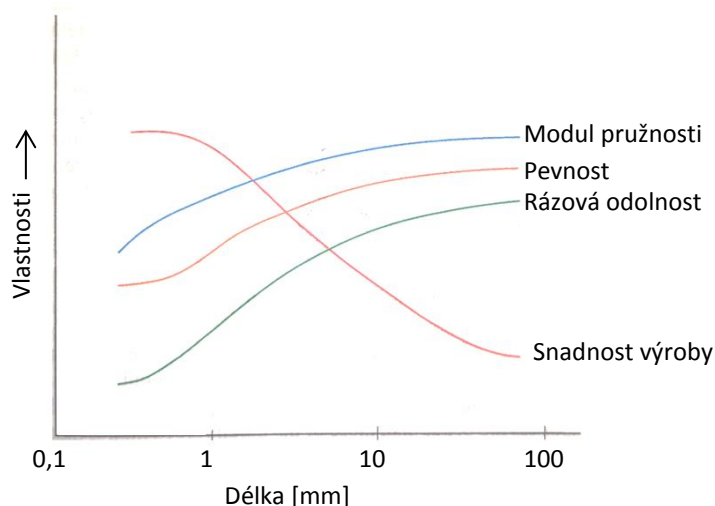
Nejmenší střída keprové vazby je 3x3 vazebné body. Útková nit je vazebně posunuta o jednu nit buď doprava, či doleva, poté se jedná o kepr pravý, či levý. Tímto se vytváří efekt šikmých řádků. Existují různé varianty keprové vazby, podle druhu převládající nitě jsou označovány za keprové vazby útkové či osnovní a podle směru zešikmení na kepry pravé či levé. Příklady keprových vazeb jsou uvedeny na Obr. 5



**Obr. 5 Příklady keprové vazby: a) útková 3x3, b) osnovní 5x5, c) osnovní 5x10 lomený [9]**

### 2.2.2. Vlákna

Vyztužující schopnost nespojitých vláken je dána především poměrem délky vlákna  $l$  a jeho průměru  $d$  - aspektivní poměr  $l/d$ . Uvádí se, že podmínka zpevnění je poměr  $l/d$  větší než 10. Kompozity s nespojitými vyztužujícími vlákny lze rozdělit do dvou kategorií. První kategorií jsou kompozity s krátkými vlákny, v nich se délka vláken pohybuje v rozmezí desetin milimetru až několika milimetrů. Druhou kategorií jsou kompozity s dlouhými vlákny, zde je délka použitých vláken cca 10 až 15 mm. Kompozity vyztužené dlouhými vlákny, oproti krátkovláknovým, vykazují lepší mechanické vlastnosti a vrubovou houževnatost. Průměr vlákna je zpravidla u obou druhů materiálu v jednotkách mikrometrů. [12]



**Obr. 6 Vliv velikosti vláken na vlastnosti kompozitu [3]**

### 2.3. Mezifázové rozhraní

Rozhraní mezi fázemi matrice a výztuží je kritickým místem pro funkci kompozitu. Důvodem velké důležitosti mezifázového rozhraní je skutečnost, že může nabývat hodnoty

až 3 000 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> v kompozitu za předpokladu, že se plocha rozhraní rovná ploše povrchu vláken a za běžné hodnoty obsahu vláken. Pro poměr mezi mezifázovým rozhraním a objemem vláken lze také lehce odvodit vztah (při zanedbání plochy konce vláken):

$$\frac{S}{V} = \frac{2\pi r l}{\pi r^2 l} = \frac{2}{r} \quad (1)$$

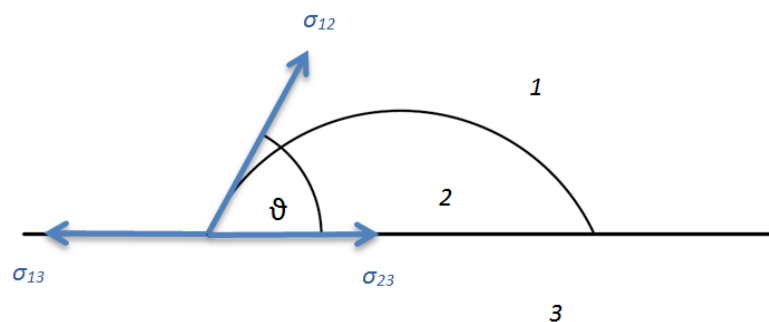
Kde  $r$  je poloměr vlákna a  $l$  je délka vlákna. Ze vztahu (1) je patrné, že velikost mezifázového rozhraní roste s klesající velikostí poloměru vlákna.

### 2.3.3. Smáčivost

Smáčivost výztuže matricí je naprosto základním předpokladem pro správnou funkci kompozitu. Smáčivost je schopnost tekutiny se rozprostřít po pevném povrchu. Tuto vlastnost lze popsat kontaktním úhlem  $\vartheta$ . Schéma systému je zobrazeno na Obr. 7. V případě kontaktních úhlů  $\vartheta < 90^\circ$  kapalina povrch smáčí. Naopak v případě úhlů  $\vartheta > 90^\circ$  kapalina povrch nesmáčí. Speciální případy kdy  $\vartheta = 0^\circ$  (absolutní smáčení) a  $\vartheta = 180^\circ$  (žádné smáčení) v reálných situacích nenastávají. V případě rovnováhy systému lze sestavit rovnici (2) popisující smáčivost povrchu:

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} + \sigma_{12} \cdot \cos\vartheta \quad (2)$$

Kde  $\sigma$  označuje veličinu povrchového napětí [N.m<sup>-1</sup>], konkrétně  $\sigma_{13}$  je povrchové napětí povrchu (povrchové napětí na rozhraní fází pevné a plynné). [3] [13]



**Obr. 7 Schéma styku plynné 1, kapalné 2, pevné látky 3 a vyznačení kontaktního úhlu  $\vartheta$  [13]**

### 2.3.4. Vliv drsnosti povrchů

Povrch vyztužujících vláken v kompozitu není pochopitelně ideálně hladký. V případě požadavku na uplatnění mezimolekulárních sil mezi vlákny a matricí je nutné, aby byl povrch vláken matricí smáčen. Často se pro zlepšení smáčení používají různá vazebná činidla. Jestliže je však i nerovný povrch vláken matricí dobře smáčen je o tuto drsnost zvětšena plocha mezifázového rozhraní a přispívá to k lepší soudržnosti obou fází. [1]

### 2.3.5. Druhy vazeb

Mezi fázemi v kompozitu jde v zásadě o tři druhy: [1]

- **Mechanická vazba**

Mechanická vazba je mezi vlákny a matricí přítomna vždy, jedná se svým způsobem o tření mezi dvěma povrchy způsobené jejich nerovností. Toto mezipovrchové napětí lze popsat rovnicí (3).

$$\tau_i = \mu\sigma_r \quad (3)$$

Kde  $\tau_i$  představuje smykové mezifázové napětí, zatímco  $\sigma_r$  napětí působící kolmo na mezifázové rozhraní a  $\mu$  koeficient tření, jehož hodnota se pohybuje mezi 0,1 a 0,6.

- **Fyzikální vazba**

Jedná se o velmi slabý druh vazby s energií přibližně 8 – 16 kJ.mol<sup>-1</sup>. Mezi fyzikální vazby se řadí van der Waalsovy síly, dipólové interakce a vodíkové můstky.

- **Chemické vazby**

Mezi chemické vazby se řadí kovalentní, iontová a kovová vazba. Jedná se o vazby s velkou energií přibližně: 40 – 400 kJ.mol<sup>-1</sup>.

### 3. Technologické vlastnosti při zpracování plastů

Během zpracování plastů jak při různých způsobech výroby tak při jejich recyklaci je nutné znát základní technologické vlastnosti. Ty nejdůležitější jsou shrnuty v následujícím přehledu:

- **Teplota tání  $T_m$**

Teplotu tání lze určit pouze u semikrystalických polymerů jako teplotu tání krystalů. Hodnota  $T_m$  není ani pro jeden konkrétní polymer vždy stejná, vždy závisí na mnoha faktorech. Mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující teplotu tání patří: rychlost ohřevu, působící tlak, krystalická struktura. [4]

- **Teplota krystalizace  $T_k$**

Teplota, u semikrystalických polymerů, při které se začínají vytvářet krystalické útvary. Hodnota  $T_k$  není ani pro jeden konkrétní polymer vždy stejná, vždy závisí na mnoha faktorech. Mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující teplotu krystalizace patří: rychlost ochlazování, působící tlak, počet, velikost a tvar krystalizačních zárodků. [4]

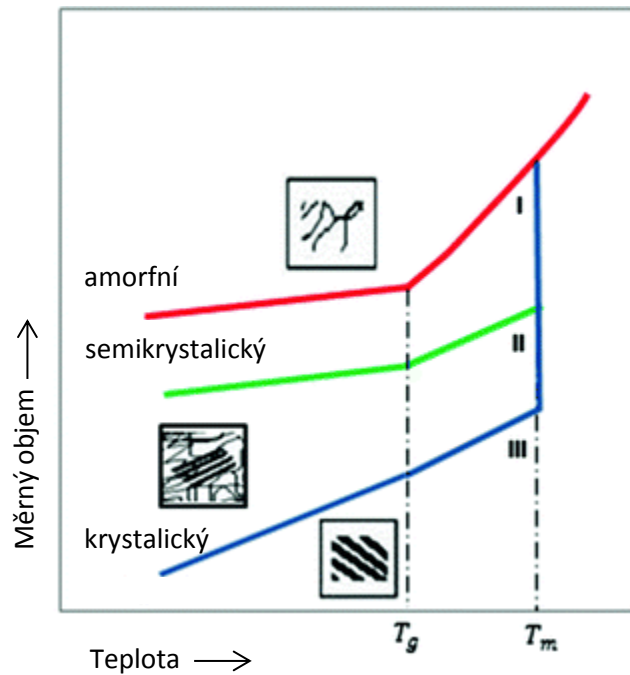
- **Teplota viskózního toku  $T_f$**

Teplota, při které polymerní materiály přecházejí do tekutého stavu.

- **Teplota skelného přechodu  $T_g$**

Teplota, při které se na grafu závislosti měrného objemu na teplotě objevuje zlom či ohyb. Uvedená závislost, s vyznačenými teplotami skelného přechodu a tání, je na Obr. 8 pro amorfní (I), semikrystalický (II) a hypotetický krystalický polymer (III). Pod teplotou  $T_g$  dojde k zastavení mikrobrownovského pohybu – ustaví se stabilní konformace řetězců. [4] [14]

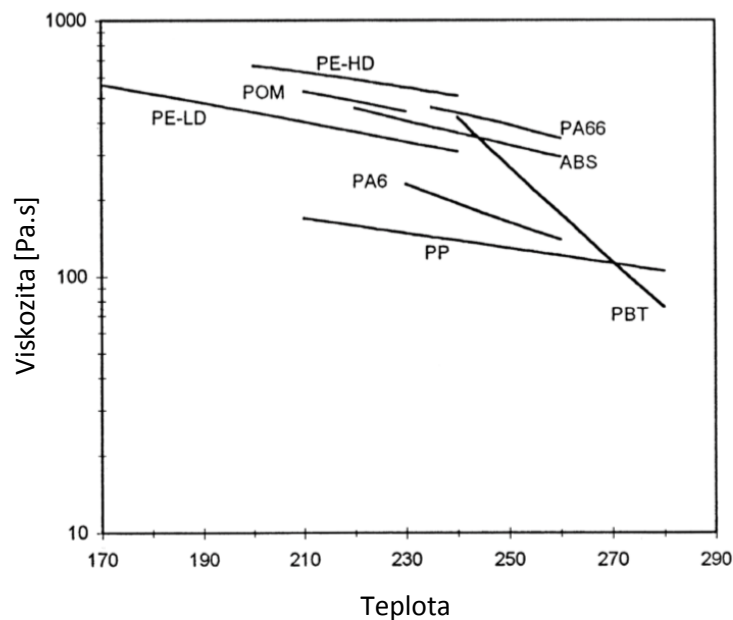




**Obr. 8 Závislost specifického objemu na teplotě pro různé druhy polymerů ( [15] upraveno)**

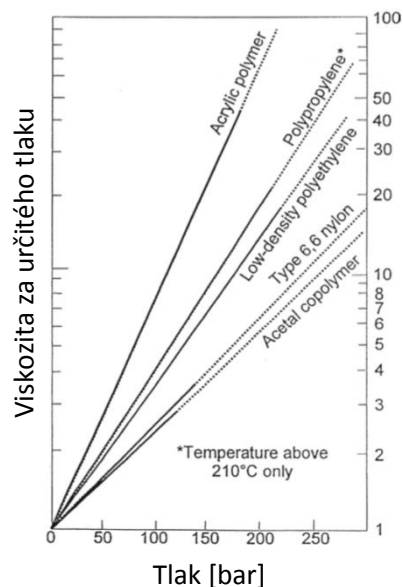
- **Viskozita  $\eta$**

Viskozita je konstanta úměrnosti mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí. Viskozita polymerních materiálů s rostoucí teplotou klesá, konkrétní hodnoty za různých teplot jsou zobrazeny na Obr. 9. [16] [3]



**Obr. 9 Závislost viskozity různých polymerů na teplotě [16]**

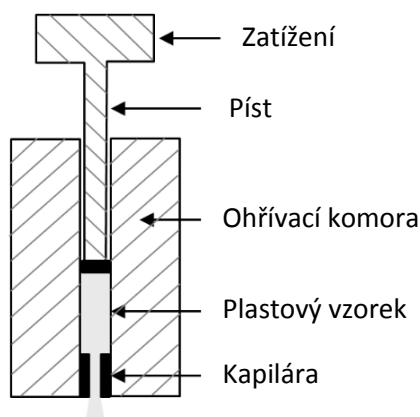
Naopak zvyšování tlaku způsobuje růst viskozity polymerů, viz závislost uvedená na Obr. 10.



**Obr. 10 Závislost viskozity různých polymerů na tlaku [16]**

- **Index toku taveniny**

S viskozitou přímo souvisí měření indexu toku taveniny (v anglické literatuře: MFR – melt mass-flow rate, či MVR - Melt volume-flow). Metoda jeho měření je popsána v normách ASTM D1238 a ČSN EN ISO 1133. Malý vzorek testovaného plastu (5 g) je zahřát nad teplotu tání  $T_m$ , nebo teplotu viskózního toku  $T_f$  a je tlačěn pístem, zatíženým obvykle 2,16 kg nebo 5 kg, skrz kapiláru. Princip metody je znázorněn na Obr. 11. Hodnota MFR je rovna hmotnosti materiálu v gramech, vytlačeného za 10 minut. Obecně lze říci, že čím vyšší MFR hodnotu materiál má, tím nižší je hodnota jeho viskozity. Zároveň existuje souvislost mezi molekulovou hmotností a hodnotou viskozity (potažmo MFR). Pro porovnání plastů ve stejné kategorii platí, že čím vyšší molekulová hmotnost, tím vyšší viskozita a tím nižší hodnota MFR. [17]



**Obr. 11 Princip měření MFR [17]**

- **Úroveň prosycení - Degree of Impregnation (DoI) [18]**

Úroveň prosycení (DoI) svazků vláken matricí, v kompozitních materiálech, je dána vztahem:

$$DoI = \frac{A_m}{A} \quad (4)$$

Kde  $A_m$  představuje plochu vláken prosycených matricí, zatímco  $A$  je celková plocha vláken.

- **Krystalinita  $w_k$**

Krystalinita semikrystalického polymeru vyjadřuje poměr množství krystalické fáze ku celkovému množství, obvykle se udává v procentech. Hodnota  $w_k$  závisí především na typu polymeru, molekulové hmotnosti a teplotě krystalizace. Hodnota krystalinity obvyklých polymerů se pohybuje mezi 30 a 60 %. Reálně dosáhnout 100 % je nemožné z důvodu vždy přítomné amorfní fáze. Polymery s jednoduchým lineárním řetězcem dosahují největšího podílu krystalinity, např. lineární HD-PE má podíl krystalické složky až 90 %. Zatímco PE s rozvětveným polymerním řetězcem dosahuje hodnoty  $w_k$  již jen 65 %. Obecně platí, že pevnost a tuhost semikrystalických polymerních materiálů roste s rostoucím stupněm krystalizace, zatímco houževnatost klesá.

- **Molekulová hmotnost MW**

Molekulová hmotnost je důležitý materiálový parametr pro charakterizaci polymerních materiálů. Obecně platí, že s rostoucí molekulovou hmotností se zvyšuje pevnost materiálu, ale také se zhoršuje zpracovatelnost. Pro výpočet molekulové hmotnosti platí následující vztah:

$$MW = DP \cdot MU \quad (5)$$

Kde veličina  $DP$  (degree of polymerization) je stupeň polymerizace a  $MU$  je molekulární hmotnost každé opakující se jednotky (meru). Ve většině případů se polymery neskládají z naprosto identických molekulových řetězců. Jedná se o směs různě dlouhých molekul s rozdílnou molekulovou hmotností. Tudíž se pro

charakterizaci polymerního materiálu používá distribuční funkce, čím její průběh užší, tím se jedná o homogennější materiál. [3]

- **Darcyho zákon**

Darcyho zákon charakterizuje viskózní tok Newtonské kapaliny skrz homogenní porézní médium s náhodně rozmístěnou porozitou. Tok je dán vektorem rychlostí  $J$ :

$$J = -\frac{k}{\eta} \nabla P \quad (6)$$

Kde  $k$  je permeabilita porézního prostředí,  $\eta$  je dynamická viskozita,  $\nabla P$  vyjadřuje gradient tlaků. Z uvedeného vztahu pro Darcyho zákon tedy vyplývá, že prosycování porézního média – tedy v případě kompozitů vláken je přímo úměrné gradientu tlaků, zatímco nepřímo úměrné viskozitě kapaliny – v případě kompozitů matrice. [3]

## 4. Výroba kompozitů

Kompozitní materiál, jak již bylo zmíněno výše, je velice široký pojem. Značný počet materiálů, které lze označit jako kompozitní, se vyrábí velkým množstvím různých technologií. V dnešní době konstrukčně nejzajímavější materiály na bázi tkanin s uhlíkovými vlákny a reaktoplastické matrice jsou velmi finančně nákladné, jednak z důvodu ceny hlavní suroviny - uhlíkových vláken, ale také z důvodu drahé výroby. Vysoké náklady na výrobu spočívají v značném podílu lidské práce, avšak i do této oblasti již proniká automatizace. Dalším faktorem, zvyšujícím cenu, je časová náročnost jednotlivých technologických postupů. Používané technologie jsou uvedené v následující podkapitole.

### 4.1. Technologie výroby kompozitů z reaktoplastů

Reaktoplastické kompozity nejsou předmětem této práce, avšak pro určité srovnání jsou zde nejobvyklejší technologie výroby alespoň vyjmenovány: [3]

- Ruční kladení (Hand Layup)
- Kladení vláken (Filament Winding)
- Pultruze
- RTF (Resin transfer Molding)

- Automatické kladení pásů či vláken (Automate tape placement and automated fiber placement)
- Metody založené na vytvrzování v autoklávu (Autoclave-Based method)

Ve většině výše zmíněných technologií se vyskytuje alespoň jedna z nevýhod výroby reaktoplastických kompozitů:

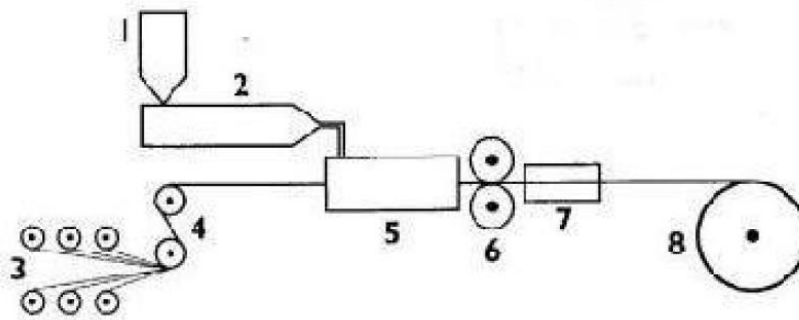
- Malá produktivita
- Velký podíl manuální práce
- Dlouhý čas produkce jednoho dílu (dáno vytvrzováním reaktoplastů)

Některé nevýhody vyplývající z technologičnosti výroby kompozitů s reaktoplastickou maticí by mohly být vyřešeny použitím matrice termoplastické. Jedná se především o zkrácení času výroby, jelikož odpadá nutnost vytvrzování matrice a zjednodušení skladování polotovarů – prepregů. Zatímco reaktoplastické prepregy musí být skladovány v chladu – za pokojové teploty dochází po určité době k samovolnému vytvrzení, termoplastické prepregy žádné takové omezení nemají. V literatuře mnoho zmínek o výrobě termoplastických kompozitů s tkanou výztuží (termoplastických prepregů) zatím není. Určité rozdělení technologií je uvedeno v následující podkapitole.

#### **4.2. Technologie výroby kompozitů z termoplastů**

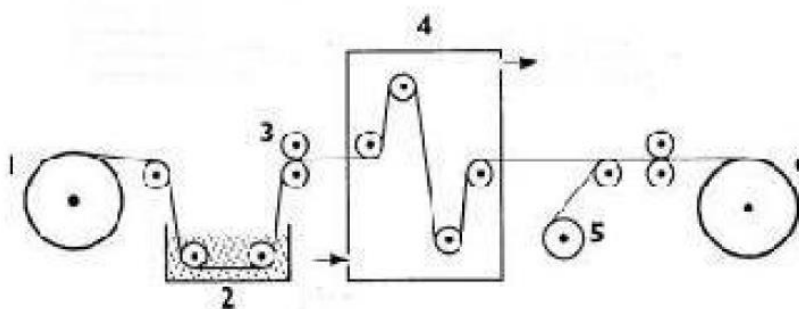
Dle [19] jsou technologie výroby termoplastických prepregů následující:

- Předimpregnace pramenců vláken taveninou polymeru, schéma technologie uvedeno na Obr. 12



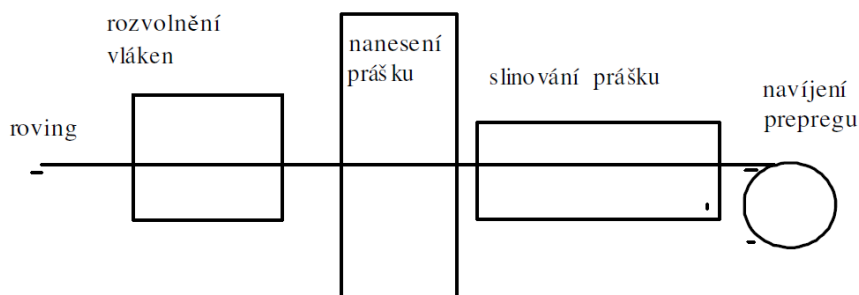
**Obr. 12 Technologie předimpregnace pramenců vláken, 1- zásobník granulí termoplastu, 2- vytlačovací stroj se štěrbinovou hubicí, 3-cívky rovingů, 4-napínací kladky, 5-prosycování rovingů taveninou termoplastu, 6- válcování prepregu, 7 -chlazení prepregu, 8-navíjení prepregu [19]**

- Impregnace polotovarů roztokem polymeru, schéma technologie je uvedeno na Obr. 13.



**Obr. 13 Technologie impregnace polotovarů roztokem polymeru, 1- role tkaniny 2- prosycování tkaniny roztokem termoplastu, 3- vymačkávání přebytečné matrice, 4-sušící věž, 5-separační fólie, 6-role tkaninového prepregu [19]**

- Impregnace vláken suchým práškem polymeru ve fluidním loži, schéma technologie je uvedeno na Obr. 14.

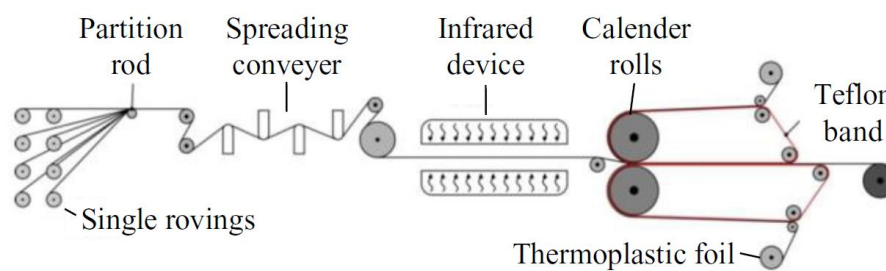


**Obr. 14 Technologie nanesení kapalné suspenze částic polymeru na výztuž [19]**

Další podobná technologie výroby prepregů je uvedena v [20].

- **Vlákno – fóliová pásová linka, Fibre-Foil-Tape Unit (FFTU)**

Technologie kombinující výrobu textilie a termoplastické fólie díky modulární konstrukci a kontinuální výrobě je vhodná pro hromadnou produkci a je schopná se přizpůsobit konkrétním podmínkám. Přednosti technologie spočívají v rovnoměrnosti uspořádání vláken bez nežádoucích dutin, možnosti nastavení obsahu vláken, flexibilní kombinaci vláken a matrice. Procesem se nepoškozuje vlákna, schéma technologie je na Obr. 15. [20]



**Obr. 15 Vlákno – fóliová pásová linka (FFTU) [20]**

Následná výroba finálních produktů z kompozitních materiálů je možná technologiemi:

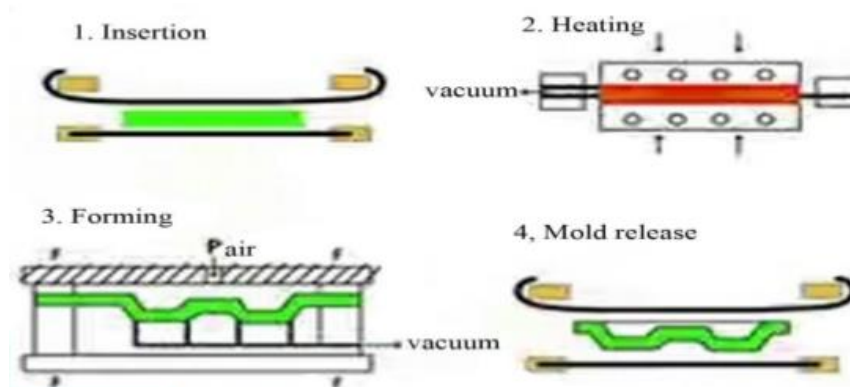
Technologie uvedené v [3] jsou následující:

- **Kladení vrstev – Film Stacking**

Metoda výroby kompozitů Film Stacking, což je možné přeložit jako metoda Klazení vrstev, spočívá v postupném klazení vrstvy vyztužující tkaniny a tenkého polymerního filmu. Vrstva vyztužující tkaniny obsahuje malé množství polymerní matrice, cca 15 hm. %. Vrstvením s polymerní fólií je dosaženo požadovaného poměru mezi maticí a výztuží. Kompozit vznikne z připraveného materiálu za působení tlaku a teploty lisování, finální stupeň prosycenosti je popsán Darcyho zákonem. Prosycenost je přímo závislá na působícím tlaku a nepřímo závislá na viskozitě roztaveného polymeru.

- **Tváření membránou – Diaphragm Forming**

Technologie výroby kompozitů z termoplastických prepregů, kde požadované množství prepregů je navrstveno a vloženo mezi dvě membrány. Z prostoru mezi membránami je vyčerpán vzduch a navrstvené prepregy jsou nahřaty nad teplotu tání či viskózního toku ( $T_m$ ,  $T_f$ ), poté je z jedné strany aplikován tlak. Tím se zdeformuje membrána a kompozit je vytvarován podle použité formy. Hlavní výhodou popisované technologie je skutečnost, že lze vyrábět i dvojitě prohnuté produkty. Kritickou částí procesu je pevnost membrány, která pro lisování za velkých tlaků musí být velmi odolná. Schéma technologie je na Obr. 16.

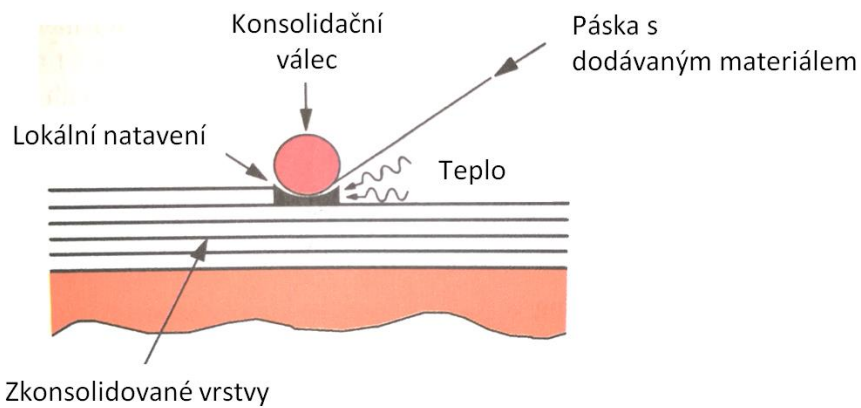


**Obr. 16 Schéma technologie tváření membránou [21]**

- **Vrstvení termoplastických pásků - Thermoplastic Tape Laying**

Postupné kladení pásků tvořených jednosměrnými vyztužujícími vlákny impregnovanými matricí, kde kladená vlákna jsou ohřívána a konsolidačním válcem přitlačována k již vytvořenému materiálu, je principem technologie Thermoplastic Tape Laying. Kromě teplého válce, který materiál matrice ohřívá nad  $T_m$  či  $T_f$ , je součástí technologie válec studený (konsolidační), který roztavený polymer ihned chladí a převádí ho zpět do pevného stavu. Znázornění výroby kompozitů touto technologií je znázorněno na Obr. 17.





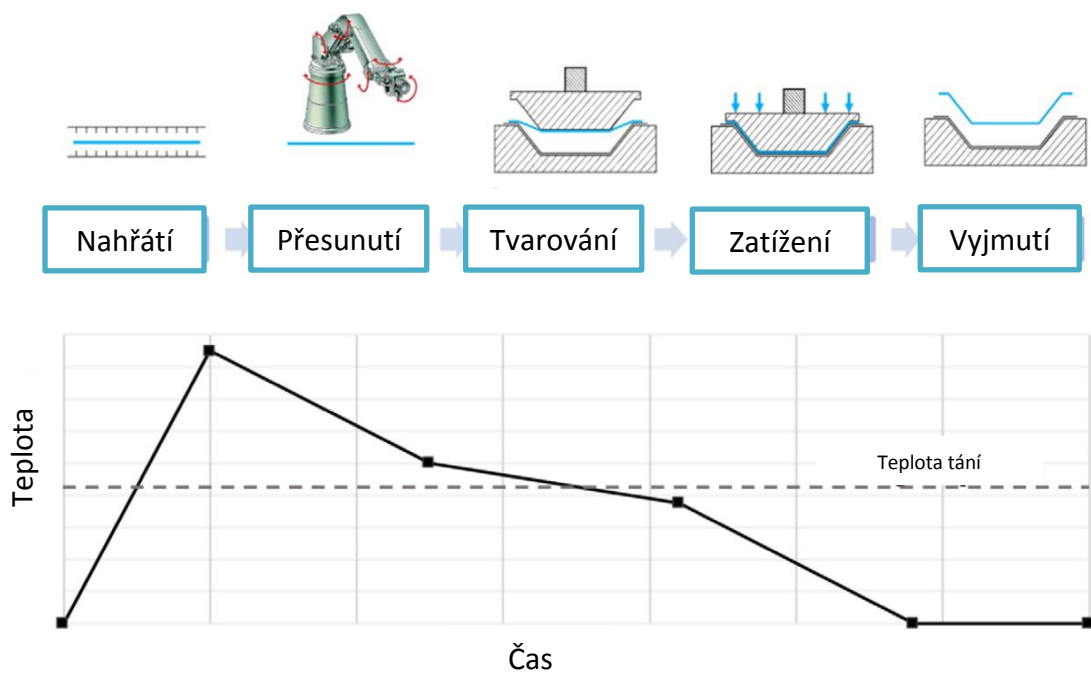
**Obr. 17 Schématické znázornění technologie Thermoplastic Tape Laying [1]**

- **Technologie splétaných vláken - Commingled Fibres**

Technologie Commingled Fibres využívá dodání termoplastické matrice k výrobě kompozitu v podobě vláken. Z vláken matricových a vyztužujících jsou vytvořeny příze, z nichž je poté vytvořena klasická tkanina. Tato tkanina se za působení tlaku a tepla prosytí svou vlastní složkou - roztavenými termoplastickými vlákny. Po zchladnutí vzniká přímo hotový kompozit.

- **Termoforming**

Schematické znázornění výroby finálního výrobku pomocí technologie termoformingu je uvedeno na Obr. 18. Termoplastický prepreg je nahřát nad teplotu tavení  $T_m$ , popřípadě nad teplotu  $T_f$ , matrice poté je přemístěn do formy, která je temperovaná jen mírně nad  $T_m$  ( $T_f$ ). Během chladnutí dílu je teplota snižována za stále působícího tlaku. Tímto způsobem je možné vyrábět díly během krátkého času a s dobrou kvalitou povrchu. [22]



Obr. 18 Fáze procesu výroby dílu pomocí thermoformingu ( [22] upraveno )

## 5. Analýza současného stavu

Byla provedena analýza současného stavu výroby a výzkumu kompozitů s termoplastickou výztuží. Čerpáno bylo především z internetových zdrojů.

### 5.1. Výrobci

Firem nabízejících výrobu kompozitů s termoplastickou matricí je k nalezení celá řada, následující přehled se snaží o shrnutí nejzajímavějších z celého světa. Z pochopitelných důvodů si společnosti chrání své know-how a příliš technických podrobností na svých internetových stránkách neposkytují, informace níže jsou maximální, které je možné veřejně získat.

#### 5.1.1. Evropské společnosti

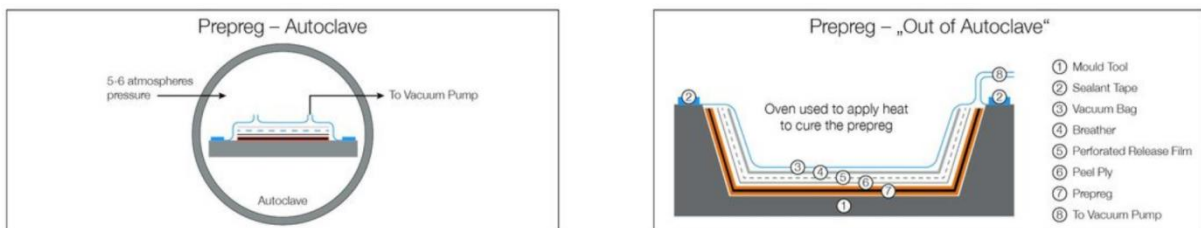
- **C. Cramer, Weberei, GmbH u. Co. KG** [10]

Tradiční německý výrobce tkanin, působící na trhu již od roku 1947 se v posledních dekádách specializuje na tkaniny určené pro výrobu kompozitů. Mezi nabídkou různých tkanin vyčnívá produkt termoplastického prepregu.

Společnost uvádí nabídku termoplastického prepregu s následujícími materiály:

- **Matrice:** PE, PP, PA6, PA6.6, PA11, PA12, PET, PETG, PBT, PC, PC-FST, FEP, PVF, PVDF, ECTFE, EFTE, PPS, PEI, PEEK, PAEK, TPU
- **Výztuž:** karbonová vlákna, skleněná vlákna, aramidová vlákna, ocelová, měděná, hliníková, titanová, čedičová

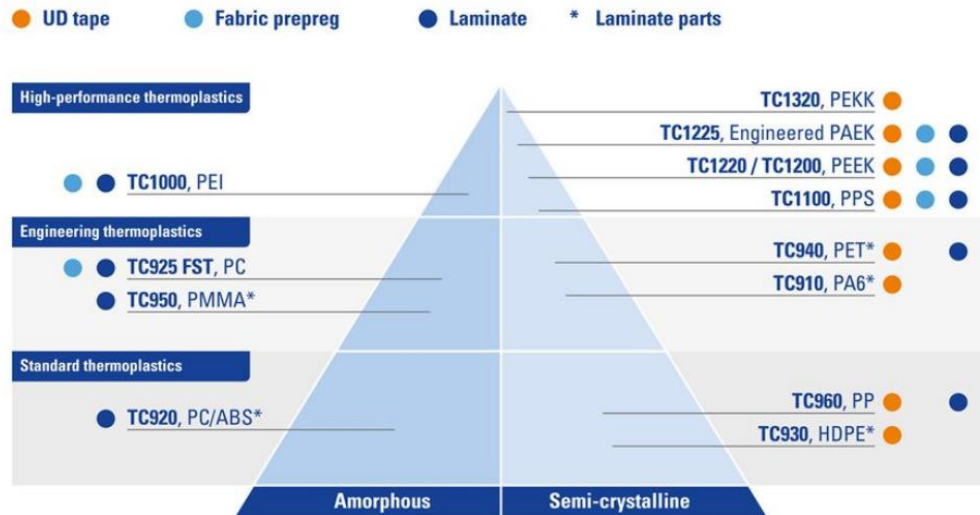
Společnosti uvádí, že prepregy jsou vyráběny technologií spečením buď v autoklávu, nebo vně autoklávu. Proces je uveden na Obr. 19



**Obr. 19 Technologie výroby prepregů společnosti CCE [10]**

- **TORAY [23]**

Nizozemská společnost založená roku 1972 zabývající se již od svého začátku produkcí kompozitů. V současnosti firma nabízí širokou škálu kompozitních materiálů jednak s reaktoplastickou matricí, tak s matricí termoplastickou. Konkrétní nabízené materiály jsou uvedeny na Obr. 20. Ke každému uvedenému materiálu lze na stránkách dohledat také jeho materiálový list s podrobnou charakteristikou a mechanickými vlastnostmi. Společnost uvádí různorodé použití jejich produktů v oblastech letectví, kosmonautiky, automotive i v produktech každodenní potřeby. Dle informací uvedených na internetových stránkách mají k dispozici pro své zákazníky zpracované technologické návody doporučených postupů při výrobě.



Obr. 20 Portfolio produktů termoplastických kompozitů firmy TORAY [23]

- **XELIS GmbH** [24]

Německá společnost nabízející výrobu termoplastických laminátů a profilů vlastní unikátní technologií X-CCM® (Continuous Compression Moulding). Tato technologie umožňuje kontinuální výrobu termoplastického kompozitu při následujících podmínkách:

- X-CCM® Flat Laminate Machine:
  - Tlak > 2 MPa
  - Maximální rychlost linky: 90 m.h<sup>-1</sup>
  - Maximální teplota: 410 °C
  - Maximální rozměry (šířka x tloušťka): 660 x 10 mm
- X-CCM® Profile Machine:
  - Tlak > 2 MPa
  - Maximální rychlost linky: 30 m.h<sup>-1</sup>
  - Maximální teplota: 410 °C
  - Maximální rozměry (šířka x výška): 150 x 150 mm

Výroba termoplastických kompozitů je nabízena z blíže nespecifikovaných materiálů matrice a z vyztužujících vláken: skla, karbonu, aramidu a čediče.

### 5.1.2. Světové společnosti

- **SHINDO**

Japonská společnost založená roku 1970 specializující se na výrobu tkanin, nabízí termoplastické kompozity. Konkrétně dva druhy jednosměrně vyztužených prepregů s matricí z polyamidu 6 (PA6) a vyztužujícími vlákny skleněnými (GF) či uhlíkovými (CF). Nelze dohledat technologii, kterou pro jejich výrobu používají, avšak v produktových listech lze dohledat informace o dosahovaných mechanických vlastnostech viz Tab. 2.

**Tab. 2 Materiálové vlastnosti prepregů společnosti SHINDO**

	<b>GF/PA6</b>	<b>CF/PA6</b>
<b>Množství vláken [hm. %]</b>	69	65
<b>Pevnost 0° [MPa]</b>	950	2300
<b>Y. Modul 0° [MPa]</b>	40 000	120 000

- **Vector systems [25]**

Společnost sídlící ve Spojených státech amerických působí na trhu od roku 2001 a specializuje svou produkci na výrobu prepregů z reaktoplastů a také termoplastů. Nabídku tvoří široká paleta plastů, z těch termoplastických: PEEK, PEI, PPS, PP, PE, PC, PET, PES, PBT, PA12, PA11, PA6, PA4.1, PEKK. Kombinovat tyto materiály lze s tkaninou z vláken: uhlíkových, skleněných, aramidových, ocelových, hliníkových, titanových. Na stránkách výrobce lze najít produktový list k prepregu s matricí z PEEK a tkaninou z uhlíkových vláken, uvedené mechanické vlastnosti jsou vypsány v Tab. 3.

**Tab. 3 Materiálové vlastnosti prepregu společnosti Vector systems**

	<b>CF/PEEK</b>
<b>Množství vláken [hm. %]</b>	51
<b>Pevnost 0° [MPa]</b>	696
<b>Y. Modul 0° [MPa]</b>	57 000

- **Lingol Corp. [26]**

Společnost sídlící ve Spojených státech amerických působí na trhu od roku 1974 a historicky se orientovala na výrobu reaktoplastických kompozitních laminátů. Avšak již od roku 1994 také začala vyrábět termoplastické kompozity. V tomto sektoru

nabízí výrobu laminátů a prepregů z materiálů matrice: PC, PES, PPSU, PEI, PP, HDPE, PET, PA, PA, PPS, PEEK, PEKK a materiály vyztužujících vláken: uhlík, sklo, aramid.

Společnost uvádí, že výroba jejich kompozitů probíhá pomocí následujících technologií: thermoforming, compression molding, machining, tube rolling, overmolding/co-molding, roll forming, vakuum forming. Technologii, kterou vyrábějí konkrétní produkt neuvádějí, stejně tak jako materiálové vlastnosti jednotlivých kompozitů.

## 5.2. Výzkum termoplastických kompozitů

Problematika kompozitů či prepregů používajících termoplastickou matrici je v současnosti velice aktuální. K nalezení je značné množství vědeckých prací publikovaných v odborných časopisech. V následující kapitole jsou shrnuty poznatky z převážně těch nejaktuálnějších či nejvíce relevantních.

- **Použití předpolymerizovaného monomeru [27]**

Obecně lze říci, že hlavním problémem termoplastických kompozitů je smáčivost a prosycenost použitých vláken matricí, z důvodu vysoké viskozity termoplastů v tekutém stavu. Řešením v některých případech může být výroba za větších teplot a tlaků, avšak práce [27] zkoumá tento problém z úplně jiného úhlu. Analyzuje proces výroby prepregu, složeného z uhlíkových vláken a PMMA (polymethylmetakrylát). Na rozdíl od klasického přístupu k výrobě takového prepregu (totiž při vzájemném kontaktu vláken a matrice ohřátí nad teplotu viskózního toku) je zde rozvíjen princip odlišný. Nejdříve jsou uhlíková vlákna smočena předpolymerizovaným methylmetakrylátem (MMA) a až poté dochází k polymerizaci *in situ* – tedy k výrobě polymethylmetakrylátu.

Velkou výhodou tohoto výrobního postupu je nízká viskozita MMA (0,53 mPa.s), díky této vlastnosti monomer velmi dobře smočí a prosytí tkaninu. Z uvedených snímků výbrusů vzorků vyrobených prepregů zmíněným postupem je viditelné bezchybné prosycení a žádné viditelné dutiny. Další výhodou je nízká polymerizační teplota (90 °C) a nízký tlak (0,38 MPa), za kterých probíhá výroba prepregu. Při použití

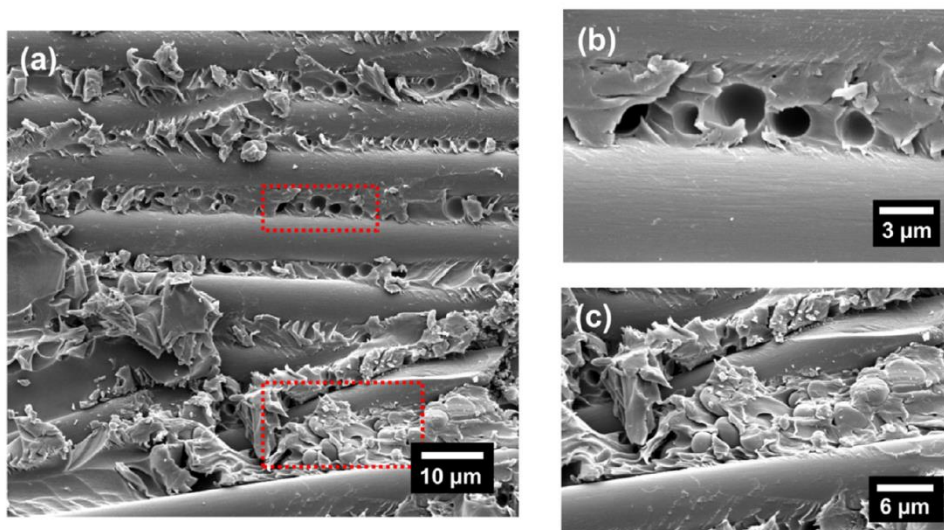
konvenčního způsobu je nutné použít technologické parametry zcela odlišné: teplotu 200 °C a tlak (3,8 MPa). Což představuje nemalou energetickou zátěž. Možnou nevýhodu tohoto inovativního procesu je možné spatřovat v nutnosti uchovávat předpolymerizovaný monomer MMA v chladicím zařízení (při -18 °C) [27].

Bohužel se autoři článku nezmiňují o dosažených mechanických vlastnostech připravených prepregů a také zde nejsou pro srovnání uvedeny fotografie výbrusů prepregů připravených konvenční technologií.

- **Prepreg s matricí ze směsi termoplastu a epoxidu se samoléčící schopností [28]**

Jedním z aktuálních problémů při použití kompozitních materiálů je možnost katastrofálního selhání materiálu a to bez předcházejícího varování a s tím související druhý velký problém – obtížnost takové selhání předpovědět. Řešením by mohlo být použití samoléčebných kompozitů.

Autoři se v [28] zabývali výrobou a analyzováním prepregu s uhlíkovými vlákny, matricí ze směsi termo a reaktu plastů. Úspěšná příprava vzorků je doložena několika mikroskopickými snímky, ty pořízené metodou SEM jsou uvedeny na Obr. 21. Avšak užitečný vliv samo-hojících látek není nikde v textu podložen konkrétním srovnáním vlastností kompozitů vyrobených s a bez této látky.



**Obr. 21 SEM snímky struktury samoléčícího kompozitu [28]**

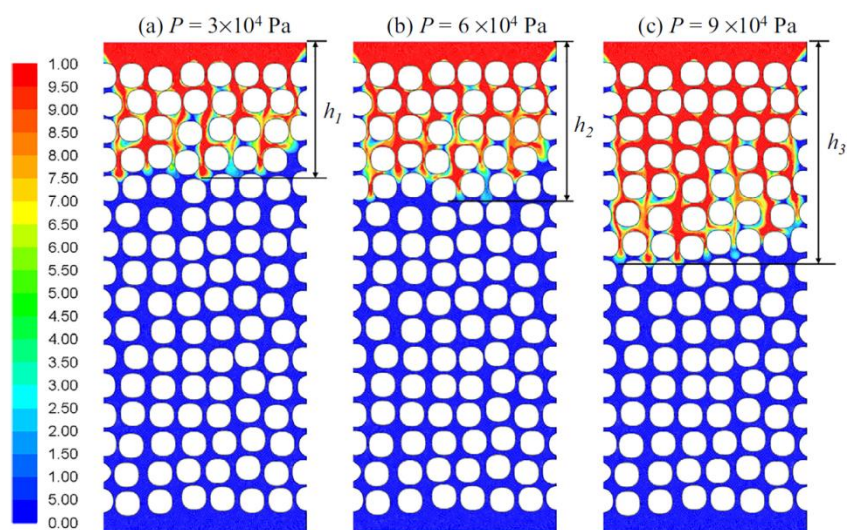
- **Simulace thermoformingu při výrobě termoplastického prepregu [22]**

Jednou z možností výroby finálních výrobků z polotovarů – termoplastických prepregů je proces thermoformingu. Jedná se ve své podstatě o lisování za tepla. Nabízí se srovnání s procesem lisování plechů, kde v jejich případě je nabízeno mnoho komerčních softwarů pro simulaci výrobního procesu. V případě thermoformingu plastových prepregů se simulaci děje zabývá [22].

Úspěšnou simulací procesu je možné ušetřit významné finanční prostředky omezením fyzického testování, omezením přístupu pokus – omyl. Uvedená simulace procesu je možná díky detailnímu zkoumání vzniklých dějů za použití visko-elastického modelu, znalostí termálního chování materiálů a následně homogenizační metody. Uvedené výsledky simulací ukazují na velmi dobrou shodu s provedeným experimentem.

- **Predikce prosycenosti vláken [18]**

Klíčovou problematikou prosycenosti vláken matricí DoI se také zabývá [18]. Autoři pro predikci prosycenosti uhlíkových vláken matricí (PA6) využili třífázového přístupu. Nejdříve byl tok tekutiny – roztavené matrice (PA6) počítán na mikro úrovni ve 2D, druhou fází bylo počítání toku tekutiny na makro úrovni. Závěrečnou třetí fází bylo modelování chování celkového systému a určení úrovně prosycenosti vláken (DoI). Simulovány byly mimo jiné podmínky za různých působících tlaků. Jak můžeme pozorovat ze simulace uvedené na Obr. 22 při použití vyšších tlaků je stav prosycení lepší.



**Obr. 22 Simulace DoI za různých tlaků (legenda zobrazuje hodnotu DoI), převzato z [18]**



## 6. Návrh a provedení experimentů

Provedené experimenty jsou zaměřeny na vliv různých parametrů při výrobě kompozitů z termoplastů, konkrétně polyetylenu. Jedna část experimentů je zaměřena na kompozity s výztuží s čedičovou tkaninou, v druhé části je pozornost věnována kompozitům vyztuženým krátkými uhlíkovými vlákny.

Kompozity s tkaninovou výztuží jsou zkoumány z hlediska působení různého tlaku při přípravě vzorků.

Kompozity s krátkými uhlíkovými vlákny jsou připraveny za různé teploty, různého časového intervalu výdrže na teplotě a z různých druhů polyetylenu.

### 6.1. Použitá zařízení a přípravy

Výroba experimentálních vzorků v laboratorních podmínkách probíhala pomocí následujících zařízení a přípravků:

- **Lis**

Hydraulický lis WP 45H od firmy Holzmann-Maschnen s mechanických odměřováním zátěžné síly a rozsahem do 45 tun. Zatěžování se provádí ručně pomocí páky spřažené s hydraulickým pístem. Fotografie lisu je na Obr. 23 a).

- **Vyhřívané desky**

Lis byl vybaven měděnými deskami na Obr. 23 b), které obsahují tepelnou spirálu z odporového drátu. Výkon spirál je řízen PID regulátorem (Ht60B), teplota je zjišťována pomocí sondy zabudované do desek. Pro účely chlazení jsou v deskách taktéž kanály pro chladicí médium. Při prováděných experimentech byla používána voda z vodovodního řadu.



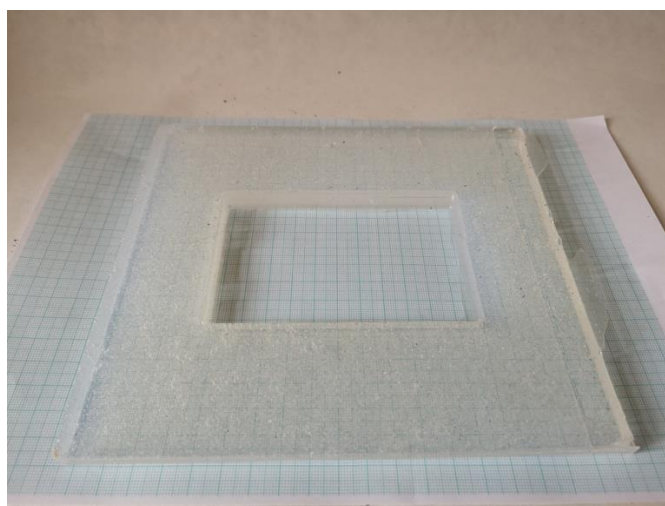
a)

b)

**Obr. 23 a) hydraulický lis, b) vyhřívané desky**

- **Forma**

Pro potřeby výroby vzorků, o větší tloušťce než tenký jednovrstevný prepreg, byl vytvořen laboratorní přípravek z transparentní silikonové pryskyřice: Essil 291/292 (od společnosti SikaAxson). Tento materiál vykazuje velice dobrou teplotní a chemickou odolnost. Forma byla vyrobena s vnějšími rozměry: 195 x 180 mm a vnitřními rozměry: 112 x 74 mm. Forma, jejíž výška byla 3 mm, je zobrazena na Obr. 24.



**Obr. 24 Silikonová forma pro přípravu vzorků**

## 6.2. Použité materiály

Následující přehled uvádí materiály, které byly použity pro výrobu vzorků. V závorce jsou uvedeny zkratky, které budou dále v práci uplatněny. Byly vybrány dva polyetylenové materiály ve formě prášků jeden s velmi vysokou hodnotou *MFR* a druhý s naopak běžnou hodnotou *MFR*.

- **RPX 1001 NATUR LD/70/600 $\mu$  (RPX)**

Materiál na bázi nízko hustotního polyetylenu, dodávaný ve formě prášku, je určen především pro výrobu, kde je požadovaná malá viskozita a dobré tokové vlastnosti.

Deklarované vlastnosti výrobcem jsou následující: hustota materiálu je 0,919 g.cm<sup>-3</sup>, hodnota indexu toku taveniny (*MFR*) 70 g/10 min, teplota tání 104 °C. Materiálové specifikace jsou k dispozici v příloze č. 1, není však uvedena pevnost materiálu v tahu.

- **Dowlex 2629.10UE (DOW - ZS)**

Materiál na bázi lineárního nízko hustotního polyetylenu, dodávaný ve formě prášku, je určen především pro výrobu ve vstřikolisech a metodu rotačního spékání. Materiál je plně teplotně a UV stabilizován, vykazuje také dobrou odolnost vůči šíření trhlin a vysokou rázovou pevnost.

Deklarované vlastnosti výrobcem jsou následující: hustota materiálu je 0,935 g.cm<sup>-3</sup>, hodnota indexu toku taveniny (*MFR*) 4,0 g/10min, pevnost v tahu 17,5 MPa, teplota tání 124 °C, elastický modul v ohybu 0,645 GPa. Veškeré další dostupné materiálové specifikace jsou k dispozici v příloze č. 2. Sítovacím zařízením ve firmě SurfaceTreat bylo provedeno třídění prášku dle velikosti částic, distribuce velikosti částic je uvedeno v Tab. 4.

**Tab. 4 Distribuce velikosti částic materiálu DOW - ZS**

Velikost částic [ $\mu$ m]	podíl %
$\leq 63$	2,4
64 - 100	10,4
101 - 150	22,5
151 - 200	19,4
201 - 250	18,6
251 - 300	12,8
$\geq 301$	13,9

- **Dowlex 2629.10UE – plazmovaný (DOW – P)**

Polyetylenový materiál byl podroben plazmové úpravě v zařízení LA 400 od firmy SurfaceTreat. Jedná se o zařízení generující plazma pomocí mikrovlnného zdroje ve vakuu [29]. Prášek byl v zařízení upravován po dobu 120 s a průtok pracovního plynu – kyslíku (O<sub>2</sub>) byl nastaven na hodnotu 100 sccm.

- **Dowlex 2629.10UE – separovaný 100 μm (DOW 100)**

Polyetylenový materiál v základním stavu byl roztříděn dle velikosti částic a byla vyseparována frakce s částicemi o velikosti 101 až 150 μm.

- **Dowlex 2629.10UE – separovaný 300 μm (DOW 300)**

Polyetylenový materiál v základním stavu byl roztříděn dle velikosti částic a byla vyseparována frakce s částicemi o velikosti větší než 300 μm.

### **6.3. Charakterizace použitých matricových materiálů**

Pro charakterizaci materiálových vlastností matric byla použita metoda diferenční snímací kalorimetrie.

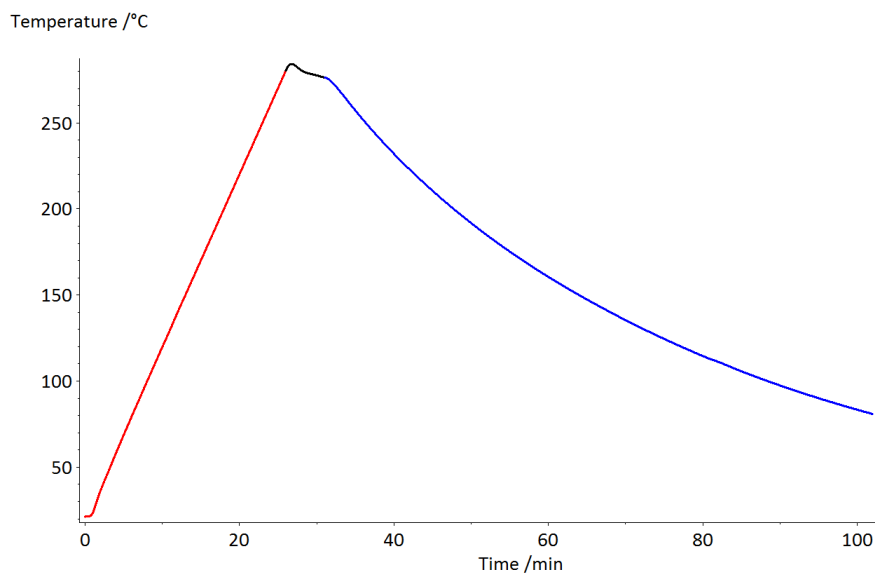
#### **6.3.1. Diferenční snímací kalorimetrie (DSC)**

Metodou DSC (differential scanning calorimetry) lze zjistit teplotu tání a krystalizace ( $T_m$ ,  $T_k$ ), měrné teplo (entalpie tání) potřebné k roztavení vzorku (endotermní reakce - na grafu značeno kladně) a uvolněné při krystalizaci (exotermní reakce - na grafu značeno záporně). Z hodnot měrných tepel lze posoudit stupeň krystalinity. [30]

Metoda DSC je způsob měření, při kterém se zaznamenává rozdíl mezi rychlostí toku tepla v kelímku se zkušebním vzorkem a v referenčním kelímku. Oba kelímky jsou podrobeny stejnému řízenému teplotnímu režimu, záznamem ze zkoušky je křivka závislosti rozdílu tepelného toku na času, či teplotě. Užívá se označování endotermických jevů za kladné (tedy vzhledem k svislé ose směrem vzhůru) a exotermických jevů za záporné (tedy vzhledem k svislé ose směrem dolů).

Měření použitých materiálů bylo prováděno na přístroji pro termickou analýzu od společnosti NETZSCH s označením STA 409PG LUXX. Ohřev byl prováděn na teplotu 280 °C

rychlostí  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Měření probíhala v ochranné atmosféře  $\text{N}_2$ . Byl proveden 1. ohřev materiálů pro zjištění chování prášku při lisování a 2. ohřev pro zjištění zda 1. ohřevem (do  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) materiál nedegradoval. Teplotní režim zkoušky je zobrazen na Obr. 25.

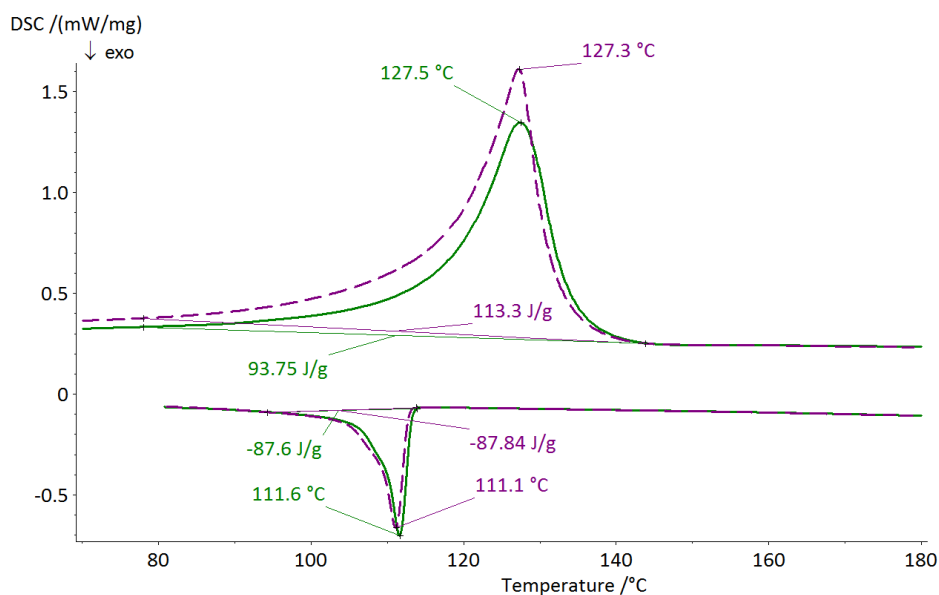


**Obr. 25** Teplotní průběh zkoušení materiálů na DSC, červená křivka – ohřev, černá křivka – výdrž na teplotě, modrá křivka – ochlazování

### 6.3.2. Naměřené materiálové vlastnosti

- **DOW – ZS**

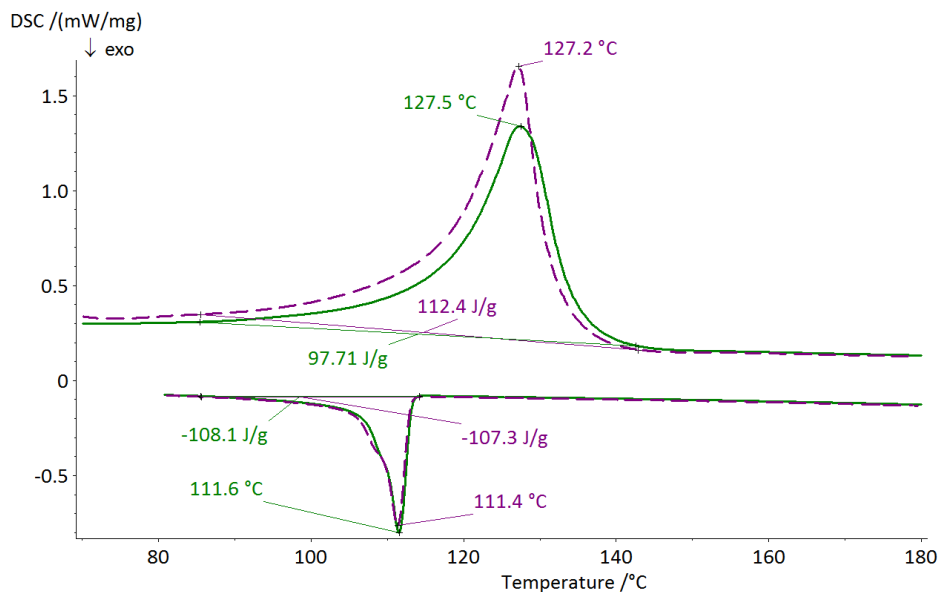
Výsledky měření materiálu DOW – ZS jsou zobrazeny na Obr. 26. Lze pozorovat, že teplota ani entalpie krystalizace se mezi 1. a 2. ohřevem se příliš neliší, stejně tak hodnota teploty tání je v obou případech podobná. Hodnoty entalpie tání se liší, což může být dáno zvětšením podílu krystalické fáze po 1. ohřevu. Pro další experimenty je nejdůležitější hodnota teploty tání, která se pohybuje mezi teplotami  $127$  a  $128\text{ }^{\circ}\text{C}$ . K roztavení všech krystalických útvarů v materiálu dochází při teplotě cca  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Obr. 26 DSC křivky materiálu DOW – ZS, zeleně – 1. ohřev, fialově – 2. ohřev**

- **DOW – P**

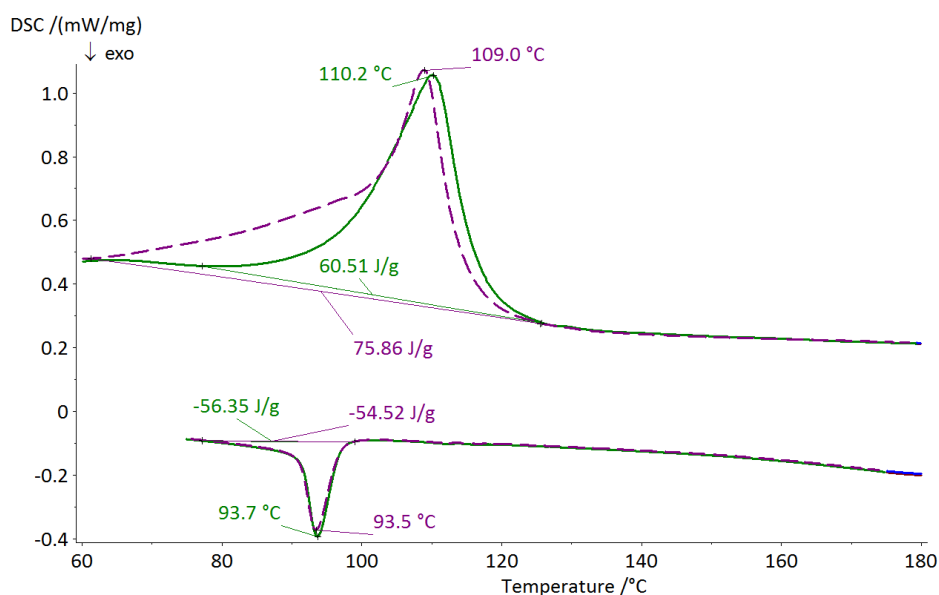
Výsledky měření materiálu DOW – P jsou zobrazeny na Obr. 27, lze pozorovat, že teplota ani entalpie krystalizace se mezi 1. a 2. ohřevem se příliš neliší, stejně tak hodnota teploty tání je v obou případech podobná. Pouze hodnoty entalpie tání se liší, což může být dáno zvětšením podílu krystalické fáze po 1. ohřevu. Hodnoty teploty tání se opět pohybují mezi 127 a 128 °C. Lze říci, že plazmováním základního materiálu se jeho charakteristiky prakticky nezměnily. K roztavení všech krystalů útvarů v materiálu dochází při teplotě cca 145 °C.



**Obr. 27 DSC křivky materiálu DOW – P, zeleně – 1. ohřev, fialově – 2. ohřev**

- **RPX**

Výsledky měření materiálu RPX jsou zobrazeny na Obr. 28, lze pozorovat, že teplota ani entalpie krystalizace se mezi 1. a 2. ohřevem se příliš neliší, stejně tak hodnota teploty tání je v obou případech podobná. Pouze hodnoty entalpie tání se trochu liší, což může být dáno zvětšením podílu krystalické fáze po 1. ohřevu. Hodnoty teploty tání se pohybují mezi 109 a 110 °C. K roztavení všech krystalických útvarů v materiálu dochází při teplotě cca 125 °C.



**Obr. 28 DSC křivky materiálu RPX, zeleně – 1. ohřev, fialově – 2. ohřev**

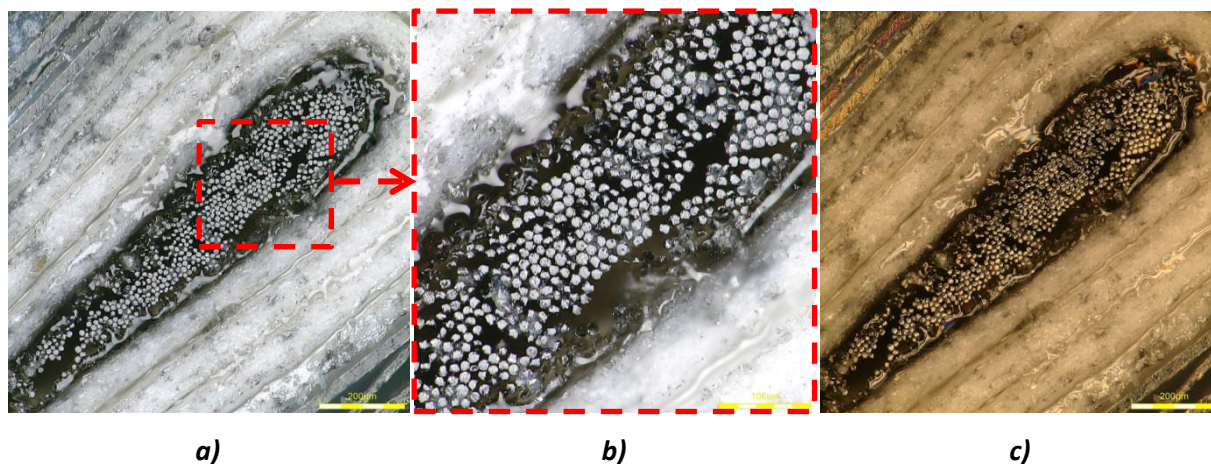
## 6.4. Způsoby testování

Připravené vzorky kompozitů byly zkoumány jak z hlediska struktury – pomocí mikroskopického zkoumání, tak z hlediska mechanických vlastností – pomocí tahové a ohybové zkoušky.

### 6.4.1. Mikroskopické pozorování

Mikroskopické pozorování bylo prováděno pomocí digitálního mikroskopu Olympus DSX1000. Pozorování je možné ve světlém (BF), tmavém (DF), šikmém (OBQ) a smíšeném poli (MIX), dále je k dispozici pozorování v polarizovaném světle (PO) a s diferenciální interferencí (DIC).

Mikroskopické zkoumání bylo prováděno hlavně z důvodu zkoumání prosycenosti vláken matricí, proto byla nejdříve nasnímána vlákna samotná. Na Obr. 29 je zobrazen svazek čedičových vláken, který byl obalen izolepou a připraven jako standardní výbrus. Z obrázku je patrné, že mezery mezi vlákny jsou při pozorování mikroskopem zobrazeny jako černá místa. Tato znalost bude dále uplatněna při posuzování prosycenosti v hotových kompozitech.



**Obr. 29** Snímky výbrusů čedičových vláken, a) čedičová vlákna režim BF, b) zvětšen snímek a, c) čedičová vlákna režim DIC

### 6.4.2. Zkouška tahem

Principy zkoušení byly inspirovány normou [31], nebyl však dodržen tvar a rozměr zkoušených vzorků, vzhledem k možnostem jejich výroby.



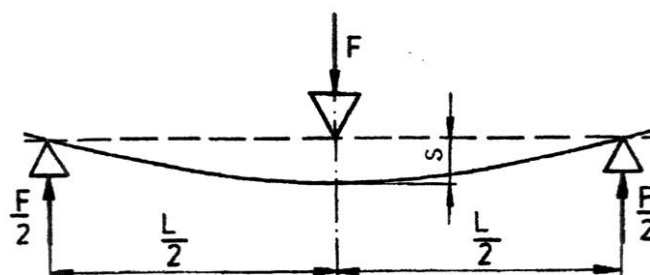
Všechny vzorky byly testovány zkušební rychlostí  $v = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Především byla měřena maximální síla  $F_M$  a byla počítána hodnota pevnosti následujícím vztahem:

$$\sigma = \frac{F_M}{A} \quad (7)$$

Zkoušenými vzorky byly pásky o velikosti cca ( $\text{š} \times \text{d}$ )  $15 \times 68 \text{ mm}$ , které byly rozřezány na kotoučové pile z kompozitních destiček, vzniklých lisováním v silikonové formě. Pro konkrétní výčet pevnosti daného vzorky byl každý jednotlivý pásek přeměřen a byla zjištěna plocha kolmého průřezu vzorku  $A$ . Vzdálenost čelistí byla pro všechny vzorky nastavena na hodnotu  $40 \text{ mm}$ .

### 6.4.3. Ohybová zkouška

Zkoušení elastického modulu pružnosti probíhalo při zvolených parametrech inspirovaných normou [32]. Schéma zkoušení je uvedeno na Obr. 30.



*Obr. 30 Schéma tříbodové zkoušky ohybu pro určení modulu pružnosti*

Výpočet modulu pružnosti  $E_o$  byl prováděn podle vztahu:

$$E_o = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \Delta s} \quad (8)$$

Pro těleso obdélníkového průřezu je  $I$ :

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (9)$$

kde  $h$  je tloušťka tělesa,  $b$  šířka zkušební tělesa,  $I$  je moment setrvačnosti [ $\text{mm}^4$ ],  $\Delta F$  je přírůstek síly [N],  $L = (16 \pm 1) \cdot h$  je vzdálenost podpor, zaokrouhlena na celé sudé číslo [mm],

$\Delta s$  je přírůstek průhybů zkušebního vzorku [mm]. Poměr  $\Delta F / \Delta s$  byl při výpočtu dosazen jako hodnota směrnice získaná proložením přímky naměřenými body v lineární oblasti zatěžování.

### **6.5. Nízkotlaké lisování**

Výroba vzorků probíhala v lisovacím zařízení a silikonovém přípravku uvedených výše. Tlak vyvolaný v přípravku a samotném lisovaném materiálu zatížením lisovacích desek, byl volen nízký, z důvodu malé pevnosti silikonu. Při experimentech za většího zatížení se silikonová forma velmi deformovala a v některých případech ani neudržela tekutou směs plastu a výztuže uvnitř formy. Avšak pomocí silikonového přípravku bylo možné vyrobit vzorky o podstatně větší tloušťce než v lisu bez přípravku. Takto připravené vzorky byly vhodnější pro zkoušky mechanických vlastností.

Pojmem nízkotlaké lisování se rozumí, že hodnota tlaku, působícího na materiál během výrobního procesu, byla  $p = 0,7$  MPa.

### **6.6. Vysokotlaké lisování**

Během výroby vzorků odlišným způsobem byla mezi vyhřívanými deskami lisována tkanina s plastem přímo bez použití jakéhokoliv přípravku/formy. Lisováním přímo mezi vyhřívanými deskami lze použít podstatně větších tlaků a tento výrobní postup vedl k vytvoření velmi tenkého kompozitu – prepregu. Motivací k lisování za vysokých tlaků byla snaha o lepší prosycení tkaniny a jejich vláken maticí. Předpokladem bylo, že se toto při nízkotlakém lisování neděje z důvodu příliš vysoké viskozity taveniny plastu.

Nevýhodou připravených vzorků – prepregů byla jejich velmi malá tloušťka. Klasické mechanické zkoušení se na takovýchto vzorcích provádí velice obtížně. Proto byla navržena třetí, kombinovaná varianta přípravy vzorků.

Pojmem vysokotlaké lisování se rozumí, že hodnota tlaku, působícího na materiál během výrobního procesu, byla  $p = 14,4$  MPa.

### **6.7. Dvoufázové lisování za různých tlaků**

Prepregy vyrobené přímo mezi vyhřívanými deskami umožňovaly lisování za vysokého tlaku, ale zároveň nebylo možné vyrobit kompozit o větší tloušťce a ten podrobit mechanickým

zkouškám. Proto byl zaveden dvoufázový postup výroby. Nejdříve byly připraveny prepregy (za vysokého i nízkého tlaku), který byly následně navrstveny v deseti vrstvách na sebe do silikonové formy vysoké 2 mm. Takto navrstvené prepregy se poté za níže uvedených podmínek lisovaly tlakem  $p = 0,7$  MPa. Vznikly vzorky o tloušťce 2 mm, které bylo možné podrobit mechanickým zkouškám.

## **7. Kompozity s krátkovláknovou výztuží**

Byly vyrobeny vzorky kompozitů s polyetylenovou matricí vyztuženou krátkými vlákny z uhlíku. Uhlíková vlákna byla dodána firmou MSV STUDÉNKA s.r.o, která vyvíjí možné postupy recyklace kompozitních materiálů. Dodaná vlákna, o průměru  $7 \pm 1$   $\mu\text{m}$  viz příloha č. 3 a délce 6 mm, pocházela z recyklace a je pro ně hledáno vhodné uplatnění. Využití jako plniva či výztuže do termoplastických kompozitů je jedna z možných cest. Byly provedeny experimenty, kdy uhlíková vlákna vždy tvořila 12 hm. % vzorku.

Byl zkoumán vliv čtyř různých druhů PE matrice, prvním z nich byl DOW 100, tedy prášek s velmi malými částicemi. Na základě práce [33] bylo vyvozeno, že v případě beztlakového způsobu výroby či výroby za malých tlaků, by mělo použití prášku o malém průměru částic přinést dobré výsledky. Především by mělo dojít k lepšímu smáčení vyztužující složky. Proto pro porovnání vlivu velikosti částic byl zvolen jako druhý materiál DOW 300, materiál s naopak velmi velkými částicemi. Tento materiál by měl vlákna smáčet znatelně hůře. Třetím materiálem byl zvolen DOW – P. U tohoto plazmově upraveného prášku byl předpoklad lepšího smáčení vláken z důvodu zvýšené energie a polarizace povrchu prášku. Čtvrtým materiálem byl zvolen RPX, tento polyetylenový materiál se vyznačuje především velmi vysokým (na poměry termoplastů) indexem toku taveniny. Vysoká hodnota tohoto parametru by mohla umožnit dobré smáčení vláken.

Pro porovnání dosaženého vyztužení matrice byly vytvořeny dva referenční vzorky z materiálů DOW ZS a RPX. Tyto byly podrobeny testování pevnosti v tahu, dosažené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5, zároveň pevnost materiálu DOW ZS byla porovnána s hodnotou pevnosti uvedené ve specifikaci vlastností materiálu od výrobce. V datovém listu materiálu RPX informace o pevnosti chybí.

Posouzení modulu pružnosti v ohybu na těchto vzorcích nebylo kvůli nedostatečné citlivosti laboratorního přístroje možné změřit. Byla pouze dohledána hodnota elastického modulu pružnosti pro materiál DOW ZS, která činí 0,65 GPa. Materiál RPX opět tuto informaci ve svém datovém listu nemá. Pozorováním chování vzorků lze však usoudit, že hodnota elastického modulu pružnosti v ohybu materiálu RPX rozhodně nebude větší než materiálu DOW – ZS.

**Tab. 5 Hodnoty pevnosti samotné matrice - porovnání udávané a experimentálně dosažené**

Označení	Materiál	Pevnost [MPa]	Směr. odchylka [MPa]
Připraven	DOW ZS (M)	16,1	0,4
DATA SHEET	DOW ZS (M)	17,5	-
Připraven	RPX (M)	7,9	0,4
DATA SHEET	RPX (M)	-	-

### 7.1. Vlákna neupravená, nižší teplota, 1. série

Pro prvotní přiblížení byly vytvořeny vzorky z neupravených vláken přímo ve stavu od výrobce. Použité technologické parametry lisování jsou uvedeny v Tab. 6. Dané množství vláken (2,5 g) bylo v nádobě promícháno s daným množstvím prášku (18,5 g), tato směs byla poté vsypána a zarovnána do silikonové formičky. Takto připravený vzorek byl vložen mezi vyhřívané desky lisu (teplota 150°C) a nejdříve byl po stanovenou dobu nahříván a poté zatížen uvedeným tlakem. Po uplynutí doby lisování byly desky lisu ochlazeny na pokojovou teplotu, odtíženy a vzniklý vzorek odebrán.

**Tab. 6 Parametry výroby vzorků z neupravených C-vláken, nižší teplota**

Označení	Materiál	Teplota desek [°C]	Tlak [MPa]	Čas přehřevu [min]	Čas lisování [min]
1. série	DOW 100	150	0,7	2	5
1. série	DOW 300	150	0,7	2	5
1. série	DOW - P	150	0,7	2	5
1. série	RPX	150	0,7	2	5

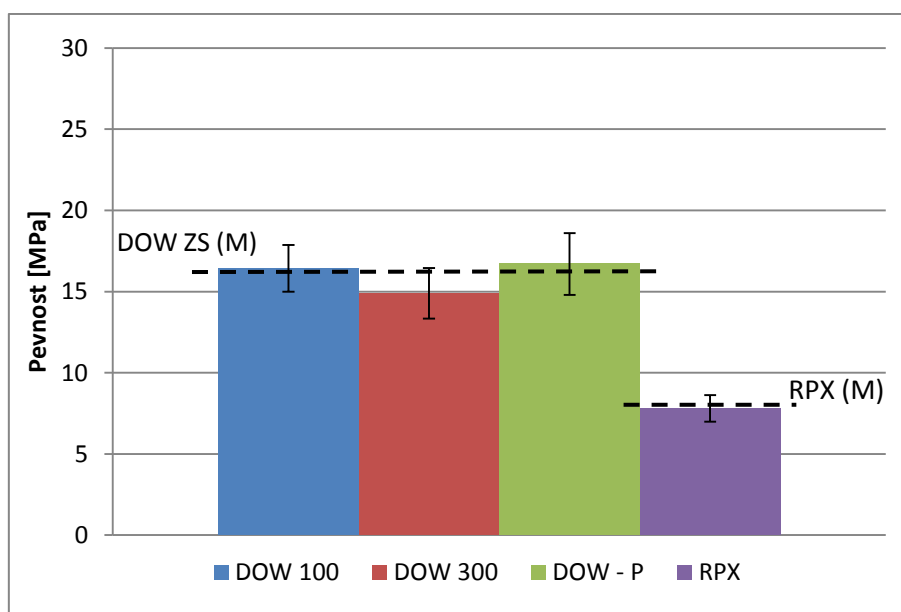
#### 7.1.1. Výsledky tahových zkoušek

Výsledky tahových zkoušek, provedených dle podmínek uvedených v Tab. 6, jsou uvedeny v Tab. 7 a graficky znázorněny na Obr. 31. Dle naměřených hodnot nelze pozorovat žádný

výrazný rozdíl pevností kompozitu mezi jednotlivými variantami matricového materiálu Dowlex, ani nelze pozorovat významné rozdíly vůči pevnosti vzorků z matricového materiálu samotného. Zatímco kompozitní materiál RPX s velmi vysokým parametrem MFR vykazuje přibližně dvakrát menší hodnotu pevnosti než kompozitní materiál s matricí z různých variant Dowlexu.

**Tab. 7 Pevnost vzorků z neupravených C-vláken, nižší teplota**

Označení	Materiál	Pevnost [MPa]	Směr. odchylka [%]
1. série	DOW 100	16,4 ± 1,4	8,8
1. série	DOW 300	14,9 ± 1,6	10,5
1. série	DOW - P	16,7 ± 1,9	11,4
1. série	RPX	7,8 ± 0,8	10,5



**Obr. 31 Grafické znázornění pevnosti vzorků z neupravených C-vláken, teplota 150 °C, čárkovaně je vyznačena pevnost materiálu matrice**

## 7.2. Vlákna neupravená, vyšší teploty, 2. série

Ze závislosti uvedené na Obr. 9 lze pozorovat, že viskozita polymerů klesá s rostoucí teplotou, proto byla teplota lisovacích desek zvýšena. Při poklesu viskozity byl předpoklad zlepšení smáčivosti vláken a tudíž zlepšení mechanických vlastností připraveného kompozitu. Příprava vzorků probíhala identicky jako v předcházejícím případě, odlišností je jiné nastavení teploty na deskách lisu. Pozitivní účinek by mělo mít také prodloužení času předehřevu a lisování. Původním záměrem byla příprava vzorků za teploty 175°C, avšak při

této teplotě desek již začínala doutnat použitá dřevěná izolace vyhřívaných desek, tudíž za této teploty byl vyroben pouze jediný vzorek z materiálu DOW – P. Následně byla zvolena teplota 165 °C, při které izolace nevykazovala známky degradace. Přehled podmínek přípravy vzorků je uveden v Tab. 8.

**Tab. 8 Parametry výroby vzorků z neupravených C-vláken, vyšší teploty**

Označení	Materiál	Teplota desek [°C]	Tlak [MPa]	Čas přehřevu [min]	Čas lisování [min]
2. série	DOW - P	175	0,7	2	5
2. série	DOW 100	165	0,7	4	10
2. série	DOW 300	165	0,7	4	10
2. série	DOW - P	165	0,7	4	10
2. série	RPX	165	0,7	4	10

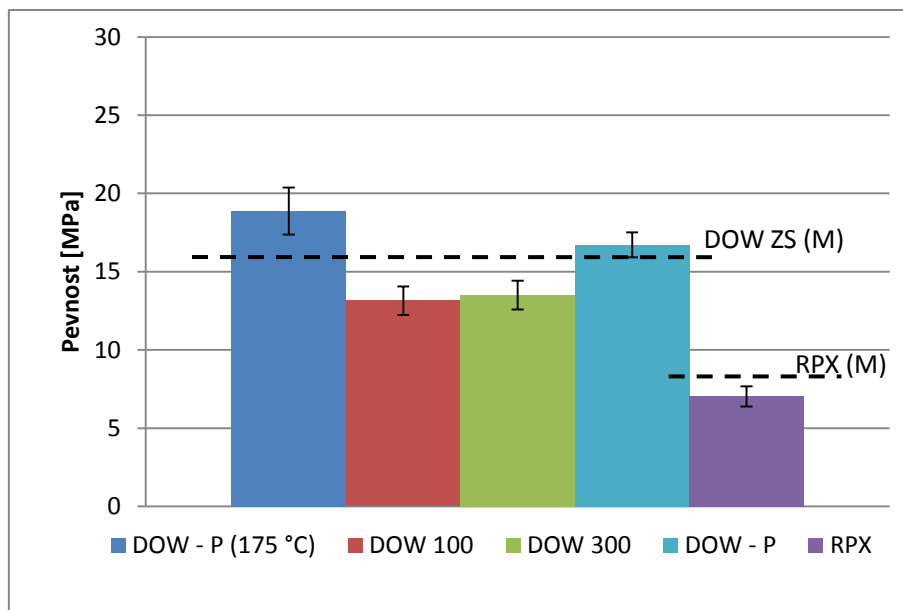
### 7.2.2. Výsledky tahových zkoušek

Výsledky tahových zkoušek, provedených dle podmínek uvedených v Tab. 8, jsou uvedeny v Tab. 9 a graficky znázorněny na Obr. 32. Naměřené hodnoty však nejsou v souladu s očekáváním, pevnost kompozitů s matricí z DOW 100 a 300 je dokonce horší než v předcházející fázi experimentu s nižší teplotou a kratší dobou lisování. Kompozity s matricí DOW – P a RPX vykazují téměř stejné hodnoty pevností jako v předcházející sérii. Jedině u vzorku s matricí DOW – P (který byl nestandardně lisován za teploty 175 °C) bylo pozorováno zlepšení oproti vzorkům ze stejného materiálu při nižších teplotách.

Vysvětlením zhoršení pevnosti během výroby za vyšší teploty a delšího času může být fakt, že výroba vzorků probíhala laboratorním způsobem, vlákna byla ručně míchaná s práškovou matricí. Není zaručeno, že v případě vzorků lisovaných za nižších teplot nebyla výztuž s matricí promísena lépe – rovnoměrněji. Tento fakt a poznatky o špatném prosycení celého průřezu svazku vláken (viz níže) vedlo k navržení dalšího experimentu – použití upravených/čištěných vláken.

**Tab. 9 Pevnosti vzorků z neupravených C-vláken, vyšší teplota**

Označení	Materiál	Pevnost [MPa]	Směr. odchylka [%]
2. série (175 °C)	DOW - P	18,9 ± 1,5	7,9
2. série	DOW 100	13,2 ± 0,9	6,9
2. série	DOW 300	13,5 ± 0,9	6,8
2. série	DOW - P	16,7 ± 0,8	4,8
2. série	RPX	7,0 ± 0,6	9,2



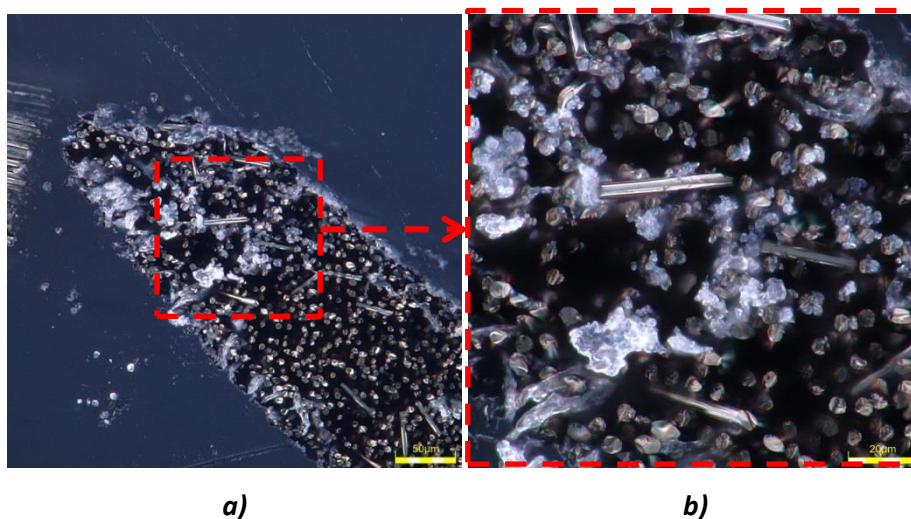
**Obr. 32 Grafické znázornění pevnosti vzorků z neupravených C-vláken, teplota 165 °C (175 °C), čárkovně je vyznačena pevnost materiálu matrice**

### 7.2.3. Mikroskopické pozorování

Pro posouzení prosycenosti a rozložení vláken bylo provedeno pozorování pomocí mikroskopu. Byl použit objektiv se zvětšením 50 x a připravené výbrusy byly pozorovány při světelném režimu MIX.

- **Vzorky z materiálu DOW 100**

Na Obr. 33 lze pozorovat, že prosycení vláken není ideální. V matrici nejsou vlákna rovnoměrně rozptýlena, jsou zde jednotlivé svazky, které nejsou příliš dobře prosyceny polyetylenem. Ve svazku se objevují pouze jednotlivá místa obsahující matrici, viz Obr. 33b.



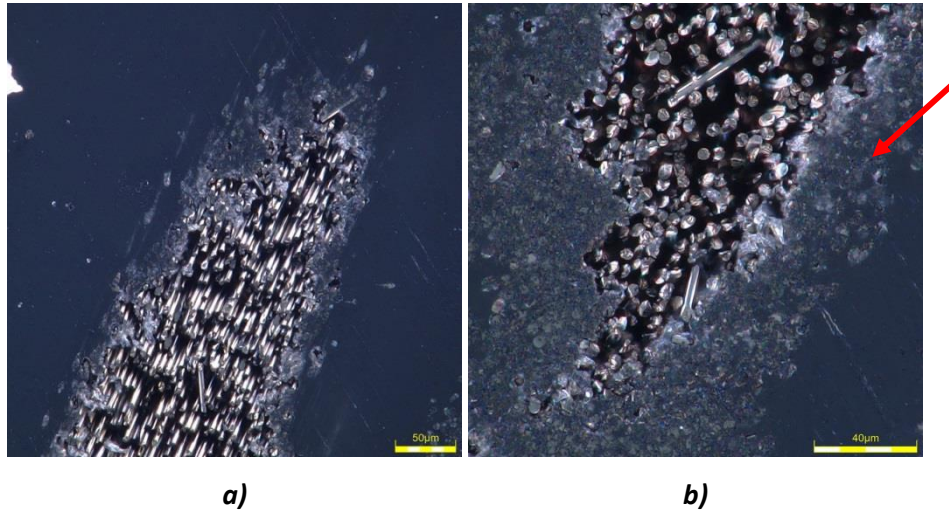
a)

b)

**Obr. 33 Výbrus materiálu DOW 100**

- **Vzorky z materiálu DOW 300**

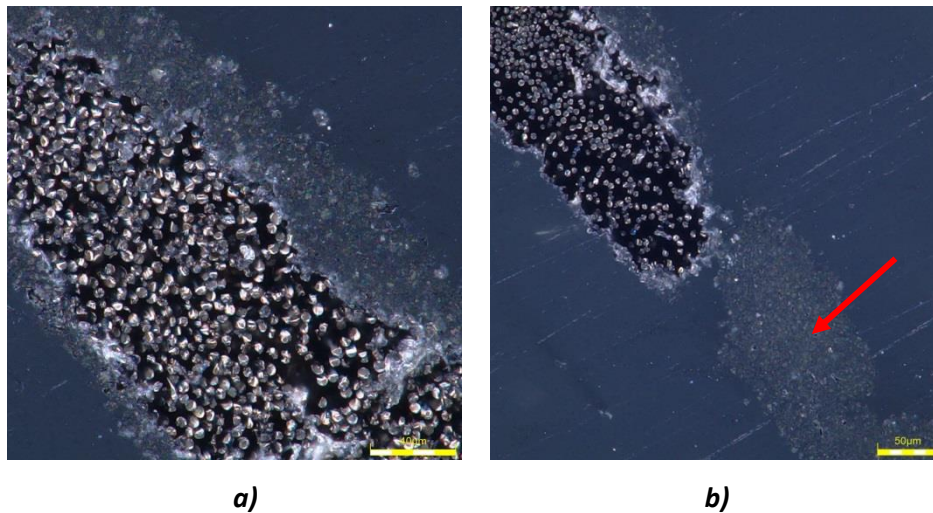
Rozdíl oproti vzorku z materiálu DOW 100 lze pozorovat v menší prosycenosti středu svazku vláken viz Obr. 34, zatímco po okrajích svazku je viditelná dobrá prosycenost, znázorněno šipkou, viz Obr. 34 b).



**Obr. 34 Výbrus materiálu DOW 300**

- **Vzorky z materiálu DOW – P**

Materiál DOW – P také špatně prosycuje vnitřek svazku vláken (Obr. 35a), avšak některé svazky byly zcela prosyceny, viz Obr. 35b.

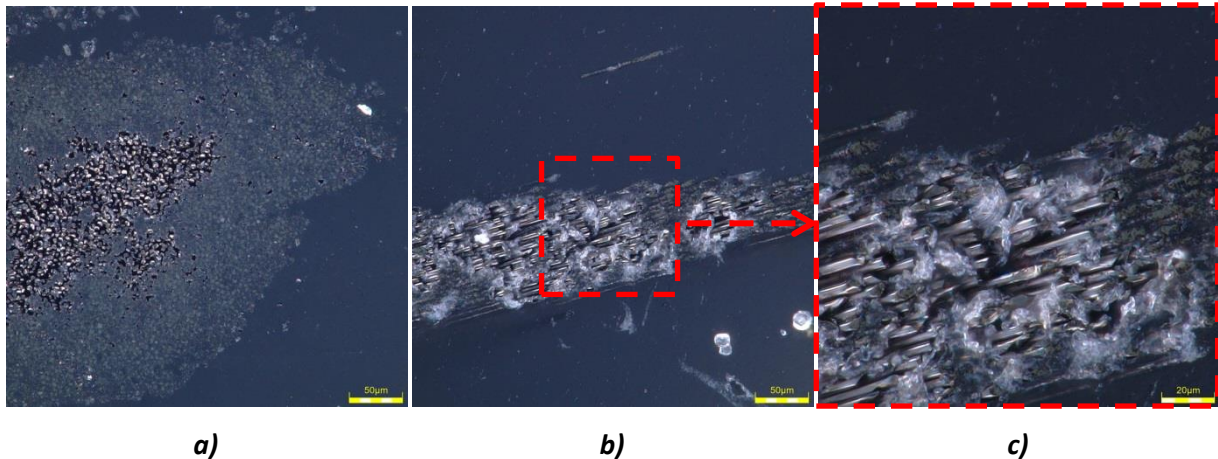


**Obr. 35 Výbrus materiálu DOW – P**



- **Vzorky z materiálu RPX**

Materiál RPX byl shledán jako nejlépe prosycující vlákna uhlíku. Na snímcích (Obr. 36) lze pozorovat velmi dobré prosycení svazku vláken, dutiny se objevují pouze zcela uprostřed svazku.



**Obr. 36 Výbrus materiálu RPX**

### **7.3. Vlákna čištěná, 3. série**

Samotná příprava vzorků probíhala identicky jako v předcházejícím případě, stejné je i nastavení teploty na deskách lisu a času předehřevu a lisování. Odlišností je upravení uhlíkových vláken. Z předcházejícího zkoumání výbrusů vyplynulo, že promísení a prosycení vyztužujících vláken bylo nedostatečné. Jako příčina bylo určeno spojení neupravených vláken do svazků, které se v tavenině plastu samovolně nerozmísí, a tedy neposkytují požadované zpevnění.

Byl navržen další experiment, ve kterém byla uhlíková vlákna nejdříve ultrazvukově vyčištěna v isopropanolové lázni, následně vysušena a ručně rozseparována. Vlákna po vyčištění několikanásobně zvětšila objem. Na následujících fotografiích Obr. 37 lze pozorovat rozdíl mezi neupravenými vlákny a vlákny čištěnými, vždy se jedná o stejné množství vláken tj. 2,5 g (stejně množství, které bylo použito pro výrobu jednoho vzorku).



a)

b)

**Obr. 37** Porovnání uhlíkových vláken, a) upravený stav, b) neupravený stav

V Tab. 10 jsou uvedeny konkrétní parametry výroby vzorků.

**Tab. 10** Parametry výroby vzorků z upravených C-vláken, vyšší teplota

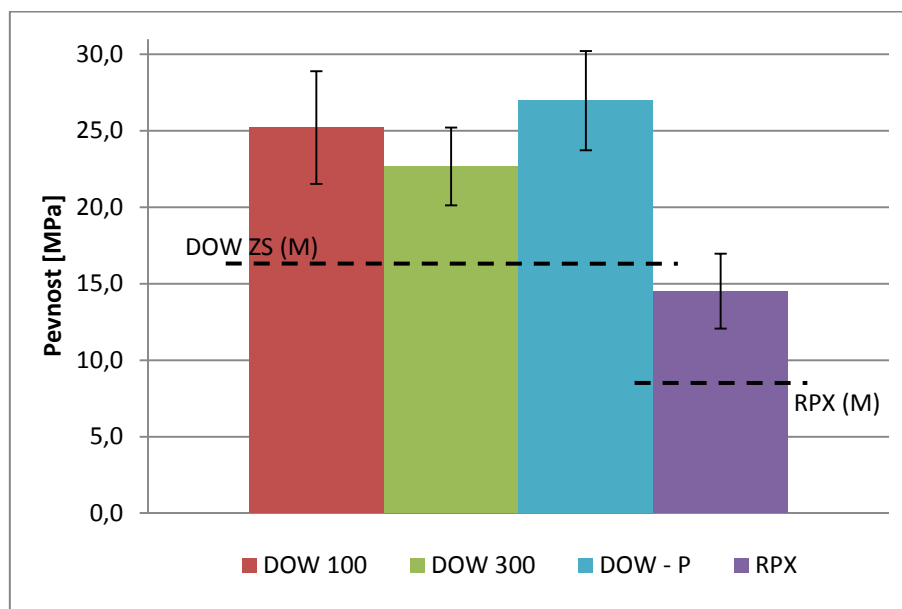
Označení	Materiál	Teplota desek [°C]	Tlak [MPa]	Čas předehřevu [min]	Čas lisování [min]
3. série	DOW 100	165	0,7	4	10
3. série	DOW 300	165	0,7	4	10
3. série	DOW - P	165	0,7	4	10
3. série	RPX	165	0,7	4	10

#### 7.3.4. Výsledky tahových zkoušek

Úprava vláken – vyčištění v ultrazvukové isopropanolové lázni a následná separace, přinesla kýžený efekt. Vlákná byla v kompozitu v případě materiálů DOW – P a DOW 100 rovnoměrně rozprostřena, při užití materiálů DOW 300 a RPX již rozmístění vláken nebylo po laboratorní přípravě zdaleka ideální. Naměřené hodnoty pevností však ukazují znatelné zlepšení u všech materiálů. Nejlepší pevnosti dosáhl kompozit s matricí z plazmovaného PE (DOW – P), zlepšení oproti pevnosti samotné matrice (DOW – ZS) je 68 %. Dobré zlepšení hodnoty pevnosti rovněž dosáhl vzorek z materiálu DOW 100, oproti nevyztuženému vzorku z DOW – ZS byl pevnější o 57 %. Kompletní výsledky pevnostních zkoušek jsou uvedeny v Tab. 11 a jejich grafické znázornění je uvedeno na Obr. 38.

**Tab. 11 Pevnosti vzorků z upravených C-vláken, vyšší teplota**

Označení	Materiál	Pevnost [MPa]	Směr. odchylka [%]
3. série	DOW 100	25,2 ± 3,7	14,6
3. série	DOW 300	22,7 ± 2,5	11,2
3. série	DOW - P	27,0 ± 3,3	12,1
3. série	RPX	14,5 ± 2,4	16,9



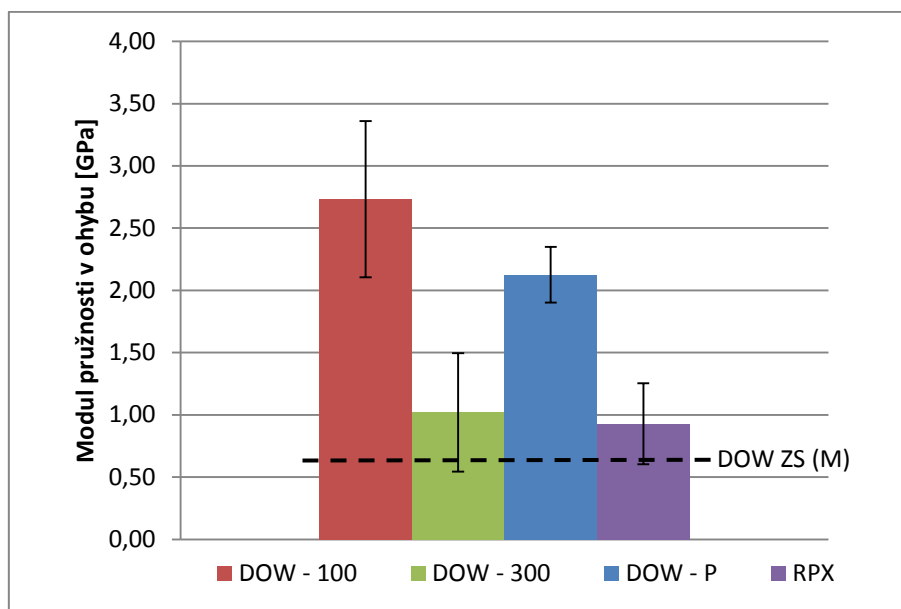
**Obr. 38 Grafické znázornění pevnosti vzorků z upravených C-vláken, vyšší teplota, čárkovaně je vyznačena pevnost materiálu matrice**

### 7.3.5. Výsledky ohybových zkoušek

Nejllepších výsledků při zkouškách elastického modulu pružnosti v ohybu bylo dosaženo při použití materiálu DOW 100 a DOW – P. Zvýšení hodnoty modulu oproti nevyztuženému materiálu DOW – ZS bylo více než čtyřnásobné (DOW 100) a více než trojnásobné (DOW – P). U zbylých dvou materiálů (DOW 300 a RPX) nebylo zvýšení modulu tak výrazné. Také se zde projevila anizotropie připraveného kompozitu daná především špatným promísením vláken a prášku při přípravě. Mezi naměřenými hodnotami modulu byly velké rozdíly, což se odráží v zjištěné směrodatné odchylce. Souhrn naměřených hodnot je uveden v Tab. 12 a jejich grafické znázornění na Obr. 39.

**Tab. 12 Elastický modul ohybu vzorků z upravených C-vláken, vyšší teplota**

Označení	Materiál	Modul [GPa]	Směr. odchylka [%]
3. série	DOW 100	2,73 ± 0,63	23,0
3. série	DOW 300	1,02 ± 0,48	46,6
3. série	DOW - P	2,13 ± 0,22	10,5
3. série	RPX	0,93 ± 0,33	35,0



**Obr. 39 Grafické znázornění elastického modulu v ohybu vzorků z upravených C-vláken, vyšší teplota**

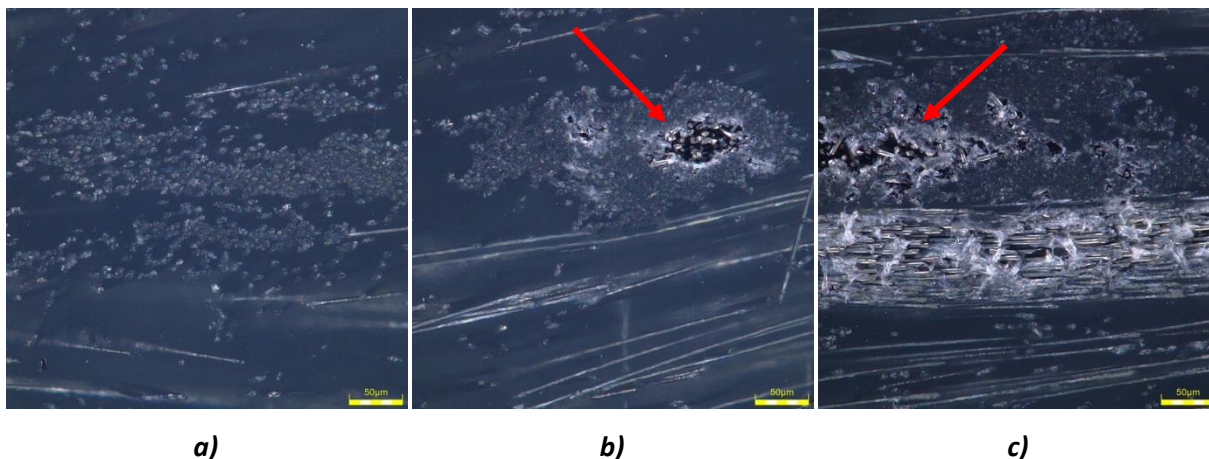
### 7.3.6. Mikroskopické pozorování

Pro posouzení prosycenosti a rozptýlení vláken bylo provedeno pozorování pomocí mikroskopu. Byl použit objektiv se zvětšením 50 x a vybroušené vzorky byly pozorovány při světelném režimu MIX.

Obecně lze říci, že bylo dosaženo daleko lepších výsledků, co se týče rovnoměrného rozprostření a prosycenosti vláken, než v případě předcházející série vzorků s neupravenými (nerozseparovanými) vlákny.

- **Vzorky z materiálu DOW 100**

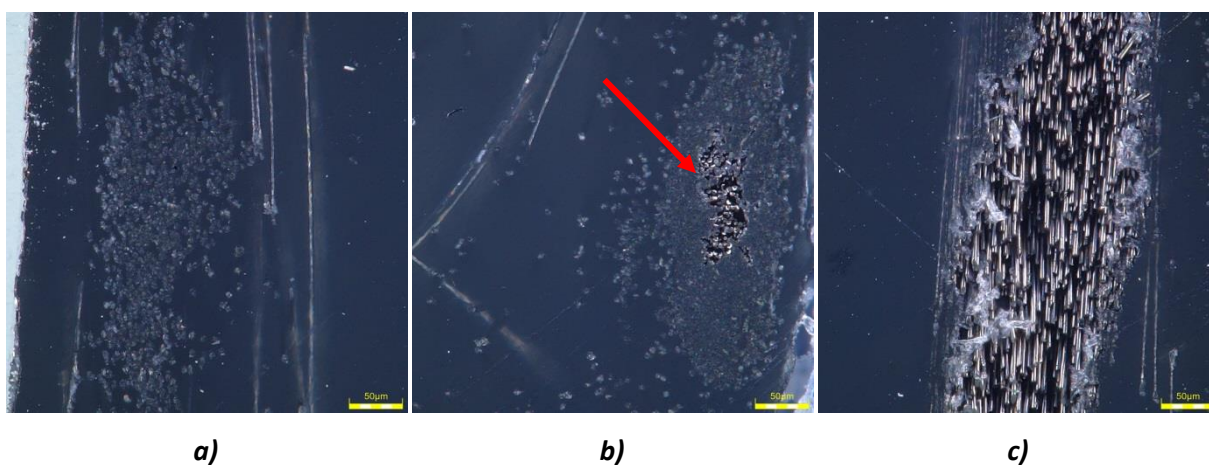
Vzorky z materiálu DOW 100 vykazují dobré rozprostření vláken v objemu a dobrou prosycenost (Obr. 40a), pouze uprostřed širších svazků vláken, které nebyly rozseparovány, jsou pozorovány dutiny (červené šipky na Obr. 40b, c).



**Obr. 40 Snímky výbrusu materiálu DOW 100**

- **Vzorky z materiálu DOW 300**

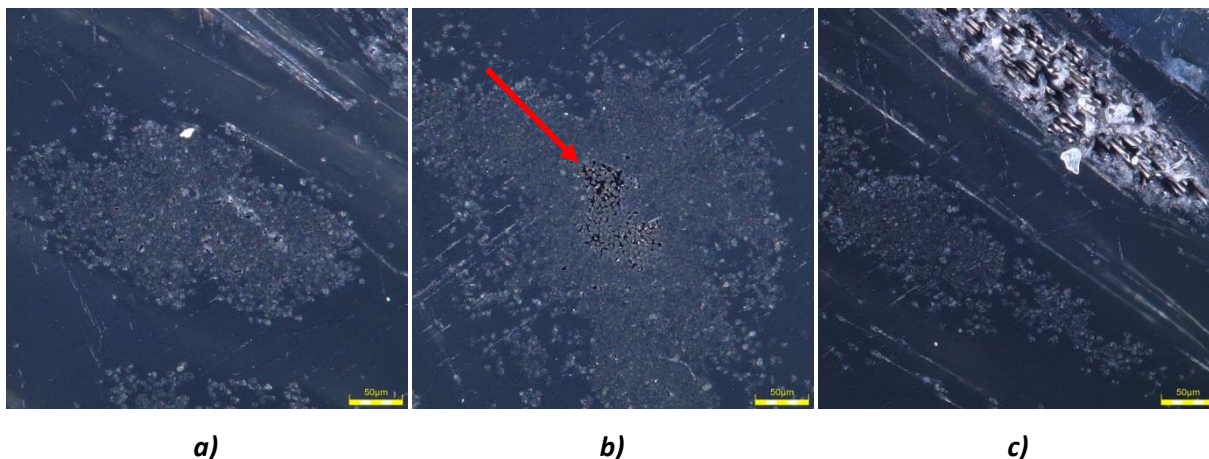
Vzorky z materiálu DOW 300 vykazují podobné vlastnosti, co se týče oblasti prosycenosti vláken (Obr. 41), avšak rozmístění vláken v matrici bylo značně nerovnoměrné. Na snímcích je opět možné pozorovat dutiny (červená šipka na Obr. 41 b).



**Obr. 41 Snímky výbrusu materiálu DOW 300**

- **Vzorky z materiálu DOW – P**

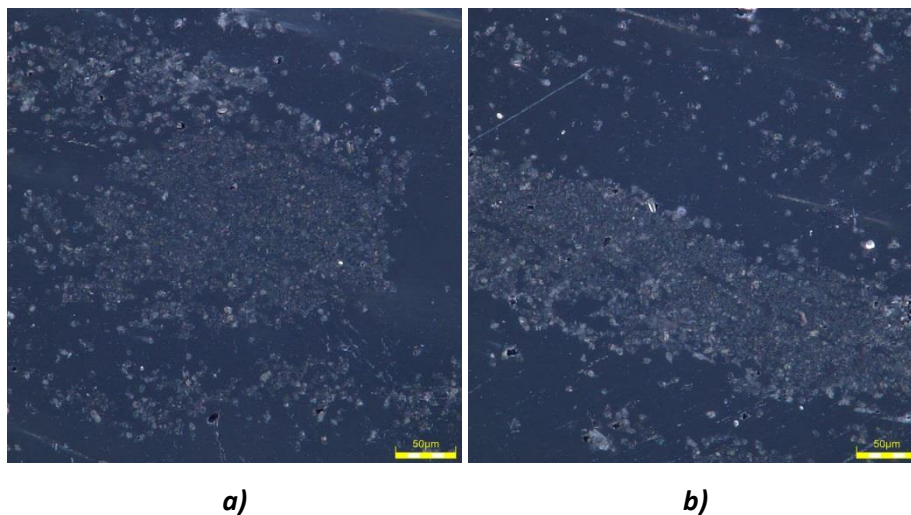
Prosycenost vláken z materiálu DOW – P je opět podobná jako v předcházejících dvou případech viz Obr. 42, bylo však pozorováno nejrovnoměrnější rozmístění vláken. Dutiny jsou ve svazcích vláken stále přítomné, jsou však menších rozměrů (červená šipka na Obr. 42 b).



**Obr. 42 Snímky výbrusu materiálu DOW – P**

- **Vzorky z materiálu RPX**

Prosycenost uhlíkových vláken maticí z materiálu RPX byla ze všech čtyř případů nejlepší, v daném pozorovaném vzorku nebyly pozorovány žádné významné dutiny – tedy neprosycenost vláken maticí, viz Obr. 43. Avšak rozmístění vláken v matici bylo při daném laboratorním způsobu výroby celkově velmi nerovnoměrné.



**Obr. 43 Výbrus materiálu RPX**

## 8. Kompozity s tkaninovou výztuží

Vyrobené vzorky kompozitů s výztuží z čedičové tkaniny typu plátno a s polyetylenovou matricí byly podrobeny mikroskopickému zkoumání prosycenosti svazků vláken matricí. Byly připraveny vzorky s 50 hm. % podílu výztuže s materiály DOW – ZS, RPX a DOW – P, přímo mezi vyhřívanými deskami bez užití silikonové formy. Lisování probíhalo za vysokého tlaku 14,4 MPa a pro porovnání také za tlaku nízkého 0,7 MPa.

Pro zhodnocení funkčnosti prepregů zvolenou metodou byly vytvořeny kompozity o větší tloušťce tak, aby mohly být podrobeny zkoušce tahem a ohybem. Takovéto kompozity byly vytvořeny spečením deseti vrstev daného prepregu v silikonové formě za nízkého tlaku (0,7 MPa).

### 8.1. Prepreg – nízký tlak

Prepregy byly vyráběny přímo mezi deskami lisu bez použití formy. Tkanina dané hmotnosti byla posypána stejným hmotnostním množstvím PE prášku a vložena do kapsy z pečícího papíru a umístěna do lisu, viz Obr. 44. Byl vytvořen kompozit za použití 50 hm. % matrice a 50 hm. % výztuže, což byla čedičová tkanina typu plátno. Konkrétní parametry výroby jsou uvedeny v Tab. 13. Lisování prepregů za nízkého tlaku bylo provedeno pouze z materiálu RPX.



*Obr. 44 Příprava před lisováním prepregu*

**Tab. 13 Parametry výroby prepregu s 50 hm. % výztuže za nízkého tlaku**

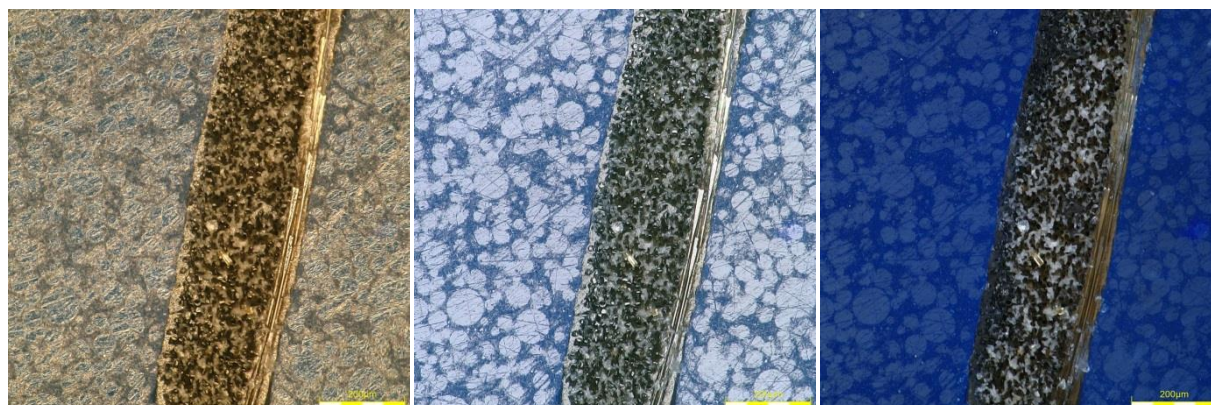
Označení	Materiál	Teplota desek [°C]	Tlak [MPa]	Čas předeřevu [min]	Čas lisování [min]
Nízký tlak	RPX	150	0,7	2	5

### 8.1.1. Mikroskopické pozorování

Pro posouzení prosycenosti a rozptýlení vláken bylo provedeno pozorování pomocí mikroskopu. Byl použit objektiv se zvětšením 20 x a vybroušené vzorky byly pozorovány při světelném režimu DIC, BF či PO. Konkrétní světelný režim byl vždy volen tak, aby na snímku byla co nejlépe zachycena kvalita prosycení.

- **Prepreg z materiálu RPX**

Prosycenost čedičových vláken maticí z materiálu RPX byla pozorována za různých světelných režimu mikroskopu, viz Obr. 45. Zvláště na Obr. 45c je možné pozorovat, že se polyetylenová matrice nevyskytuje mezi všemi vlákny ve svazku.



a)

b)

c)

**Obr. 45 výbrus prepregu z materiálu RPX, a) - režim DIC, b) – režim BF, c) – režim PO**

### 8.2. Prepreg - vysoký tlak

Příprava a výroba prepregů probíhala stejně jako v předcházející kapitole s rozdílem aplikovaného tlaku, který byl v této sérii zkoušení 14,4 MPa. Konkrétní parametry výroby jsou uvedeny v Tab. 14.



**Tab. 14 Parametry výroby prepregů s 50 % výztuže za vysokého tlaku**

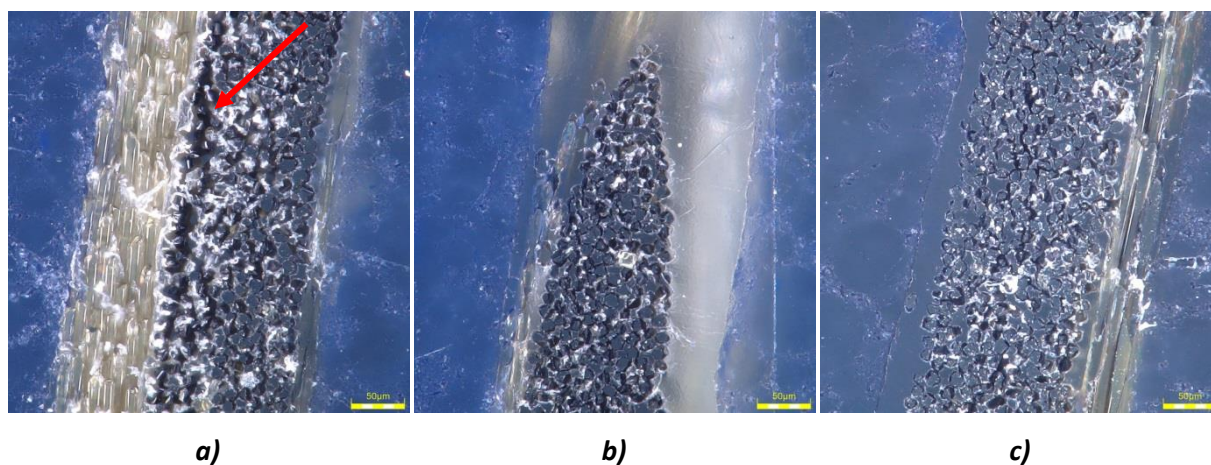
Označení	Materiál	Teplota desek [°C]	Tlak [MPa]	Čas předeřevu [min]	Čas lisování [min]
Vysoký tlak	DOW - ZS	150	14,4	2	5
Vysoký tlak	RPX	150	14,4	2	5
Vysoký tlak	DOW - P	150	14,4	2	5

### 8.2.2. Mikroskopické pozorování

Pro posouzení prosycenosti a rozptýlení vláken bylo provedeno pozorování pomocí mikroskopu. Byl použit objektiv se zvětšením 50 x a vybroušené vzorky byly pozorovány při světelném režimu MIX, BF či PO. Konkrétní světelný režim byl vždy volen tak, aby na snímku mohla být co nejlépe zachycena kvalita prosycení.

- **Prepreg z materiálu DOW ZS**

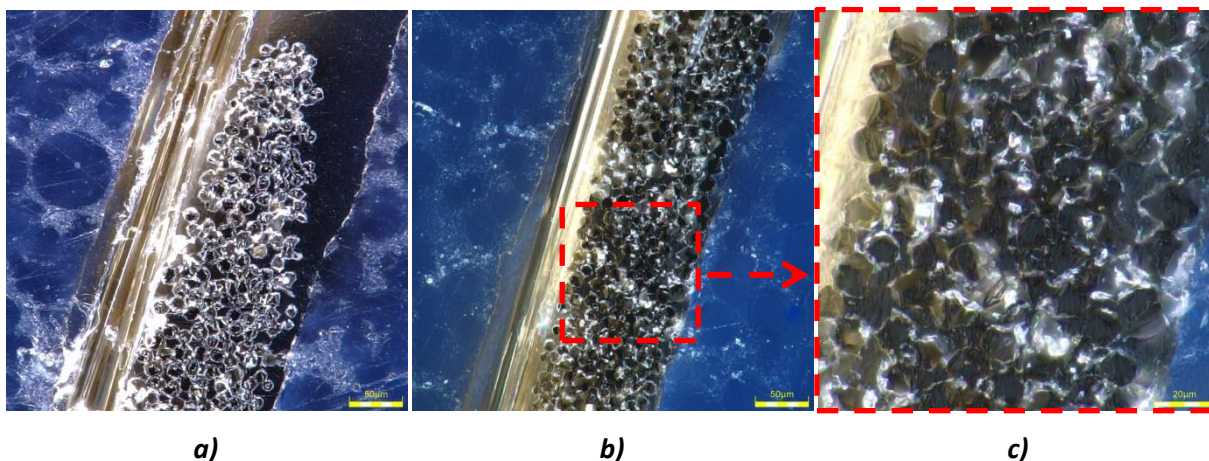
Prosycenost prepregu z materiálu DOW ZS lze pozorovat na snímcích na Obr. 46. Výraznější dutina byla pozorována pouze na snímku Obr. 46 a) – dutina je vyznačena červenou šipkou.



**Obr. 46 Výbrus prepregu z materiálu DOW – ZS, režim MIX**

- **Prepreg z materiálu DOW – P**

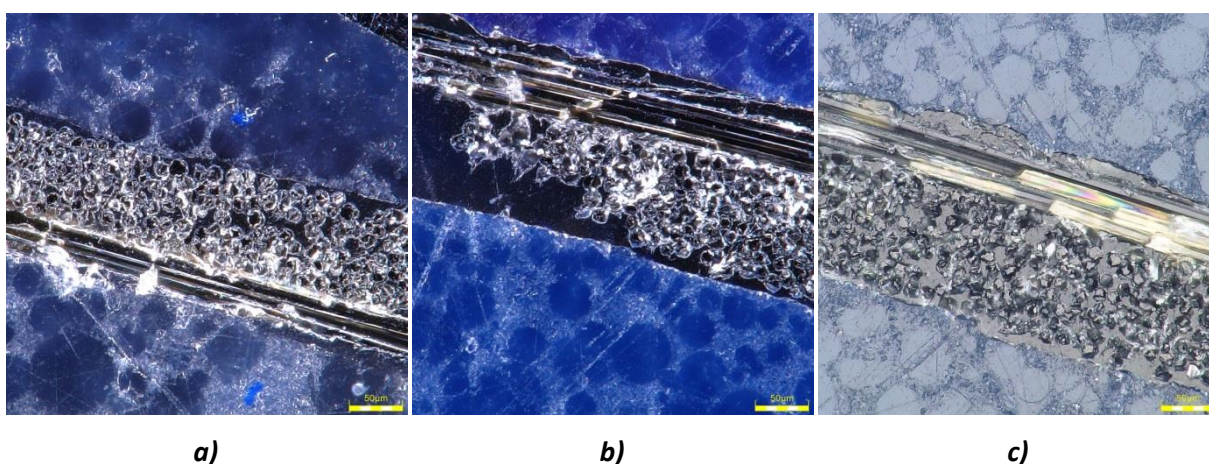
Snímky struktury prepregu z materiálu DOW – P jsou zobrazeny na Obr. 47. Lze pozorovat velmi dobré prosycení, ani zvětšený pohled neodhalí případné vzniklé dutiny - Obr. 47 c).



**Obr. 47** Výbrus prepregu z materiálu DOW – P, a) – režim MIX, b) – režim PO, c) – zvětšen snímek b

- **Prepreg z materiálu RPX**

Struktura prepregu z materiálu RPX je zobrazena na Obr. 48. Lze pozorovat velmi dobré prosycení, stejně tak jako v předcházejícím případě nebyly žádné dutiny nalezeny.



**Obr. 48** Výbrus prepregu z materiálu RPX, a), b) – režim MIX, c) – režim BF

### 8.3. Porovnání kompozitů při lisování nízkým a vysokým tlakem

Experiment byl založen na použití pouze jednoho materiálu – RPX. Byl vybrán pro své vynikající tokové vlastnosti a na základě předcházejícího zkoumání. Byl vyráběn kompozit o tloušťce cca 2 mm tak, aby mohl být podroben nejenom mikroskopickému zkoumání, ale také mechanickým zkouškám – tahové a ohybové. Byly navrženy tři různé způsoby výroby kompozitů. Společným rysem je lisování a spékání vrstev v silikonové formě při tlaku 0,7 MPa a teplotě 150 °C.

První z nich spočívá ve spečení již dříve připravených prepregů za vysokého tlaku (14,4 MPa). Během druhého způsobu byly spečeny prepregy, předem slisované tlakem 0,7 MPa. Třetí variantou výroby kompozitu bylo střídaté navrstvení plátňové tkaniny a polyetylenového prášku. Z důvodu větší souhrnné tloušťky tkaniny a PE v práškovém stavu bylo použito pouze sedm vrstev, na rozdíl od deseti vrstev u variant jedna a dva. Detailní podmínky kompozitů jsou uvedeny v Tab. 15.

Takto navržený experiment by měl ukázat vliv tlaku při lisování na kvalitu výsledného kompozitu.

**Tab. 15 Parametry výroby kompozitů s 50% výztuží**

Označení varianty	Materiál	Teplota desek [°C]	Tlak lisování prepregů [MPa]	Tlak [MPa]	Počet vrstev [ks]	Čas předehřevu [min]	Čas lisování [min]
1	RPX	150	14,4	0,7	10	5	10
2	RPX	150	0,7	0,7	10	5	10
3	RPX	150	-	0,7	7	5	10

### 8.3.3. Výsledky tahových zkoušek

Měření pevnosti kompozitních materiálů vytvořených z několika vrstev prepregů či prášku a tkaniny neproběhlo zcela validně. Při měření se zkoušené vzorky kompozitu vždy porušily v místě upnutí do čelistí, konkrétně se v tomto místě kompozity delaminovaly.

Byla snaha tomuto nežádoucímu jevu zbránit aplikací příložek, což bylo inspirováno [34] a [35]. Příložky, z hliníkového plechu, byly nalepeny na konce jednotlivých vzorků kompozitů lepidlem společnosti 3M typem DP8005. Toto lepidlo bylo vybráno pro své speciální schopnosti lepit jak kovové materiály, tak i plasty s nízkou povrchovou energií. Pro aplikaci slepení polyetylenové matrice a hliníkové příložky tedy mělo být vhodné. Zlepšení však bohužel nenastalo, k porušením kompozitů opět docházelo v místě upnutí – příložky byly odtrženy od kompozitních vzorků.

Údaje uvedené v Tab. 16 vycházejí z prvního měření bez použití příložek. Jedná se o minimální hodnoty pevností kompozitů, které byly zjištěny vydělením maximální dosažené zatěžující síly při zkoušce plochou průřezu daného vzorku. Předpokladem je, že skutečná

pevnosti kompozitů je větší, neboť žádný ze zkoušených vzorků nebyl poškozen v celém svém průřezu, ale pouze v místech upnutí.

**Tab. 16 Hodnoty minimálních pevností kompozitů s 50% výztuží**

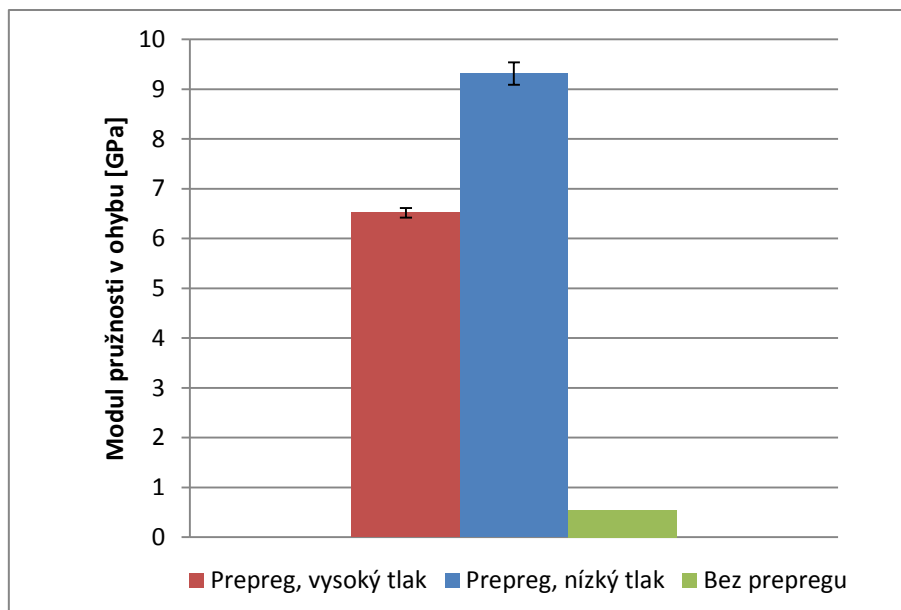
Označení varianty	Tlak lisování prepregů [MPa]	Počet vrstev [ks]	Pevnost [MPa]
1	14,4	10	> 195
2	0,7	10	> 91
3	-	7	> 36

#### 8.3.4. Výsledky ohybových zkoušek

Měření elastického modulu v ohybu v případě kompozitu vytvořeného přímo z vrstev tkaniny a prášku bohužel nebylo příliš úspěšné, důvodem byla malá citlivost měřícího zařízení. To při malých působících silách není schopno poskytovat relevantní data, proto není v Tab. 17 uvedena směrodatná odchylka u tohoto měření. Grafické znázornění vypočtených hodnot je uvedeno na Obr. 49. Nejlepších hodnot modulu dosáhl materiál připravený z prepregů lisovaných za nízkého tlaku, zatímco kompozit lisovaný z prepregů za vysokého tlaku dosáhl velikosti modulu o 30 % menší. Kompozitu lisovaný přímo z vrstev prášku a tkaniny byl naměřen modul o celý jeden řád menší.

**Tab. 17 Hodnoty elastického modulu v ohybu kompozitů s 50% výztuží**

Označení varianty	Tlak lisování prepregů [MPa]	Počet vrstev [ks]	Modul [GPa]	Směr. odchylka [%]
1	14,4	10	6,52 ± 0,09	1,5
2	0,7	10	9,31 ± 0,23	2,4
3	-	7	0,55	-

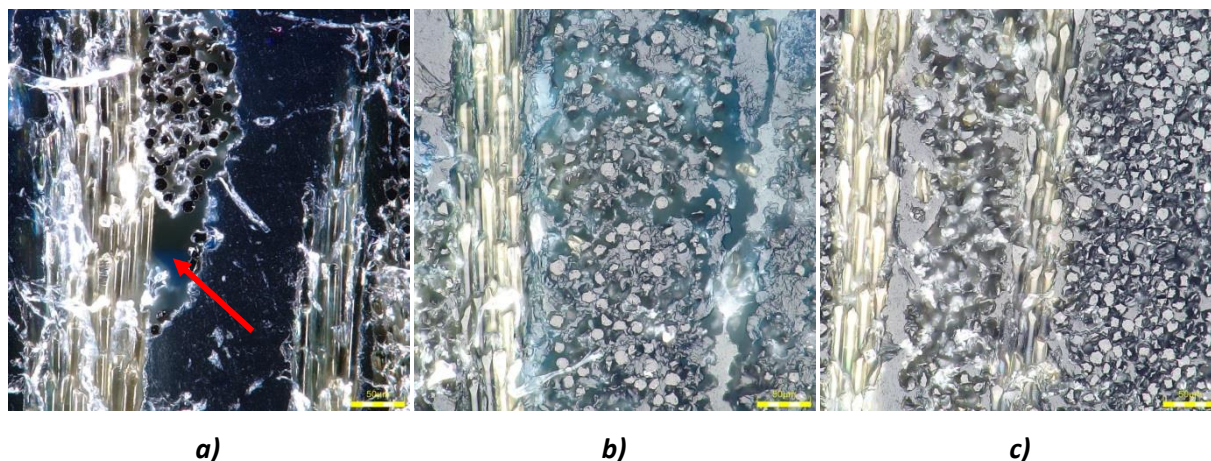


**Obr. 49 Grafické znázornění elastického modulu v ohybu kompozitů s 50% výztuží**

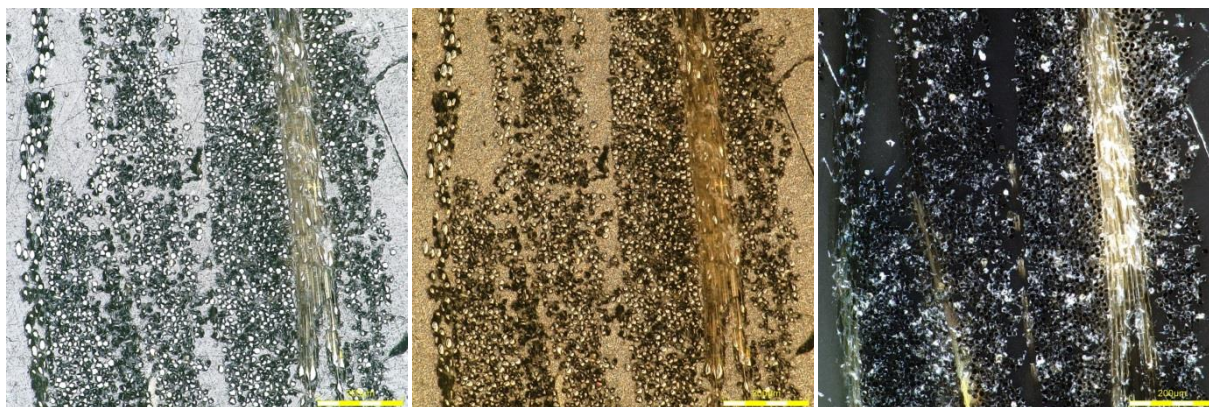
### 8.3.5. Mikroskopické pozorování

- **Kompozit z prepregů lisovaných za vysokého tlaku**

Prosycenost stejně tak jako u prepregů, ze kterých byl kompozit vyráběn, je velmi dobrá. Avšak nejspíše během druhé fáze výroby – slisování jednotlivých prepregů vznikly v prepregu dutiny – jedna z nich je označena červenou šipkou Obr. 50 a). Snímky struktury kompozitu jsou uvedeny na Obr. 50, tyto snímky byly pořízeny pomocí 50 x objektivu, pro lepší představu, jak vypadá celková struktura kompozitu, byly pořízeny fotografie za užití 20 x objektivu Obr. 51.



**Obr. 50 Výbrus kompozitu z prepregů lisovaných za vysokého tlaku, objektiv 50x, a) – režim MIX, b), c) - režim BF**



a)

b)

c)

**Obr. 51 Výbrus kompozitu z prepregů lisovaných za vysokého tlaku, objektiv 20x, a) – režim BF, b) – režim DIC, c) - režim MIX**

- **Kompozit z prepregů lisovaných za nízkého tlaku**

Prosycenost kompozitu vyrobeného slisováním prepregů, které byly lisovány za nízkého tlaku, se dle pozorování mikroskopem na většině míst zdá být podobná jako v předcházejícím případě (Obr. 52 c), ale na několika místech byly objeveny dutiny na Obr. 52 a, b) označeny šipkami.



a)

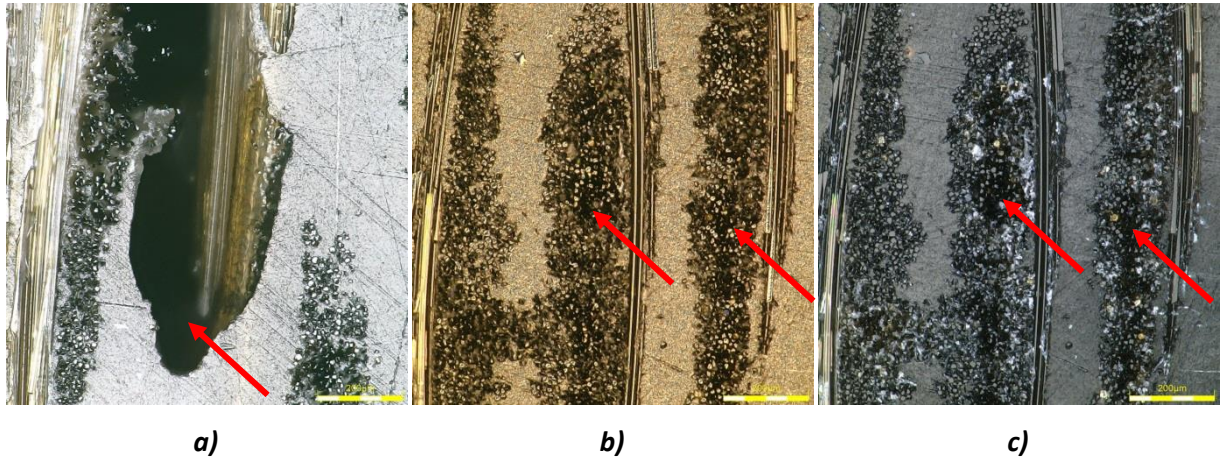
b)

c)

**Obr. 52 Výbrus kompozitu z prepregů lisovaných za nízkého tlaku, objektiv 20x, všechny snímky v režimu BF**

- **Kompozit přímo lisovaný z vrstev tkaniny a RPX prášku**

Prosycení kompozitu připraveného přímo z vrstev tkaniny a matrice ve formě prášku není ideální. Na Obr. 53 a) je možné pozorovat rozsáhlou dutinu – zvýrazněna šipkou, na Obr. 53 b) a c) je zobrazeno to samé místo struktury kompozitu, pro lepší rozlišení prosycenosti bylo provedeno za použití dvou světelných režimů. Dle pozorování autora černá místa ve struktuře znamenají dutiny mezi vlákny, tyto jsou zvýrazněny šipkami.



**Obr. 53** *Struktura kompozitu lisovaného přímo z tkaniny a RPX prášku, a) – režim BF, b) – režim DIC, c) – režim PO*

## 9. Diskuse

Na základě prostudované literatury [16] [3] [33] [27] [22] [18] bylo vysloveno několik hypotéz:

- Se zvyšující se teplotou matrice klesá její viskozita, tudíž při vyšší teplotě by měla být vlákna lépe prosycena/smáčena.
- Za použití vyššího tlaku by se prosycenost/smáčení vláken mělo zlepšit.
- Použití vláken od určité délky by mělo mít zpevňující efekt.
- Materiál s větším parametrem MFR by měl vlákna prosytit lépe.
- Během beztlakého, či nízkotlakového spékání by měla mít vliv velikost částic použitého prášku. Malé částice by měly vlákna smáčet lépe.
- Plazmově upravený prášek by měl vykazovat lepší adhezi k vyztužujícím vláknům.

Dané hypotézy byly ověřovány pomocí experimentů, které lze rozdělit do dvou kategorií: kompozity s výztuží krátkovláknovou a tkaninovou.

### 9.1. Kompozity s krátkovláknovou výztuží

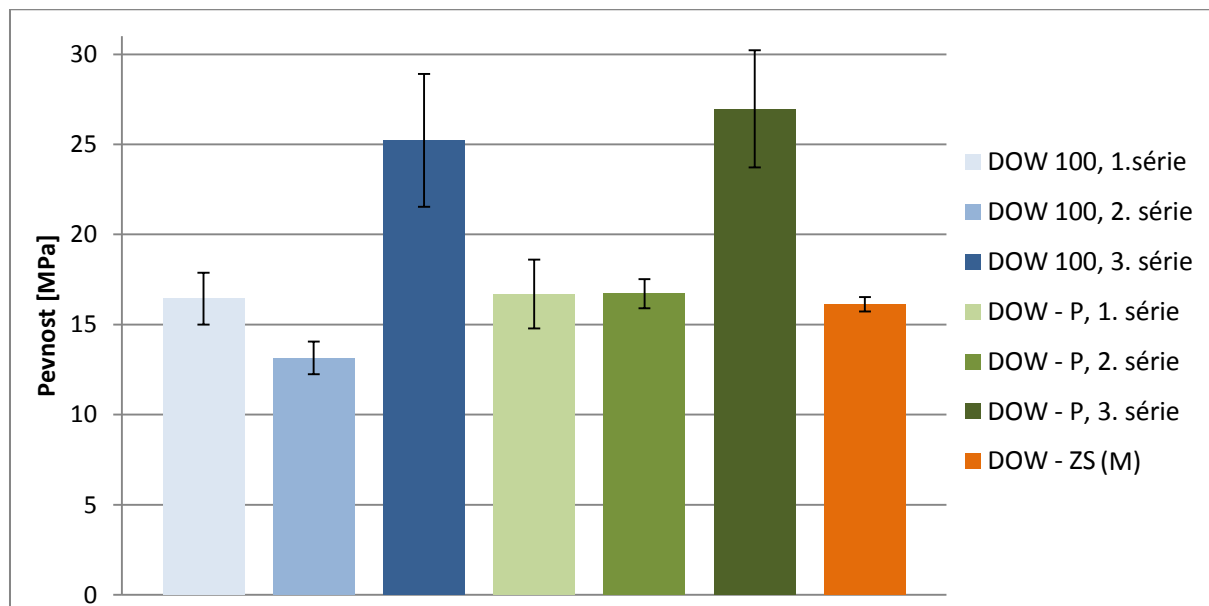
Byla použita krátká uhlíková vlákna pocházející z recyklovaného uhlíkového kompozitu, vlákna byla nasekána na 6 mm a jejich průměr byl 7  $\mu\text{m}$ . Aspektivní poměr těchto vláken je 860, což převyšuje udávanou hranici zpevnění, která je 10. Během výroby a testování prvních dvou sérií, kdy byla použita vlákna v neupraveném stavu, však zlepšení mechanických vlastností nebylo pozorováno u žádného ze čtyř různých druhů materiálů matrice. Během přípravy vzorků třetí série byla proto vlákna nejdříve vyčištěna v izopropanolové ultrazvukové lázni a následně usušena a ručně od sebe oddělována, několikanásobně se zvětšil jejich objem a především došlo k rozseparování svazků vláken na menší svazky případně na jednotlivá vlákna.

Při přípravě kompozitů před lisováním bylo pozorováno výrazně lepší mísení vláken a prášku než v případě dvou předcházejících sérií. Lépe proběhlo smísení těchto dvou fází v případě materiálů DOW – P a DOW 100. Toto dobré promísení před samotným lisováním se ukázalo jako klíčové pro výslednou kvalitu lisovaného kompozitu. V případě připravených kompozitů z materiálů DOW – P a DOW 100 došlo k významnému zlepšení mechanických vlastností



(jak pevnosti v tahu, tak elastického modulu v ohybu), zatímco v případě materiálů DOW 300 a RPX nebylo mísení vláken a prášku před lisováním tak efektivní a po výrobě kompozitních vzorků bylo možné bezprostředně pozorovat značně nerovnoměrné rozmístění vláken v matrici. Dle autorova názoru především toto nerovnoměrné rozmístění vedlo k ne tak výraznému zlepšení oproti předcházejícím sériím či vzorkům z matricového materiálu samotného. Použití materiálu RPX, polyetylenu s velmi vysokým MFR, přineslo dle mikroskopického zkoumání nejlepší prosycenost vláken. Problémy s nerovnoměrným rozmístěním vláken, ale tuto výhodu potlačily.

Porovnání pevností všech tří sérií vytvořených vzorků kompozitních materiálů s matricí z materiálu DOW 100 a DOW – P a vzorku ze samotného materiálu DOW – ZS je provedeno na Obr. 54. Je možné pozorovat, že pevnost série jedna a dvě se pohybuje okolo 16 MPa, což je identická hodnota jako samotného materiálu DOW – ZS. Ke zpevnění vlákny tedy v tomto případě vůbec nedochází. Zatímco v případě série tři, kdy byla vlákna upravena, dochází k nárůstu pevnosti kompozitů až přes hodnotu 25 MPa. Zpevnění matrice danými vlákny je více než 56 %.

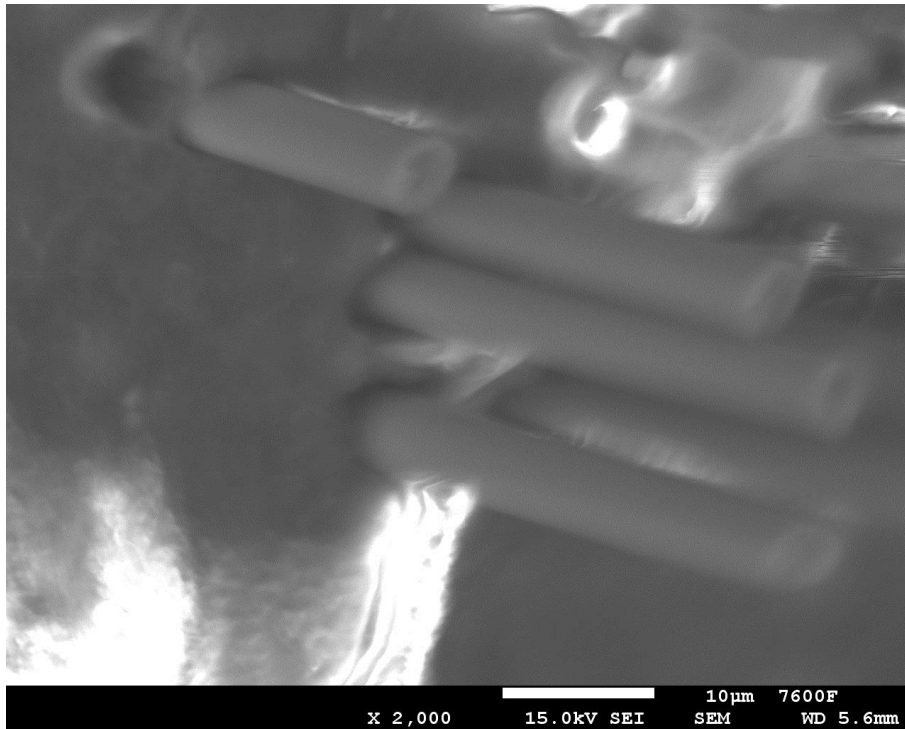


**Obr. 54 Porovnání pevností všech tří sérií kompozitů z materiálů DOW 100 a DOW – P s pevností vzorku vyrobeného pouze z matricového materiálu DOW –ZS (M)**

Zkouškou třibodového ohybu vzorků bylo zjištěno, že elastický modulu v ohybu samotného materiálu matrice (DOW – ZS) oproti modulu kompozitů třetí série s matricí z materiálů DOW 100 a DOW – P je menší více než čtyřnásobně (DOW 100) a více než trojnásobně (DOW – P).

Použití matricového materiálu s malými částicemi (DOW 100) a plazmovaného (DOW – P) přineslo výrazně lepší hodnoty elastického modulu v ohybu než při použití materiálů s velkými částicemi (DOW 300) či s vysokým indexem toku taveniny (RPX), jak je možné pozorovat na Obr. 39. Zatímco hodnoty pevností vyzkoušených vzorků neukazují na výhodnost použití menších částic matricového materiálu. Pevnost vzorků z materiálu DOW 300 byla velmi podobná jako u materiálů DOW 100 i DOW – P viz Obr. 38. Hypotéza, o zlepšení adheze mezi vlákny a matricí při použití malých částic či plazmování matricového materiálu, se tedy potvrdila jen z části. Zároveň je otázkou, zda pozitivní vliv použití malých či plazmovaných částic na výsledné mechanické vlastnosti má zlepšení adheze (mezi vlákny a matricí), či schopnost lepšího/rovnoměrnějšího promísení obou směsí před samotnou výrobou kompozitu.

Odpovědí na tuto otázku by mohlo být pozorování chování rozhraní vláken a matrice při křehkém lomu. Tento experiment byl autorem také připraven, avšak kvůli nedobrému stavu elektronovému mikroskopu na pracovišti UMI nebylo možné pozorování provést. Podařilo se pouze pořídit jeden snímek křehké lomové plochy vzorku z materiálu DOW – P ze třetí série. Byla předpokládána dobrá adheze mezi vlákny a matricí, avšak jak je možné pozorovat na ne příliš kvalitním Obr. 55, tato adheze na snímku není pozorovatelná.

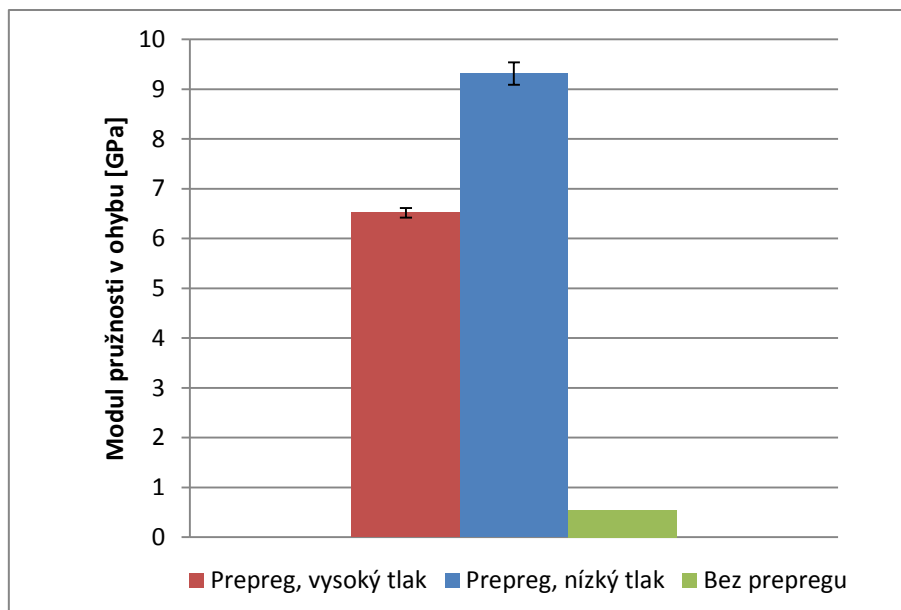


*Obr. 55 Rozhraní uhlíkových vláken a matrice (DOW - P), vzorek třetí série*

## 9.2. Kompozity s tkaninovou výztuží

Jako výztuž kompozitů byla použita čedičová tkanina typu plátno. Byly vyrobeny vzorky kompozitních materiálů třemi různými způsoby: první – lisováním prepregů, které byly před tím slisovány za vysokého tlaku (14,4 MPa), druhý – lisováním prepregů, které byly před tím slisovány za nízkého tlaku (0,7 MPa) a třetím – lisováním přímo vrstev tkaniny a práškového materiálu matrice.

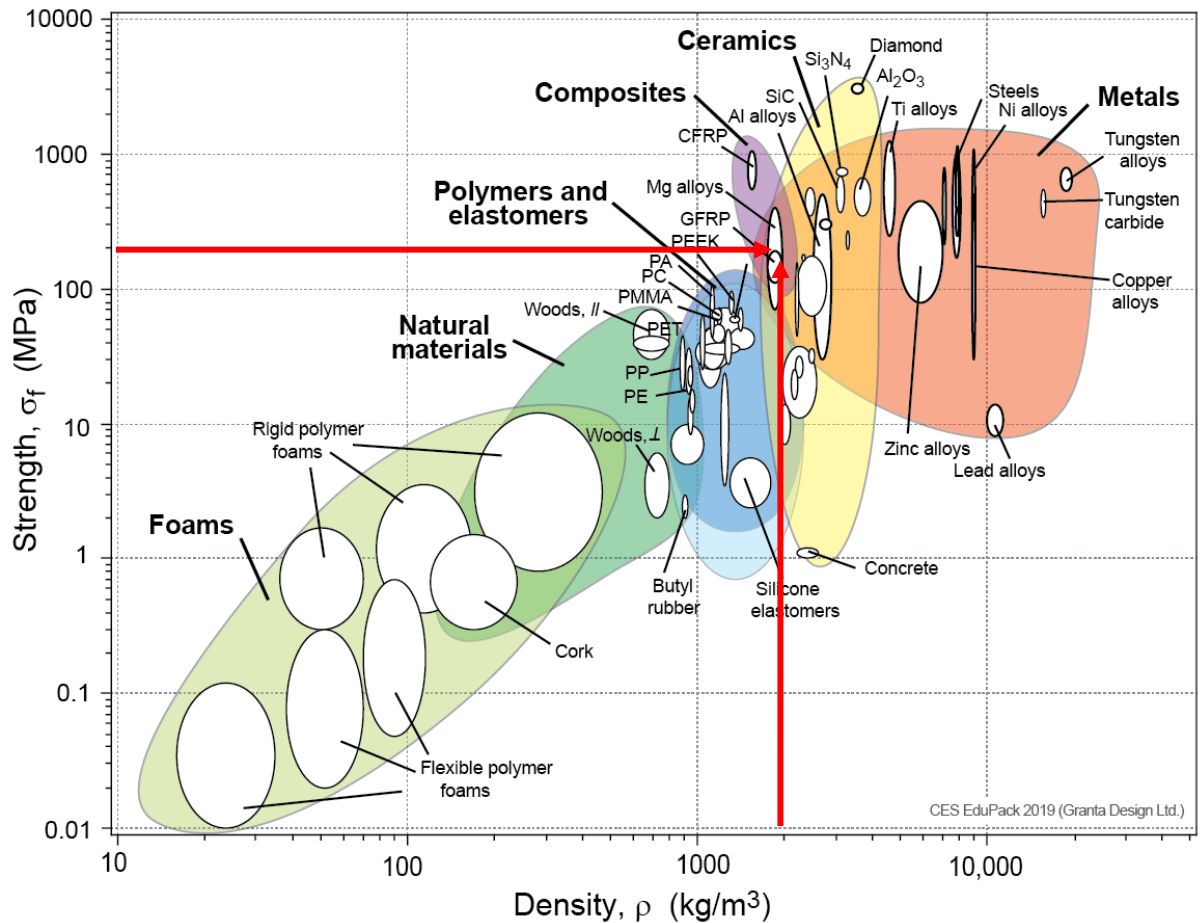
Na Obr. 56 lze pozorovat porovnání dosažených hodnot elastického modulu v ohybu těchto tří různých kompozitních materiálů. Z výsledků je zřejmé, že lisováním kompozitu přímo z vrstev tkaniny a prášku nepřináší uspokojivé výsledky, naopak dvoufázovým lisováním (nejdříve prepregů a poté finálního kompozitu) lze dosáhnout velmi zajímavých hodnot elastického modulu v ohybu. Zajímavým výsledkem provedených experimentů je skutečnost, že lepších hodnot elastického modulu dosáhl kompozit lisovaný z prepregů připravených za nízkého tlaku. Tento fakt a mikroskopická pozorování neodpovídají teorii, že s rostoucím tlakem se zlepšuje prosycenost vláken (kvalita prosycení je pro mechanické vlastnosti rozhodující).



**Obr. 56 Porovnání elastických modulů v ohybu vzorků kompozitu s tkaninovou výztuží**

Zatímco výsledky měření ohybových zkoušek vyznívají lépe pro nízkotlakový prepreg tak naměřené hodnoty pevností v tahu ukazují, že lepších hodnot bylo dosaženo s kompozitem z vysokotlakých prepregů. Získané hodnoty pevností 195 MPa (vysokotlaký prepreg), 91 MPa (nízkotlaký prepreg) a 36 MPa (bez prepregu) jsou však pouze orientační. Během zkoušky došlo k porušení soudržnosti vrstev kompozitu v místech uchycení čelistmi.

Případné budoucí potvrzení dosažených pevností v oblasti kolem 200 MPa je pro takovýto kompozit velmi slibným výsledkem při uvažování měrné pevnosti v závislosti na hustotě by takovýto kompozitní materiál byl na úrovni velmi kvalitní ocele (měrná pevnost okolo  $10 \text{ Nm.g}^{-1}$ ) zvláště, uvažujeme-li cenovou náročnost surovin potřebných k výrobě takového kompozitu: low-end mezi plasty – polyetylen a také velmi výhodnou čedičovou tkaninu. Na Obr. 57 je uvedeno srovnání s celou škálou dostupných materiálů a je možné pozorovat, že vyrobený kompozit spadá do vyznačené oblasti pro kompozity, konkrétně těsně nad oblast GFRP – kompozitů vyztuženými skleněnými vlákny.



Obr. 57 Ashby diagram uvádějící závislost pevnosti na hustotě různých materiálů, převzato z [36], šipkami vyznačeno místo, do kterého spadá experimentálně připravený kompozit

## 10. Závěr

V experimentální části byla řešena příprava, výroba a testování dvou typů kompozitních materiálů. Prvním byly kompozity s krátkými vlákny z uhlíku, která pocházejí z recyklace. Jedná se o prvotní výzkum znovupoužití vláken, které by z ekologického hlediska bylo velmi přínosné. Byly zkoušeny různé technologické parametry výroby za použití čtyř odlišných typů polyetylenové matrice. Nejdůležitější poznatky získané z mikroskopického pozorování a výsledků mechanických zkoušek jsou shrnuty v následujících bodech:

- Zásadním faktorem pro výslednou kvalitu kompozitu s krátkými vlákny je jejich předúprava, neupravená uhlíková vlákna pocházející z recyklace zůstávala ve svazcích a neposkytovala materiálu požadované zpevnění.
- Upravená vlákna – čištěná v isopropanolu a ručně rozseparovaná přinesla při obsahu 12 hm. % zlepšení pevnosti o více jak 56 % a navýšení elastického modulu v ohybu až o 300 % oproti vzorku vyrobeného pouze z materiálu matrice.
- Nejlepších výsledků bylo dosaženo při užití materiálu matrice plazmově upraveného (DOW – P) či jemno-částicového (DOW 100) pravděpodobně z důvodu nejlepšího promísení vláken a prášku při přípravě vzorků.
- Prosycení svazků vláken bylo pozorováno jako nejlepší při užití materiálu matrice s vysokou hodnotou indexu toku taveniny – materiál RPX.

Druhým typem materiálu byl kompozit vyztužený čedičovou tkaninou, tato přináší zajímavou alternativu k zavedeným materiálům používaným pro vyztuž. Jedná se o přírodní materiál s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a zároveň příznivou cenou. Nejdůležitější poznatky během mikroskopického pozorování a výsledků mechanických zkoušek jsou shrnuty v následujících bodech:

- Nelze jednoznačně říci, zda jsou lepší kompozity připravené z prepregů za nízkého či vysokého tlaku, protože:
  - Kompozitům připravených z prepregů za nízkého tlaku byla naměřena pevnost nižší než kompozitům z prepregů za vysokého tlaku.

- U kompozitů připravených z prepregů za nízkého tlaku byl naměřen elastický modul v ohybu vyšší než kompozitům z prepregů za vysokého tlaku (9,31 vs. 6,52 GPa).
- Prosycenost svazků vláken se zdá být dle provedeného mikroskopického pozorování nejlepší u prepregů lisovaných za vysokého tlaku (14,4 MPa) s matricí z polyethylenu s vysokým indexem toku taveniny – materiálem RPX.

Cíle diplomové práce byly splněny.

## 12. Bibliografie

- [1] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1988.
- [2] GERDEEN, James C., Harold W. LORD a Ronald A. L. RORRER. *Engineering design with polymers and composites*. Boca Raton: Taylor and Francis, 2006. Materials engineering (Marcel Dekker, Inc.), 30. ISBN 08-247-2379-1.
- [3] CHAWLA, Krishan K. *Composites Materials: Science and Engineering*. Third. London: Springer, 2012. ISBN 978-0-387-74364-6.
- [4] MEISSNER, B. a V. ZILVAR. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. První. Bratislava: SNTL, 1987.
- [5] RAGAERT, K., L. DELVA a K. V. GREEM. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Elsevier* [online]. 2017. b.r., **2017**(69), 24-58 [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- [6] LOYDA, Miloslav. *Svařování termoplastů*. 2., dopl. a rozš. vyd. Praha: UNO Praha, 2011. ISBN 978-80-904949-0-9.
- [7] ERHARD, Gunter, Martin THOMPSON. *Designing with Plastics*. 1st. München, Germany: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 1-56990-386-7.
- [8] REMMERS, Joris a Varvara KOUZNETSOVA. *Composite and Light-Weight Materials: Design and Analysis (4MM00): Lecture 1: Introduction*. Eindhoven University of Technology, 2018.
- [9] Technické textilie. *Veba.cz* [online]. BROUMOV, b.r. [cit. 2019-09-29]. Dostupné z: <http://www.veba.cz/cs/technicky-textil>
- [10] *ECC: Fabric for composites* [online]. Heek, Germany, b.r. [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://www.ecc-fabrics.com/>



- [11] ŠKRINIAROVÁ, Nina. *Mechanická odezva dlouhými vlákny vyztuženého polymerního kompozitu*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [12] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [13] JENÍK, Filip. *Studium vlivu úpravy povrchu na kvalitu spoje kov-plast*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT.
- [14] HOLZMÜLLER, W. a K. ALTENBURG. *Fyzika polymerů*. První. Praha: SNTL, 1966.
- [15] GUARINO, V. a M. MARRESE. *Chemical and Physical Properties of Polymers for Biomedical Use: Advanced Polymers in Medicine*. Springer, Cham, 2015. ISBN 978-3-319-12478-0.
- [16] RAO, Natti S. *Basic polymer engineering data*. München, Germany: Hanser Publications, 2017. ISBN 978-1-56-990-649-1.
- [17] MELT FLOW INDEX. *Polymer Science* [online]. 2015 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Melt%20Flow.html>
- [18] NGO, S. I., Y. LIM, M-H. HAHN a J. JUNG. Prediction of degree of impregnation in thermoplastic unidirectional carbon fiber prepreg by multi-scale computational fluid dynamics. *Elsevier* [online]. 2018, (185), 64-75 [cit. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.04.010>
- [19] KOŘÍNEK, Zdeněk. Technologie. *Kompozity* [online]. b.r. [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: [https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI\\_vSI9DY3VYV0JUeIU/view](https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI_vSI9DY3VYV0JUeIU/view)
- [20] NESTLER, D., M. TRAUTMANN, C. ZOPP, J. TRÖLTZSCH, T. OSIECKI, S. NENDEL, G. WAGNER a L. KROLL. Continuous Film Stacking and Thermoforming Process for Hybrid CFRP/aluminum Laminates. *Elsevier* [online]. 2017. 2017, **2017**(66), 107-112 [cit. 2019-10-13]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117304043>

- [21] ASHRAF, Ali. Application & manufacturing process of polymer matrix composites. *SlideShare* [online]. b.r. [cit. 2019-12-31]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/AshrafAli173/application-amp-manufacturing-process-of-polymer-matrix-composites>
- [22] GUZMAN-MALDONADO, E., N. HAMILA, N. NAOUAR, G. MOULIN a P. BOISSE. Simulation of thermoplastic prepreg thermoforming based on a visco-hyperelastic model and a thermal homogenization. *Elsevier* [online]. 2016. 2016, **2016**(93), 431-442 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.166>
- [23] TORAY: *Toray Advanced Composites* [online]. Netherlands, b.r. [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://www.toraytac.com/>
- [24] XELIS [online]. Germany, b.r. [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://www.xelis.de/home.html>
- [25] *Vector Systems* [online]. USA, 2019 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <http://www.vectorams.com/>
- [26] *Lingol Corp.: Thermoplastic and Thermoset Composite Materials* [online]. USA, 2019 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://lingolcorp.com/>
- [27] SHIN, J. H., D. KIM, T. CENTEA a S. NUTT. Thermoplastic prepreg with partially polymerized matrix: Material and process development for efficient part manufacturing. *Elsevier* [online]. 2019. 2019, **2019**(119), 154-164 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.01.009>
- [28] KIM, S. Y., T-W. LIM, N. R. SOTTOS a S. R. WHITE. *Manufacture of carbon-fiber prepreg with thermoplastic/epoxy resin blends and microencapsulated solvent healing agents* [online]. 2019. Elsevier, 2019, **2019**(121), 365-375 [cit. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.03.033>
- [29] LA 400 -Laboratorní zařízení pro plazmové povrchové úpravy. *SurfaceTreat* [online]. Turnov, 2017 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://surfacetreat.cz/cs/la400-laboratorni-zarizeni-pro-plazmove-povrchove-upravy/>

- [30] ČSN EN ISO 11357-1. *Plasty-Diferenční snímací kalorimetrie (DSC) - Část 1: Základní principy*. ÚNMZ, 2010.
- [31] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. ÚNMZ, 2012.
- [32] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. ÚNMZ, 2019.
- [33] NOVÁČEK, Vojtěch. *Aplikace plasmové úpravy pro vláknové kompozity s termoplastovou maticí*. Praha, 2018. Disertační práce. ČVUT.
- [34] ČSN EN 2561. *Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken*. Český normalizační institut, 1997.
- [35] ČSN EN 2747. *Letectví a kosmonautika - Sklem vyztužené platy - Zkouška tahem*. Český normalizační institut, 1999.
- [36] *Granta Design* [online]. In: . United Kingdom: Granta Design Limited, 2019 [cit. 2019-12-23].

### **13. Seznam příloh**

Příloha č. 1 Materiálový list RPX 1001 NATURAL (LD/70/600μ)

Příloha č. 2 Materiálový list DOWLEX 2629.10UE

Příloha č. 3 UHLÍKOVÁ VLÁKNA C