

# **Studium polymerních kompozitních systémů s kovovými plnivy**

Bc. Martin Vaculík

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2012/2013

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Vaculík**  
Osobní číslo: **T11040**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Studium polymerních kompozitních systémů s kovovými plnivý**

Zásady pro vypracování:

## I. Teoretická část

1. Polymerní kompozitní systémy, rozdělení, vlastnosti a definice.
2. Plněné kompozitní materiály a jejich význam.
3. Přehled plniv v kompozitních materiálech, vlastnosti a jejich vliv na vlastnosti polymerních systémů.

## II. Experimentální část

4. Navrhněte složení polymerních kompozitních systémů s kovovými plnivý.
5. Výroba zkušebních těles. Popište způsoby výroby zkušebních těles.
6. Experimentální studium vlivu plniv na zvolené mechanické vlastnosti.
7. Porovnání dosažených výsledků, vyhodnocení a doporučení pro technickou praxi.
8. Formulace závěru.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Vyd. 1. Praha, Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.

[2] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s.

[3] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 325 s, 1988.

[4] DAĐOUREK, K. Kompozitní materiály – druhy a jejich užití. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.

[5] Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství


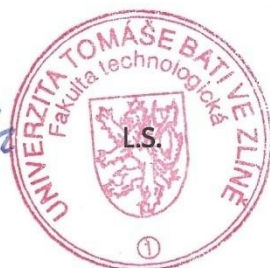
Datum zadání diplomové práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 7.5.2013

  
.....

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

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

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

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

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

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

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na studii polymerních kompozitních systémů s kovovými plnivými. Jedná se o přidávání kovového prášku do matrice a porovnávání vlastností polymerních kompozitů. Teoretická část popisuje materiály používané pro polymerní kompozitní systémy a výrobní postupy. Praktická část je zaměřena na aplikaci kovového prášku do matrice v různém množství a jeho vlivu na mechanické vlastnosti polymerního kompozitu.

Klíčová slova: polymerní kompozit, kovový prášek, železo, bronz, měď, mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on the study of polymer composite systems with metallic fillers. It is to add metal powder into the matrix and comparing the properties of polymer composites. The theoretical part describes the materials used for polymer composite systems and production processes. The practical part is focused on the application of metal matrix powder in varying amounts and its effect on the mechanical properties of the polymer composite.

Keywords: polymer composites, metal powder, iron, bronze, copper, mechanical properties

Rád bych touto cestou poděkoval paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D., vedoucí mé diplomové práce, za odborné vedení, rady, připomínky a čas, který mi věnovala. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Milanu Žaludkovi za pomoc a ochotu při testování zkušebních vzorků. Děkuji i panu Ing. Ladislavu Fojtlovi za příležitostné konzultace.

*„Chci být šťastným. Avšak člověku nelze být šťastným,  
žije-li mezi nešťastnými, jako nelze zůstat trvale zdravým mezi nezdravými.  
Mým cílem tedy je, aby bylo na světě více šťastných lidí.“*

*(Tomáš Baťa)*

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POLYMERNÍ KOMPOZIT</b> .....	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ .....	11
1.1.1 Termoplasty.....	11
1.1.2 Reaktoplasty.....	12
1.1.3 Rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty .....	12
<b>2 SLOŽENÍ POLYMERNÍHO KOMPOZITU</b> .....	<b>14</b>
2.1 MATRICE.....	16
2.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R) .....	16
2.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R) .....	16
2.1.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R) .....	17
2.1.4 Fenolické pryskyřice (PF-R).....	17
2.2 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA.....	18
2.2.1 Druhy vláken.....	18
2.2.2 Porovnání vláken.....	21
2.2.3 Uspořádání vláken.....	22
2.2.4 Nejběžnější druhy vazeb vyztužujících tkanin.....	23
<b>3 PLNĚNÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>24</b>
3.1 PŘEHLED PLNIV A JEJICH ROZDĚLENÍ.....	24
<b>4 VÝROBA KOMPOZITU</b> .....	<b>26</b>
4.1 RUČNÍ KLADENÍ.....	26
<b>5 VÝZKUM POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ VE SVĚTĚ</b> .....	<b>28</b>
5.1 POUŽITÍ PRÁŠKOVÉHO NANODIAMANTU .....	28
5.2 APLIKACE EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE, TERMOPLASTU A TiO <sub>2</sub> .....	28
5.3 VLIV TVARU ČÁSTIC OXIDU KŘEMÍČITÉHO NA EPOXIDOVÝ KOMPOZIT.....	28
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>29</b>
<b>6 POPIS A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>30</b>
<b>7 POUŽITÉ MATERIÁLY PRO ZKUŠEBNÍ VZORKY</b> .....	<b>31</b>
7.1 KOVOVÁ PLNIVA .....	31
7.1.1 Železný prášek .....	31
7.1.2 Měděný prášek .....	32
7.1.3 Bronzový prášek: .....	32
7.2 MATRICE L 285 + TUŽIDLO H 285 .....	33
7.3 VÝZTUŽ - SKELNÁ TKANINA .....	33
7.4 VOSKOVÝ SEPARÁTOR.....	34
<b>8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ</b> .....	<b>35</b>
<b>9 MECHANICKÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>41</b>
9.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	41
9.1.1 Stanovení tahových vlastností bez přídavku plniva .....	42
9.1.2 Stanovení tahových vlastností s přídavkem železného prášku.....	43
9.1.3 Stanovení tahových vlastností s přídavkem měděného prášku .....	45



9.1.4	Stanovení tahových vlastností s přídavkem bronzového prášku.....	47
9.2	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	49
9.2.1	Stanovení ohybových vlastností bez přídavku plniva.....	50
9.2.2	Stanovení ohybových vlastností s přídavkem železného prášku: .....	50
9.2.3	Stanovení ohybových vlastností s přídavkem měděného prášku: .....	51
9.2.4	Stanovení ohybových vlastností s přídavkem bronzového prášku: .....	53
9.3	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU .....	55
9.3.1	Stanovení rázových vlastností bez přídavku plniva .....	56
9.3.2	Stanovení rázových vlastností s přídavkem železného prášku.....	56
9.3.3	Stanovení rázových vlastností s přídavkem měděného prášku .....	57
9.3.4	Stanovení rázových vlastností s přídavkem bronzového prášku.....	59
<b>10</b>	<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VZORKŮ A DISKUZE .....</b>	<b>61</b>
10.1	POROVNÁNÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ .....	61
10.1.1	Modul pružnosti v tahu .....	61
10.1.2	Mez pevnosti v tahu .....	62
10.1.3	Poměrné prodloužení při přetržení .....	62
10.1.4	Síla při přelomení .....	63
10.2	POROVNÁNÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ .....	64
10.2.1	Modul pružnosti v ohybu .....	64
10.2.2	Mez pevnosti v ohybu .....	64
10.3	POROVNÁNÍ RÁZOVÝCH VLASTNOSTÍ .....	65
10.3.1	Síla při přetržení v rázu .....	65
10.3.2	Celková vykonaná práce .....	66
<b>11</b>	<b>ROZLOŽENÍ ČÁSTIC PLNIVA V KOMPOZITU .....</b>	<b>67</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>82</b>

## ÚVOD

Pevnost, rozměr a hmotnost konstrukčních materiálů. Tato slova patří mezi velmi časté pojmy používané ve vědě, výzkumu a průmyslu za posledních pár desetiletí. Je to jedna z hlavních cest zkoumání něčeho nového a následně použitého v životě a v praxi. Materiály a jejich zpracování jsou hlavními prvky pro postup v inovacích a tvorbě nových produktů. V každém odvětví průmyslu se používají materiály, které tvoří díl či sestavu. Jedná se například o strojírenství, automobilový průmysl, letectví, ale i lékařství a mnoho dalších. Pro fungování průmyslu a jednotlivých odvětví je ale potřeba se zabývat i ekonomikou, a to z pohledu nabídky a poptávky. Průmysl bude fungovat, pokud bude reagovat na poptávku a bude ji moci pokrýt svou nabídkou. Zvyšující se nároky poptávky a konkurenceschopnost vede průmysl a jednotlivé podniky, které jsou navázány na vědu a výzkum k hledání nových řešení, která se dají uplatnit v praxi.

Hmotnost konstrukčních materiálů je hlavní prioritou v dopravě, a to především v letectví a automobilovém průmyslu. V těsném závěsu jsou za nimi vlaková a lodní doprava. Snižováním hmotnosti konstrukčních materiálů lze docílit změn mnoha faktorů, jako jsou například snížení spotřeby paliva a emisí nebo zvýšení rychlosti a mnoha dalších, a to při zachování stejných či lepších mechanických vlastností.

Jedná se o použití materiálu, který je složen z více druhů komponentů. Díky vzájemnému spojení jednotlivých složek dochází k maximálnímu využití užité vlastnosti každé složky. Vysoká odolnost u mechanických a fyzikálních zkoušek a k tomu nízká hmotnost jsou významným znakem materiálů, které budou nastupovat jako hlavní používaný materiál a budou mít možnost otevřít nové možnosti nejen v průmyslu, ale i vědě a poznání.

Materiály, které do této kategorie patří, jsou polymerní kompozitní systémy.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERNÍ KOMPOZIT

Kompozitem je nazýván materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dvě nebo více komponent o výrazně se lišících fyzikálních a chemických vlastnostech. Kompozity mají ve srovnání s jednotlivými komponentami, tj. vlákny a pryskyřicí, podstatně odlišné unikátní vlastnosti. Nevýztužená pryskyřice má nízkou hustotu a je snadno zpracovatelná a má relativně dobrou stabilitu proti působení širokého spektra prostředí a chemikálií. Nevýhodami, které omezují, či úplně vylučují jejich použití v konstrukčních aplikacích, je velmi nízký modul pružnosti (do 6GPa), nízká pevnost (100MPa), křehkost a relativně malá creepová odolnost. Vlákna mají sice požadovanou tuhost a pevnost, jsou však velmi křehká a náchylná k poškození v některých agresivních prostředích. Je navíc velmi obtížné udržet je v požadovaném prostorovém uspořádání, zvláště pokud působí tlakové složky napětí. Jestliže však vyrobíme kompozitní materiál tím, že prostorově vhodně umístíme skleněná, uhlíková či organická vlákna (výztuž) v pryskyřici, která se potom nazývá pojivem neboli matricí, dostaneme novou entitu s vlastnosti nedosažitelnými jednotlivými komponentami samotnými. [1]

### 1.1 Rozdělení polymerních kompozitů

Na trhu je dostupné relativně široké spektrum kompozitních materiálů lišících se pojivem (pryskyřicí/matricí), typem a charakterem výztuží (typ vláken, tkanin, rohože, rouna) a mnohdy i způsobem výroby (ruční laminace, tažení, navíjení, odstředivé lití, atd.). Kompozitní materiály se pak rozlišují podle typu strukturních kritérií. Z hlediska klasifikace podle typu matric existují dva základní typy polymerních pryskyřic - pojiv, a to termoplasty a reaktoplasty. [1]

#### 1.1.1 Termoplasty

Do skupiny termoplastů patří například polystyrén (PS), polypropylen (PP), polyetylén (PE), polykarbonát (PC), polyetylén tereftalát (PET) a další. Jsou to tuhé látky, které měknou a tečnou při zvýšení teploty nad jistou hodnotu charakteristickou pro daný polymer. Po ochlazení pod tuto teplotu opět přejdou do pevného skupenství. Charakteristickým strukturním znakem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené

opakováním stejných strukturních jednotek (několik tisíc až několik miliónů). Z toho důvodu bývá tento typ makromolekul označován jako polymer. Jednotlivé makromolekuly nejsou vzájemně vázány chemickými vazbami. Jejich vzájemné interakce, které zaručují kohezní pevnost polymerního tělesa, jsou většinou slabé. [1]

### 1.1.2 Reaktoplasty

Mezi zástupce reaktoplastů (dříve termoset) patří pryskyřice, které se vytvrzují přidavkem katalyzátoru a urychlovače, příp. dodáním energie (teplo, záření). Díky tomu získává kompozit své konečné vlastnosti. Ke skupině reaktoplastů patří například epoxidové pryskyřice (EP-R), nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP-R), vinylesterové pryskyřice (VE-R) či fenolické pryskyřice (PF-R). Pryskyřice jsou obvykle dodávány ve formě viskózních tekutin s konzistencí řídkého medu tvořené relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí. Vytvrzení probíhá buď za pokojové teploty, nebo za zvýšených teplot. Způsobem, kterým vytvrzování probíhá, do značné míry ovlivňuje výsledné vlastnosti. Jelikož při vytvrzování dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými malými molekulami, vzniká místo dlouhých lineárních molekul, které jsou charakteristické pro reaktoplasty, třídimenziální polymerní síť s různou hustotou. Kompozity s matricemi z reaktoplastické pryskyřice mají mezi konstrukčními aplikacemi vláknových kompozitů naprostou převahu. [1]

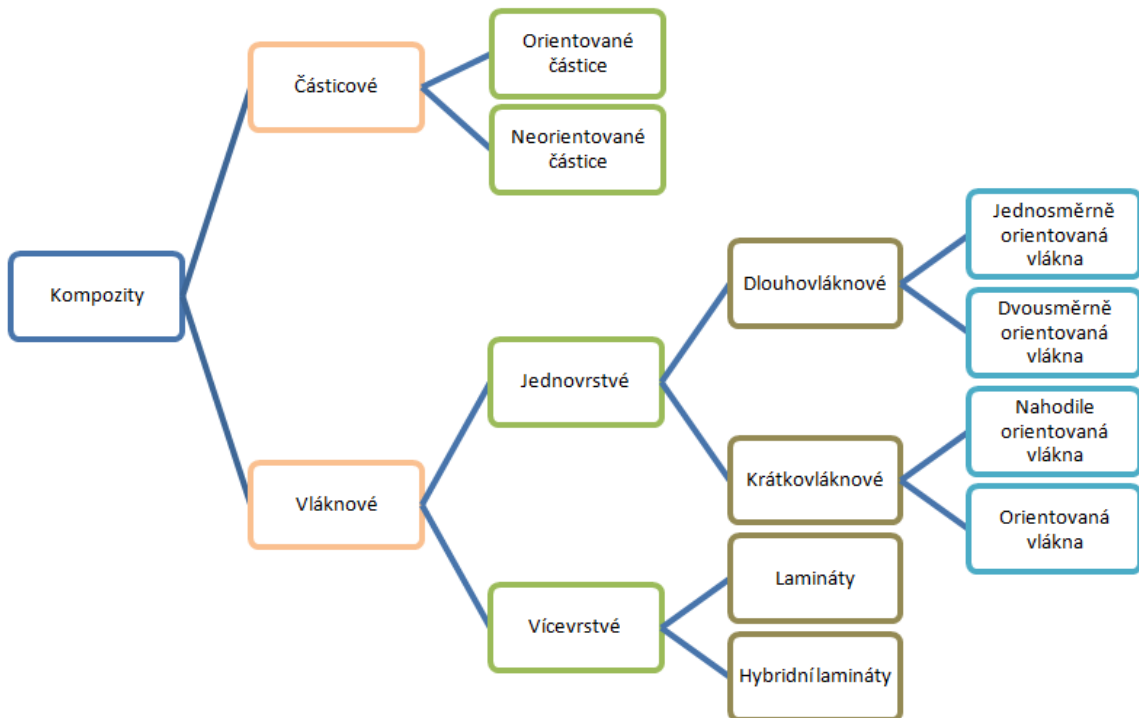
### 1.1.3 Rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty

Reaktoplasty se oproti termoplastům mnohem lépe zpracovávají, snadněji smáčejí a lépe prosycují vlákna. Energetické nároky na prosycování vláken jsou v porovnání s termoplasty nižší, protože zpracování probíhá při podstatně nižších teplotách. Zpracovatelské teploty termoplastů jsou mnohem vyšší a jsou omezeny teplotou rozkladu. Jejich viskozita ve srovnání s reaktoplasty je sto až tisícinásobná. Výhodou termoplastů oproti termosetům je jejich houževnatost. Jen minimum termoplastových kompozitů dosahuje obdobných hodnot modulu pružnosti, tepelné odolnosti a odolnosti proti chemickým vlivům jako reaktoplasty. Níže jsou uvedeny rozdíly mezi vyztuženými termoplasty a termosety (reaktoplasty).

	Termoplasty	Termosety
Matrice	Polymerovaná, vysokoviskózní tavenina, špatně se spojuje lepením	Nevytvrzená, nízkoviskózní, dobře se spojuje lepením a opatřuje nátěrem
Cena matrice	Nízká, ale i vysoká	Nízká
Předimpregnace	Obtížné smáčení a prosycování	Snadné
Cena předimpregnace	Vysoká	Nízká
Skladování	Neomezeně skladovatelné	Omezená skladovatelnost (v chladu), reakce pomalu pokračuje
Polotovar	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží (GMT), pásky	Lisovací hmoty SMC (prepregy)
Přímé zpracování	Granulát (krátká vlákna), přímo zpracovatelný dlouhovláknitý polotovar (D-LFT)	Výztuž a reaktivní pryskyřice
Teplota při zpracování	Teplota taveniny	Teplota okolí
Tvarování	Vhodné pro velké série	Nevhodné
Ruční kladení	Nevhodné	Vhodné pro velkoplošné díly
Kladení pásů	Vysoká automatizace, malá lepivost, svařování	Vysoká automatizace, dobrá lepivost, citlivé vytvrzování
Teplota nástroje při lisování	Teplota taveniny 150 až 180 °C	Reakční teplota 140 až 160 °C
Lisovací tlak	GMT: 200 až 300 N · mm <sup>-2</sup> D-LFT: 30 až 100 N · mm <sup>-2</sup>	SMC: 20 až 50 N · mm <sup>-2</sup>
Plocha povrchu	Přiměřená, svařitelná	Dobrá, tvrdá; lze ji lepit a natírat
Mechanické chování	Houževnaté, sklon ke krípu	Dynamicky zatížitelné, křehký lom
Chování za tepla	Výrazné změknutí při $T_g$	Méně závislé na teplotě
Stárnutí	Málo odolné až odolné	Velmi odolné proti stárnutí
Možnost opravy	Omezená	Dobrá

Obr. 1. Rozdíl mezi termoplasty a termosety [3]

## 2 SLOŽENÍ POLYMERNÍHO KOMPOZITU



Obr. 2. Složení polymerního kompozitu

### - Částicové kompozity

Jsou plněny částicemi, které jsou definovány jako nevláknový útvar, který nemá dlouhý řetězec. Mohou být ve tvaru koule, krychle, kvádru, popř. jiného tvaru. Částice se mohou rovněž podílet na přenosu namáhání, ale v mnohem menším měřítku než vlákna. Hlavní význam částic je zlepšení mechanických vlastností materiálu, např. úprava elektrické a tepelné vodivosti, zvýšení odolnosti proti opotřebení, snížení koeficientu tření, apod. Částice mohou mít v matrici náhodnou orientaci, nebo přednostní orientaci z důvodu požadovaných mechanických vlastností. [2]

### - Vláknové kompozity

Vláknové kompozity mají délkové rozměry podstatně větší než průřezové.

- **Jednovrstvé vláknové kompozity**

Jsou tvořeny jednou vrstvou, nebo jsou složeny z několika samostatných vrstev, z nichž každá vrstva má stejnou orientaci a stejné vlastnosti. Jednovrstvé kompozity lze rozdělit na dlouhovláknové a krátkovláknové.

U dlouhovláknových jednovrstvých kompozitů mohou být vlákna uspořádána v jednom směru (jednosměrně orientovaná vlákna) a tím je vytvořen tzv. jednosměrový kompozit - lamina. Tyto kompozity se vyrábějí rovnoběžným ukládáním vláken a jejich prosycením pryskyřicí, která udržuje vlákna v dané poloze a tvoří matici. Tyto kompozity mají vysokou pevnost ve směru vláken, ale velmi nízkou pevnost ve směru kolmém na vlákna, což je dáno vlastnostmi matrice.

U krátkovláknových kompozitů jsou krátká vlákna (někdy označována jako sekaná vlákna) orientovaná nahodile nebo v určitém směru. Krátkovláknový kompozit s orientovanými vlákny se vyrábí většinou tak, že jsou krátká vlákna spojena ve slabě vázanou rohož, která je poté impregnována pryskyřicí. [2]

- **Vícevrstvé vláknové kompozity**

Patří v praxi k nejčastěji používaným. Skládají se z několika tenkých různě orientovaných jednosměrových vláknových kompozitů - lamin. Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, například skelná vlákna v epoxidové pryskyřici, nazývá se tento kompozit laminát. V případě, že jsou vrstvy vyrobeny z různých materiálů, například jedna vrstva je vyztužena uhlíkovými vlákny a další skelnými vlákny, hovoříme o tzv. hybridních laminátech.

Významnou vlastností vláknových kompozitů je jejich poměr vysoké pevnosti a tuhosti k hmotnosti. Další předností těchto materiálů je možnost vyrobit materiál požadovaných pevnostních vlastností v daných směrech. [2]



## 2.1 Matrice

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, který je prosycen systémem vláken a parikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, přenos sil, ochrana vláken, zavedení přenosu namáhání na vlákna, převedení namáhání vlákna na vlákno, zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku, ochrana vláken před vlivy okolí. Mezi nejčastější používané matrice při výrobě kompozitů patří reaktivní pryskyřice. Jsou to kapalné, nebo tavitelné pryskyřice, které buď samostatně nebo za pomoci jiných složek tvrdidel, tj. iniciátorů, katalyzátorů, urychlovačů, aldehydů (fonolů), vytvrzují polyadici nebo polymeraci bez odštěpení těkavých složek. Reaktivní pryskyřice taky nazýváme licí, laminační, impregnační, prosycovací nebo zalévací. [1], [3]

### 2.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Jsou známé již od roku 1936 a v kompozitech se uplatňují nejvíce. Pryskyřice je bezbarvá, až slabě nažloutlá v reaktivním rozpouštědle. Vytvrzovat ji lze za normální nebo zvýšené teploty, aniž by vznikaly vedlejší těkavé produkty. Při vytvrzování se uvolní reakční teplo a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9 %. Nenasycené polyesterové pryskyřice patří mezi levné, spolehlivé a jako mnohostranně použitelné licí pryskyřice. Lze použít velkou variabilitu s volbou jednotlivých složek styrenu, katalyzátoru či urychlovače. UP-R mají dobrou odolnost proti povětrnostním podmínkám. [3]

### 2.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Jsou velmi vhodné pro výrobu kompozitů vyztužených skleněnými i uhlíkovými vlákny určených pro náročnější aplikace. Hodí se výborně pro náročné aplikace, zejména do agresivního chemického prostředí a pro kompozity vystavené velkému mechanickému namáhání. Ve většině aplikací nevyžadujících speciální elektrické vlastnosti a dlouhodobé využití při vysokých teplotách je možno pomocí VE-R nahradit ostatní typy pryskyřic jako např. epoxidové. Použití vinylesterových pryskyřic je zejména v oblastech s vysokým korozním namáháním jako jsou například pračky, chladicí věže, potrubí, přepravní nádrže a další. Díky houževnatosti se VE-R používají taky pro nosníky nárazníků a díky vysoké pevnosti je využito této pryskyřice i u velkých nosných konstrukcí. [1], [3]

### 2.1.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)

EP-R pryskyřice patří mezi velmi hodnotné termosety s velice dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Pouze 8 % se zpracovává ve formě vyztužených kompozitů. Výsledkem velmi dobrých mechanických, elektrických vlastností a velké reaktivitě se rozvinuly aplikace EP-R v lepidlech, zalévacích a lisovacích hmotách, pojivech pro lamináty a lékařských pryskyřicích. Při vytvrzování dochází jen k malému celkovému polymeračnímu smrštění okolo 2 % a díky tomu je velmi vhodná pro výrobky s požadavky na přesné rozměry a pro výrobu kompozitů, kde je v důsledku minimálního smrštění minimalizováno vnitřní pnutí i ve velkých dílcích. [1], [3]

### 2.1.4 Fenolické pryskyřice (PF-R)

Byly poprvé studovány již kolem roku 1880 a použity jako základy některých lepidel. Fenolické pryskyřice jsou termosety s vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí, které vznikají nejčastěji jako reakční produkt reakce fenolu s formaldehydem. Formaldehydová pryskyřice je známá pod komerčním názvem bakelit. Fenolické pryskyřice se používají jako základ lepidel pro laminování dřeva. Dále se využívá této pryskyřice jako pojivo brusných částic. Největší předostí této pryskyřice je její vynikající termomechanická, povětrnostní a elektrická odolnost. [1]

## 2.2 Vyztužující vlákna

Hlavní význam pro použití výztuže je zvýšení pevnosti a tuhosti, které vznikne uložení výztuže do základního materiálu (matrice). Hlavním strukturálním parametrem, který určuje výsledné vlastnosti kompozitu, je použití druhu výztuže a její uspořádání.

### 2.2.1 Druhy vláken

V kompozitech se mohou používat vlákna z různých materiálů. Průřez vláken bývá zpravidla kruhový. Jejich průměr se pohybuje v různém rozmezí.:

- do průměru 100 nanometrů se jedná o nanovláknko;
- 0,1 - 1 mikrometrů jde o mikrovláknna - např. whiskery;
- 1 - 10 mikrometrů jsou střední vlákna - např. uhlíková, skleněná, textilní;
  - o nad 10 mikrometrů se jedná o hrubá vlákna. [4]

#### **Rozdělení vláken:**

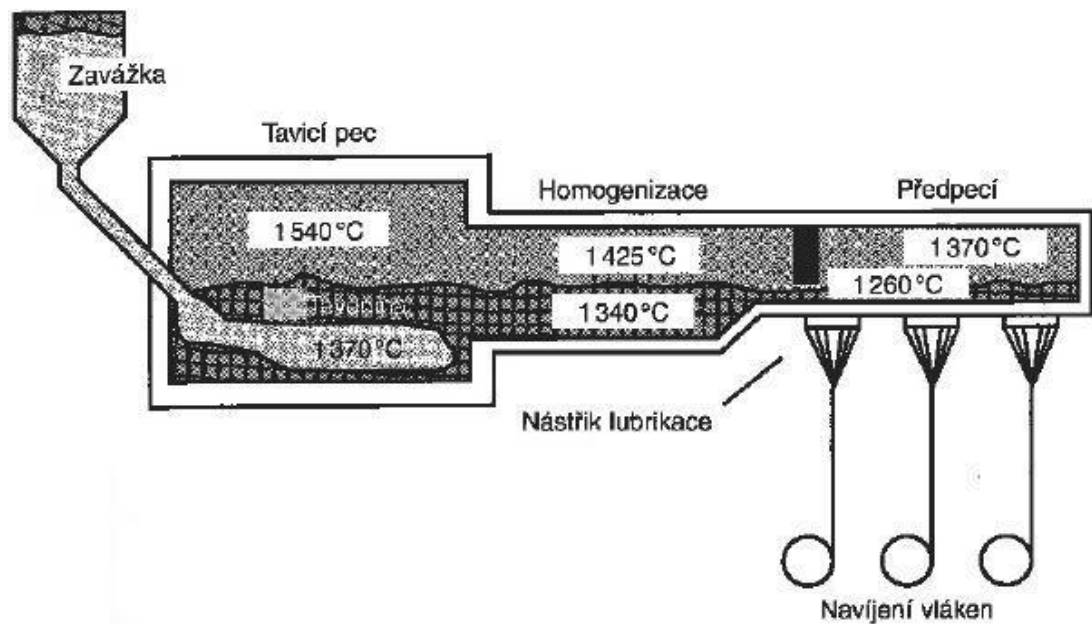
- 1) přírodní vlákna;
- 2) skleněná vlákna;
- 3) uhlíková a grafitová vlákna;
- 4) aramidová a silonová vlákna;
- 5) keramická vlákna;
- 6) kovová vlákna;
- 7) whiskery.

#### - **Skleněná vlákna**

Skleněná vlákna patří mezi nejrozšířenější a zatím nejpoužívanější. Mají silikátový základ ( $\text{SiO}_2$ ). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg a B) s velmi malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Potřebného průměru vláken se dosáhne dlužením proudu skla vytékajícího tryskami ze dna zvláknovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtažování monovláken. Monovláknna se po povrchové úpravě sdružují do pramene a navíjejí na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving. [5]

**Základní vlastnosti:**

- hustota:  $\pm 2,5 \text{ g / cm}^3$ ;
- modul pružnosti: 70 - 85 GPa;
- tepelná vodivost je o polovinu nižší než u oceli;
- tepelná roztažnost je méně než polovina tepelné roztažnosti oceli.

**Výroba skleněných vláken:**

Obr. 3. Výroba skleněných vláken tažením z trysek [3]

**Nejčastěji používané druhy skleněných vláken:**

OZNAČENÍ SKLA	POUŽITÍ	SLOŽENÍ V %	PEVNOST (GPa)	PRODLOUŽRNÍ PŘI LOMU (%)
E	Elektrické izolace	55 SiO <sub>2</sub> , 11 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 6 B <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 18 CaO, 5 MgO	3	3
S	Vysokopevnostní kompozity	65 SiO <sub>2</sub> , 25 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 5 MgO	5	5
A	Tepelné izolace	72 SiO <sub>2</sub> , 1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 3 MgO, 10 CaO, 14 K <sub>2</sub> O		
C (Pyrex)	Chemické aplikace	65 SiO <sub>2</sub> , 14 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 6 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 3 MgO, 14 CaO, 14 K <sub>2</sub> O	2	2

Obr. 4 Druhy nejčastěji používaných skleněných vláken [4]

**- Uhlíková vlákna**

V uhlíkových vláknech se pojí vysoká pevnost, modul pružnosti a tepelná odolnost s nízkou měrnou hmotností. [6]

Základní metody přípravy jsou:

a) parolýzou polymerů;

- umělé polymery (PAN);
- přírodní polymeru (různé smoly);

b) tepelným rozkladem uhlovodíků;

c) odpařováním z obloukového výboje mezi uhlíkovými elektrodami. [4]

Prvním výrobním krokem přípravy uhlíkových vláken je karbonizace primárního vlákna, při níž se nesmí surovina roztavit a zreagovat na nedefinované produkty. Proto se např. zvlákněné smoly zesílují opatrným naoxidováním do netavitelného termosetu. Zvlákněje se pod napětím, aby se v případě zvláknění ze smoly vytvořila orientace molekul ve směru osy vlákna. Čím je tato orientace dokonalejší, tím má vlákno vyšší modul pružnosti a pevnost. Z materiálového i energetického hlediska jsou výhodnější suroviny, které dávají při karbonizaci vyšší výtěžky: viskózní vlákna dávají asi 15 - 20%, akrylonitrilová až 55% a ze smol bývá výtěžek až 80% hmoty výchozích látek. Uhlíková vlákna se většinou z praktických důvodů dělí podle hodnot modulu pružnosti a pevnosti. Vlákna získaná při 900°C až 1500°C jsou pevnější, nazývají se vysokopevnostní uhlíková vlákna (označo-

vaná HS = „high strength“). Tato vlákna jsou levnější než vysokomodulová vlákna. Další karbonizací HS vláken při teplotě 2000°C až 2800°C se získají vlákna grafitová, která mají menší tahovou pevnost, ale vynikají vyšším modulem pružnosti v tahu (vysokomodulová vlákna = HM = „high modulus“). [1]

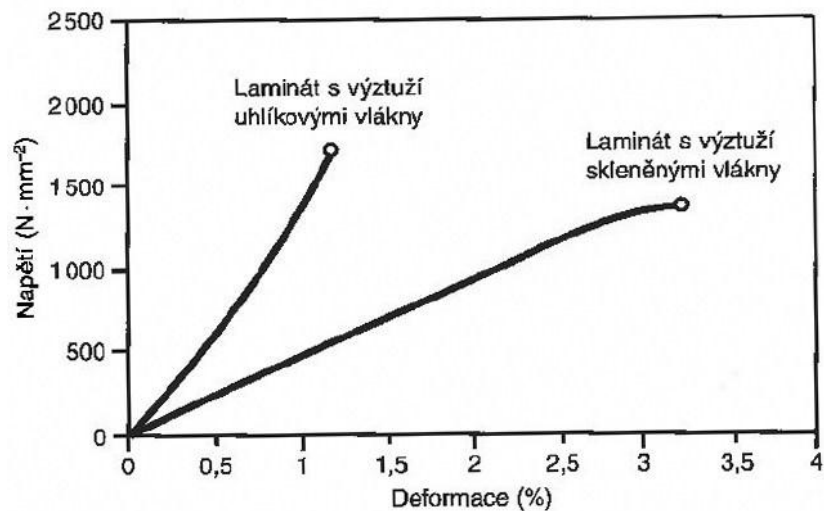
### Základní vlastnosti:

- hustota: 1,8 - 2 g / cm<sup>3</sup> (obsahují 90 až 95 % uhlíku);
- tuhost až desetinásobná oproti skleněným vláknům;
- vynikající tepelné vlastnosti, pokud jsou chráněny před oxidací;
- uhlíková vlákna jsou elektricky vodivá;
- dvojnásobná až stonásobná cena oproti skleněným vláknům;
- stabilní do 1000 °C.

### 2.2.2 Porovnání vláken

Vlákno	Uhlíkové	Grafitové	Whisker (monokrystal)	Skleněné	Ocelové
Průměr [μm]	7-10	5-7	0.2	12-20	13
Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	1,6	2,0	2,26	2,5	7,87
Pevnost v tahu [GPa]	2,5-3,5	2-2,5	20	3,5	4,2
Modul pružnosti [GPa]	250-300	400-500	500-1000	70-85	210
Měr. pevnost [m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> .10 <sup>9</sup> ]	1,55-2,2	1-1,25	8,85	1,4	0,53
Měr. modul [m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> .10 <sup>8</sup> ]	156-188	200-250	220-440	28	27
Tep. tání [°C]	3650	3650	3650	700	1400
Tep. odolnost inert [°C]	2000	2000	2000	500	
Tep. odolnost vzduch [°C]	350	350	350	300	

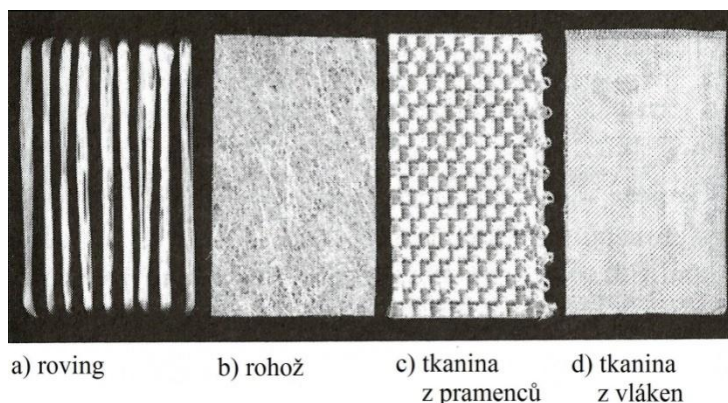
Obr. 5 Porovnání některých druhů vláken [1]

**Mechanické porovnání uhlíkových a skleněných vláken:**

Obr. 6 Porovnání uhlíkových a skleněných vláken [3]

**2.2.3 Uspořádání vláken**

- ❖ *Příze* - kroucená, nebo nekroucená vlákna určená k textilnímu zpracování.
- ❖ *Krátká vlákna* - mletá na jednotlivá elementární vlákna rozptýlená o různé délce (0,1 mm až 5 mm), používaná pro vyztužení termoplastů.
- ❖ *Pramen* - vzniká spojením cca 200 elementárních vláken bez kroucení.
- ❖ *Tkaniny* - plošné výrobky z vláken nebo pramenců uloženy pravoúhle v útku a osnově, které působí vyztužně ve dvou směrech.
- ❖ *Roviny* - jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů/m) pro výrobu profilů tažením (pultruzí), pro navíjení a pro výrobu prepregů. Jsou dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti (u skleněných vláken do 15 kg).
- ❖ *Prepreg* - jedná se o různé široké role polotovaru s reaktoplastickou, nebo termoplastickou maticí.
- ❖ *Rohož* - je plošná vyztuž skládající se z nekonečných, nebo sekaných, nahodile orientovaných pramenců vláken spojených pojivem. [3], [4]



Obr. 7 Nejdůležitější typy sklovláknitých výztuží [3]

#### 2.2.4 Nejběžnější druhy vazeb vyztužujících tkanin



Obr. 8 Nejběžnější druhy vazeb vyztužujících tkanin [3]

- a) Plátnová vazba - je jednoduchá základní vazba, ale patří mezi nejpevnější. Má dobrou rozměrovou stálost, malý otřep při řezání, avšak je nejméně poddajná při tvarování.
- b) Keprová vazba - díky menšímu zvlnění vláken má vysokou pevnost a oproti plátnové vazbě je ohebnější a proto vhodnější pro tvarové prvky.
- c) Atlasová vazba - je nejméně pevnou vazbou. Atlasovou vazbou lze dosáhnout velmi hladkého povrchu, a proto se jí také říká saténová. [3], [5]



### 3 PLNĚNÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

V kompozitech je možné používat nejrůznější druhy částic. Jejich použití může vést ke zlepšení mechanických vlastností, ale častěji ke zlepšení nebo úpravě jiných vlastností jako je například tepelná odolnost, elektrická odolnost, útlum vibrací, apod. [4]

Zpravidla není možné přímým měřením určit velikost částic. Nejjednodušší a často velmi používaný je síťový rozbor, kdy je velikost částic charakterizována průměrem otvoru síta, jímž částice ještě propadne. [4]

#### **Všeobecně lze vyjádřit vliv plniv na mechanické vlastnosti následovně:**

- přidáním anorganických plniv se dosáhne významné zvýšení tuhosti (modulu pružnosti) při současném poklesu tažnosti;
- v případě použití plniva s anizometrickým (destičkovitým, vláknitým) tvarem plniva je možné dosáhnout zlepšení pevnosti, které závisí na tvaru obsahu plniva a jeho orientaci;
- při použití plniv s izometrickým (sférickým) tvarem částic ( $\text{CaCO}_3$ , skleněné kuličky) se stoupajícím obsahem plniva klesá pevnost, intenzita poklesu závisí na velikosti částic, nejmenší pokles je při optimální velikosti částic plniva (1-10  $\mu\text{m}$ ). Při namáhání kompozitu sférická plniva působí v polymerní matrici jako koncentrátoři napětí a iniciují destrukci kompozitu. [7]

#### **3.1 Přehled plniv a jejich rozdělení**

Disperzní plniva mají různé chemické složení, tvar, hustotu, barvu, tvrdost a mnohé jiné fyzikálně - mechanické vlastnosti. [7]

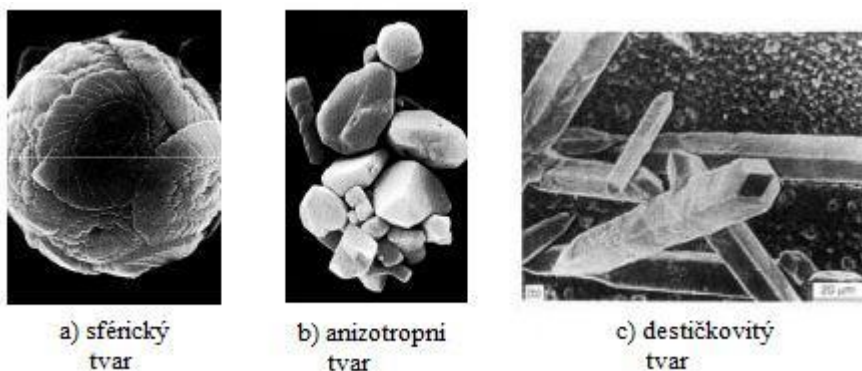
*Plniva můžeme rozdělit podle:*

##### **Velikosti částic:**

- písek 2 až 0,25 mm, rozeznatelné okem;
- jemný písek - 0,25 až 0,05 mm, rozeznatelné okem;
- hrubý prach - 0,05 až 0,01 mm, rozeznatelné optickým mikroskopem;
- jemný prach -  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  mm (10 až 1 mikrometr), rozeznatelné optickým mikroskopem;

- disperze -  $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  mm (0,01 až 1 mikrometr), rozeznatelné skenovacím elektronovým mikroskopem;
- nanočástice - pod  $10^{-5}$  mm (pod 10 nanometrů), rozeznatelné transmizním elektronovým mikroskopem. [4]

### Tvaru částic:



Obr. 9 Tvar částic plniva [7]

### Dále lze rozdělit plniva podle:

- chemického složení, barvy, hustoty, aplikace pro dosažení požadovaných vlastností polymerního kompozitu, jako je například snížení hořlavosti, odolnost proti kyselinám a další.

### Příklady plniv:

- křemenný prášek (zvýšení elektroizolačních schopností);
- oxid hlinitý (snížení hořlavosti, případně až dosažení samozhášivosti);
- olovněný prášek (ochrana proti RTG);
- niklové částice (dobrá tepelná a elektrická vodivost);
- celulózové částice - např. piliny (antivibrační účinek).

## 4 VÝROBA KOMPOZITU

Způsob výroby polymerních kompozitů se stanoví na začátku podle předpokládaného počtu vyráběných kusů, a to zda se bude jednat o kusovou, malosériovou či sériovou výrobu. Tato výroba se dále rozděluje na manuální, částečně automatizovanou, kontinuální a speciální. Oproti konvenčním metodám výroby, je velká přednost ekonomické nenáročnosti zejména u jednodušších dílů, které jsou vyráběny kusově. Suroviny potřebné k výrobě jsou dostupné díky rozšiřující se konkurenci výrobců jednotlivých matric a výztuží. Pro základní ruční kladení není potřeba ani strojírenské vybavení, jak je tomu ve valné většině konvenční výroby.

### **Základní metody výroby jsou:**

- 1) ruční kladení;
- 2) nízkotlaká (vakuová) technologie;
- 3) lisování pomocí tlakového vaku;
- 4) lisování v autoklávu;
- 5) prepregy;
- 6) lisování;
- 7) vstřikování;
- 8) pultruze (tažení);
- 9) navíjení;
- 10) oplétání;
- 11) odstředivé lití.

### **4.1 Ruční kladení**

Patří mezi nejstarší a nejjednodušší pracovní postup, který je vhodný pro malé série, prototypy a velkoplošné díly. Pracovní nástroje a pomůcky jsou jednoduché a levné. Jakost vyráběného dílu závisí na znalostech a zkušenostech pracovníka.

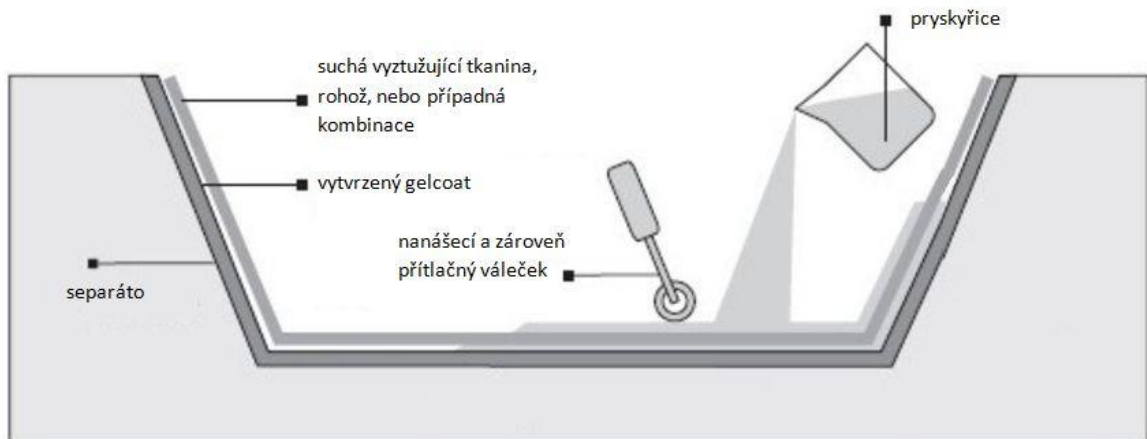
#### **Pracovní postup:**

Otevřená pracovní forma je zbavena nečistot a naseparovaná. Separace formy se provádí z důvodu lepšího odformování.

Jako základní vrstva se nanáší vrstva pryskyřice o tloušťce 0,3 - 0,6 mm, zvaná gelcoat.

Tato vrstva zabraňuje proražení struktur výztuže na povrch výrobku, slouží současně jako ochrana povrchu a zajišťuje i estetickou stránku.

Po částečném vytvrzení gelcoatu se kladou jednotlivé vrstvy výztuže, které se prosycují pryskyřicí pomocí štětce nebo nanášením válečku a poté se přebytečná pryskyřice a vzduchové bubliny vytlačují rýhovanými válečky. Úplné odvzdušnění laminátu je však při ručním kladení téměř nemožné. Vznik vzduchových bublin by se po vytvrzení projevil ve snížených mechanických vlastnostech laminátu. [3], [8]



Obr. 10 Ruční kladení polymerního kompozitu [8]

## **5 VÝZKUM POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ VE SVĚTĚ**

Portál ScienceDirect na internetové adrese [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) sdružuje vědeckou publikační činnost, kde je možné dohledat experimentální zkoušky a články různých technologií. Je zde popsáno mnoho aplikací s použitím polymerních kompozitů, kde je jako matrice použita různá pryskyřice, či měněna vyztužující vlákna. Dále je zde mnoho způsobů aplikací a přípravy. Níže je uveden výběr některých zahraničních výzkumů.

### **5.1 Použití práškového nanodiamantu**

Nízký obsah prášku nanodiamantu byl rozptýlen do epoxidové pryskyřice a poté smíchán s tvrdidlem pomocí vysokorychlostního míchadla. Byly zkoumány mechanické vlastnosti, kde bylo zjištěno, že se významně zlepšila tvrdost, pevnost v tahu a modul pružnosti. [9]

### **5.2 Aplikace epoxidové pryskyřice, termoplastu a TiO<sub>2</sub>**

Aplikací nano-částic termoplastu ABS a nano-částic TiO<sub>2</sub> s epoxidovou maticí s cílem zvýšit mechanické vlastnosti a snížit náklady, aniž by se zhoršily mechanické vlastnosti. Bylo zjištěno, že se mechanické vlastnosti s použitím nano-částic zlepšily a mají nejvýznamnější vliv na mechanické vlastnosti. [10]

### **5.3 Vliv tvaru částic oxidu křemičitého na epoxidový kompozit**

Použitím různých tvarů částic, lze docílit změny mechanických vlastností. Vyšší mechanické vlastnosti byly pozorovány u vyššího procenta plnění. Mechanické vlastnosti s protáhlými částicemi křemenného minerálu jsou vyšší. [11]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 POPIS A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část diplomové práce se zabývala výrobou zkušebních těles s aplikací kovového prášku v různém procentuálním hmotnostním množství. Do polymerního kompozitu se přidával železný, měděný a bronzový prášek. Matici tvořila epoxidová pryskyřice a výztuž skleněná tkanina. Provedly se mechanické zkoušky a výsledky byly porovnány nejen mezi kompozity s přídavkem kovového plniva, ale i bez přídavku plniva. Výsledky a následná diskuze řeší, zdali působí na změnu mechanických vlastností kovové plnivo či nikoliv.

### **Cíle diplomové práce:**

1. Studium vlivu přídavku kovového plniva do polymerního kompozitu.
2. Návrh a výroba zkušebních vzorků ručním kladením.
3. Experimentální měření tahových vlastností dle ČSN EN ISO 527 - 4.
4. Experimentální měření ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 178.
5. Experimentální měření rázové zkoušky Charpyho metodou dle ČSN EN ISO 179.
6. Vyhodnocení výsledků a diskuze.
7. Závěr.

## 7 POUŽITÉ MATERIÁLY PRO ZKUŠEBNÍ VZORKY

### 7.1 Kovová plniva

Kovové prášky jsou základem pro experimentální výzkum vlivu jejich procentuálního hmotnostního podílu na mechanické vlastnosti polymerního kompozitu. Zvolenými kovovými prášky byly železo, měď a bronz. Tyto kovové prášky byly vybrány z důvodu bezproblémové dostupnosti a jejich častého použití v průmyslu. Prášky byly objednány od společnosti FICHEMA - [www.fichema.cz](http://www.fichema.cz).

#### 7.1.1 Železný prášek

Železo má chemickou značka Fe (Ferrum) a patří mezi nejrozšířenější kov na Zemi. Technické železo je slitina železa s uhlíkem, křemíkem, fosforem a dalšími prvky. Železo se dále dělí na surové a litiny. Surové železo s přidávkem dalších prvků se používá hlavně k výrobě odlitků. Litina je velmi křehká a vyrábí se z ní hlavně předměty, které nepotřebují odolnost proti nárazu.

#### Vlastnosti použitého železného prášku:

Hustota: 7,86 g/cm<sup>3</sup>

Molární hmotnost: 55, 85 g/mol<sup>-1</sup>

Bod tání: 1538<sup>0</sup>C

Bod varu: 2861<sup>0</sup>C

Obsah železa: min. 99 %

Síto: 97 nad 45 mikronů, 20 % nad 150 mikronů



Obr. 11 Železný prášek [14]



### 7.1.2 Měděný prášek

Měď je značena v tabulce chemických prvků jako Cu (Cuprum), má načervenalou barvu a patří po technickém železe mezi nepoužívanější kovy v průmyslu. Mezi hlavní přednosti mědi patří velmi dobrá elektrická a tepelnou vodivost a odolnost proti korozi. Měď se dále používá i jako přídavek do slitin bronzu a mosazi.

#### **Vlastnosti použitého měděného prášku:**

Hustota: 8,94 g/cm<sup>3</sup>

Molární hmotnost: 63,55 g/mol<sup>-1</sup>

Bod tání: 1083<sup>0</sup>C

Bod varu: 2567<sup>0</sup>C

Síto: menší než 45 mikronů



Obr. 12 Měděný prášek [15]

### 7.1.3 Bronzový prášek:

Bronzový prášek je slitina mědi a dalšího prvku. Nejčastěji se jedná o přídavek cínu. Bronz má nízké tření kovu na kov a často se používá pro výrobu ložisek.

#### **Vlastnosti použitého bronzového prášku:**

Obsah cínu: 9 - 11 %

Síto: min. 99 % do 45 mikronů



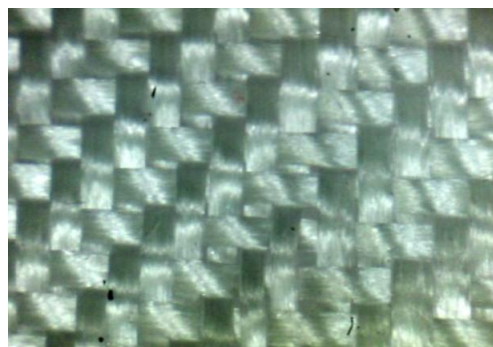
Obr. 13 Bronzový prášek [16]

## 7.2 Matrice L 285 + tužidlo H 285

Použitá matrice byla epoxidová pryskyřice L 285 s tužidlem H 285. Jedná se o velmi kvalitní pryskyřici, která je vhodná pro letecký průmysl a výrobu modelů. Pryskyřice s tužidlem vytváří velmi viskózní směs a díky tomu jsou vlákna rychle a kvalitně prosycena. Doporučené a zároveň použité bylo tužidlo H 285 s poměr míchání 100:40 váhově nebo 100:50 objemově. Doba zpracovatelnosti u 100g/25°C je cca 50 min.

## 7.3 Výztuž - skelná tkanina

Skelné tkaniny se používají velmi často jako výztuž, jelikož jsou cenově dostupné a mají dobré mechanické vlastnosti. Nevýhodou u skelných vláken je nízký modul pružnosti, ale naopak vysoká pevnost v tahu. Vlastnosti skelných vláken jsou izotropní. Mají tedy stejné vlastnosti jak v podélném, tak kolmém směru. Zvolená byla skleněná tkanina vazby keprové s hmotností 200 g/m<sup>2</sup>.



Obr. 14 Keprová vazba



Obr. 15 Skelná tkanina keprové vazby

#### 7.4 Voskový separátor

Separáčnı́ vosk vytvoří na formě tenkou vrstvu, která pomůžke k snadnějšı́mu odformování.

Zvolen byl voskový separátor MOLD RELEASE TR 104.



Obr. 16 Separátor MR - TR 104 [17]

## 8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Výrobna zkušebních vzorků probíhala ručním kladením a vytvrzováním při pokojové teplotě. Postupně byly vyráběny vzorky s různým typem plniva, ale se stejným hmotnostním procentem. Následně proběhly mechanické zkoušky. Po naměření výsledků pokračovala výroba nových zkušebních vzorků s jiným hmotnostním procentem plnění.

Po vytvrzení kompozitu, které trvalo minimálně dvacet čtyři hodin, proběhlo odformování a pokračovalo nařezání kompozitu na požadované rozměry pro potřebu mechanických zkoušek. Zpočátku byly zkušební vzorky vyráběny po deseti kusech, ale po prvních zkouškách a zjištění malého rozptylu v hodnotách pokračovala výroba po pěti zkušebních vzorcích. Celkem bylo vyrobeno a otestováno přes dvě stě deset zkušebních vzorků.

### **Postup výroby ručním kladením:**

- 1) hlavní rozvaha;
- 2) připravení skelné tkaniny;
- 3) separace formy;
- 4) navažování komponent pro polymerní kompozit;
- 5) nanášení první vrstvy promíchané pryskyřice se všemi složkami a postupné nanášení na připravenou formu;
- 6) ruční kladení a prosycování skelné tkaniny s opakujícím se předchozím bodem až do poslední šesté vrstvy;
- 7) vytvrzení;
- 8) odformování;
- 9) příprava plošného dílce k nařezání na potřebné zkušební rozměry;
- 10) rozdělení / nařezání na potřebné rozměry.

#### **- Hlavní rozvaha**

Patří mezi první úkony, které je nutné před samotnou výrobou započít. Jedná se o vypočítání potřebného množství komponent jako je matrice (pryskyřice + pojivo), výztuž, plniva a časový plán. Časový plán je důležitý nejen pro rozvržení výroby, ale i následně prováděných zkoušek a jejich vyhodnocení.

Výpočet potřebných komponent:

Bylo dohodnuto, že se budou vyrábět vzorky s šesti vrstvami skelné tkaniny, která má  $200 \text{ g/m}^2$ . Plnivo mělo být přidáváno v hmotnostním procentu a to v pěti, patnácti a dvaceti pěti hmotnostních procentech.

Hmotnostní zlomek je podíl hmotnostní složky k hmotnosti celé směsi tzn.:

$$w_a = \frac{m_a}{m_s}$$

$w_a$  = hmotnostní zlomek

$m_a$  = hmotnost látky

$m_s$  = hmotnost celé směsi

Hmotnostní procento je hmotnostní zlomek vyjádřený procentem:

$$w_a = \frac{m_a}{m_s} \cdot 100 [\%]$$

**Příklad výpočtu pro polymerní kompozit s 15 hm. % plniva:**

- skelná tkanina =  $200 \text{ g/m}^2$ ;
- vrstva =  $200 \times 300 \text{ mm} = (0,2 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}) \times 200 \text{ g} = 12 \text{ g} \times 6 \text{ vrstev} = 72 \text{ g} \times 1,4 = 100,8 \text{ g}$ ;
- 1,4 = bezpečnostní koeficient pro dostatek pryskyřice;
- 100,8 g = minimální množství pryskyřice.

Volím:

- matrice = 80 g;
- tužidlo = 32 g;
- $(80 + 32) = 112 \text{ g}$  pryskyřice s pojivem;
- + plnivo = 19,8 g.

Výpočet hmotnostního procenta:

$$w_a = \frac{19,8}{80 + 32 + 19,8} \cdot 100 [\%]$$

$w_a \equiv 15 \text{ hm. } \%$

(25 hm. % = 37,3 g)

(5 hm. % = 5,9 g)

Z důvodu množství alternativ, byl vypracován v programu Microsoft Excel systém pro výpočet, který automaticky po zadání základních údajů generoval potřebné hodnoty.

- **Příprava skelné tkaniny:**

Bylo nutné skelnou tkaninu rozměřit na potřebné části a poté nastříhat na požadované rozměry. Jedna vrstva měla rozměry 200 x 300 mm. Pro jednu zkušební řadu bylo potřeba celkem šest vrstev.



Obr. 17 Příprava skelné tkaniny



Obr. 18 Stříhání skelné tkaniny

- **Separace formy:**

Formu bylo potřeba nejprve očistit od nečistot a dále byla separovaná voskovým separátorem TR 104 třikrát po desetiminutových časových odstupech. Díky tomu se zaručilo bezproblémové odformování.

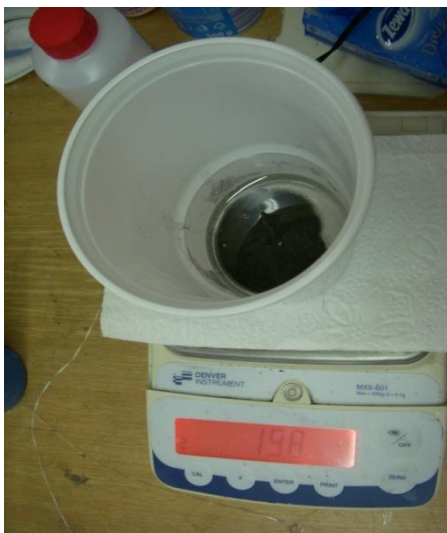


Obr. 19 Separace formy



- **Navazování komponent matrice:**

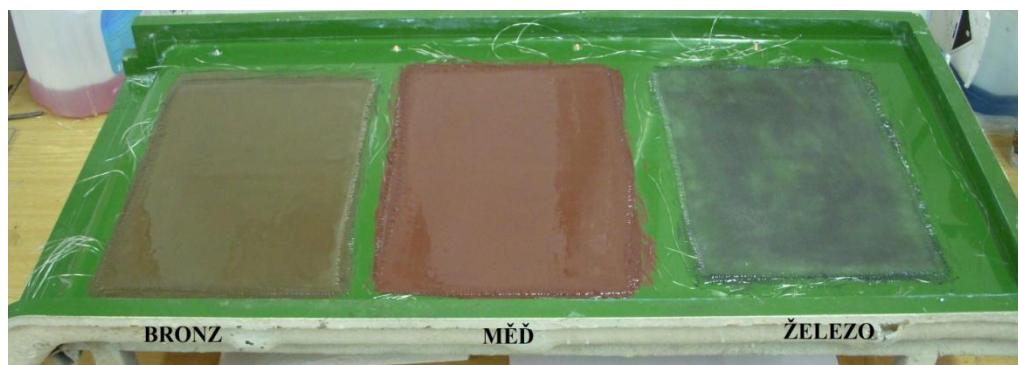
Nejprve se navažovala pryskyřice, do které se v potřebném množství přidal kovový prášek. Kovový prášek - plnivo se s pryskyřicí ručně promíchalo pomocí dřevěné špachtličky. Po rozmíchání se do složky přidalo tužidlo a proběhlo další promíchání všech tří složek. Promíchání proběhlo vždy před aplikací matrice na formu a výztuž. Cílem bylo mít stejnoměrně promíchanou matici.



Obr. 20 Navažování komponent

- **Pokládání jednotlivých vrstev:**

Jelikož byla zvolena operace pro výrobu zkušebních těles ručním kladením, tak po separaci a navázení potřebných komponent nastal čas pro pokládání jednotlivých vrstev. Před položením první vrstvy sklené tkaniny byla plocha formy štětcem natřena důkladně promíchanou maticí. Poté byla položena první vrstva sklené tkaniny a ta pomocí vytlačovacího válečku prosycena maticí. Tento postup se opakoval až do poslední šesté vrstvy.

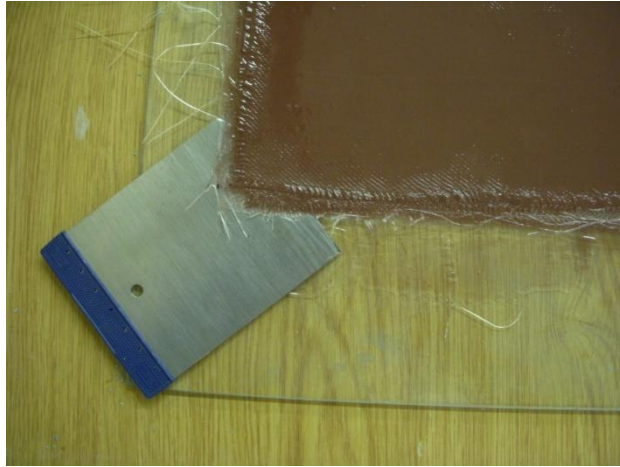


Obr. 21 Dokončená laminace



- **Odformování:**

Díky předchozí separaci formy probíhalo odformování bez problémů.



Obr. 22 Odformování polymerního kompozitu

- **Rozvržení zkušebních těles na kompozitu pro následné nařezání:**

Zvolené rozměry tkaniny byly dostačující pro rozvržení zkušebních těles pro všechny prováděné mechanické zkoušky.



Obr. 23 Rozvržení zkušebních těles

## 9 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Patří mezi nejčastější zkoušky materiálů. Chování materiálu při působení vnějších sil a porušení vzorků nám umožňuje zjistit mechanické vlastnosti. Zkoušky byly prováděny na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně.

### 9.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla prováděna na stroji ZWICK 1456. Tento stroj je vhodný pro statické zkoušky tahem pro různé typy materiálu, jako je např. plast, kov, vlákny zpevněný kompozit a další. Dále je na stroji možné provádět zkoušky tlakem, tří bodovým ohybem či cyklické zatěžování. Vyhodnocování výsledků provádí program testXpert, který je propojen se strojem. Program zapisuje, ale i vyhodnocuje a graficky zpracovává výsledky.

Tahová zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-4. Celkem bylo provedeno přes sedmdesát měření zkušebních vzorků. V každé sérii vzorků bylo vyhodnocování modulu pružnosti  $E$  [MPa], maximální dosažené napětí  $\sigma_m$  [MPa], poměrné prodloužení při maximálním napětí  $\varepsilon_{F_{\max}}$  [%], poměrné prodloužení při přetržení  $\varepsilon_B$  [%], maximální síla dosažená při přetržení  $F$  [N].



Obr. 24 ZWICK 1456



Obr. 25 Průběh tahové zkoušky

### 9.1.1 Stanovení tahových vlastností bez přídavku plniva

Tab. 1 Výsledky tahových vlastností bez přídavku plniva

Bez plniva	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
1	15900	323	5,3	8,1	11800	1,4	26,0
2	14000	327	3,0	8,4	11200	1,4	25,3
3	16000	323	2,7	7,8	11100	1,4	24,5
4	16000	293	2,4	7,3	9960	1,4	25,3
5	16800	311	2,6	7,6	10800	1,4	24,9
6	13700	262	2,6	7,5	10700	1,6	25,6
7	13700	280	2,7	7,7	10800	1,6	24,3
8	14200	258	2,4	7,4	9880	1,6	25,0
9	15400	261	2,3	7,3	10500	1,6	25,0
10	16000	263	2,2	7,7	10600	1,6	25,3
$\bar{x}$	15170,0	290,1	2,8	7,7	10734,0	1,5	25,1
s	1151,9	28,8	0,9	0,4	567,5	0,1	0,5
v	7,6	9,9	32,0	4,6	5,3	7,0	2,0

### 9.1.2 Stanovení tahových vlastností s přidavkem železného prášku

Tab. 2 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 5 hm. % železného prášku

Železo 5 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	13990	232,5	2,3	6,9	9338	1,6	25,4
s	765,1	12,9	0,2	0,4	485,5	0,0	0,6
v	5,5	5,5	7,5	5,2	5,2	0,0	2,3

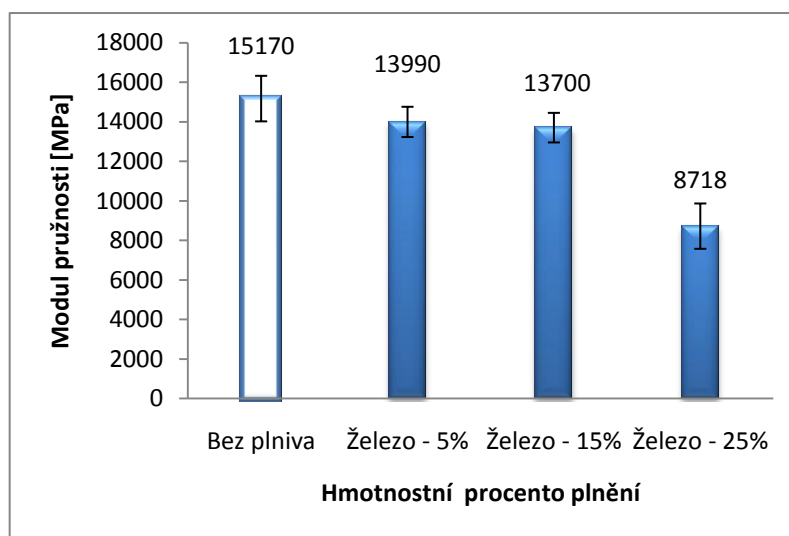
Tab. 3 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 15 hm. % železného prášku

Železo 15 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	13700	245,4	2,4	7,9	12930	2,0	25,8
s	748,3	12,3	0,3	0,4	452,2	0,1	0,4
v	5,5	5,0	11,4	4,9	3,5	5,4	1,7

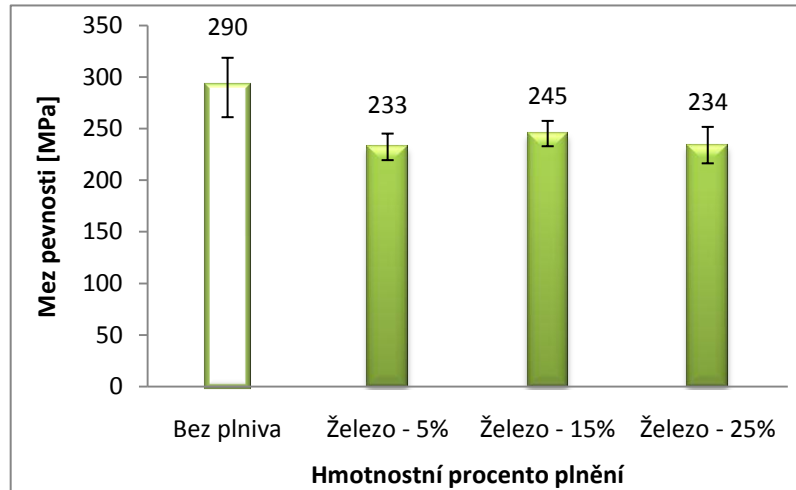
Tab. 4 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 25 hm. % železného prášku

Železo 25 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	8718	234,2	2,2	9,1	12880	2,0	28,0
s	1146,9	17,7	0,3	1,8	1110,0	0,0	1,0
v	13,2	7,6	12,5	19,6	8,6	1,5	3,7

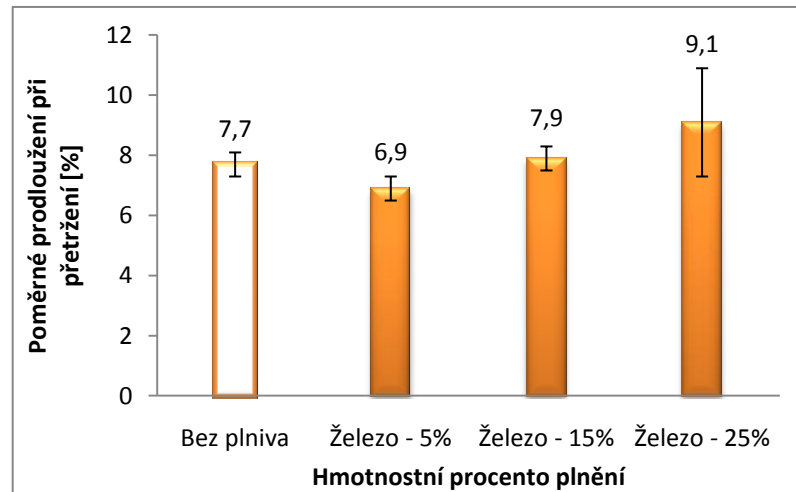
#### Grafické znázornění plnění s přidavkem železného prášku:



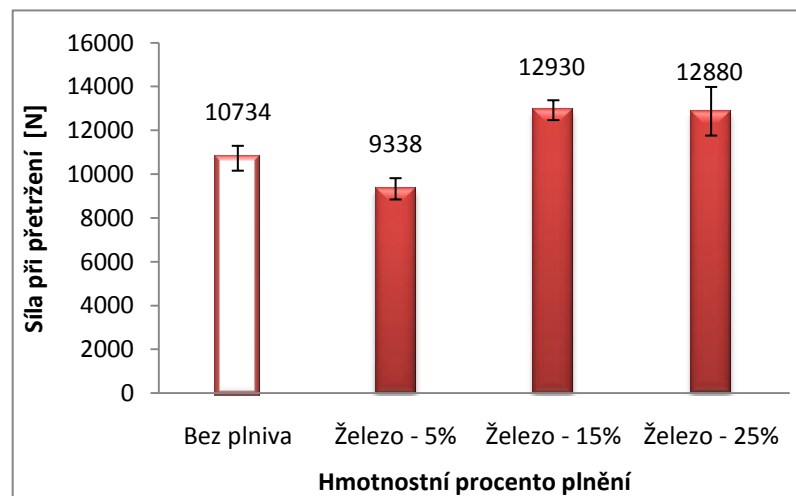
Obr. 26 Tah - (E) s přidavkem železného prášku



Obr. 27 Tah - ( $\sigma_m$ ) s přidavkem železného prášku



Obr. 28 Tah - ( $\epsilon_B$ ) s přidavkem železného prášku



Obr. 29 Tah - (F) s přidavkem železného prášku

### 9.1.3 Stanovení tahových vlastností s přidavkem měděného prášku

Tab. 5 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 5 hm. % měděného prášku

Měď' 5 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	14060	268,3	2,6	7,4	10460	1,6	24,4
s	685,1	9,2	0,1	0,2	320,4	0,0	0,6
v	4,9	3,4	4,6	3,1	3,1	0,0	2,4

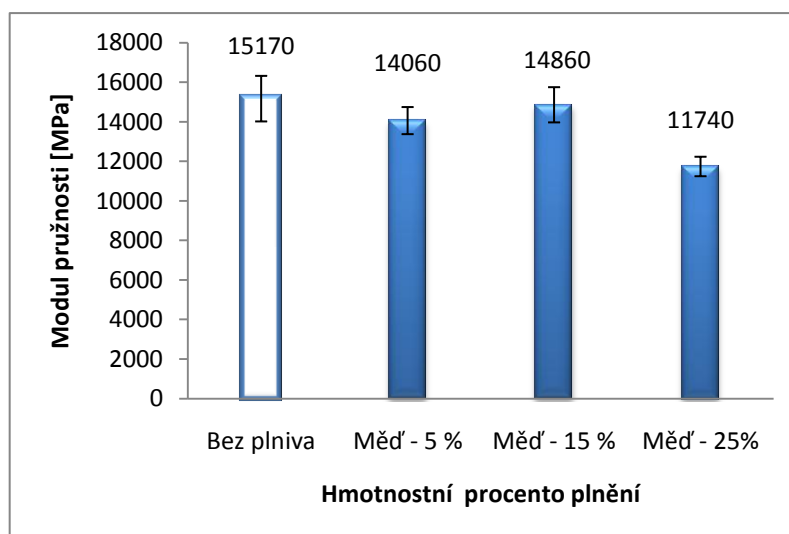
Tab. 6 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 15 hm. % měděného prášku

Měď' 15 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	14860	293,0	2,4	7,8	12660	1,7	25,9
s	890,5	33,9	0,2	0,4	550,5	0,1	0,6
v	6,0	11,6	7,8	4,7	4,3	5,4	2,3

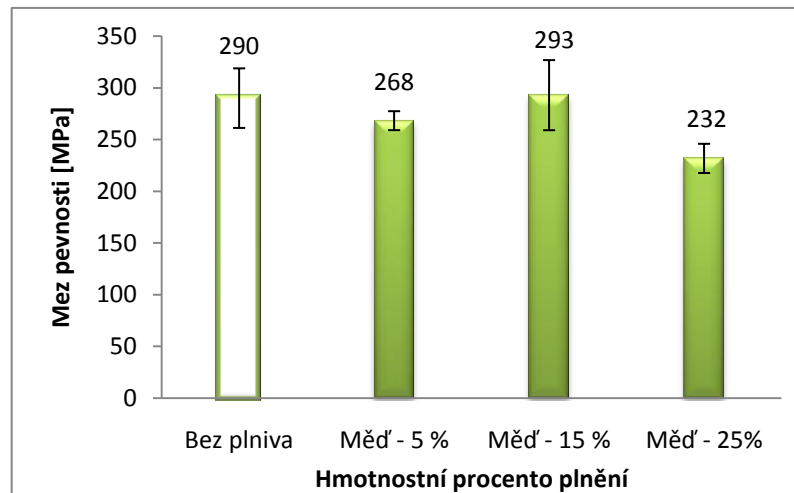
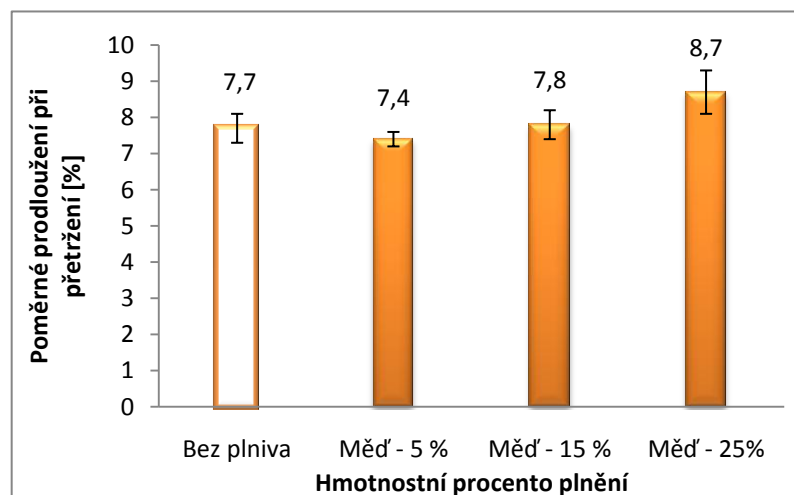
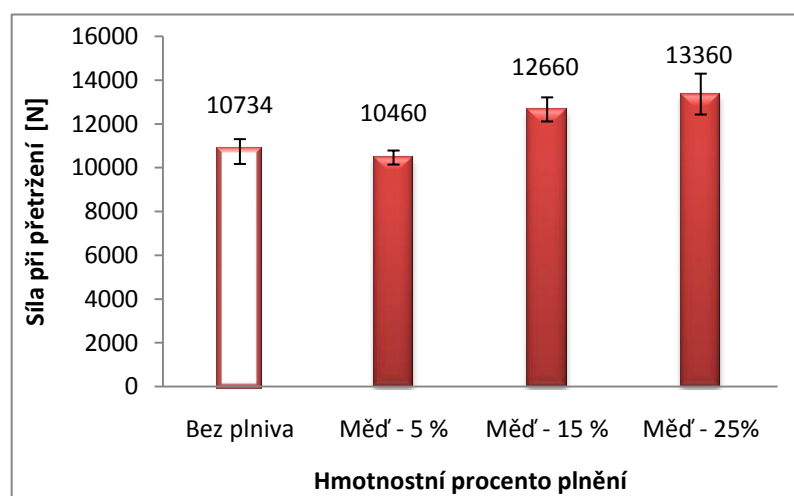
Tab. 7 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 25 hm. % měděného prášku

Měď' 25 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	11740	231,8	2,2	8,7	13360	2,1	28,6
s	493,0	14,1	0,1	0,6	934,3	0,1	0,3
v	4,2	6,1	6,0	7,2	7,0	3,5	1,0

#### Grafické znázornění plnění s přidavkem měděného prášku:



Obr. 30 Tah - (E) s přidavkem měděného prášku

Obr. 31 Tah - ( $\sigma_m$ ) s přidavkem měděného práškuObr. 32 Tah - ( $\epsilon_B$ ) s přidavkem měděného prášku

Obr. 33 Tah - (F) s přidavkem měděného prášku

### 9.1.4 Stanovení tahových vlastností s přidavkem bronzového prášku

Tab. 8 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 5 hm. % bronzového prášku

Bronz 5 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	13980	274,3	2,6	7,8	10770	1,6	24,7
s	336,0	11,7	0,1	0,3	612,9	0,0	0,7
v	2,4	4,3	4,9	4,3	5,7	0,0	2,7

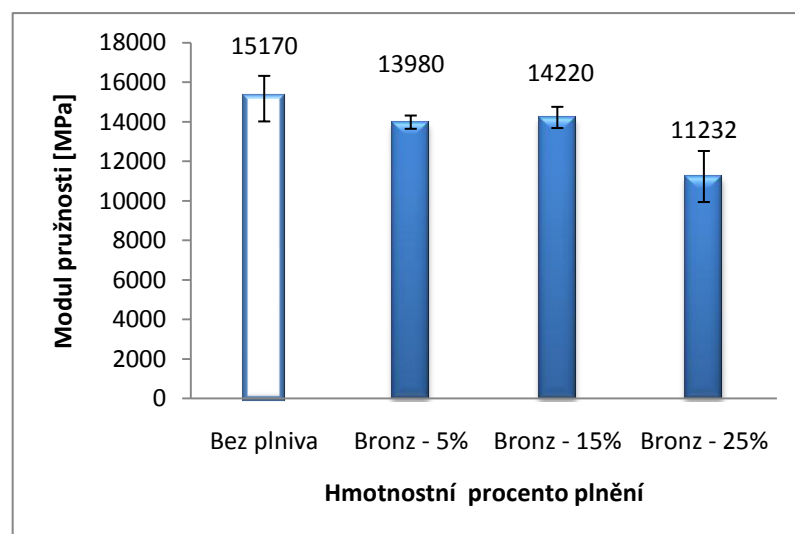
Tab. 9 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 15 hm. % bronzového prášku

Bronz 15 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	14220	287,8	2,6	8,2	13740	1,9	25,3
s	535,7	14,3	0,1	0,3	391,2	0,0	0,5
v	3,8	5,0	4,2	3,7	2,8	1,6	2,0

Tab. 10 Výsledky tahových vlastností s přidavkem 25 hm. % bronzového prášku

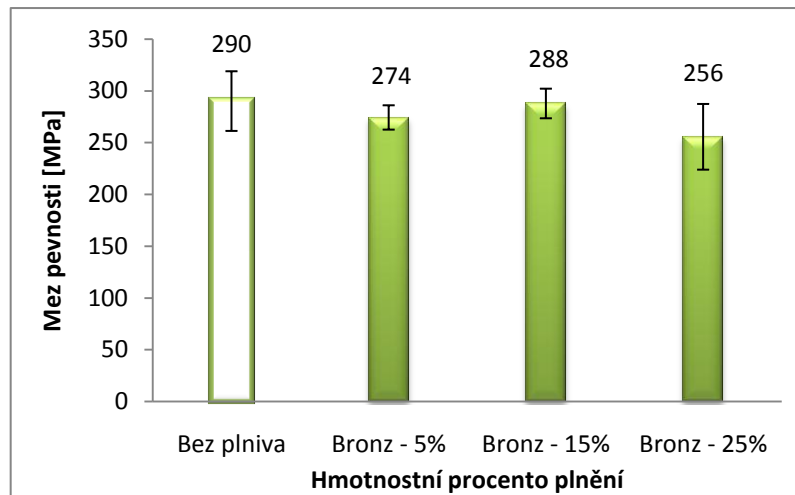
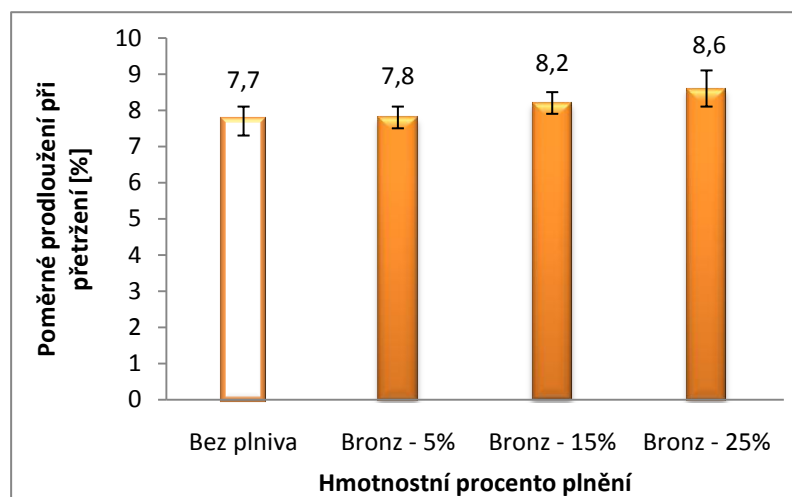
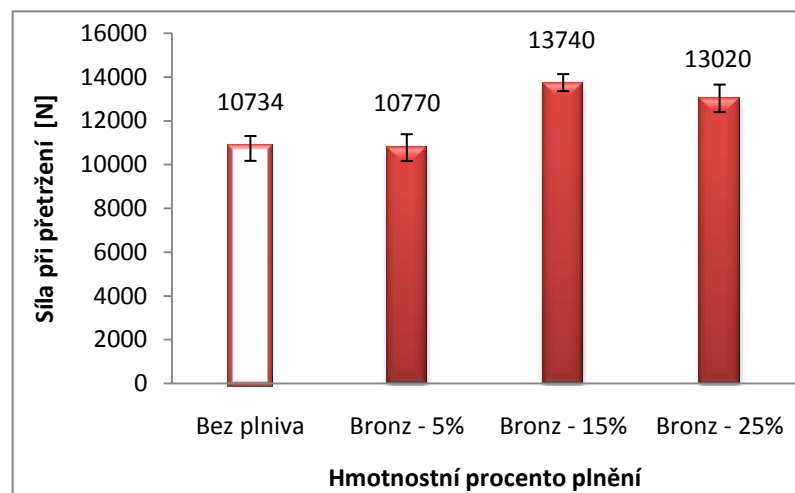
Bronz 15 %	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$\varepsilon_B$ [%]	F [N]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	11232	255,6	2,3	8,6	13020	1,8	28,3
s	1291,2	31,7	0,2	0,5	630,1	0,1	0,8
v	11,5	12,4	8,0	5,5	4,8	7,6	3,0

### Grafické znázornění plnění s přidavkem bronzového prášku:



Obr. 34 Tah - (E) s přidavkem bronzového prášku



Obr. 35 Tah - ( $\sigma_m$ ) s přidavkem bronzového práškuObr. 36 Tah - ( $\epsilon_B$ ) s přidavkem bronzového prášku

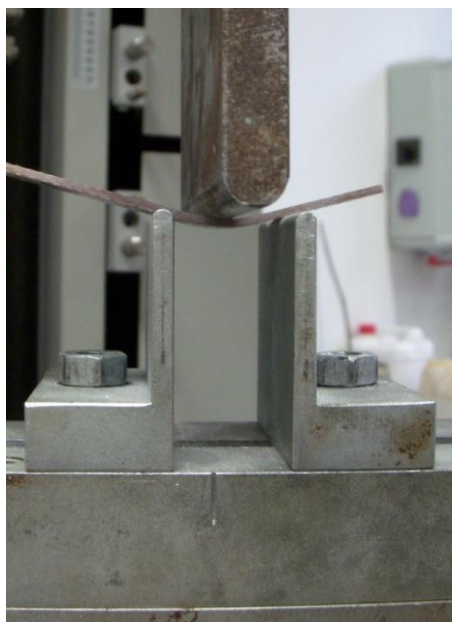
Obr. 37 Tah - (F) s přidavkem bronzového prášku

## 9.2 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška byla tříbodová. Zkouška se také prováděna na stroji ZWICK 1456. Stroj byl upraven od předchozí zkoušky nejen programově, ale i mechanicky. Ohybová zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 178. Vzdálenost podpor byl šestnáctinásobek tloušťky vzorku. U této zkoušky bylo provedeno taktéž přes sedmdesát měření zkušebních vzorků. V každé sérii vzorků bylo vyhodnocování modulu pružnosti  $E$  [MPa], maximální dosažené napětí v ohybu  $\sigma_m$  [MPa] a poměrné prodloužení při maximálním napětí  $\epsilon_{F_{max}}$  [%].



Obr. 38 Ohybová zkouška na stroji ZWICK 1456



Obr. 39 Ukázka ohybové zkoušky

### 9.2.1 Stanovení ohybových vlastností bez přídavku plniva

Tab. 11 Výsledky ohybových vlastností bez přídavku plniva

Bez plniva	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_{F_{max}}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	9567	336,5	4,3	1,6	15,8
s	1057,9	18,8	0,5	0,1	0,8
v	11,1	5,6	11,4	4,4	4,9

### 9.2.2 Stanovení ohybových vlastností s přídavkem železného prášku:

Tab. 12 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 5 hm. % železného prášku

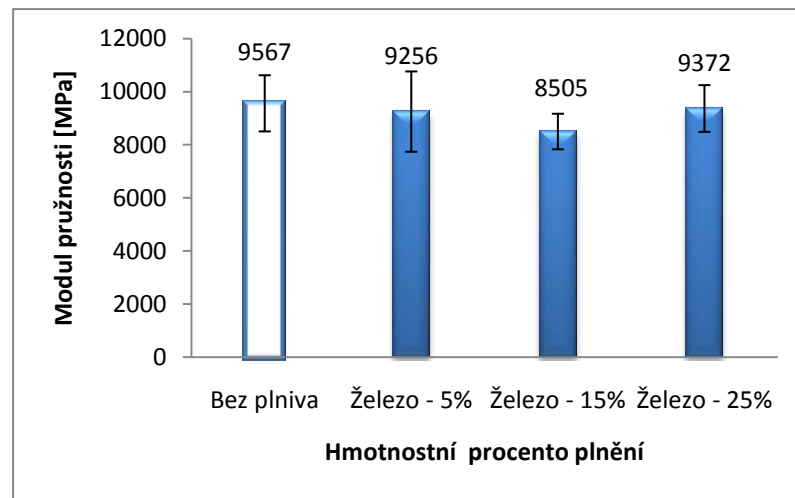
Železo 5%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_{F_{max}}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	9256	350,2	3,9	1,7	15,0
s	1511,4	51,6	0,2	0,2	0,6
v	16,3	14,7	4,3	9,1	3,9

Tab. 13 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 15 hm. % železného prášku

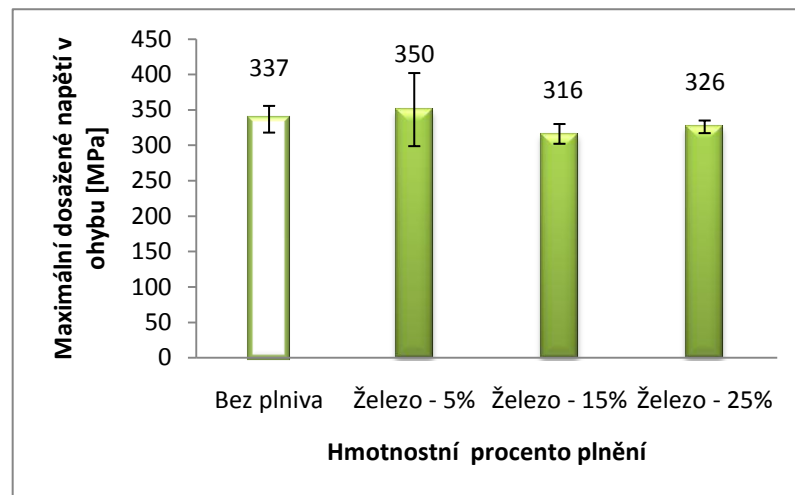
Železo 15%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_{F_{max}}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	8505	315,8	4,0	2,0	16,6
s	670,1	14,0	0,1	0,1	0,3
v	7,9	4,4	3,2	5,2	1,7

Tab. 14 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 25 hm. % železného prášku

Železo 25%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_{F_{max}}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	9372	325,8	3,9	1,9	18,1
s	879,7	8,9	0,1	0,1	0,4
v	9,4	2,7	2,3	6,9	2,0

**Grafické znázornění plnění s přidavkem železného prášku:**

Obr. 40 Ohyb - (E) s přidavkem železného prášku

Obr. 41 Ohyb - ( $\sigma_m$ ) s přidavkem železného prášku**9.2.3 Stanovení ohybových vlastností s přidavkem měděného prášku:**

Tab. 15 Výsledky ohybových vlastností s přidavkem 5 hm. % měděného prášku

Měď 5%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon F_{max}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	10034	356,6	4,0	1,6	15,6
s	891,0	15,1	0,3	0,0	0,4
v	8,9	4,2	7,0	2,1	2,4

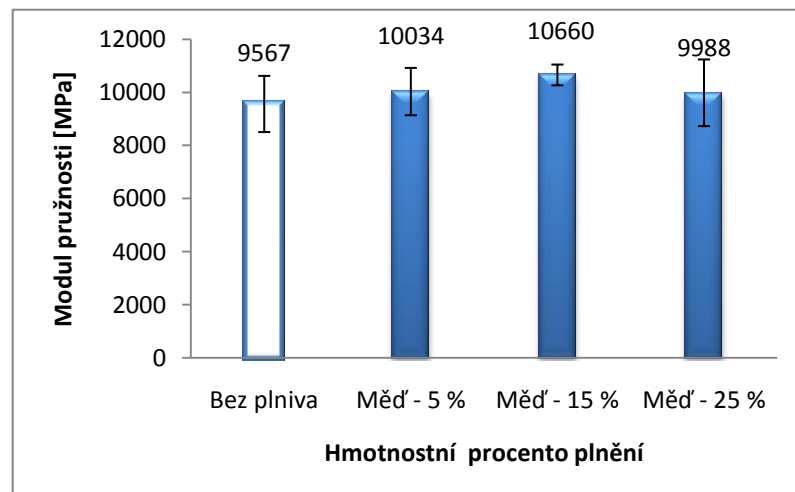
Tab. 16 Výsledky ohybových vlastností s přidavkem 15 hm. % měděného prášku

Měď' 15%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	10660	324,2	3,6	1,6	15,8
s	391,2	10,6	0,4	0,0	0,6
v	3,7	3,3	10,6	2,0	3,7

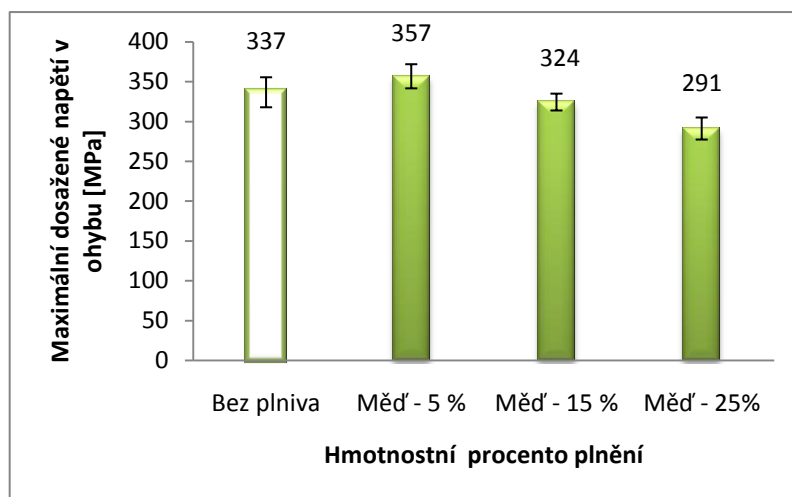
Tab. 17 Výsledky ohybových vlastností s přidavkem 25 hm. % měděného prášku

Měď' 25%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon F_{max}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	9988	291,0	3,4	1,9	18,3
s	1255,5	13,8	0,2	0,0	0,4
v	12,6	4,8	5,5	1,3	2,0

### Grafické znázornění plnění s přidavkem měděného prášku:



Obr. 42 Ohyb - (E) s přidavkem měděného prášku

Obr. 43 Ohyb - ( $\sigma_m$ ) s přidavkem měděného prášku

#### 9.2.4 Stanovení ohybových vlastností s přidavkem bronzového prášku:

Tab. 18 Výsledky ohybových vlastností s přidavkem 5 hm. % bronzového prášku

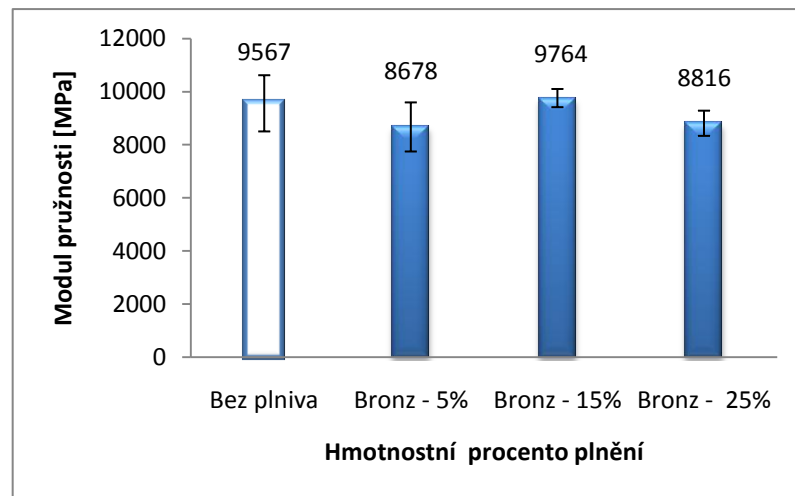
Bronz 5%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_{F_{max}}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	8678	352,0	4,2	1,6	15,2
s	923,6	15,5	0,3	0,0	0,7
v	10,6	4,4	8,2	2,4	4,3

Tab. 19 Výsledky ohybových vlastností s přidavkem 15 hm. % bronzového prášku

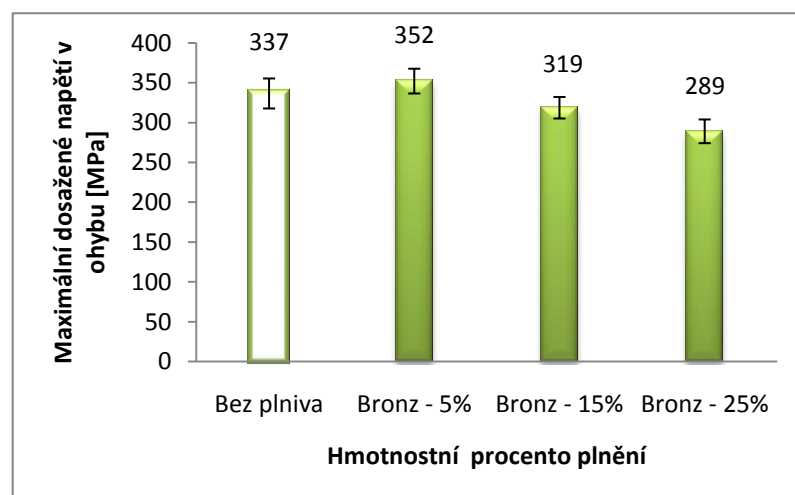
Bronz 15%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_{F_{max}}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	9764	318,6	3,7	1,8	15,7
s	342,4	13,5	0,3	0,0	0,9
v	3,5	4,2	7,9	2,6	5,7

Tab. 20 Výsledky ohybových vlastností s přidavkem 25 hm. % bronzového prášku

Bronz 25%	E [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_{F_{max}}$ [%]	$a_0$ [mm]	$b_0$ [mm]
$\bar{x}$	8816	289,0	3,4	1,9	18,1
s	474,6	14,9	0,3	0,1	0,5
v	5,4	5,1	7,9	7,8	2,8

**Grafické znázornění plnění s přidavkem bronzového prášku:**

Obr. 44 Ohyb - (E) s přidavkem bronzového prášku

Obr. 45 Ohyb - ( $\sigma_m$ ) s přidavkem bronzového prášku

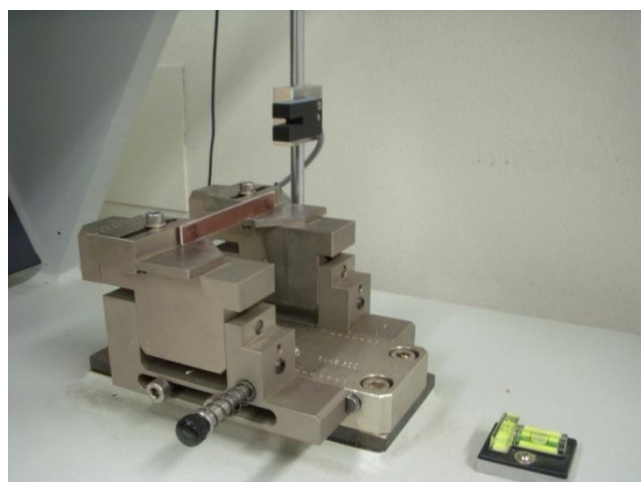
### 9.3 Rázová zkouška v ohybu

Podstata rázové zkoušky v ohybu je přeražení zkušebního tělesa. Charpyho rázové kladivo stanoví spotřebovanou práci k porušení zkušebního tělesa. Metoda Charpy je dle normy ČSN EN ISO 179. Pro rázovou zkoušku bylo zvoleno rázové kladivo CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR.

Stroj byl nastaven na požadované hodnoty a úhel závaží - kladiva pro přelomení polymerního kompozitu měl u všech zkušebních vzorků nastaven stejný výchozí úhel  $140^{\circ}$ . V každé sérii vzorků byla vyhodnocována síla potřebná k přerušení - zlomení vzorku  $F_m$  [N] a celková spotřebovaná práce  $A_b$  [ $\text{kJ/m}^2$ ].



Obr. 46 CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR



Obr. 47 Připravený vzorek pro rázovou zkoušku



### 9.3.1 Stanovení rázových vlastností bez přídavku plniva

Tab. 21 Výsledky rázových vlastností bez přídavku plniva

Bez plniva	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	299,5	147,5
s	25,6	11,7
v	8,5	7,9

### 9.3.2 Stanovení rázových vlastností s přídavkem železného prášku

Tab. 22 Výsledky rázových vlastností s přídavkem 5 hm. % železného prášku

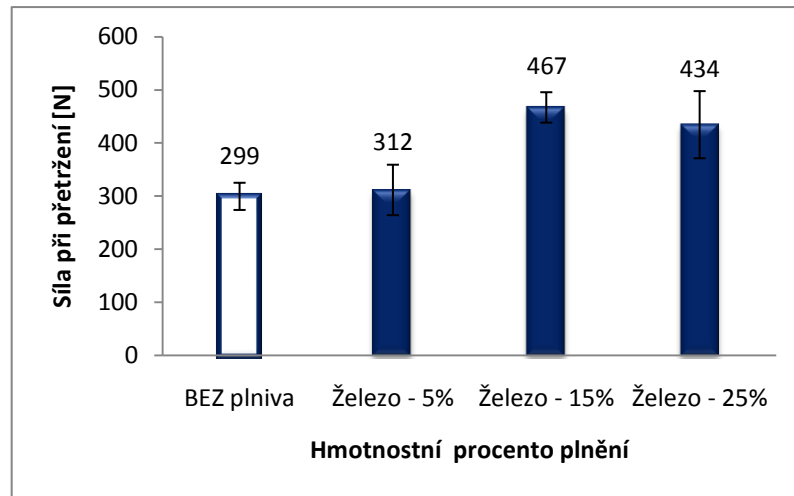
Železo 5 %	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	312	137,8
s	47,5	16,4
v	15,2	11,9

Tab. 23 Výsledky rázových vlastností s přídavkem 15 hm. % železného prášku

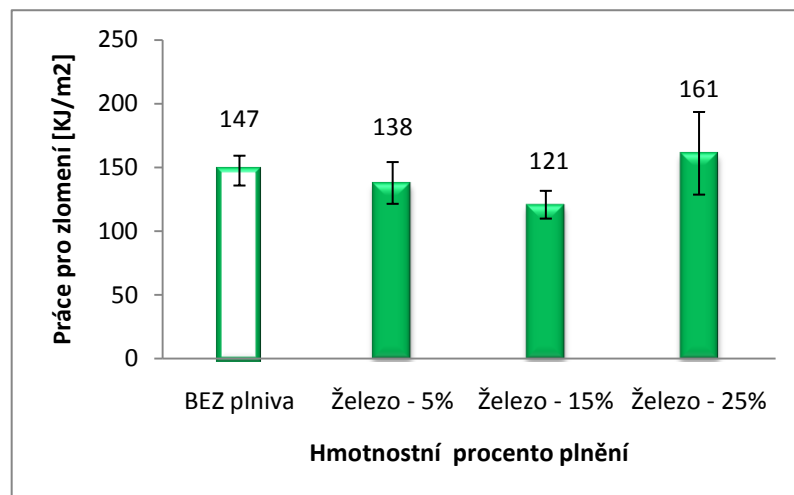
Železo 15 %	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	467	120,7
s	28,7	10,9
v	6,1	9,0

Tab. 24 Výsledky rázových vlastností s přídavkem 25 hm. % železného prášku

Železo 25 %	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	434	161,0
s	63,2	32,4
v	14,6	20,1

**Grafické znázornění plnění s přidavkem železného prášku:**

Obr. 48 Charpy - (Fm) s přidavkem železného prášku



Obr. 49 Charpy - (Ab) s přidavkem železného prášku

**9.3.3 Stanovení rázových vlastností s přidavkem měděného prášku**

Tab. 25 Výsledky rázových vlastností s přidavkem 5 hm. % měděného prášku

Měď 5 %	Fm [N]	Ab [kJ/m²]
$\bar{x}$	333	147,1
s	24,1	12,9
v	7,2	8,8

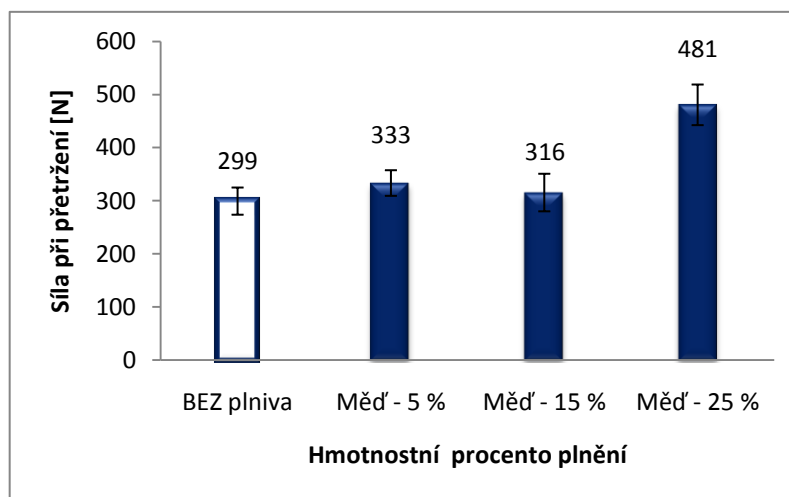
Tab. 26 Výsledky rázových vlastností s pří-  
davkem 15 hm. % měděného prášku

Měď' 15 %	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	316	107,5
s	35,4	7,7
v	11,2	7,2

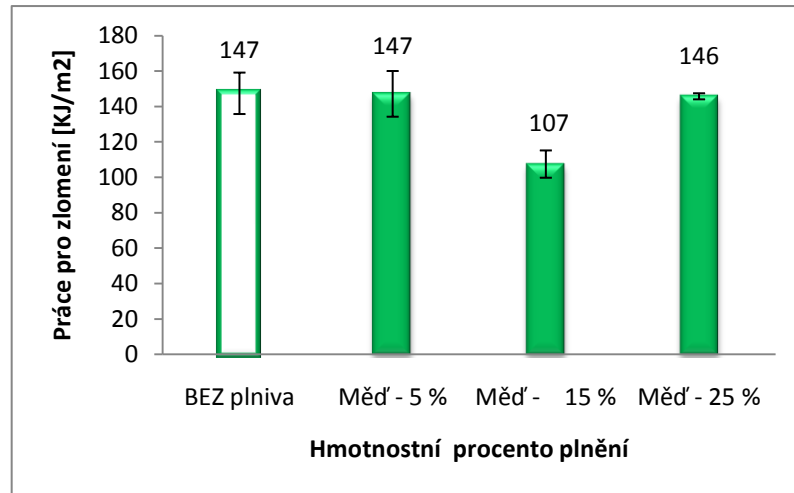
Tab. 27 Výsledky rázových vlastností s pří-  
davkem 25 hm. % měděného prášku

Měď' 25 %	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	481	145,8
s	38,2	1,7
v	8,0	1,2

**Grafické znázornění plnění s přidavkem měděného prášku:**



Obr. 50 Charpy - (Fm) s přidavkem měděného prášku



Obr. 51 Charpy - (Ab) s přidavkem měděného prášku

### 9.3.4 Stanovení rázových vlastností s přidavkem bronzového prášku

Tab. 28 Výsledky rázových vlastností s přidavkem 5 hm. % bronzového prášku

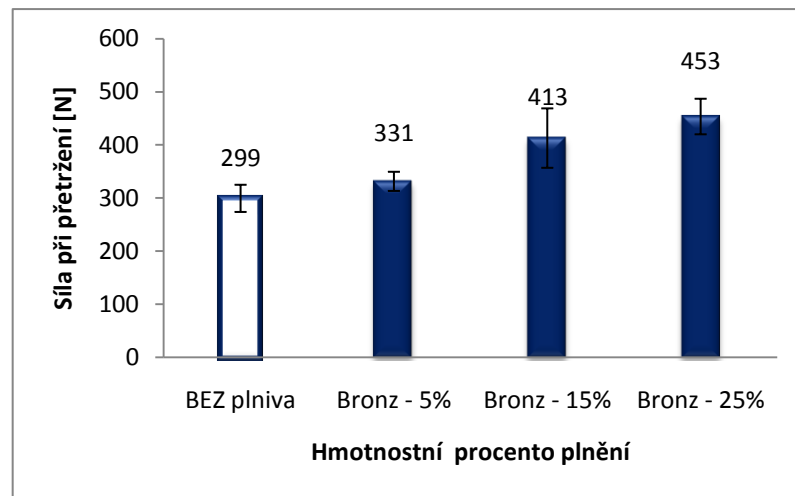
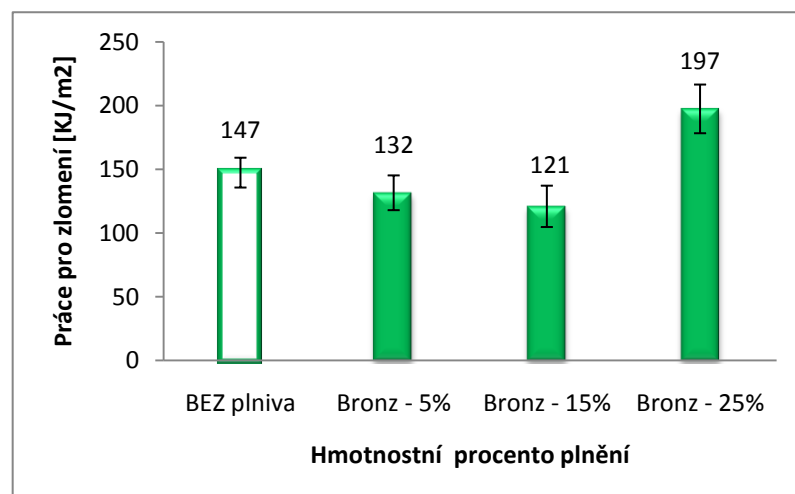
Bronz 5 %	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	331	131,6
s	18,0	13,6
v	5,4	10,4

Tab. 29 Výsledky rázových vlastností s přidavkem 15 hm. % bronzového prášku

Bronz 15 %	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	413	121,0
s	55,9	16,2
v	13,5	13,4

Tab. 30 Výsledky rázových vlastností s přidavkem 25 hm. % bronzového prášku

Bronz 15 %	Fm [N]	Ab [kJ/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	453	197,4
s	33,5	19,1
v	7,4	9,7

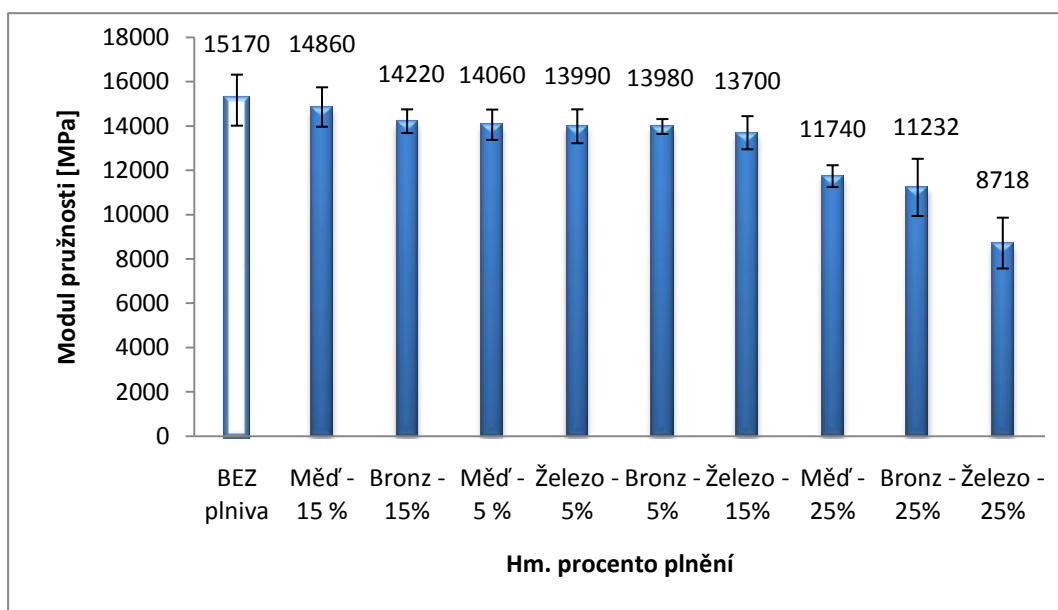
**Grafické znázornění plnění s přidavkem bronzového prášku:**Obr. 52 Charpy - ( $F_m$ ) s přidavkem bronzového práškuObr. 53 Charpy - ( $A_b$ ) s přidavkem bronzového prášku

## 10 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VZORKŮ A DISKUZE

### 10.1 Porovnání tahových vlastností

Porovnáním tahových vlastností všech vzorků bylo pozorováno, které plnivo a s jakým hmotnostním procentem má nejlepší vlastnosti v tahu.

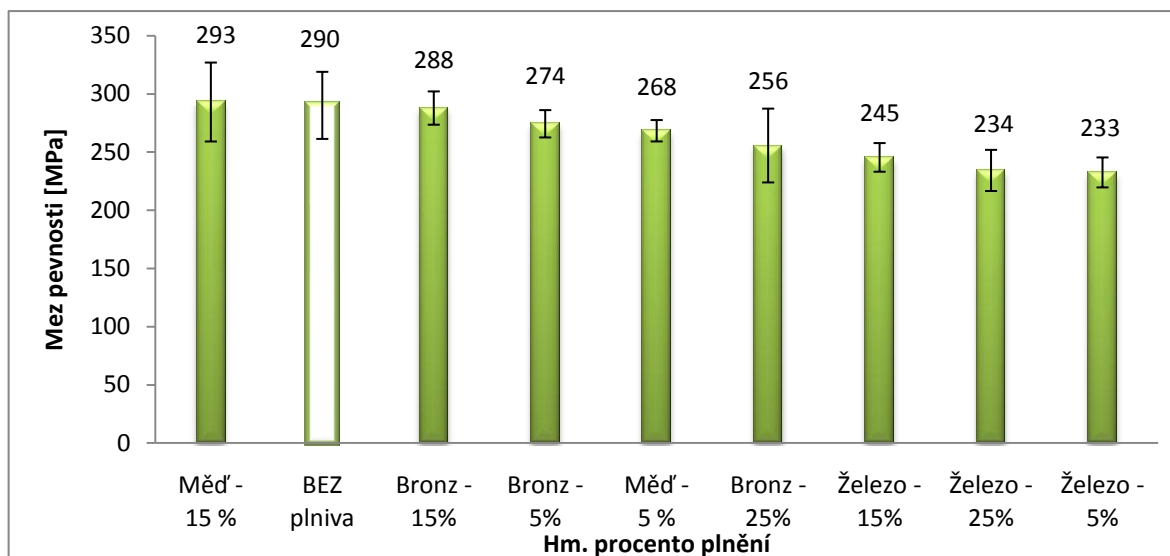
#### 10.1.1 Modul pružnosti v tahu



Tab. 31 Výsledky modulu pružnosti v tahu [MPa]

Z výsledků je patrné, že nejvyšší modul pružnosti má vzorek bez přídavku plniva. S různým přídavkem plniva a různým hmotnostním procentem plnění modul pružnosti klesá. V případě vzorku s přídavkem železného prášku s 25 hm. % plnění až téměř o polovinu. Nejblíže se nejvyšším výsledkům přibližuje vzorek s přídavkem měděného prášku s 15 hm. % plnění.

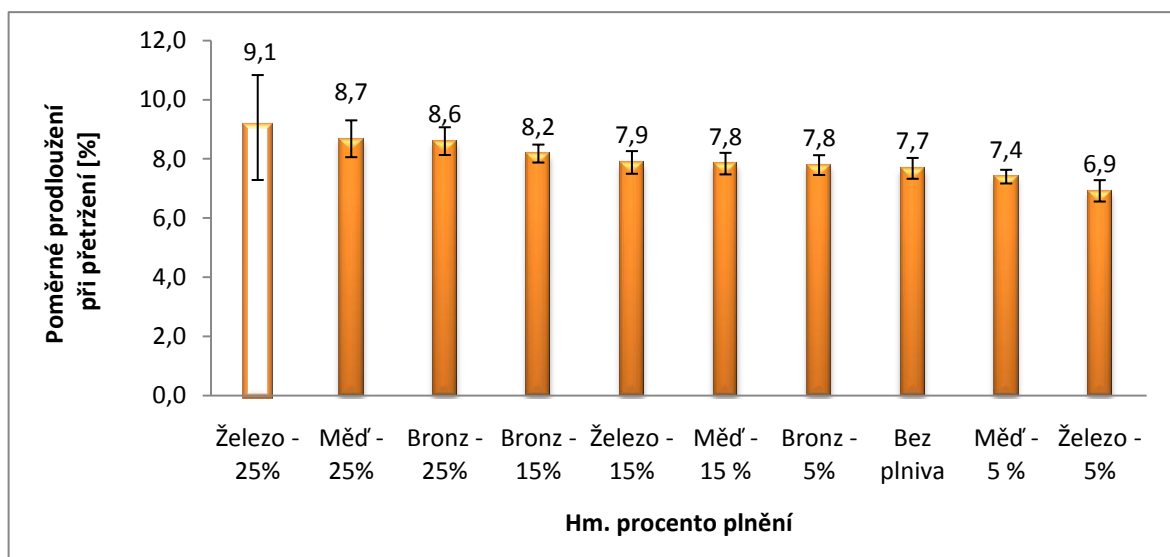
### 10.1.2 Mez pevnosti v tahu



Tab. 32 Výsledky meze pevnosti v tahu [MPa]

Nejvyšší hodnoty meze pevnosti má vzorek s přidavkem měděného prášku s 15 hm. % plnění. Velmi podobné hodnoty má však také vzorek bez přidavku plniva. S dalšími přidavky plniva a různým hmotnostním procentem plnění mez pevnosti lehce klesá. Nejnižší mez pevnosti má vzorek s obsahem železného prášku s 5 hm. % plnění a vzorek s železným práškem s 25 hm. % plnění.

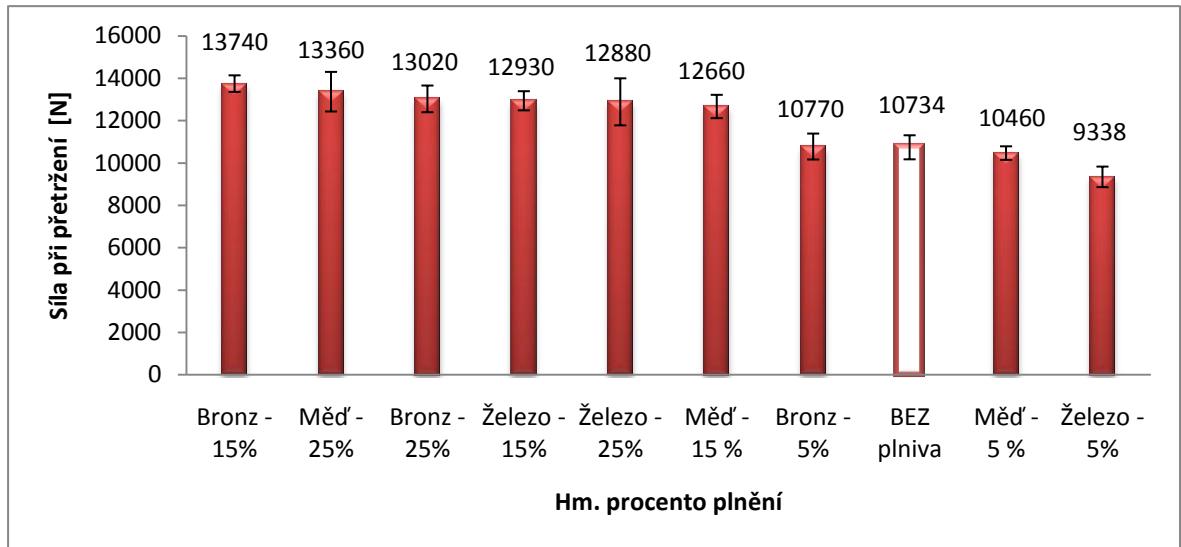
### 10.1.3 Poměrné prodloužení při přetržení



Obr. 54 Výsledky poměrného prodloužení při přetržení [%]

Vzorek s přidavkem železného prášku s 25 hm. % plnění dosahuje nejvyšší poměrné prodloužení. Naopak vzorek s přidavkem železného prášku s 5 hm. % plnění dosahuje nejnižších hodnot.

#### 10.1.4 Síla při přelomení



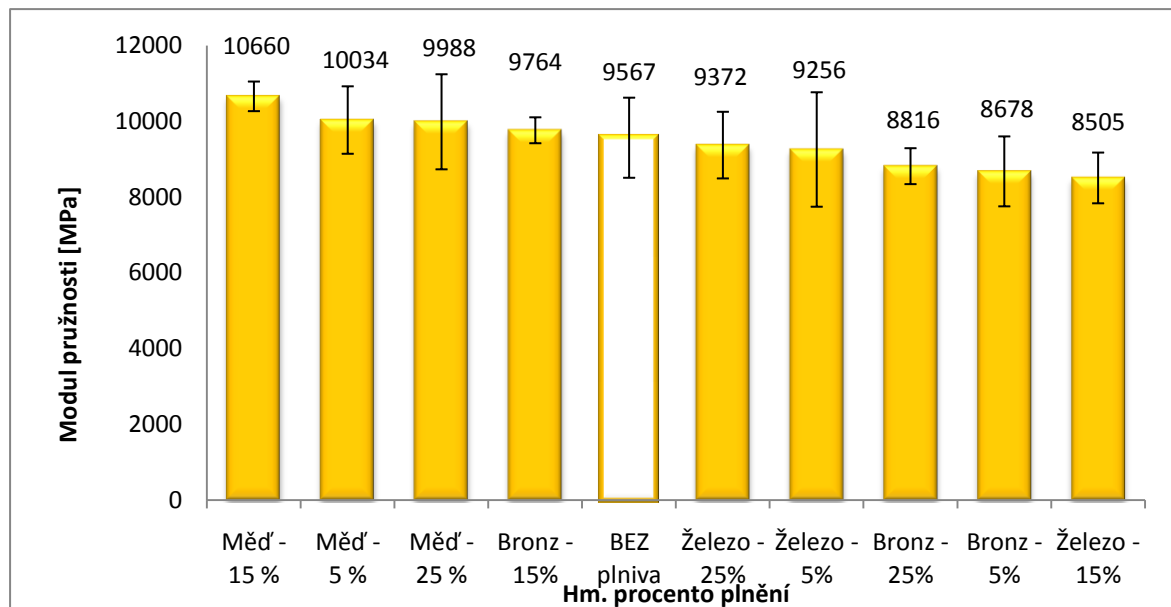
Tab. 33 Výsledky síly při přelomení

Nejmenší použitou sílu bylo potřeba k přelomení kompozitu s plněním železným práškem s 5 hm. % plnění. Naopak pro přelomení vzorku s plněním bronzovým práškem s 15 hm. % bylo potřeba nejvíce síly. V porovnání s kompozitem bez plniva o čtvrtinu více.



## 10.2 Porovnání ohybových vlastností

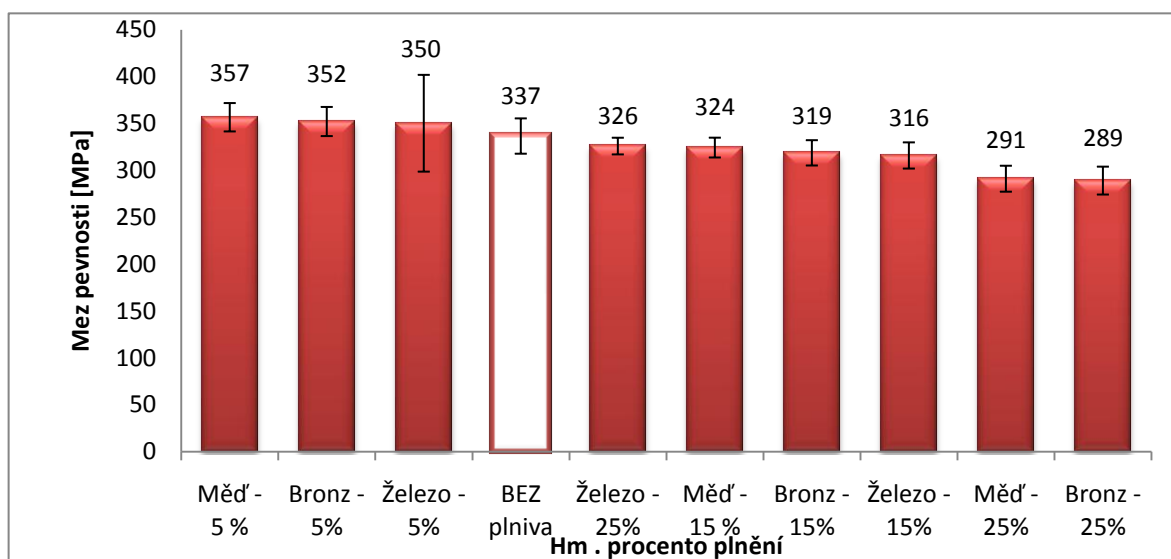
### 10.2.1 Modul pružnosti v ohybu



Tab. 34 Výsledky modulu pružnosti v ohybu [MPa]

V ohybu měly nejvyšší modul pružnosti kompozity plněné měděným práškem. Nejvyšší hodnoty měl kompozit s měděným práškem s 15 hm. % plnění. Naopak nejnižší hodnoty modulu pružnosti v ohybu měl vzorek s přidavkem železného prášku plněný 15 hm. %.

### 10.2.2 Mez pevnosti v ohybu

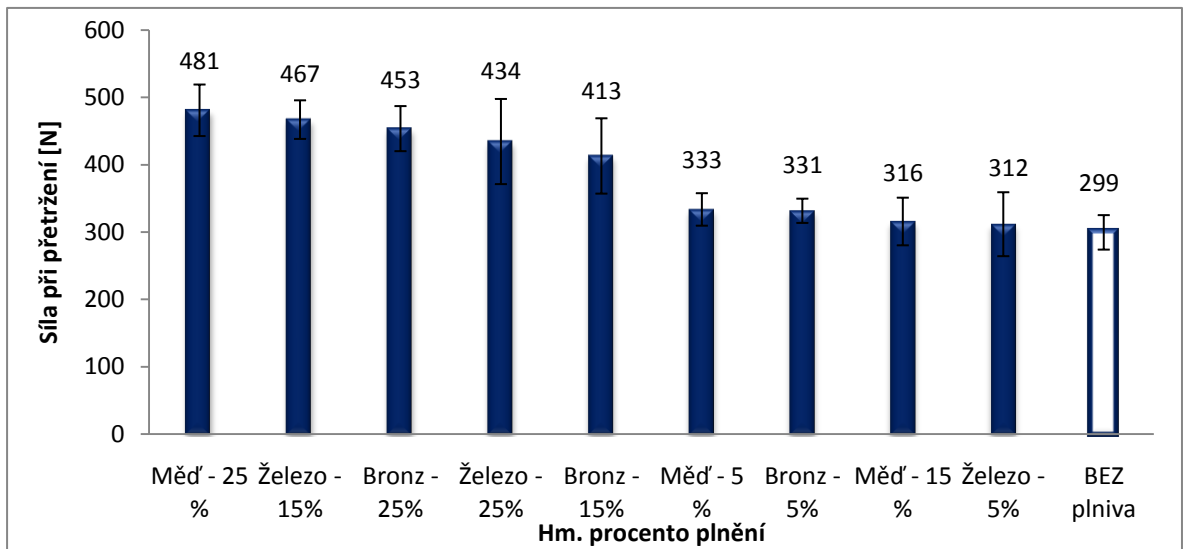


Tab. 35 Výsledky meze pevnosti v ohybu [MPa]

Mez pevnosti v ohybu byla velmi dobrá u kompozitu plněného měděným práškem s 5 hm. %. V porovnání s ostatními však nebyl velký rozdíl.

### 10.3 Porovnání rázových vlastností

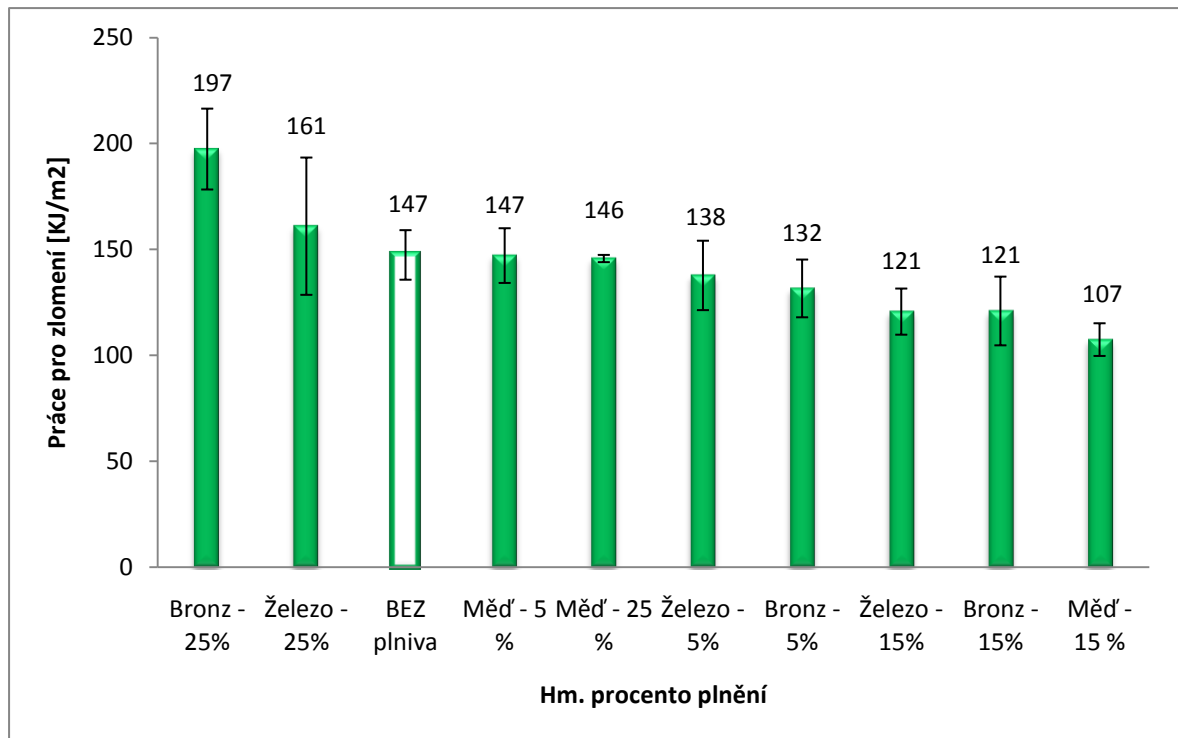
#### 10.3.1 Síla při přetržení v rázu



Tab. 36 Síla při přetržení [N]

U kompozitu plněného měděným práškem s 25 hm. % plnění bylo potřeba největší síly pro přerušení Charpyho kladivem. Nejnižší síla potřebná k přerušení zkušební vzorku byla u kompozitu bez plnění a s kompozity s nižším hmotnostním procentem plnění.

## 10.3.2 Celková vykonaná práce

Tab. 37 Práce pro přetržení [kJ/m<sup>2</sup>]

Nejvíce práce pro přerušení zkušebního tělesa bylo spotřebováno u kompozitu plněného bronzovým práškem s 25 hm. % plnění. Nejméně spotřebované práce bylo potřeba u kompozitu plněného měděným práškem s 15 hm. %.

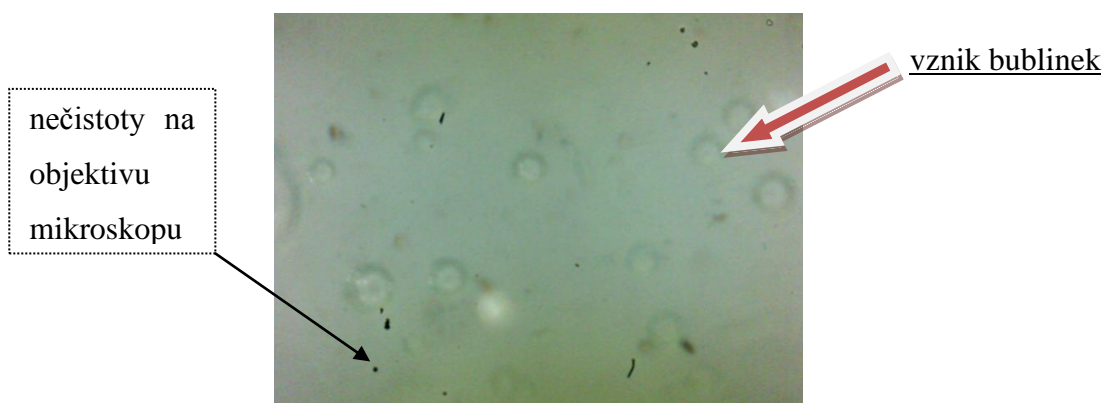
## 11 ROZLOŽENÍ ČÁSTIC PLNIVA V KOMPOZITU

Jednotlivé povrchy zkušebních vzorků byly po dokončení pozorovány digitálním mikroskopem ProScope HR, který je propojen přes USB s počítačem. Byly pořizovány snímky s třicetinásobným a čtyřicetkrát násobným zvětšením povrchu. Díky matrici, kterou tvořila epoxidová pryskyřice, bylo možné pozorovat i vnitřní uspořádání, jelikož je matrice transparentní. Toto pozorování vnitřní struktury jde však pouze do určitého hmotnostního procenta plnění. Na zvětšeném povrchu jsou viditelné nevýhody ručního laminování, kdy vznikají místa vzduchových kapes - bublinky.



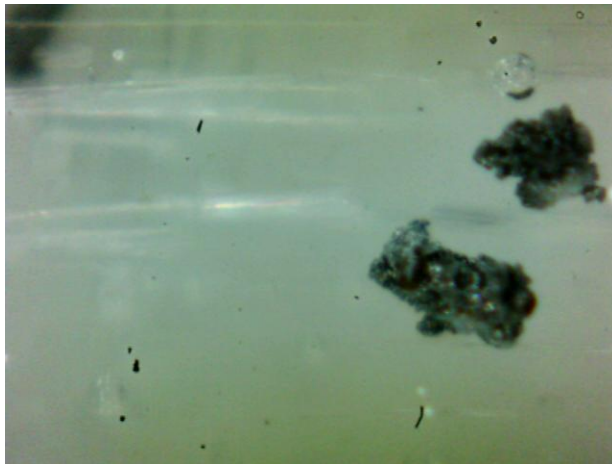
Obr. 55 ProScope HR

- Zvětšení povrchu (400 x) zkušebního vzorku bez plniva:

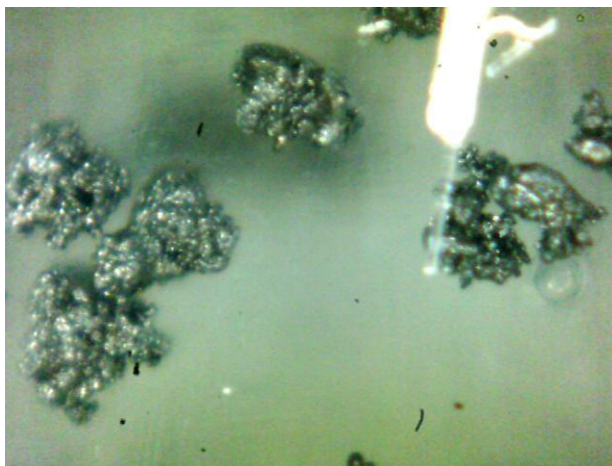


Obr. 56 Zkušební vzorek bez plniva

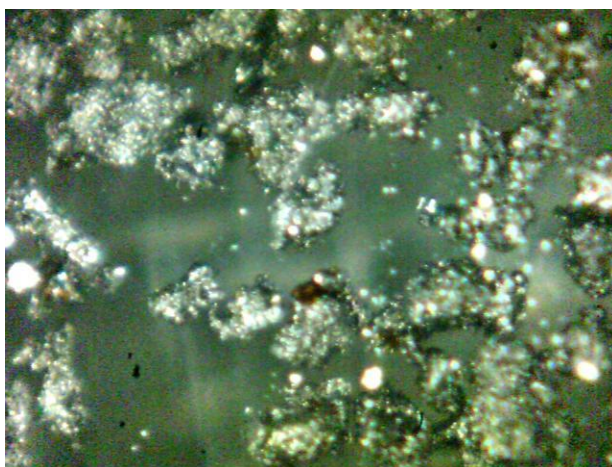
- Zvětšení povrchu (400 x) zkušebního vzorku s přidavkem železného prášku:



Obr. 57 Přídavek 5 hm. % železného prášku

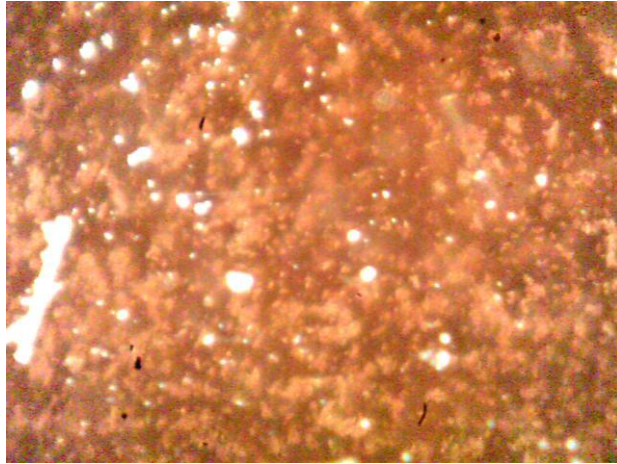


Obr. 58 Přídavek 15 hm. % železného prášku

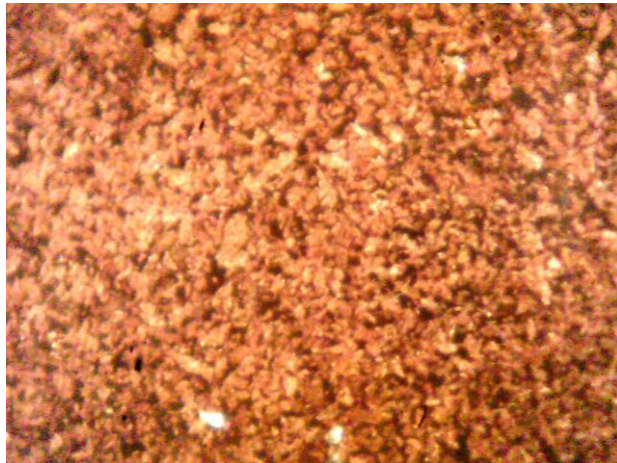


Obr. 59 Přídavek 25 hm. % železného prášku

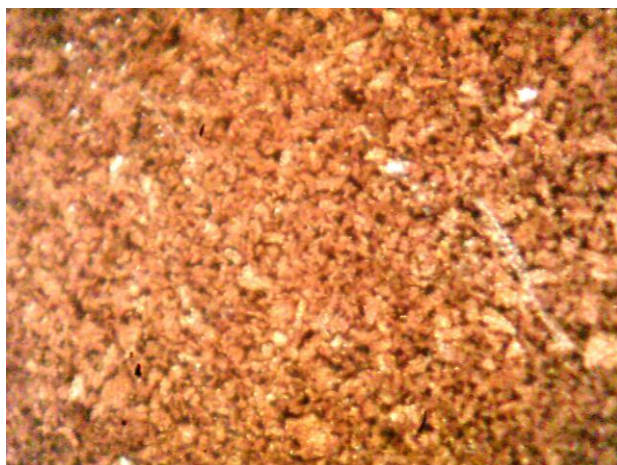
- Zvětšení povrchu (400 x) zkušebního vzorku s přidavkem měděného prášku:



Obr. 60 Přídavek 5 hm. % měděného prášku



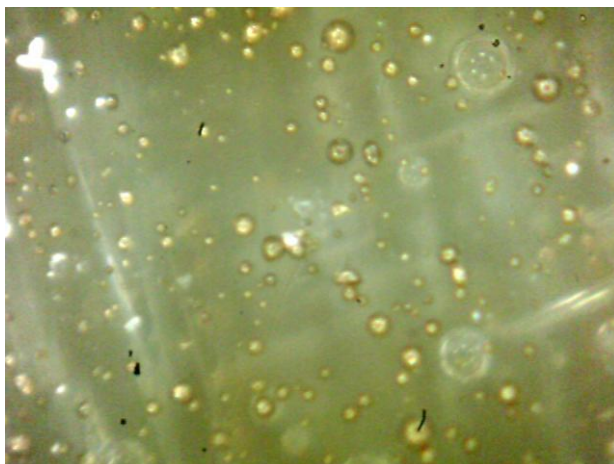
Obr. 61 Přídavek 15 hm. % měděného prášku



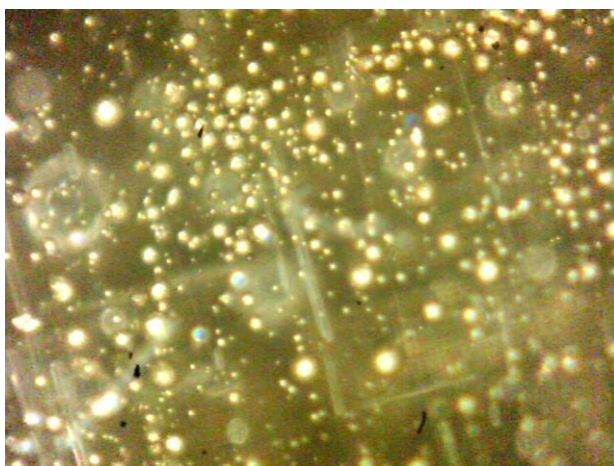
Obr. 62 Přídavek 25 hm. % měděného prášku



- Zvětšení povrchu (400 x) zkušební vzorku s přidavkem bronzového prášku:



Obr. 63 Přídavek 5 hm. % bronzového prášku



Obr. 64 Přídavek 15 hm. % bronzového prášku



Obr. 65 Přídavek 25 hm. % bronzového prášku

## ZÁVĚR

Polymerní kompozitní materiály mají v současné době velký vliv na nový rozvoj v dopravním průmyslu, kde se používají již několik desetiletí. Nejpoužívanějším typem výztuže byla skleněná vlákna v různém uspořádání. S nástupem nových typů vláken se značně zlepšily vlastnosti polymerních kompozitů. Příkladem mohou být uhlíková vlákna. Hlavní vlastností těchto vláken je nižší hmotnost a lepší mechanické vlastnosti.

Novým rozvojem v dopravním průmyslu je myšlen masivní nástup výroby dopravních prostředků s hybridním nebo elektrickým pohonem a potřeba snížení spotřeby paliva u stávajících pohonů. Snížení spotřeby paliva a tím provozních nákladů má velký význam zejména v letectví a kosmonautice.

Část dnes běžných konstrukčních materiálů bude v budoucnu nahrazena stále se rozvíjejícími polymerními kompozitními systémy. Tato doba se však bude odvíjet od postupného začleňování jednotlivých výrobků ve společnosti a právě velký vliv na to má dopravní průmysl, jelikož z rostoucí poptávkou potřeby pro výrobu, se bude tím více tvořit dodavatelů a výrobců, kteří vlastní výrobou a výzkumem urychlí nástup polymerních kompozitů v běžnou věc pro konstrukční a mnohé další odvětví.

Diplomová práce byla zaměřena na studii polymerních kompozitních systémů s přídavkem kovových plniv. Jednalo se o použití železného, měděného a bronzového prášku v různém hmotnostním procentu plnění. Cílem bylo navrhnout výrobu zkušebních vzorků a provést mechanické zkoušky v tahu, ohybu a rázu. Vyrobeny byly i zkušební vzorky bez přídavku plniva, které sloužily k porovnání s ostatními vzorky. Na základě provedení zkoušek bylo zjištěno, zda je vhodné použití některého z plniv s daným hmotnostním procentem plnění místo polymerního kompozitu bez plnění a tím možnost získání lepších mechanických vlastností.

Celkem bylo vyrobeno přes dvě stě deset zkušebních vzorků. Výztuží zkušebních vzorků byla skelná tkanina vazby keprové. Matici tvořila epoxidová pryskyřice L 285 s použitím tužidla H 285 a kovové prášky jako plniva v 5 hm. %, 15 hm. % a 25 hm. %.

Z vyhodnocení výsledků zkoušek v tahu je patrné, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti vykazaly dva typy vzorků, a to vzorky bez přídavku plniva a s plnivem měděného prášku s 15 hm. % plnění. Vzorky s přídavkem 25 hm. % plniva vykazovaly špatné vlastnosti s výjimkou vyhodnocení síly potřebné na přetržení, kdy vzorky



s 25 hm. % měly nejvyšší hodnoty. Ze souhrnu tahové zkoušky není tedy vhodné přidávat plnivo s 25 hm. %, a to jakéhokoliv z uvedených typů kovových prášků.

Výsledky ohybových zkoušek dopadly v porovnání s předchozí tahovou zkouškou výrazně lépe pro vzorky s přídavkem kovového plniva. Modul pružnosti v ohybu byl nejvyšší u vzorků s přídavkem měděného prášku, a to ve všech třech hmotnostních procentech plnění a až za vzorkem plněným bronzovým práškem s 15 hm. % plnění byl vzorek bez přídavku plniva. Za touto pomyslnou hranicí, kterou byl vzorek bez přídavku plniva, byly zbylé vzorky s přídavkem železného a bronzového prášku v různém hmotnostním procentu plnění. U meze pevnosti ohybu měly nejvyšší dosažené výsledky vzorky s přídavkem plniva s 5 hm. %.

Porovnáním výsledků z Charpyho rázové zkoušky ohybem je patrné, že největší síla pro přelomení je potřebná pro vzorky plněné s přídavkem plniva ve 25 hm. % a 15 hm. %. Vyjímku tvoří vzorek plněný měděným práškem s 15 hm. %, který vykazuje menší sílu potřebnou pro přelomení vzorku. Nejmenší potřebnou sílu pro přelomení potřebuje vzorek bez přídavku plniva. Nejvíce práce je potřeba pro přelomení vzorku s přídavkem 25 hm. % bronzového prášku.

V souhrnu porovnání prášků mezi sebou u různých typů zkoušek a výsledků jednotlivých měření je těžko určit jeden typ prášku a jeho hmotnostní procento plnění, které by nejvíc zlepšilo vlastnosti vzorku. Avšak u plniv s přídavkem 15 hm. % byly většinou hodnoty mechanických vlastností podobné jako u vzorků bez plniva, někdy i vyšší.

Velikost a tvar částic u jednotlivých typů kovových prášků byly rozdílné, jak je patrné z pozorování vzorků mikroskopem s čtyřistanásobným zvětšením. Lze pozorovat, že rozložení plniva bylo poměrně rovnoměrné a že při výrobě vzorků ručním laminováním není dokonale odstraněn z jednotlivých vrstev výztuže vzduch a vznikají bublinky. Vznik bublinek má negativní vliv na výsledky u mechanických zkoušek, proto je důležité při výrobě ručním laminováním dbát na pečlivost. I přesto, že byla práce při výrobě ručním laminováním pečlivá, nešlo se vyvarovat vzniku bublinek. Pro zamezení vzniku bublinek by se muselo použít jiné technologie výroby. Všechny vzorky jsem připravoval osobně a stejným postupem, proto lze jednotlivé vzorky mezi sebou porovnávat bez ohledu na vznik případných vzduchových bublinek a jejich negativní vliv na mechanické vlastnosti.

Výsledky naměřených zkoušek jasně dokazují, že použití kovového prášku ve vzorku jako plniva v určitých ohledech zlepšuje mechanické vlastnosti vzorku v porovnání se vzorkem

polymerního kompozitu bez přídavku plniva. Doporučil bych tedy se dále zabývat experimentálním zkoušením vlivu přídavku kovového prášku jako plniva na mechanické vlastnosti polymerního kompozitu.

Jako příklad pro další experimentální zkoušky bych navrhoval zvolit stejný typ skleněné výztuže, ale jiný druh vazby. Případně místo skleněné výztuže zvolit výztuž z uhlíkových vláken. Měděný a bronzový prášek bych jako plnivo zachoval, ale použitý typ železného prášku bych již nedoporučoval. Hmotnostní procento plnění bych volil do 20 hm. %, jelikož z výše naměřených výsledků je patrné, že u většiny vzorků se mechanické vlastnosti při plnění 25 hm. % zhoršovaly.

Z experimentálního studia vlivu vybraných kovových plniv na zvolené mechanické vlastnosti polymerních kompozitů s kovovým práškem lze konstatovat, že díky přídavku určitých kovových prášků do polymerního kompozitu se zlepší některé jeho mechanické vlastnosti. Takto upraveným polymerním kompozitem je možno v praxi nahradit polymerní kompozity stejného složení, ale bez přídavku plniva, které vykazují nižší mechanické vlastnosti.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [2] LAŠ, V. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 154 s. ISBN 80-704-3273-X
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [5] Kompozity. [online]. 2013 [cit. 2013-01-26]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zk-orinek>.
- [6] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*. Brno ÚCHM FCH VUT, 1999.
- [7] LIPTÁKOVÁ, T., P. ALEXY, E. GONDÁR a V. KHUNOVÁ. *Polymérne technické materiály: Vysokoškolská učebnica pre technické smery* [online]. 2009. vyd. [cit.2013-04-11]. Dostupné z: [http://kmi2.uniza.sk/wpcontent/uploads/2010/10/polymerne\\_konstrukcne\\_materialy.pdf](http://kmi2.uniza.sk/wpcontent/uploads/2010/10/polymerne_konstrukcne_materialy.pdf)
- [8] HAVEL-COMPOSITES [online]. [cit. 2013-01-26]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.-http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html> html
- [9] Improved mechanical properties of epoxy reinforced by low content nanodiamond powder. ScienceDirect [online]. [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509311007209>
- [10] Preparation and characterization of an epoxy nanocomposite toughened by a combination of thermoplastic, layered and particulate nano-fillers. *ScienceDirect* [online]. [cit.2013-02-11].Dostupné z www: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130691000049X>

- [11] Effect of particle shape of silica mineral on the properties of epoxy composites epoxy nanocomposite toughened by a combination of thermoplastic, layered and particulate nano-fillers. ScienceDirect [online]. [cit. 2013-02-11]. Dostupné z www: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635380700293Xce/article/pii/S026635380700293Xce/article/pii/S026130691000049X>
- [12] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [13] STREK, F. *Míchání a míchací zařízení: určeno [také] posl. vys. škol chemickotechnologických a chem. i potravní specializací strojních fakult*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 383 s.
- [14] Fichema. [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: [http://www.fichema.cz/kovove-prasky-zelezny-prasek-c-37\\_105\\_139.html](http://www.fichema.cz/kovove-prasky-zelezny-prasek-c-37_105_139.html)
- [15] Fichema. [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: [http://www.fichema.cz/kovove-prasky-medeny-prasek-c-37\\_105\\_121.html](http://www.fichema.cz/kovove-prasky-medeny-prasek-c-37_105_121.html)
- [16] Fichema. [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.fichema.cz/bronzovy-prasek-100g-mesh-325-44-mikronu-p-1003.html>
- [17] AOC: Composite Material Suppliers. [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.aoc-resinsuk.co.uk/section.php?xSec=53>
- [18] Dvořák R., *Kompozitní materiály v letectví*. MM Průmyslové spektrum. 2010, č.1, [online]. [cit. 2013-01-26]. Dostupné z www: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-materialy-v-letectvi.html>
- [19] Benešová D., *Změny v obrábění kompozitních materiálů*. MM Průmyslové spektrum. 2011, č.1, [online]. [cit. 2013-01-26]. Dostupné z www: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zmeny-v-obrazeni-kompozitnich-materialu.html>
- [20] Kořínek Z., *Kompozity* [online]. [cit. 2013-01-26]. Dostupné z www: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [21] HAVEL-COMPOSITES [online]. [cit. 2013-01-26]. Dostupné z www: <http://www.havel-composites.com/>

- [22] RUSNÁKOVÁ, S., ŽALUDEK M., BAKOŠOVÁ D., Processing engineering of large composites structures using low-pressure vacuum infusion. *Manufacturing Technology* [online]. 2012, vol. 12, iss. 12, s. 83-86. [cit. 2013-02-13]. ISSN 1213-2489.
- [23] LUKOVICS, I. *Konstrukční materiály a technologie*. 1. vyd. Brno: VUT. ISBN 80-214-0399-3.
- [24] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. UTB, Zlín, 2005. 112 s.
- [25] Mañas, M., Staňek, M., Mañas, D.: *Výrobní stroje a zařízení I. stroje gumárenské a plastikářské*. Zlín, UTB Zlín, 2007.
- [26] MLEZIVA, J. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.
- [27] KRATOCHVÍ B., ŠVORČÍK V., VOJTĚCH D., *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PS		polystyrén
PP		polypropylen
PE		polyetylén
PC		polykarbonát
PET		polyetylén tereftalát
EP-R		epoxidová pryskyřice
UP-R		nenasycená polyesterová pryskyřice
VE-R		vinylesterová pryskyřice
PF-R		fenolická pryskyřice
$w_a$		hmotnostní zlomek
$m_a$		hmotnost látky
$m_s$		hmotnost celé směsi
E	[MPa]	modul pružnosti
$\sigma_m$	[MPa]	maximální dosažené napětí
$\varepsilon_{F_{\max}}$	[%]	poměrné prodloužení při maximálním napětí
$\varepsilon_B$	[%]	poměrné prodloužení při přetržení
F	[N]	maximální síla dosažená při přetržení
F <sub>m</sub>	[N]	síla potřebná k porušení - přelomení vzorku
Ab	[kJ/m <sup>2</sup> ]	celková spotřebovaná práce
$a_0$	[mm]	střední tloušťka
$b_0$	[mm]	střední šířka
$\bar{x}$		aritmetický průměr
s		směrodatná odchylka
v		variační koeficient

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Rozdíl mezi termoplasty a termosety [3].....	13
Obr. 2. Složení polymerního kompozitu.....	14
Obr. 3. Výroba skleněných vláken tažením z trysek [3].....	19
Obr. 4 Druhy nejčastěji používaných skleněných vláken [4] .....	20
Obr. 5 Porovnání některých druhů vláken [1] .....	21
Obr. 6 Porovnání uhlíkových a skleněných vláken [3].....	22
Obr. 7 Nejdůležitější typy sklovláknitých výztuží [3].....	23
Obr. 8 Nejběžnější druhy vazeb vyztužujících tkanin [3] .....	23
Obr. 9 Tvar částic plniva.....	25
Obr. 10 Ruční kladení polymerního kompozitu .....	27
Obr. 11 Železný prášek [14] .....	31
Obr. 12 Měděný prášek [15] .....	32
Obr. 13 Bronzový prášek [16] .....	33
Obr. 14 Keprová vazba .....	33
Obr. 15 Skelná tkanina keprové vazby .....	34
Obr. 16 Separátor MR - TR 104 [17].....	34
Obr. 17 Příprava skelné tkaniny .....	37
Obr. 18 Stříhání skelné tkaniny .....	38
Obr. 19 Separace formy .....	38
Obr. 20 Navažování komponent .....	39
Obr. 21 Dokončená laminace.....	39
Obr. 22 Odformování polymerního kompozitu .....	40
Obr. 23 Rozvržení zkušebních těles .....	40
Obr. 24 ZWICK 1456 .....	41
Obr. 25 Průběh tahové zkoušky .....	42
Obr. 26 Tah - (E) s přídavkem železného prášku .....	43
Obr. 27 Tah - ( $\sigma_m$ ) s přídavkem železného prášku .....	44
Obr. 28 Tah - ( $\epsilon_B$ ) s přídavkem železného prášku .....	44
Obr. 29 Tah - (F) s přídavkem železného prášku .....	44
Obr. 30 Tah - (E) s přídavkem měděného prášku.....	45
Obr. 31 Tah - ( $\sigma_m$ ) s přídavkem měděného prášku.....	46
Obr. 32 Tah - ( $\epsilon_B$ ) s přídavkem měděného prášku.....	46

Obr. 33 Tah - (F) s přídavkem měděného prášku .....	46
Obr. 34 Tah - (E) s přídavkem bronzového prášku .....	47
Obr. 35 Tah - ( $\sigma_m$ ) s přídavkem bronzového prášku.....	48
Obr. 36 Tah - ( $\varepsilon_B$ ) s přídavkem bronzového prášku .....	48
Obr. 37 Tah - (F) s přídavkem bronzového prášku.....	48
Obr. 38 Ohybová zkouška na stroji ZWICK 1456 .....	49
Obr. 39 Ukázka ohybové zkoušky .....	49
Obr. 40 Ohyb - (E) s přídavkem železného prášku.....	51
Obr. 41 Ohyb - ( $\sigma_m$ ) s přídavkem železného prášku.....	51
Obr. 42 Ohyb - (E) s přídavkem měděného prášku .....	52
Obr. 43 Ohyb - ( $\sigma_m$ ) s přídavkem měděného prášku .....	53
Obr. 44 Ohyb - (E) s přídavkem bronzového prášku.....	54
Obr. 45 Ohyb - ( $\sigma_m$ ) s přídavkem bronzového prášku .....	54
Obr. 46 CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR.....	55
Obr. 47 Připravený vzorek pro rázovou zkoušku .....	55
Obr. 48 Charpy - (Fm) s přídavkem železného prášku.....	57
Obr. 49 Charpy - (Ab) s přídavkem železného prášku .....	57
Obr. 50 Charpy - (Fm) s přídavkem měděného prášku .....	58
Obr. 51 Charpy - (Ab) s přídavkem měděného prášku.....	59
Obr. 52 Charpy - (Fm) s přídavkem bronzového prášku .....	60
Obr. 53 Charpy - (Ab) s přídavkem bronzového prášku .....	60
Obr. 54 Výsledky poměrného prodloužení při přetržení [%] .....	62
Obr. 55 ProScope HR .....	67
Obr. 56 Zkušební vzorek bez plniva .....	67
Obr. 57 Přídavek 5 hm. % železného prášku .....	68
Obr. 58 Přídavek 15 hm. % železného prášku .....	68
Obr. 59 Přídavek 25 hm. % železného prášku .....	68
Obr. 60 Přídavek 5 hm. % měděného prášku .....	69
Obr. 61 Přídavek 15 hm. % měděného prášku .....	69
Obr. 62 Přídavek 25 hm. % měděného prášku .....	69
Obr. 63 Přídavek 5 hm. % bronzového prášku .....	70
Obr. 64 Přídavek 15 hm. % bronzového prášku .....	70
Obr. 65 Přídavek 25 hm. % bronzového prášku .....	70



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Výsledky tahových vlastností bez přídavku plniva .....	42
Tab. 2 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 5 hm. % železného prášku .....	43
Tab. 3 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 15 hm. % železného prášku .....	43
Tab. 4 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 25 hm. % železného prášku .....	43
Tab. 5 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 5 hm. % měděného prášku.....	45
Tab. 6 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 15 hm. % měděného prášku.....	45
Tab. 7 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 25 hm. % měděného prášku.....	45
Tab. 8 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 5 hm. % bronzového prášku .....	47
Tab. 9 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 15 hm. % bronzového prášku .....	47
Tab. 10 Výsledky tahových vlastností s přídavkem 25 hm. % bronzového prášku .....	47
Tab. 11 Výsledky ohybových vlastností bez přídavku plniva .....	50
Tab. 12 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 5 hm. % želez- .....	50
Tab. 13 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 15 hm. % želez- .....	50
Tab. 14 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 25 hm. % želez- .....	50
Tab. 15 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 5 hm. % mědě-.....	51
Tab. 16 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 15 hm. % mě- .....	52
Tab. 17 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 25 hm. % mě- .....	52
Tab. 18 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 5 hm. % bronz- .....	53
Tab. 19 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 15 hm. % bronz- .....	53
Tab. 20 Výsledky ohybových vlastností s přídavkem 25 hm. % bronz- .....	53
Tab. 21 Výsledky rázových vlastností bez .....	56
Tab. 22 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	56
Tab. 23 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	56
Tab. 24 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	56
Tab. 25 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	57
Tab. 26 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	58
Tab. 27 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	58
Tab. 28 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	59
Tab. 29 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	59
Tab. 30 Výsledky rázových vlastností s pří-.....	59
Tab. 31 Výsledky modulu pružnosti v tahu [MPa].....	61
Tab. 32 Výsledky meze pevnosti v tahu [MPa].....	62

---

Tab. 33 Výsledky síly při přelomení [N] .....	63
Tab. 34 Výsledky modulu pružnosti v ohybu [MPa].....	64
Tab. 35 Výsledky meze pevnosti v ohybu [MPa].....	64
Tab. 36 Síla při přetržení [N].....	65
Tab. 37 Práce pro přetržení [kJ/m <sup>2</sup> ] .....	66

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: Technický list laminační pryskyřice L 285

Příloha PII: Technický list tužidla 285

Příloha PII: Technický list separátoru TR 104

## PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285

### LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLA 285, 286, 287

#### Návod k použití, technické listy

##### Charakteristika

Schválení:	Německý federální úřad pro letectví
Použití:	výroba kluzáků, motorových kluzáků a motorových letadel, lodě a stavba lodí, sportovní nářadí, letecké modely, formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků bez výrazných změn jejich parametrů:	- 60 °C - > + 50-60 °C za temperování - 60 °C - > + 80-+ 100 °C po temperování
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 50 °C Všechny běžné metody zpracování
Zvláštní vlastnosti:	Extremně dobrá fyziologická kompatibilita Dobré mechanické a tepelné vlastnosti Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) od přibližně 45 minut do asi 5 hodin (závisí na použitém tužidle)
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: tixotropní tepelná úprava L 285 W: bílá

##### Použití

Systém laminační pryskyřice, schválený německým federálním úřadem pro letectví, má rozdílné doby zpracovatelnosti (v závislosti na použitém tužidle) pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Po tepelném vytvrzení při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větroně a motorové větroně (pracovní teplota - 60 °C až - 54 °C. Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C.

Rozmezí doby zpracovatelnosti (tzv. pot life) je mezi přibližně 45 min. a 5 h v závislosti na druhu tužidla. Tužidla mají stejný poměr míchání a mohou být míchány mezi sebou v jakémkoli poměru. Toto dovoluje výběr optimálního systému pro všechny metody zpracování. Po počátečním vytvrzení při pokojové teplotě jsou vyrobené komponenty opracovatelné a lze je vytáhnout z formy. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy, a to dokonce i při nepříznivých podmínkách při vytvrzování, tj. nižší teploty nebo vysoká vlhkost.

Viskozita směsi zaručuje rychlé a dokonalé prosycení vláken, nicméně, pryskyřice se

## PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285

nerozlije na tkanině na vertikálním povrchu. Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejrůznější plniva, např. aerosil, mikrobalony, bavlněné vločky, kovový prášek apod.

Pokud se nevyžaduje vysoká tepelná odolnost či letecké schválení, dá se tužidlo 285 použít bez následného temperování. Nicméně, uvedené vlastnosti získá pouze po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C.

### Použití

Laminační systém má hydrofilní charakter (vyšší absorpce vlhkosti, nižší odpor rozptylu páry). Proto neočekáváme žádné problémy kompatibility při jeho kombinaci s polyesterovými gelcoaty, rozmanitými barvami (např. na bázi PUR) atd. Bohužel však nemáme k dispozici testy těchto kombinací.

Od svého schválení v roce 1985 byl laminační systém L 285 používán téměř všemi výrobci letadel a kluzáků a - zvláště kvůli své extrémně dobré fyziologické kompatibilitě - je nejvíce užívaným systémem dnešního leteckého průmyslu. Často se stává, že pracovníci, kteří zaznamenali problémy s některými epoxidy (alergie či podráždění pokožky), jsou schopni zpracovávat laminační pryskyřici L 285.

Je nutno dodržovat příslušná bezpečnostní pokyny pro manipulaci s epoxidovými pryskyřicemi a tužidlo a naše instrukce pro bezpečné zpracování.

### Specifikace

		Laminační pryskyřice L 285
Hustota	g/cm <sup>3</sup> / 25 °C	1,18 - 1,23
Viskozita	mPas / 25 °C	600 - 900
Ekvivalent epoxidu	-	165 - 170
Hodnota epoxidu	-	0,59 - 0,65
Barva	Gardner	max 3

		Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Hustota	g/cm <sup>3</sup> / 25 °C	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozita	mPas / 25 °C	50 - 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo	mg KOH / G	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Barva	Gardner	max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

(\*) Vztahuje se pouze k průsvitnému tužidlu - tužidla mají průsvitně modrou barvu

## PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST TUŽIDLA 285

# LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE LH 160 TUŽIDLA 135 - 137, 285 - 287, 501 - 502 H 147

### Návod k použití, technické listy

Charakteristika Schválení:	---
Použití:	Stavba lodí Sportovní nářadí Letecké modely Formy a nástroje Lepidla Odlitky
Teplotní odolnost výrobku bez výrazných změn jejich parametrů:	- 60 °C - > + 50-60 °C (s H 300 do 80°C)
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 50 °C Všechny běžné metody zpracování
Zvláštní vlastnosti:	Dobré mechanické vlastnosti Doba zpracovatelnosti /tzv. pot life/ od přibližně 15 min. do asi 5 hodin

#### Systémy laminačních pryskyřic pro vytvrzování při pokojové teplotě

Pro vytvrzování při pokojové teplotě od 10 - 30 °C jsou k dispozici speciální kombinace laminačních pryskyřic. Tyto systémy byly upraveny takovým způsobem, že při pokojové teplotě zcela vytvrdnou a mohou být zpracovávány a používány bez následného tepelného vytvrzení.

Tepelná odolnost 40 - 60 °C lze dosáhnout vytvrzováním při pokojové teplotě /tzv. pravidlo palce: vytvrzovací teplota + 30 °C = maximální tepelná odolnost/. Tepelná odolnost některých systémů /tužidla 135 - 137 a H 300/ může být zvýšena na přibližně 80 °C postupným tepelným temperováním.

Mimo systémy popsané níže lze použít po vytvrzování při pokojové teplotě i další kombinace pryskyřice/tužidlo, které nemusejí splňovat zvláštní požadavky (letecký test apod.).

Příklady vhodné kombinace:

#### Laminační pryskyřice LH 160

Standardní pryskyřice nízké viskozity na bázi bisphenolu A. Viskozita: 700 - 900 mPas/25 °C. Při normálních skladovacích teplotách nedochází ke zkrystalizování.

#### Tužidla 135 - 137

Série tužidel s rozličnými dobami zpracování (od přibližně 25 minut do asi 5 hodin) pro zpracování při teplotách nad 18 °C.

Laminační pryskyřice L 285 s tužidlem 285 nebo laminační pryskyřice L 335 s tužidlem 335 / 340

## PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST TUŽIDLA 285

### Tužidla 285 – 287

Dobré vytvrzení je zajištěno od teplot +10°C. doba zpracovatelnosti je od cca 50 minut do asi 2 hodin. Při vytvrzení mezi 50 - 60°C po 3 hodiny, systém vyhovuje požadavkům pro motorová letadla. (tj. -60 - +80°C.)

### Tužidla 501 - 502

Jsou určena speciálně pro použití při nižších teplotách. Dobrého vytvrzení tohoto systému je dosaženo při teplotách od + 10 °C. Tepelná odolnost je nižší než u tužidel 135 - 137.

### Použití

Jedná se o systémy laminačních pryskyřic s nízkou viskozitou neobsahující rozpouštědla či plniva určená pro zpracování a vytvrzování při pokojové teplotě. Vhodná pro výrobu dílů vyztužených skleněnými, uhlíkovými a aramidovými vlákny. Jejimiž rysy jsou vysoká statická a dynamická pevnost.

Doba zpracovatelnosti v kelímku (tzv. pot life) se různí od přibližně 25 min do 5 hodin. Dokonce i při nepříznivých vytvrzovacích podmínkách, jako je nízká teplota či vysoká relativní vlhkost lze dosáhnout nelepivých povrchů s vysokým leskem. Viskozity směsí s laminační pryskyřicí LH 160 jsou velmi nízké, což je výhodné pro zpracování při nízkých teplotách nebo zvláštních metodách zpracování, např. vstříkávání apod.

Díky svým výborným přilnavým vlastnostem se tyto systémy rovněž dají použít jako adheziva pro dřevo, kov, sklo, beton a četné druhy plastů. Plniva (např. kovový prášek, prach, bavlněné vločky apod.) mohou být přimíchána pro dosažení speciálních vlastností systému.

Kvůli průtažnosti 4 - 7 %, což je výhodné při použití jako laminační pryskyřice, je pevnost ve stříhu a odolnost proti odlupu o něco nižší než u našich speciálních adhezivních pryskyřic.

		Laminační pryskyřice LH 160
Hustota	g/cm <sup>3</sup> / 25 °C	1,13 - 1,17
Viskozita	mPas / 25 °C	700 - 900
Epoxid.hmot.ekvivalent	g/mol	166 - 182
Epoxidový index	mol/1000 g	0,55 - 0,60
Barva	Gardner	max 3

### Tužidlo 135 – 137

Tužidlo 285 - 287

Tužidlo 501 - 502

Tužidlo H 147

### Specifikace

		Tužidlo 135	Tužidlo 136	Tužidlo 137
Hustota	g/cm <sup>3</sup> / 25 °C	0,98 - 1,07	0,94 - 0,98	0,94 - 0,98
Viskozita	mPas / 25 °C	50 - 150	20 - 100	10 - 50
Aminové číslo	mg KOH / g	450 - 500	450 - 500	450 - 500

## PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST TUŽIDLA 285

Barva	Gardner	max 4 (*)	max 4 (*)	max 4 (*)
		<b>Tužidlo 285</b>	<b>Tužidlo 286</b>	<b>Tužidlo 287</b>
Hustota	g/cm <sup>3</sup> / 25 °C	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozita	mPas / 25 °C	50 - 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo	mg KOH / g	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Barva	Gardner	max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

(\*) Vztahuje se pouze k transparentnímu tužidlu - tužidla mají transparentní modrou barvu

		<b>Tužidlo 501</b>	<b>Tužidlo 502</b>
Hustota	g/cm <sup>3</sup> / 25 °C	0,98 - 1,05	0,98 - 1,05
Viskozita	mPas / 25 °C	100 - 250	30 - 100
Aminové číslo	mg KOH / g	470 - 550	400 - 500
Barva	Gardner	max 4	max 4

		<b>Tužidlo H 147</b>
Hustota	g/cm <sup>3</sup> / 25 °C	
Viskozita	mPas / 25 °C	600
Aminové číslo	mg KOH / g	-
Barva	Gardner	

Podrobnosti pro zpracování

	<b>Pryskyřice LH 160</b>	<b>Tužidlo 135 - 137</b>	<b>Tužidlo 501 - 502</b>
Průměrná hodnota epoxidu	0,56	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	62	72
Skladování	> 12 měsíců v originálním obalu		
Teplota při zpracování	10 - 50 °C		
Vytvrzování	Vytvrzování při pokojové teplotě nebo vytvrzování ve formě při vysokých teplotách.		
Temperování	Není nezbytné - možno při 50 °C - > 150 °C		
	<b>Tužidlo 285 - 287</b>	<b>Tužidlo H 147</b>	
Průměrná hodnota epoxidu	-	-	
Průměrný ekvivalent aminu	64	-	
Skladování	> 12 měsíců v originálním obalu		
Teplota při zpracování	10 - 50 °C		



## PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST SEPARÁTORU TR 104

### TR 104 Separační vosk

#### **Popis výrobku:**

Tuhá vosková pasta na vyrobená z nejkvalitnějšího rafinovaného karnaubského vosku smíšeného s dalšími syntetickými vysoce tepelně odolnými materiály a organickými destiláty.

#### **Vlastnosti výrobku:**

- Lehké nanášení a pozdější odstraňování. Lze lehce vyleštit i po dlouhém času od nanesení na povrch formy
- Dává tvrdý film s vynikající tepelnou a chemickou odolností
- Lehké dosažení vysokého lesku povrchu bez matných míst

#### Fyzikální vlastnosti:

Doba zrání po nanesení: 5 -10 minut při 23 C  
Teplota měknutí: 88 - 98 C  
Barva: bledě modrá  
Tuhost: shodná s karnaubským voskem při 25 C

#### **Doporučené aplikace:**

Jako separační vosk na polyesterové, epoxidové, kovové a jiné formy s tvrdým povrchem. Vhodné pro použití do teplot nepřesahujících 90 C ve formě.

Na nové nebo opravené formy doporučujeme použít jako základní vrstvu plnič-leštič TR 301 před použitím vosků pro zlepšení separace, lesku a životnosti formy. Vosk nanášejte krouživým pohybem na povrch formy. Necháte vyzrát cca 5 minut a vyleštíte do finálního lesku. Pro nové nebo opravované formy dávejte minimálně 5 vrstev voskové pasty a po každém vyleštění necháte ještě vrstvu vyzrát po dobu 30 - 60 minut. Nejlepšího výsledku se dosahuje, jestliže po poslední nanesené a vyleštěné vrstvě se nechá voskový film vyzrát po dobu 10 a více hodin při pokojové teplotě.

Před vlastním použitím formy se nanese nová vosková vrstva, nechá vyzrát 30 - 60 minut a zařadí se do výrobního cyklu. Po odformování prvních 2 - 3 výrobků z nové formy je vhodné formu znovu převoskovat. Dále se forma již separuje podle potřeby, tak jak to vyžaduje technologický proces pro snadné odformování.

Informace zde uváděné jsou na základě testů. Každému uživateli je doporučeno provést si vlastní testy na jeho zamýšlené aplikace, protože není možno obsáhnout veškeré materiály a technologické podmínky při testech u výrobce tak, aby byly hodnověrné a precizované pro danou konkrétní výrobu.