



Analýza vlastností polymerních kompozitů se skleněnými a uhlíkovými vlákny v matrici PA

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Ondřej Černý**
Vedoucí práce: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Černý**
Osobní číslo: **S12000852**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Analýza vlastností polymerních kompozitů se skleněnými a uhlíkovými vlákny v matrici PA**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte literární rešerši kompozitních struktur s polymerní matricí z hlediska jejich užitných vlastností, typu matric a plniva.
2. Vstřikováním dle ČSN EN ISO 294-1 a ČSN EN ISO 1874-2 zhotovte zkušební tělesa kompozitních struktur na bázi polyamidové matrice, uhlíkových (CF) a skleněných (GF a LGF) vláken.
3. V souladu s mezinárodními standardy ČSN EN ISO 179-1, ČSN EN ISO 527 a ČSN EN ISO 178 stanovte mechanické vlastnosti kompozitních struktur při rázovém a statickém namáhání v tahu a ohybu.
4. Stanovte hustotu kompozitních struktur dle ČSN EN ISO 1183-1.
5. Naměřené výsledky diskutujte. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] **JANČÁŘ, Josef.** *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů: klasická a speciální.* 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
[2] **KAW, Autar K.** *Mechanics of composite materials.* 2nd ed. Boca Raton, Fl: Taylor Francis, 2006, 466 p. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fl.), v. 29. ISBN 0-8493-1343-0.
[3] **EHRENSTEIN, Gottfried W.** *Polymerní kompozitní materiály.* 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-296.
[4] **MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA.** *Nauka o materiálu.* 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
[5] Mezinárodní předpisy ČSN EN ISO.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Habr**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **2. března 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Analýza vlastností polymerních kompozitů se skleněnými a uhlíkovými vlákny v matrici PA

Analysis of the properties of polymer composites with glass and carbon fibers in a matrix of PA

Anotace:

Bakalářská práce se zabývá polymerními kompozity, používanými typy matrice a plniva ve formě vláken. V praktické části se zabývá porovnáváním fyzikálních a mechanických vlastností polymerních kompozitů vyztužených různým hmotnostním množstvím skleněných (GF) a uhlíkových (CF) vláken v polyamidové matrici.

Klíčová slova: polymerní kompozity, vyztužené polyamidy, skleněná vlákna, uhlíková vlákna

Annotation:

This bachelor thesis has described polymer composites and used types of matrix and dispersion in form of fibers. Practical part of this thesis deal with the physical and the mechanical properties of polymer composites, which are stiffened by different weight quantity of glass fibers (GF) and carbon fibers (CF), which is situated in polyamide matrix.

Key words: polymer composites, reinforced polyamides, glass fiber, carbon fiber

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 3. července 2015

.....

Ondřej Černý

Ohrazenice 247

511 01 Turnov

Poděkování

Na úvod bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lubošovi Běhálkovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Jiřímu Habrovi za jejich odborné vedení, poskytnutí veškerých rad, literatury, abych se mohl lépe orientovat v dané problematice při zpracovávání této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	7
1. Úvod	9
2. Teoretická část.....	10
2.1 Definice kompozitu.....	10
2.2 Dělení kompozitů.....	10
2.2.1 Kompozity s polymerní matricí.....	12
2.2.2 Kompozity s keramickou matricí.....	15
2.2.3 Kompozity s kovovou matricí.....	15
2.3 Složky kompozitu.....	16
2.3.1 Vláknitá plniva.....	16
2.3.2 Částicová plniva.....	22
2.3.3 Matrice	23
2.4 Mechanické vlastnosti polymerních kompozitů s vlákny	26
3. Experimentální část	27
3.1 Příprava zkušebních těles	27
3.2 Stanovení fyzikálních a mechanických vlastností kompozitů	31
3.2.1 Stanovení ohybových vlastností.....	32
3.2.1 Stanovení tahových vlastností	35
Stanovení meze pevnosti v tahu	36
Stanovení modulu pružnosti v tahu	38
Stanovení poměrného prodloužení na mezi pevnosti.....	39
Stanovení poměrného prodloužení při přetržení	40
3.2.2 Stanovení rázové houževnatosti Charpy	41
3.3 Stanovení hustoty	43
4. Vyhodnocení s diskuse výsledků.....	44
4.1 Vyhodnocení ohybových vlastností.....	44
4.2 Vyhodnocení tahových vlastností	46
4.2.1 Vyhodnocení naměřených hodnot meze pevnosti v tahu	46
4.2.2 Vyhodnocení naměřených hodnot modulu pružnosti v tahu	48
4.2.3 Vyhodnocení naměřených hodnot poměrného prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení	49
4.3 Vyhodnocení rázové houževnatosti Charpy.....	51
4.4 Vyhodnocení hustoty	52
5. Závěr.....	53
Použitá literatura	55

Seznam použitých symbolů a zkratek

CF	uhlíková vlákna
CMC	kompozit s keramickou maticí
GF	krátká skleněná vlákna
LGF	dlouhá skleněná vlákna
MMC	kompozit s kovovou maticí
PMC	kompozit s polymerní maticí
E_C	energie potřebná k přeražení zkušební vzorku [J]
E_f	modul pružnosti v ohybu [MPa]
E_{mm}	modul pružnosti v tahu matrice [MPa]
E_{nom}	nominální energie [J]
E_t	modul pružnosti v tahu [MPa]
E_{tf}	modul pružnosti v tahu vlákna [MPa]
L_0	počáteční délka zkušební tělesa [mm]
L_b	délka zkušební vzorku při přetržení [mm]
a_{cU}	rázová houževnatost Charpy [kJ/m^2]
b	šířka [mm]
h	výška [mm]
l	délka [mm]
$m_{S,A}$	zdánlivá hmotnost zkušební vzorku na vzduchu [g]
$m_{S,IL}$	zdánlivá hmotnost zkušební vzorku v imerzní kapalině [g]
v	rychlost zkoušení [m/s]
ΔL_m	změna počáteční vzdálenosti zkušební vzorku na mezi pevnosti [mm]
ε_b	poměrné prodloužení při přetržení v tahu [%]
ε_{bf}	poměrné prodloužení při přetržení vlákna [%]
ε_f	poměrné prodloužení při zatížení ohybem [%]
ε_m	poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu [%]
ε_{mm}	poměrné prodloužení při přetržení matrice [%]
ρ	hustota [kg/m^3]
ρ_f	hustota vlákna [kg/m^3]
ρ_{IL}	hustota imerzní kapaliny [kg/m^3]
ρ_m	hustota matrice [kg/m^3]
ρ_S	hustota zkušební vzorku [kg/m^3]

σ_f	napětí v ohybu [MPa]
σ_{fM}	napětí na mezi pevnosti v ohybu [MPa]
σ_m	napětí na mezi pevnosti v tahu [MPa]
σ_{mf}	napětí na mezi pevnosti vlákna [MPa]
σ_{mm}	napětí na mezi pevnosti matrice [MPa]
φ	objemové procento [-]
ψ	hmotnostní procento [-]
MMT	jíl montmorillonit
PA	polyamid
PA 6	polyhexanlaktam
PA 66	polyhexamethylenadipamid
PAN	polyakrylonitril
PAI	polyamidoimid
PBT	polybutylentereftalát
PE	polyethylen
PET	polyester
PC	polykarbonát
PP	polypropylén
PS	polystyren
PVC	polyvinylchlorid
UP	polyesterové pryskyřice
$Al_2 O_3$	oxid hlinitý
Mg O	oxid hořečnatý
Si C	karbid křemíku
$Si_3 N_4$	nitrid křemičitý
Zr O ₂	oxid zirkoničitý

1 Úvod

Strojírenství pracuje s materiály, ze kterých se skládají jednotlivé strojní zařízení a celé stroje. Dříve byly pro tyto účely nejvíce využívány oceli a slitiny kovů. Požadavek na nízkou hmotnost výrobku však narůstal a v konstrukcích se začaly častěji využívat plasty, které se stále více prosazují jako konstrukční materiál a stávají se nepostradatelným materiálem v technologických aplikacích.

Polymerní materiály umožňují sice rozmanitou možnost výrobků, avšak nedosahují tak dobrých mechanických vlastností na rozdíl od polymerních kompozitů, které vynikají výjimečnými vlastnostmi a zasahují již delší dobu do našich životů, např. První použití fenolové pryskyřice vyztužené azbestovými vlákny bylo zaznamenáno v roce 1907 [1]. Od té doby se nároky na pevnost samotného výrobku zvyšovaly a s postupným využíváním polymerních kompozitů byly kladeny i nové požadavky na zlepšení funkce výztuže [2].

V současné době materiály na bázi polymerů, kompozitů a s nimi související technologie přesvědčivým způsobem pomáhají rozvíjet obor strojírenství. Doposud nejvyšší význam mají v leteckém průmyslu jako sekundární i primární kompozitové konstrukce. Automobilový průmysl využívá polymerní kompozity pro díly interiéru, exteriéru a dokonce i pro některé části pohonné jednotky. Velké uplatnění nachází při výrobě plavidel. Díky své dobré chemické odolnosti se kompozity prosazují ve stavbě chemických a energetických strojů a zařízení, jako jsou například součástí čerpadel, odsiřovací jednotky atd. Polymery a jejich kompozity umožňují dosáhnout nejen základního požadavku společného pro téměř všechny aplikace, tj. snížení hmotnosti, ale umožňují i mnohem větší svobodu konstruování a tím i lepší podmínky pro inovace [3].

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou základních užitných vlastností polymerních kompozitů se skleněnými a uhlíkovými vlákny v polyamidové matrici. V rámci zadaného tématu se teoretická část věnuje obecnému rozdělení kompozitních materiálů s důrazem na polymerní kompozity vyztužené vlákny, jejich struktuře, vlastnostem polyamidové matrice a využívaným typům vláken pro vyztužení a zároveň mechanickým vlastnostem vlákna a matrice. Experimentální část této práce se zabývá vyhodnocením fyzikálních a mechanických vlastností kompozitů v závislosti na typu a množství vlákně výztuže použité v matrici PA 66. Výsledky bakalářské práce budou použity v přípravné fázi projektu TA04011009, zabývající se hybridními kompozity na bázi dutých skleněných kuliček, přidávaných k polymerní matrici se skleněnými a uhlíkovými vlákny.

2 Teoretická část

2.1 Definice kompozitu

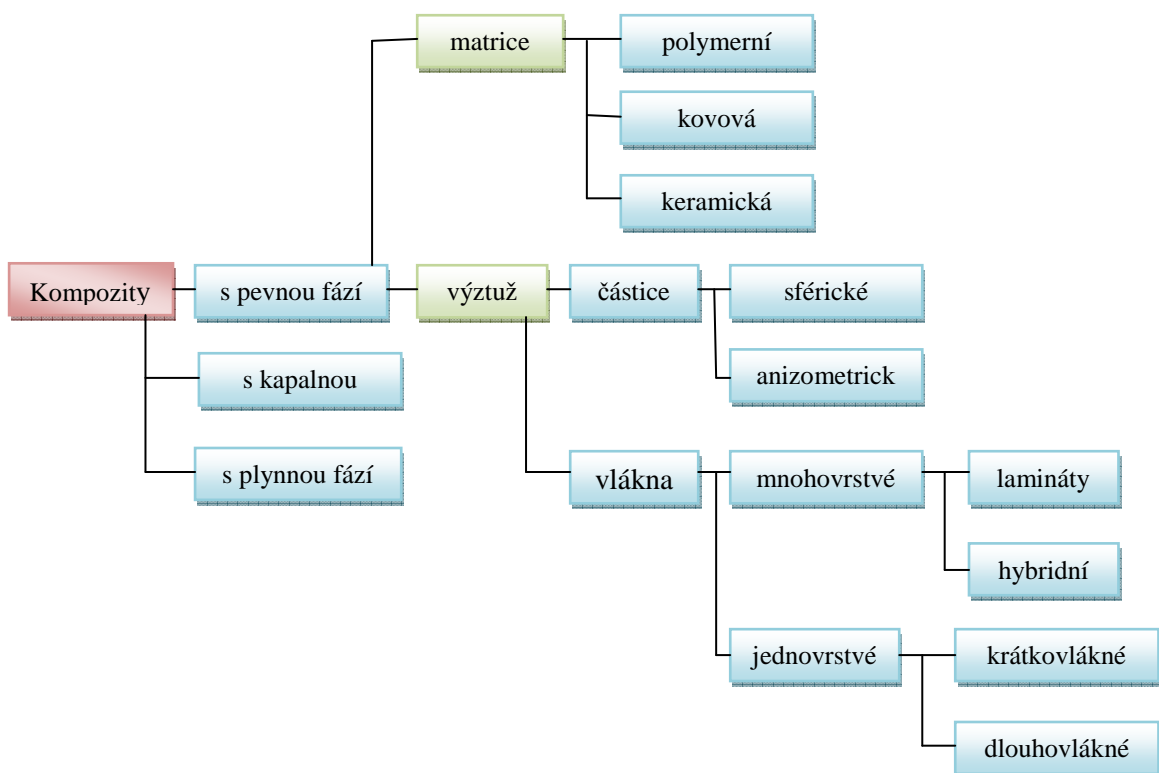
Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky odlišných fází s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, dosahující mechanických vlastností, které nemohou být docíleny, ani prostým sečtením (jedná se o tzv. synergetický efekt). Kompozity jsou materiály anizotropní, jejichž příprava spočívá ve smíchání jednotlivých složek. Nespojité složka: výztuž, bývá tužší, tvrdší a pevnější oproti složce, která slouží jako pojivo a nazývá se matrice. Vhodným výběrem materiálu tvořícího matrici a vzájemného poměru výztuže, lze dosáhnout neobvyklých vlastností. Velkou výhodou kompozitu je dosažení relativně vysokých mechanických vlastností v závislosti vůči hmotnosti. Za kompozit nelze považovat plast obsahující malé množství částic, elastomerů, nebo tuhých barviv, které se mísí v důsledku zlepšení houževnatosti výsledné směsi. Dále mezi kompozity nepatří slitiny kovů, u kterých během ochlazování, nebo tepelného zpracování došlo k vyloučení tvrdé fáze. To samé platí pro eutektické slitiny kovů, které při tuhnutí taveniny, vylučují tvrdší a tužší fázi v podobě tyčinek, nebo lamel. Kovy disperzně vyztužené částicemi oxidů lze považovat za kompozity, jelikož jejich příprava spočívá v míšení jednotlivých složek [4]. Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů v závislosti na jejich praktickém využití. Z počátku byly sklolamináty využívány v letectví, ale postupem času se rozšířily i do automobilového průmyslu a plavidel. Termoplasty vyztužené rohoží ze skleněných vláken byly poprvé zhotoveny v roce 1972. O tři roky později přišel Chevrolet s první sériovou výrobou části karoserie ze sklem vyztuženého termoplastu [1].

2.2 Dělení kompozitů

Kompozity lze dle různého kritéria viz obr 2.1:

- Kompozity s pevnou fází mohou obsahovat tři typy matic, polymerní (PMC), kovovou (MMC) a keramickou (CMC) [5]. Disperze nabývají tvarů vláken, částic, nebo desek. Vlákenná plniva jsou rozdělena podle velikosti na krátká, dlouhá a spojitá. U dlouhých vláken je plně využívána jejich pevnost, na rozdíl od vláken krátkých. Částicová plniva nabývají podobu jednorozměrných jehliček, nebo tyčinek, ale mohou se také vrstvit do destiček, nebo globulí. Speciální typ plniva jsou desky, u nichž se ztrácí rozdíl mezi maticí a plnivem.

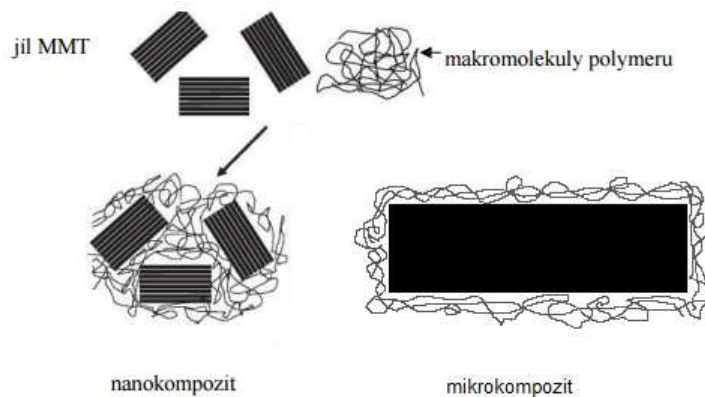
- Kompozity s kapalnou fází nejsou ve strojírenství tolik rozšířené. Patří mezi ně materiály samomazných ložisek, kde plnivem je olej. Častějším kompozitem s kapalnou disperzí je například dřevo, jako systém trubic s mizou, srdeční céva, nebo sval lidského těla [5].
- U kompozitů s plynnou fází je výztuž prosycována parami vzniklými tepelným rozkladem prekurzorů matrice. Na ohřátých vláknech, nebo částicích výztuže dochází ke kondenzaci přesycených par a vzniku tuhé fáze [6]. Takto lze dosáhnout velký podíl pórů a tudíž velmi nízké hustoty. Příkladem materiálů vyrobených tímto technologickým postupem jsou pěnový polystyren, hliníková pěna a pěnokorund [5].



Obr. 2.1 Rozdělení kompozitů

Kompozity dělíme také dle velikosti disperze na:

- Makrokompozity, jejichž velikost výztuže se řádově pohybuje od 1mm do 100 mm. Využití nachází převážně ve stavebnictví. Příkladem může být například železobeton, vyztužený ocelovými pruty, polymerbetony, obsahující drcené kamenivo a písek [6].
- Mikrokompozity jejichž velikost složek plniva se pohybuje v rozmezí od 1 mm do 100 μm . Oproti kovům a jejich slitinám mají mikrokompozitní materiály menší hustotu a příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti vůči hustotě tzn., že dosahují velké poměrné pevnosti σ_m/ρ a měrného modulu E_v/ρ . Největší uplatnění nachází ve strojírenství [2].
- Nanokompozity, kde rozměr složky plniva je v řádech nm. Mezi používaná plniva patří například destičkové částice nebo jílové minerály – montmorillonit, označeným pod zkratkou MMT. Na obr. 2.2 lze vidět rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem vyztuženým destičkami jílu MMT [1].



Obr. 2.2 Ilustrace rozdílu nanokompozitu a mikrokompozitu

2.2.1 Kompozity s polymerní matricí

Polymerní kompozity patří mezi nejčastěji používané kompozity vůbec. Rozdělujeme je do dvou skupin dle použitého typu polymeru matrice na reaktoplastické a termoplastické. Polymerní matrici vyztuženou vlákny v dnešní době používá mnoho aplikací z důvodu vysoké hodnoty poměru modulu pružnosti vůči hustotě E_v/ρ a pevnosti v tahu k hustotě σ_m/ρ . U polymerních kompozitů se využívá těchto vlastností: odolnosti proti vlivu prostředí, jednoduchost výroby složitých tvarů, nízké tepelné roztažnosti, tepelné odolnosti, elektroizolačních vlastností a odolnosti proti opotřebení [6]. Mezi nejvíce

využívané matrice patří reaktoplasty a zároveň jsou to nejdéle zpracovávané kompozity vůbec. Využívaná plniva jsou ve formě částic, nebo vláken smíšena s různými druhy materiálu matrice a jedná se zejména o sklo, uhlík, aramid, hliník, bor atd, přičemž více informací je uvedeno v kapitole 2.3.

U kompozitů s polymerní matricí mohou být vlákna orientována:

- jednosměrně,
- ve dvou osách v podobě rohoží,
- nahodile.

2.2.2.1 Reaktoplasty

Reaktivní pryskyřice jsou složeny z nízkomolekulárních podílů, které se chemickou reakcí spojují na pevnou fázi. Tomuto procesu se říká zesíťování, které nastává při tváření plastu vlivem tepla a tlaku, nebo působením katalyzátoru. Specifická vlastnost reaktoplastů se projevuje při opakovaném ohřátí, kdy není možné materiál roztavit. Za normální teploty jsou nízkoviskozní. Tato schopnost umožňuje dobře smáčet a prosytit vlákna výztuže. Nejčastěji využívaným plnivem je sklo, ale dále také uhlík, bor, keramika, kov, aramid a juta. Mezi reaktoplasty využívané jako matrice často patří epoxidy, polyestery, fenoplasty a melaminoplasty. Neoptimálnější podíl plniva činí (70 až 80) % [6]. Částice v reaktoplastech potlačují vrubové účinky a zabraňují růstu trhlin. Naopak vláknitá plniva jsou využívána za účelem zvýšení pevnosti, tuhosti a houževnatosti. Mezi nejvíce využívané reaktoplasty patří polyesterové pryskyřice (UP). Jejich viskozitu lze měnit podílem reaktivního rozpouštědla např. styrenu a ztužujícími přísadami a plnivy. Dobu vytvrzení UP lze měnit pomocí správné volby vytvrzovacího systému a teploty [2].

2.2.2.2 Termoplasty

Termoplasty jsou polymery složeny z lineárních makromolekul s dlouhým řetězcem. Tyto řetězce jsou u sebe drženy mezimolekulárními silami a to způsobuje, že za nízké teploty jsou pevné a po zahřátí na teplotu vyšší než 160 °C (v závislosti na typu termoplastu) jsou dostatečně tekuté [7]. Jejich viskozita je mnohonásobně vyšší než viskozita reaktivních pryskyřic ve výchozím stavu. Při použití rozpouštědel z důvodu snížení viskozity vzniká u termoplastů problém s odolností proti korozi za napětí [2]. Náklady na zpracování vláken do polymerů jsou u běžných materiálů jako polyethylen (PE), polyvinylchlorid (PVC) a polystyren (PS) poměrně vysoké a proto se většinou

nevzdužují. Využívají se spíše konstrukční materiály jako polyamid (PA 6, PA 66), polykarbonát (PC) a polybutyltereftalát (PBT). Výjimku tvoří polypropylen (PP), který se snadno plní a vykazuje speciální tepelné vlastnosti. Pro značně tepelně a mechanicky namáhané díly se využívají termoplasty jako například polyamidoimid (PAI), jejichž pracovní teplota nesmí překročit hodnotu 300 °C [6] apod. Běžnými plnivými termoplastických matric jsou vlákna skleněná, uhlíková a aramidová. Obsah výztuže se obvykle pohybuje mezi (15 až 60) % celkové hmotnosti výrobku. Patnáct procent plniva má velmi malý vzdužující účinek a naopak při obsahu 60 % a více nastává obtížné smáčení vláken [2]. Z předpokladu, že náklady na zpracování vláken do matrice jsou pro každý typ materiálu přibližně stejné, je vzdužení výhodné pouze v případě, kdy dochází k výraznému zlepšení mechanických vlastností, nebo snížení ceny v porovnání s materiálem matrice. Částice v termoplastických matricích mohou snížit cenu výrobku a jednoznačně smrštění vystříknutého dílu [6]. Dále zvyšují tuhost, potlačují viskoelasticitu, tlumí zvukové vlnění a vlnění obecně. Vysoké hodnoty poměrů modulu pružnosti k hustotě a pevnosti v tahu vůči hustotě často nachází uplatnění v automobilovém průmyslu, jako jsou například pedály, pouzdra a kryty. Teplotní hranice využití jsou závislé především na materiálu matrice. Hromadná výroba využívá čím dál tím víc kompozity s termoplastickou matricí. Jelikož doba výrobního cyklu je kratší oproti matricím z reaktoplastu. V praxi se nejčastěji vyskytuje směs polyamidu se skleněnými vlákny [2].

Porovnání reaktoplastů a termoplastů [2]

Reaktoplasty vynikají různými přednostmi:

- nízkou cenu matrice,
- dobrou smáčivostí,
- jednoduchým nanášením vláken při výrobě velkých dílů,
- velkou odolností proti stárnutí,
- nejsou závislé na teplotě,
- snadnou automatizaci při výrobě,

mají však i některé nevýhody:

- podléhají křehkému lomu,
- mají omezenou skladovatelnost při pokračování reakce vytvrzení.

Termoplasty mají tyto výhody:

- jejich granulát je přímo zpracovatelný,
- snadná automatizace při výrobě, jsou vhodné pro velkosériovou výrobu,
- houževnatost výrobku proti mechanickým zásahům,

ale značné množství nevýhod:

- obtížné smáčení a prosycení vláken a vysoká cena předimpregnace,
- vyšší lisovací tlak vůči reaktoplastům,
- při mechanickém namáhání mají sklon ke krípu,
- při zahřátí na teplotu skelného přechodu nastává výrazné změknutí,

2.2.2 Kompozity s keramickou maticí

Keramika má vysokou tepelnou odolnost a zároveň i tvrdost. Pro produkci kompozitu s keramickou maticí se uplatňuje prášková metoda, protože podstatou výroby konstrukční keramiky je zhutnění a následné slinutí prášků oxidů (Al_2O_3 , MgO , ZrO_2), karbidů (SiC), nebo nitridů (Si_3N_4). Na vláknitá plniva je možné nanášet keramickou maticí ve formě vodní suspenze, nebo s přídavkem polymerního vazebného prostředku, který se v průběhu slinování vypalí. Při použití správných druhů kovů jako výztuže vznikají velmi teplotně odolné kompozitní materiály, které svou žárupevností dokonce předčí i slitiny niklu [6]. Využívány jsou především pro průmyslové účely, například v reaktoru jaderné elektrárny a raketoplánech, ale mohou být použity také v běžném životě ve formě elektrických součástek, zubních výplní a implantátů.

2.2.3 Kompozity s kovovou maticí

Kompozity s kovovou maticí se rozlišují podle technologie výroby. Mletý kovový prášek s částicemi oxidů, karbidů, nebo nitridů chemických prvků, je spékán a lisován, nebo napařován pomocí práškové metalurgie. Kovová matrice zajišťuje vlastnosti, které ostatní kompozity nemají jako například elektrická vodivost a rezistence proti povrchovému poškození a opotřebení. Mezi jejich další výhody patří tepelná vodivost, nehořlavost, vysoká pevnost a houževnatost. Na druhou stranu je jejich cena vyšší než u polymerních kompozitů. Využití nacházejí v letectví, automobilovém průmyslu a často v aplikacích s vysokými teplotami [6].

2.3 Složky kompozitu

2.3.1 Vláknitá plniva

Materiály ve formě vláken se jako konstrukční prvky používají zřídka. Avšak jako funkce plniva v kompozitech jejich využití značně roste a slouží k vyztužení finálního výrobku [8]. Pod pojmem vyztužení se rozumí zvýšení pevnosti a tuhosti, které vznikne uložení výztuže do matrice, přičemž musí být splněny následující podmínky:

- Vyztužující vlákna musí být pevnější než materiál matrice $\sigma_{mf} > \sigma_{mm}$
- Vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice $E_{tf} > E_{tm}$
- Matrice se nesmí porušit dříve, než vlákno $\varepsilon_{bm} > \varepsilon_{bf}$

kde:

σ_{mf} napětí na mezi pevnosti vlákna [MPa]

σ_{mm} napětí na mezi pevnosti matrice [MPa]

E_{tf} modul pružnosti vlákna v tahu [MPa]

E_{tm} modul pružnosti matrice v tahu [MPa]

ε_{bm} poměrné prodloužení při přetržení matrice [-]

ε_{bf} poměrné prodloužení při přetržení vlákna [-]

Vlákna jsou díky svému tvaru pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě. Se zmenšujícím se průřezem vláken roste jejich pevnost. Rostoucí délka vlákna zvyšuje jeho pevnost v tahu i ohybu a zároveň narůstá modul pružnosti v tahu. Přírůstek pevnosti se zmenšujícím se průměrem, lze vysvětlit tím, že výskyt poruch a jejich vliv je o to menší, čím tenčí vlákna jsou. Části vzniklé při porušení vlivem tahového namáhání mají větší pevnost než původní vlákno, jelikož k prvotnímu lomu došlo z největšího defektu vlákna. Tažnost vlákna je rovněž závislá na jeho délce. Při narůstající délce se tažnost snižuje. Vyráběná vlákna mají zpravidla průměr od 5 μm do 20 μm . Menší průměry se nevyužívají, protože pronikají do plic a špatně by prosytily matrici. Silnější vlákna působí kladně svou tuhostí ve vzpěru, při zatížení tlakem. Tuhá a vysokopevnostní vlákna při příznivé orientaci brání šíření trhlin [2].

Vláken používaná pro vyztužení polymerní matrice lze rozlišovat na:

- skleněná,
- uhlíková,
- aramidová,
- kovová,
- přírodní.

Pro jednodušší měření a snadnější dávkování je obsah vláken udáván jako hmotnostní podíl vláken ψ ve hmotnostních procentech (hm. %) [2]. Protože hustota vláken je vyšší než hustota matrice, je hodnota obsahu vláken vyjádřená v objemových procentech φ . Objemové procento vláken se vypočítá pomocí rovnice 2.1.

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (2.1)$$

kde značí:

- φ objemový podíl vláken [-]
- ψ hmotnostní podíl vláken [-]
- ρ_f hustota vlákna [kg/m^3]
- ρ_m hustota materiálu matrice [kg/m^3]

Textilní skleněná vlákna

Průmyslová výroba skleněných vláken byla zahájena v roce 1935 [1]. Textilní skleněná vlákna (GF) je společný název pro tenká vlákna o průměru 3,5 μm až 24 μm (viz obr 2.4) s pravidelným kruhovým průřezem, vyráběná tažením z roztavené skloviny, která se využívají pro textilní účely [9]. Rozlišováno je několik typů skleněných vláken [2]:

- Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny s označením E - vlákna, která mají vynikající elektroizolační vlastnosti a vysokou propustnost pro záření. E -sklovina patří mezi nejčastěji využívaný druh skloviny při výrobě vláken a její využití v průmyslu je nejvyšší.
- Sklovina s vyšším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 se označuje jako R- sklovina a na rozdíl od E - skloviny má větší pevnost o (40 až 70) %.

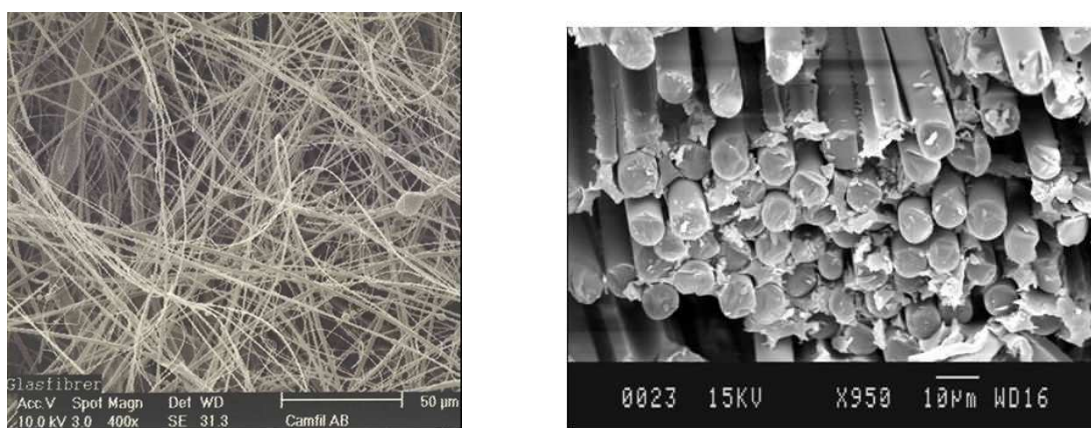
- Dále se využívají tzv. C - sklovina, která je charakteristická vysokou odolností vůči kyselinám a chemicky agresivním látkám. Tato sklovina má vyšší dielektrickou konstantu a proto je využívána například pro desky tištěných spojů, nebo v kosmonautice.
- Posledním typem jsou bezalkalická skleněná vlákna s označením AR - vlákna. Od E - vláken se liší chemickým složením a vysokou odolností proti alkáliím. Uplatnění nacházejí jako vyztužení betonu [2].

Skleněná vlákna jsou na základě své amorfní struktury izotropní, na rozdíl od uhlíkových vláken. Relativně vysoké hodnoty pevnosti a modulu pružnosti E_{tf} jsou důsledkem silné kovalentní vazby mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny. Zesíťovaná struktura a síla jednotlivých vazeb je závislá na druhu použitých oxidů kovu [2]. Jejich vlastnosti v podélném a příčném směru předpokládáme shodné. Pevnost v tahu je závislá na stavu povrchu vlákna. Vzájemné poškození vláken při sdružení do pramenů a absorpce vzdušné vlhkosti snižuje jejich pevnost. Pro zamezení vzájemného poškození je nutno skleněná vlákna chránit povlaky, které se nanášejí ještě před sdružením vláken do pramene. Vlákna se opatřují vazebními prostředky, které zlepšují adhezi polymeru s vláknem (viz kapitola 2.3.3). Problém nastává v hromadné výrobě, jelikož skleněná vlákna ve značné míře opotřebovávají potrubí dopravy granulátu, tavicí komoru vstřikovacího lisu, šnek a formu z důvodu abrazivního vlivu vláken.

Tab. 2.1 Složení a porovnání mechanických vlastností jednotlivých typů vláken [2]

Sklovina	E	R	C	AR
Složení (%)				
SiO ₂	54	60	60 až 65	62
Al ₂ O ₃	14 až 15	25	2 až 6	-
CaO	-	14	14	5 až 9
MgO	20 až 24	3	1 až 3	1 až 4
B ₂ O ₃	6 až 9	< 1	2 až 7	< 0,5
K ₂ O	< 1	< 1	8	ZrO ₂ :17
Na ₂ O	-	-	-	12 až 15
Vlastnosti				
Hustota ρ [kg/m ³]	2,6	2,53	2,52	2,68
Mez pevnosti v tahu σ_{mf} [MPa]	3400	4 400	2 400	3 000
Modul pružnosti E_{tf} [MPa]	73 000	86 000	70 000	73 000
Poměrné prodloužení při přetržení ε_{bf} [%]	< 4,8	< 4,6	< 4,8	< 4,4

Z tab. 2.1 je zřetelně, že modul pružnosti v tahu E_{tf} skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku (70 GPa) a je roven jedné třetině hodnoty modulu pružnosti oceli (210 GPa). Pevnost v tahu je udávána před zpracováním na polotovary. Po zpracování skleněných vláken klesne hodnota meze pevnosti v tahu až o 50 % z udávané hodnoty v tab. 2.1 [2]. Tato hodnota je vyšší než u většiny organických a anorganických vláken a oceli v kompaktní podobě. Vzhledem k porovnatelně nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken zvláště vysoká. Deformace na mezi kluzu je téměř elastická, což znamená, že vlákno nemá viskoelastické chování, na rozdíl od polymerů. Vlastnosti výrobku kompozitu vyztuženého skleněnými vlákny jsou ve značné míře závislé na druhu, obsahu a orientaci skleněných vláken.



Obr. 2.4 Mikroskopická struktura skleněných vláken [10] (SEM)

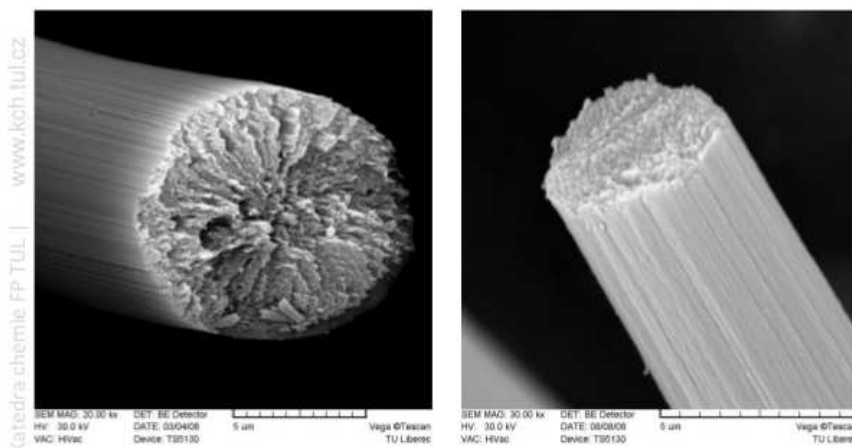
Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF) byla poprvé vyrobena roku 1957 ve Spojených státech amerických z viskózy. Tento způsob výroby měl však malý výtěžek a proto přišla na řadu nová technologie výroby z polyakrylového vlákna vynalezená v Japonsku roku 1971. Od roku 1980 se stále používá pro výrobu uhlíkových vláken polyakrylonitril zkráceně PAN, z něhož vyrobená vlákna jsou považována za standardní (viz obr 2.5) [1].

Uhlíková vlákna, se skládají z více než 90 % uhlíku, obsah dusíku činí méně než 7 %, procento kyslíku je nižší než 1 % a vodík se zde nachází ve množství menším než 0,3 % [9]. Uhlíková vlákna jsou krystalická, na rozdíl od polykrystalického grafitu, který má nahodilou orientaci krystalů. Na první pohled se zdá, že uhlík krystalizuje v hexagonální mřížce, ale díky uspořádání bazálních rovin, které jsou orientovány přednostně ve směru podélné osy vlákna, jde o tzv. turbostratický uhlík [6]. Vlastnosti vláken závisí na paralelnosti rovin s osou vlákna, na velikosti a dokonalosti krystalů a na obsahu vnitřních

defektů, jako jsou trhliny, dutiny a vměstky. Orientace rovin ve vláknu způsobuje, že jsou vysoce anizotropní [6]. Koeficient teplotní roztažnosti ve směru osy vlákna je záporný a kolmo k ose kladný. Předpokladem pro vysokopevnostní a vysokomodulová vlákna je co nejtěsněji uložená kontinuální síť silných vazeb. Vzhledem k požadované nízké měrné hmotnosti materiálu je vhodné použít pro tyto účely prvky dvou řad periodické soustavy, jako je například bor, dusík, kyslík a křemík. Nejpevnější kovalentní vazby nemusí být přitom uspořádány trojrozměrně. U vláken s převážně jednosměrným přenosem sil postačují jedno, nebo dvourozměrné molekulární struktury v ose vlákna [2].

Na rozdíl od skleněných vláken mají až desetinásobně vyšší tuhost a přibližně poloviční hustotu [9]. Jejich tepelné vlastnosti jsou velmi dobré, pokud jsou chráněna proti oxidaci. Uhlíková vlákna se povrchově upravují, za účelem docílení zvýšené odolnosti proti vzájemnému poškozování při zpracování a pro lepší soudržnost v polymerní matrici. Pro tyto účely se často využívá elektrochemická úprava povrchu. K zamezení vzájemného poškozování vláken při sdružení do pramene a křehkosti při zpracovávání se na uhlíková vlákna nanáší povlak speciálních epoxidových pryskyřic, které slouží k ochraně při zpracování a pro zlepšení adheze vláken s matricí. Modul pružnosti v tahu a pevnost se mohou měnit v závislosti na stupni orientace uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst, která vznikají ve vláknech během výroby [2]. Teoreticky možné hodnoty mechanických vlastností vycházejí z hodnot kovalentních vazeb grafitového monokrystalu ve směru vrstev a dosahují až 1 000 GPa pro modul pružnosti v tahu a 100 GPa pro pevnost. Modul pružnosti měřený kolmo na směr vrstev dosahuje kvůli chybějícím kovalentním vazbám hodnoty kolem 4 GPa [2]. Uhlíková vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování. To znamená, že se zvyšujícím zatížením stoupá hodnota modulu pružnosti E_{tf} . Dále vynikají vysokou pevností a modulem pružnosti až do teploty 500 °C, nízkou hustotou (1600 až 2000) kg/m³, mimořádně vysokou korozní odolností, vysokou odolnost vůči dlouhodobému dynamickému namáhání, velmi malou rychlostí hoření, dobrou průchodností záření, snášenlivostí s tělesnými tkáněmi [9] apod. Na druhou stranu jejich nevýhodou je nízká tažnost a ztráta ohebnosti při delším skladování, kdy dochází k vytvrzení povrchové vrstvy [2].



**Uhlíkové vlákno ze smol,
modul pružnosti 680 GPa**

**Uhlíkové vlákno z polyakrylonitrilu,
modul pružnosti 580 GPa**

Obr. 2.5 Mikroskopická struktura uhlíkového vlákna [11] (SEM)

Aramidová vlákna

Dalším druhem vláken s vysokou pevností a tuhostí jsou aramidová vlákna, využívající vlastnosti lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Velmi dobré vlastnosti aramidových vláken jsou zapříčiněny vazbami vodíkových můstků, jimiž jsou navzájem spojeny jednotlivé molekuly. Hustota vlákna činní podle uváděných zdrojů $1,45 \text{ kg/m}^3$. Aramidové vlákno má kruhový průřez o průměru přibližně $12 \text{ }\mu\text{m}$. Modul pružnosti v tahu E_{tf} se pohybuje v rozmezí od (80 000 až do 186 000) MPa. Mez pevnosti v tahu leží v intervalu od (3 400 až 3 800) MPa. Tažnost se pohybuje od (2 do 4) % [2]. Kompozity s aramidovými vlákny jsou vhodné pro konstrukce zatěžované tahem v rovnoběžném směru vlákna, nikoliv však ohybem, nebo tlakem, jelikož jejich mechanické vlastnosti v kolmém směru zatížení jsou velmi nízké. Aramidová vlákna pohlcují vlhkost, která v tomto případě snižuje jejich pevnost. Dále vynikají nízkou adhezí vůči matrici. Využití nachází jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obložkách, výztuž pro pneumatiky a dále také k výrobě ochranných oděvů pro horké provozy [2].

Přírodní vlákna

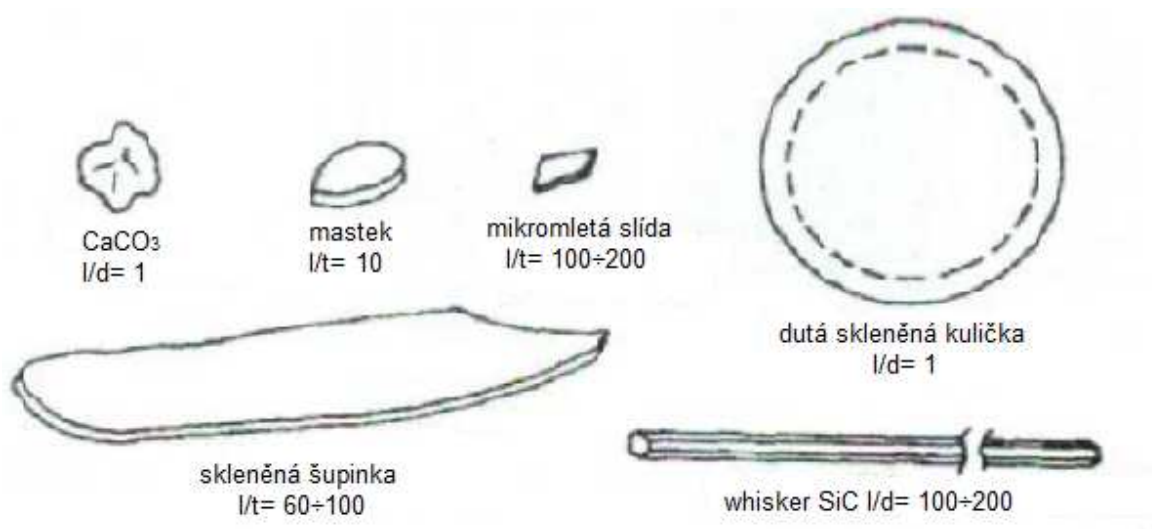
Uplatnění čím dál tím více nachází i přírodní vlákna plnící funkci výztuže kompozitů. Pro tento trend jsou vhodná rostlinná vlákna, která mají jako základ celulózu. Patří mezi ně len, konopí, silan, juta, bavlna a například i kokos. Výhoda využití přírodních vláken spočívá v nízké hustotě, snadném zpracovávání, tudíž i ve zrychlení výrobního cyklu. Proti vláknovým kompozitům se skleněnými vlákny nedochází k tak značnému opotřebení

šneku, tavné komory a formy. Mezi další výhody patří i cena výsledného výrobku. Naopak nevýhodou je hydrofilní chování a ztráta mechanických vlastností po zahřátí kompozitního výrobku [2].

2.3.2 Částicová plniva

Ke snížení smrštění se do polymerních matric přidávají také částicová plniva. Je využíváno několik tvarů částic: sférické a anizometrické. Sférické částice by neměly být příliš velké, jelikož negativně ovlivňují pevnost a naopak u příliš jemných je obtížné dosáhnout rovnoměrného rozptýlení v matrici. Vhodné rozmezí rozměrů částice je (1 až 10) μm . Anizometrické částice mají tvar destiček, disků a jehlic, které mohou matrice vyztužovat a zpevňovat díky svému tvaru. Poměr největšího rozměru částice ku minimálnímu rozměru se nazývá štíhlostní poměr. Největší štíhlostní poměr mají tzv. Whiskery, jejichž tvar připomíná tyčinku. Whiskery mají na rozdíl od krátkých vláken výhodu při ohybovém namáhání a nedochází u nich k lámání díky vysoké tahové pevnosti a malým příčným rozměrům [6]. Na obr. 2.6 jsou znázorněny používané druhy plniv.

Polymerní matrice se vyztužují ve většině případů anorganickými částicemi. Používají se mikromleté minerály, jako jsou například uhličitany (těživec, vápenec), hlinitokřemičitany (kaolin, mastek nebo-li talek) a vrstvené hlinitokřemičitany (slídy). Dále využíváme mikroskopické částice kovů a malé skleněné kuličky, které se často vyskytují i ve formě dutých skleněných kuliček [8]. Duté skleněné kuličky výrazně snižují hmotnost vstříkovaného dílu a zároveň mají velmi dobré viskózní vlastnosti díky svému tvaru.



Obr. 2.6 Užívané typy částicových plniv [6]

2.3.3 Matrice

Optimálních vlastností kompozitu lze dosáhnout jen tehdy, podaří-li se převést všechny působící síly na vlákna. Tento úkol plní matrice. Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systémem vláken nebo partikulárních komponent, tak že po zpracování vznikne trvale stálý výrobek [2]. Hlavními úkoly matrice je:

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

Důležitým kritériem pro matici je její tažnost, která musí být vyšší než tažnost vlákna. Poté co se přetrhne vlákno, může ještě vzorek přenášet zatížení, což však v opačném pořadí nelze.

Mezi další důležité podmínky, které k výrobě kompozitu patří, je spojení mezi vláknem a maticí. Aby se vlákno smočilo plně bez bublin, musí mít matrice vhodnou viskozitu a povrchové napětí. Nejsnadnější příprava kompozitu nastává tehdy, jestliže lze matici převést do kapalného stavu. Podmínkou dobrého přilnutí kapalné matrice k výztuži dochází tehdy, pokud má plnivo vysokou povrchovou energii a kapalná matrice tuto energii co nejmenší [6]. Důležitým faktorem pro kvalitu kompozitu je adheze na fázovém rozhraní matrice s vláknem. Většina plastů se svým chemickým složením liší od složení výztuže. Z tohoto důvodu je nutno používat látky, které zvyšují pevnost spojení těchto dvou složek. Úprava odpovídající tomuto požadavku se nazývá apretura a je specifická dle druhu matrice [2]. Apreturu tvoří organosilany, které se přidávají do lubrikace, jež se nanáší na vlákno při zpracování z důvodu eliminace poškození abrazí vláken mezi sebou. Druhou výhodou je snížení tření mezi vlákny a kapalnou maticí. Organosilany jsou při vdechnutí či požití toxické, poškozují kůži a dráždí oči, avšak jejich koncentrace v lubrikaci je malá a činní přibližně 0,05 % celkového objemu kompozitu. Apretace a další funkční materiály představují vrstvu mezi povrchem vlákna a maticí, proto jsou často nazývány jako mezifáze, nebo mezní vrstva [2]. Polární termoplasty mají k apreturám lepší adhezi než ostatní termoplasty, jelikož s nimi tvoří difuzní vrstvu. Termoplasty obsahující reaktivní skupinu mohou obdobně reagovat s funkční skupinou silanu. To však není možné u nepolárních termoplastů [12]. Lubrikace skleněných vláken, které se mají dále zpracovávat s termoplasty, se používají například u polyamidu, obsahují zesílovatelné

polyeteruretany a polyesteruretany, které vytváří tzv. vrstvu filmu a jsou kompatibilní s většinou aminosilanových apretur. Zvýšení adheze vláken k polymerní matici lze provést také například plazmatickou úpravou povrchu vláken [13]. Polymery obsahující polární skupiny, sice zlepšují smáčivost, ale mohou pohlcovat vlhkost. To znamená, že absorbovaná vlhkost změkčuje mezní vrstvu a snižuje tak pevnost mezi vláknem a maticí. Skleněná vlákna jsou hydrofilní, proto se při jejich používání vyžaduje povrchová úprava [2]. V případě uhlíkových vláken ve spojení s termoplasty jsou používány polyuretanové lubrikace. [2]

Polyamid

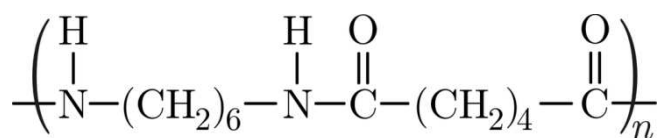
S ohledem na zadání bakalářské práce je v této kapitole věnován prostor pro charakteristiku polyamidu, jakož to termoplastu matrice zkoumaných kompozitů. Polyamid ve zkratce, je polymer, který v řetězci obsahuje opakující se amidovou skupinu $-NH-CO-$ vyznačenou na obr. 2.7. Vyrábí se polykondenzací, nebo polyadící z různých monomerů. Polyamid je semikrystalický plast, jež oproti některým ostatním polymerům vyniká svojí tuhostí, pevností a tažností [14]. Amidová skupina umožňuje tvorbu vodíkových můstků mezi makromolekulami, které představují relativně silnou mezimolekulární vazbu, která je příčinou vysoké pevnosti a zvýšené teploty tání [7].

Polyamid má výraznou mez kluzu, vysokou rázovou houževnatost a dobrou odolnost proti nárazu. Díky těmto vlastnostem se řadí mezi konstrukční plasty. Mechanické vlastnosti polyamidu jsou závislé na obsahu zbytkového monomeru vlhkosti a stupni krystalinity, který udává relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními [14]. Udávaná pevnost v tahu σ_m činní (50 až 85)MPa a modul pružnosti v tahu E_t (1400 až 2000) [7]. Polyamid je hydrokopický, jak v přímém kontaktu s vodou, tak i z atmosféry. Patří tedy mezi silně polární plasty, proto má lepší možnost přilnutí vláken s apretačním povrchem. Pohlcování vody se dá snížit přimícháním plniva v podobě skleněných vláken, nebo zvýšenou nukleací. Po vysušení ztrácí houževnatost a tažnost. Za suchého stavu má vysokou odolnost proti otěru a nízký součinitel tření [14]. Teplota tání polyamidu se pohybuje v rozmezí od 170 °C do 260 °C a jeho dlouhodobá teplotní odolnost je (130 až 170) °C [7]. Obtížně hoří a po vyjmutí z plamene zhasíná. Elektroizolační vlastnosti má dobré, přičemž při navlhnutí se snižují. Dielektrické ztráty jsou vysoké. Odolnost proti UV záření a povětrnostním vlivům jsou nižší a zároveň neodolává korozi za napětí. Polyamid je odolný vůči slabým zásadám, uhlovodíkům a rozpouštědlům, tukům

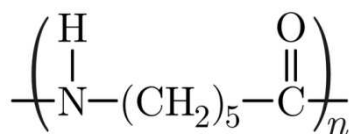
a olejům. Naopak neodolává kyselinám, silným zásadám a horké vodě. Jeho zpracovatelnost a barvivost je dobrá [14].

V praxi se využívají tyto druhy polyamidů: PA 6, PA 66, PA 610, PA 11 a PA 12. Čísla za označením polyamidu (PA) charakterizují výchozí monomery podle počtu atomů uhlíku v jejich molekulách. PA 6 nebo-li polyhexanlaktam je houževnatý termoplast tvořený lineárními makromolekulami s obsahem krystalického podílu v rozsahu od 25 % do 45 %. PA6.6 nebo-li polyhexamethylnadipamid má oproti PA 6 přibližně o 20 % lepší mechanické vlastnosti a menší nebo obdobnou navlhavost [14].

Praktické využití polyamidu se nachází při výrobě ozubených kol (viz obr 2.8), měřicích zařízení, kluzných uložení a klecí kuličkových ložisek, kladek, řemenic, nádržek a vzduchových vedení [14].



Polyamid PA-6.6



Polyamid PA-6

Obr. 2.7 Chemický vzorec polyamidu PA 6 a PA 66 [15]



Obr 2.8 Ozubená kola vyrobená z polyamidu [16]

2.4 Mechanické vlastnosti polymerních kompozitů s vlákny

Pevnost a tuhost kompozitního materiálu závisí v rozhodující míře na pevnosti a tuhosti vláken. Vlákna a jejich orientace výrazným způsobem ovlivňují také další mechanické vlastnosti, jako jsou rázová houževnatost apod. V porovnání s nevyztuženými plasty nezávisí vlastnosti kompozitů tak výrazně na teplotě, době zatížení, jako na podmínkách prostředí, tj. je vlhkost vzduchu, agresivnost média a UV záření. Vliv na jejich chování při mechanickém namáhání má především rozložení vláken, jejich orientace, zakřivení a zvláště celkový obsah plniva v díle [17]. Proto je třeba při vzájemném srovnávání vlastností neopomenout procentuální obsazení vláken. V případě této práce jsou vlákna v matici orientována náhodně v důsledku principu technologie zpracování kompozitu vstřikováním.

Z důvodu velmi odlišných mechanických vlastností vlákna a matrice vznikají ve struktuře kompozitu místní složité stavy napjatosti. Při statických a dynamických zkouškách pevnosti kompozitu způsobují tyto lokální poškození nosných vláken, celkový lom materiálu. Podle toho zda zatížení působí ve směru uložení vláken, kolmo na ně, nebo v jiném libovolném směru, dochází k rozdílnému uplatnění výztuže. Z toho plyne, že vlákna s orientací 0° ke směru zatížení vykazují vyšší pevnost než stejná vlákna s orientací 90° ke směru zatížení, u kterých dochází k prvním poruchám [2]. Při zatížení tlakem je snížena schopnost spojení vláken s maticí a je možné jejich lokální vybočení. Vlivem různého působení lokálních poškození a jejich nového vzniku jsou, při dynamickém zatěžování míjivá namáhání příznivější než střídatá [17]. Ze všeobecných zdrojů bylo zjištěno, že mechanická schopnost tlumení při dynamickém namáhání je u kompozitu vyztuženého uhlíkovými vlákny 9 × vyšší než u stejného materiálu vyztuženého skleněnými vlákny [2].

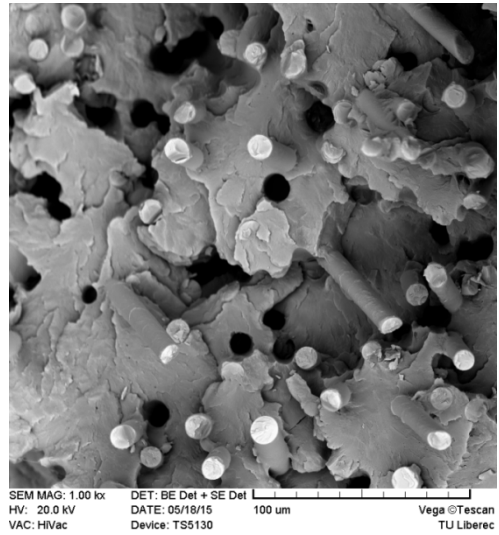
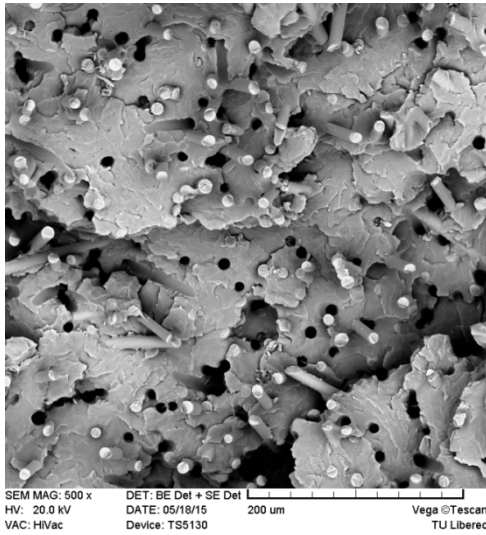
Pouze v 50 % možných směrů zatížení je matrice přidavkem vysoce pevných jednosměrně uložených vláken skutečně vyztužena. Kompozity, jakožto křehké materiály, jsou citlivé na vruby. V místě vrubu vlivem zatížení dochází ke kvaziplastickému otupení, způsobující tvorbu mikrotrhlin. Dále může docházet vlivem přerušování vazby mezi maticí a vláknem k odbourávání špiček napětí [2]. Proto se u kompozitů vyztužených vlákny provádí zkouška rázové houževnatosti Charpy a ne vrubové.

3 Experimentální část

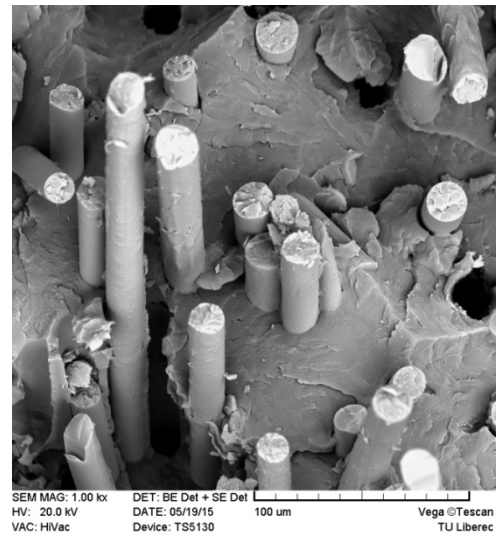
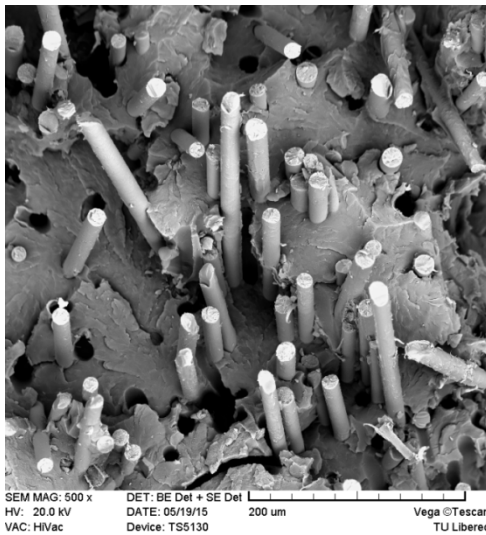
Cílem experimentální části této bakalářské práce bylo vyhodnocení fyzikálně mechanických vlastností polymerních kompozitů s matricí polyamidu PA 66, obsahující různý hmotnostní podíl uhlíkových a skleněných vláken. Celý experiment probíhal v následujících krocích. Nejprve byly ze zakoupeného granulátu smíchány směsi s požadovaným hmotnostním obsahem plniva. Z namíchaných směsí byly zhotoveny zkušební vzorky, které kondicionovaly v klimatizační skříni (viz kapitola 3.1) a následně byly sledovány jejich užitné vlastnosti v souladu se zadáním bakalářské práce (viz kapitola 3.2). Dosažené výsledky budou využity v předvývojové fázi výzkumného projektu TA04011009, zabývající se výzkumem užitných vlastností a aplikačních možností hybridních kompozitů.

3.1 Příprava zkušebních těles

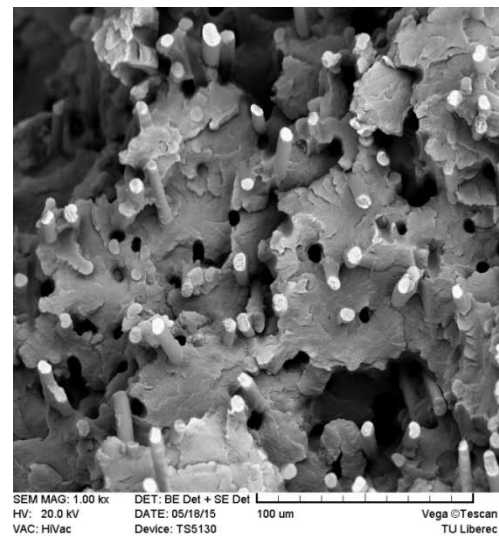
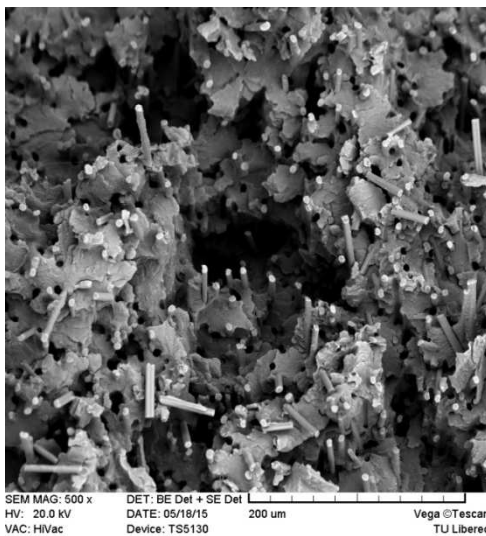
Nejprve je nutné objasnit, jakým způsobem bylo dosaženo daných hmotnostních podílů výtzuže ve zkušebních tělesech kompozitu. Z tab. 3.1 je patrné, že k přípravě kompozitů bylo použito několika druhů matric na bázi PA 66: čistý polyamid Technyl A218 21N a matrice polyamidu s krátkými (GF) a dlouhými (LGF) skleněnými vlákny a krátkými uhlíkovými vlákny (CF), které byly zakoupeny přímo od výrobce. Kombinací čisté matrice Technyl A 218 21N a matric obsahujících vyztužující vlákna byl vytvořen kompozit s požadovanými hmotnostními podíly konkrétních druhů plniv. Například kompozit PA 66 + 20 % CF byl vytvořen smícháním čisté polyamidové matrice Technyl A218 21N a matrice Luvocom 1/CF/40, obsahující 40 % uhlíkových vláken tak, aby došlo k požadovanému hmotnostnímu obsahu 20 % uhlíkových vláken v kompozitu. Tento postup byl proveden obdobně i u ostatních vláknových kompozitů. Vzájemné adhezni spojení matrice a plniva je zřejmé z mikroskopických snímků lomových ploch výstřiků (viz obr. 3.1 až obr. 3.3), které byly získány pomocí rastrovací (skenovací) elektronové mikroskopie ve spolupráci s katedrou materiálového inženýrství fakulty textilní TU v Liberci. Jedná se o techniku, která využívá detekci signálů, vznikajících při dopadu soustředěného elektronového svazku na preparát (v uvedeném případě lomovou plochu výstřiku).



Obr. 3.1 Lomová plocha kompozitního výstříku PA 66 + 30 % GF (SEM)



Obr. 3.2 Lomová plocha kompozitního výstříku PA 66 + 30 % LGF (SEM)



Obr. 3.3 Lomová plocha kompozitního výstříku PA 66 + 30 % CF (SEM)

Tab. 3.1 Složení polymerních kompozitů

Kompozit s hmotnostním obsahem výztuže	Typ matrice
Polymer	
PA 66	Technyl A218 21N
Kompozit s krátkými skleněnými vlákny	
PA 66 + 30 % GF	Technyl A218 V50 21N + Technyl A218 21N
PA 66 + 40 % GF	Technyl A218 V50 21N + Technyl A218 21N
PA 66 + 50 % GF	Technyl A218 V50 21N
Kompozit s dlouhými skleněnými vlákny	
PA 66 + 30 % LGF	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N
PA 66 + 45 % LGF	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N
PA 66 + 60 % LGF	Celstran GF60-02
Kompozit s uhlíkovými vlákny	
PA 66 + 20 % CF	Luvocom1/CF/40 + Technyl A218 21N
PA 66 + 30 % CF	Luvocom1/CF/40 + Technyl A218 21N
PA 66 + 40 % CF	Luvocom1/CF/40

Z připraveného granulátu byla na vstřikovacím stroji Arburg 270S 400-100 zhotovena zkušební tělesa pomocí formy typu A s dvojnásobnou dutinou a jednou dělicí rovinou v souladu s mezinárodními předpisy ČSN EN ISO 294-1 a ČSN EN ISO 1874-2. Chlazení formy probíhalo pomocí vody, jakožto temperačního média, cirkulujícího v kanálech v blízké oblasti tvarových dutin. Parametry vstřikování jsou uvedené v tab. 3.2 až tab. 3.4 a byly nastavovány dle materiálu pro každý typ plniva zvlášť. Volba jednotlivých parametrů se stanovila na základě normy předepisující výrobu zkušebních těles z PA (ČSN EN ISO 1874-2), doporučení výrobce materiálu a na základě eliminace vnějších vad (zejména odstranění propadlin, či tvorbě přetoků).

Tab. 3.2 Technologické parametry použité při výrobě zkušebních vzorků kompozitu s krátkými skleněnými vlákny (GF)

Parametr	Hodnota	Jednotka			
Teplota taveniny (viz teplotní profil tavicí komory)	300	°C			
Teplota temperačního média formy	80	°C			
Doba cyklu	40	s			
Doba dotlaku	15	s			
Velikost dotlaku	520	MPa			
Velikost dávky	40	cm ³			
Bod přepnutí na dotlak	13	cm ³			
Vstřikovací rychlost	35	cm ³ /s			
Teplotní profil tavicí komory stroje					
Násypka	4. zóna	3. zóna	2. zóna	1. zóna	tryska
40 °C	290 °C	300 °C	305 °C	305 °C	300 °C

Tab. 3.3 Technologické parametry použité při výrobě zkušebních vzorků kompozitu s dlouhými skleněnými vlákny (LGF)

Parametr	Hodnota					Jednotka
Teplota taveniny (viz teplotní profil tavící komory)	310					°C
Teplota temperačního média formy	80					°C
Doba cyklu	40					s
Doba dotlaku	15					s
Velikost dotlaku	580					MPa
Velikost dávky	40					cm ³
Bod přepnutí na dotlak	13					cm ³
Vstřikovací rychlost	35					cm ³ /s
Teplotní profil tavící komory stroje						
Nárypka	4. zóna	3. zóna	2. zóna	1. zóna	tryska	
40 °C	290 °C	300 °C	305 °C	305 °C	310 °C	

Tab. 3.4 Technologické parametry použité při výrobě zkušebních vzorků kompozitu s uhlíkovými vlákny (CF)

Parametr	Hodnota					Jednotka
Teplota taveniny (viz teplotní profil tavící komory)	300					°C
Teplota temperačního média formy	80					°C
Doba cyklu	40					s
Doba dotlaku	15					s
Velikost dotlaku	640					MPa
Velikost dávky	40					cm ³
Bod přepnutí na dotlak	13					cm ³
Vstřikovací rychlost	35					cm ³ /s
Teplotní profil tavící komory stroje						
Nárypka	4. zóna	3. zóna	2. zóna	1. zóna	tryska	
40 °C	280 °C	290 °C	295 °C	295 °C	300 °C	

Po zhotovení zkušebních těles byla tato kondicionována v klimatizační skříni s uzavřenou cirkulací vzduchu (viz obr. 3.4) dle normy pro zrychlené kondicionování zkušebních těles z polyamidů ČSN ISO EN 1110. Zkušební tělesa byla uvedena do tzv. vlhkého stavu, který nastane při udržované teplotě $(70 \pm 1) \text{ °C}$ a teplotní diferencí psychrometru 10 °C s tolerancí $\pm 0.3 \text{ °C}$, odpovídající relativní vlhkosti $(62 \pm 1) \%$. Doba kondicionování je závislá na tloušťce zkušebního tělesa h a byla stanovena dle normy ČSN EN ISO 1110 na 130 hodin. Po kondicionování byly zkušební vzorky vyjmuty z klimatizační skříně a nechaly se zchladnout po dobu jedné hodiny ve standardním prostředí 23/50 (viz ČSN EN ISO 291). Poté byly zváženy s přesností na 0,1 mg

a pokračovalo se ve zrychleném kondicionování zkušebních těles po dobu 50 hodin. Vážení vzorků leželo v toleranci 0,1 % a kondicionování bylo ukončeno. V souladu s normou tak bylo dosaženo 95 % rovnovážné hodnoty vlhkosti.



Obr. 3.4 Klimatizační skříň Vötsch VC 0018 se zkušebními vzorky

3.2 Stanovení fyzikálních a mechanických vlastností kompozitů

Stanovení fyzikálních a mechanických vlastností kompozitů bylo provedeno ve standardním prostředí 23/50, tj. při teplotě vzduchu ve zkušební místnosti (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti vzduchu (50 ± 5) %. V souladu se zadáním bakalářské práce byly naměřeny a následně vyhodnoceny mechanické vlastnosti zkušebních vzorků v závislosti na použitém typu a množství plniva. Vlastnosti materiálu byly stanoveny v souladu s mezinárodními předpisy. Jedná se o: mez pevnosti v ohybu, modul pružnosti v ohybu, mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, poměrné prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení (celková tažnost), rázovou houževnatost Charpy a hustotu.

3.2.1 Stanovení ohybových vlastností

Ohybové vlastnosti kompozitů byly stanoveny na zkušebním zařízení Hounsfield H10KT (viz obr. 3.5) s rozsahem snímací hlavy 500 N a 10 kN. Účelem zkoušky bylo stanovit pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu v souladu s ČSN EN ISO 178, přičemž výsledky měření jsou uvedeny v tab. 3.5. Zkušební vzorky měly rozměr (80×10×4) mm a byly zhotoveny obrobením ze střední části zkušebního tělesa v souladu s ČSN EN ISO 20753. Zkouška probíhala následovně. Těleso bylo umístěno symetricky mezi dvěma podpěrami vzdálenými od sebe 64 mm. Následně bylo prohýbáno trnem, působícím uprostřed rozpětí podpěr, konstantní rychlostí $v = 2$ mm/min tak dlouho, dokud se zkušební vzorek nezlomil. Smluvní diagramy jednotlivých kompozitů jsou uvedeny na obr. 3.6 až obr. 3.8. Modul pružnosti v ohybu (E_f) jednotlivých vzorků se stanovil ze smluvního diagramu závislosti $\sigma_f = f(\varepsilon_f)$, odečtením hodnoty napětí σ_{f1} a σ_{f2} při deformaci 0,05 % (ε_{f1}) a 0,25 % (ε_{f2}) a tyto hodnoty byly následně dosazeny do rovnice (3.1). Celý postup zkoušky byl proveden pro pět zkušebních vzorků v důsledku výpočtu průměrné hodnoty a směrodatné odchylky.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (3.1)$$

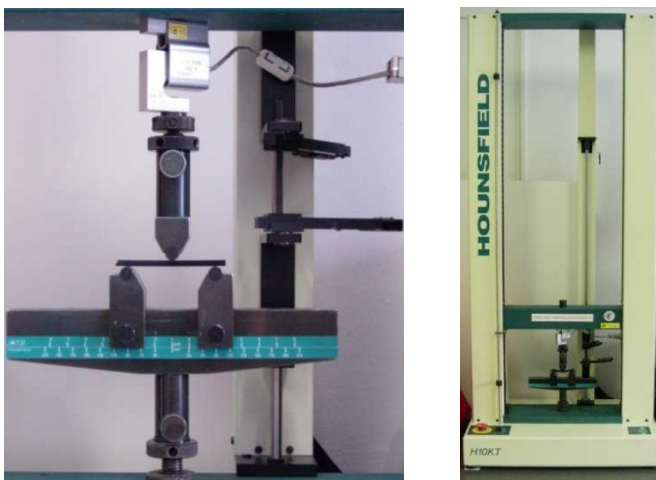
kde je:

σ_{f1} ohybové napětí stanovené při deformaci ohybem $\varepsilon_{f1} = 0,05$ % [MPa]

σ_{f2} ohybové napětí stanovené při deformaci ohybem $\varepsilon_{f2} = 0,25$ % [MPa]

ε_{f1} deformace ohybem při 0,05 %

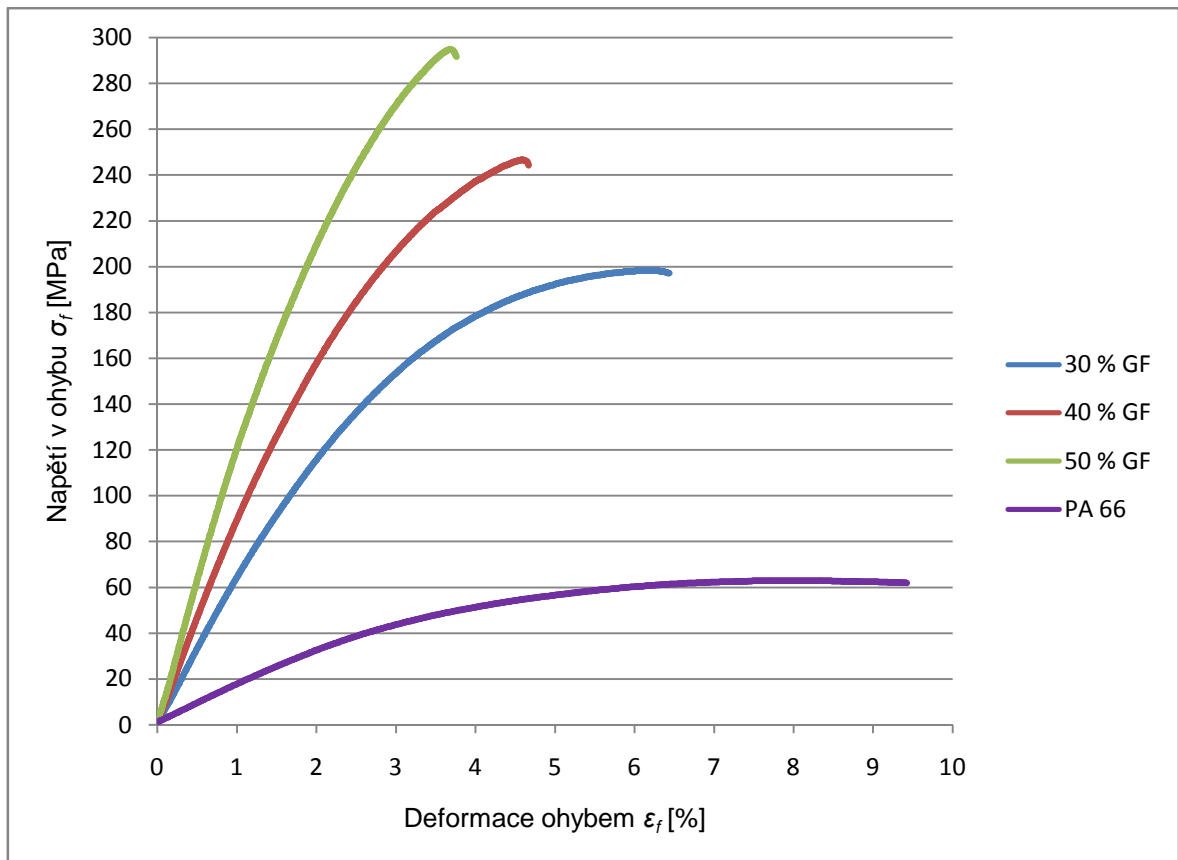
ε_{f2} deformace ohybem při 0,25 %



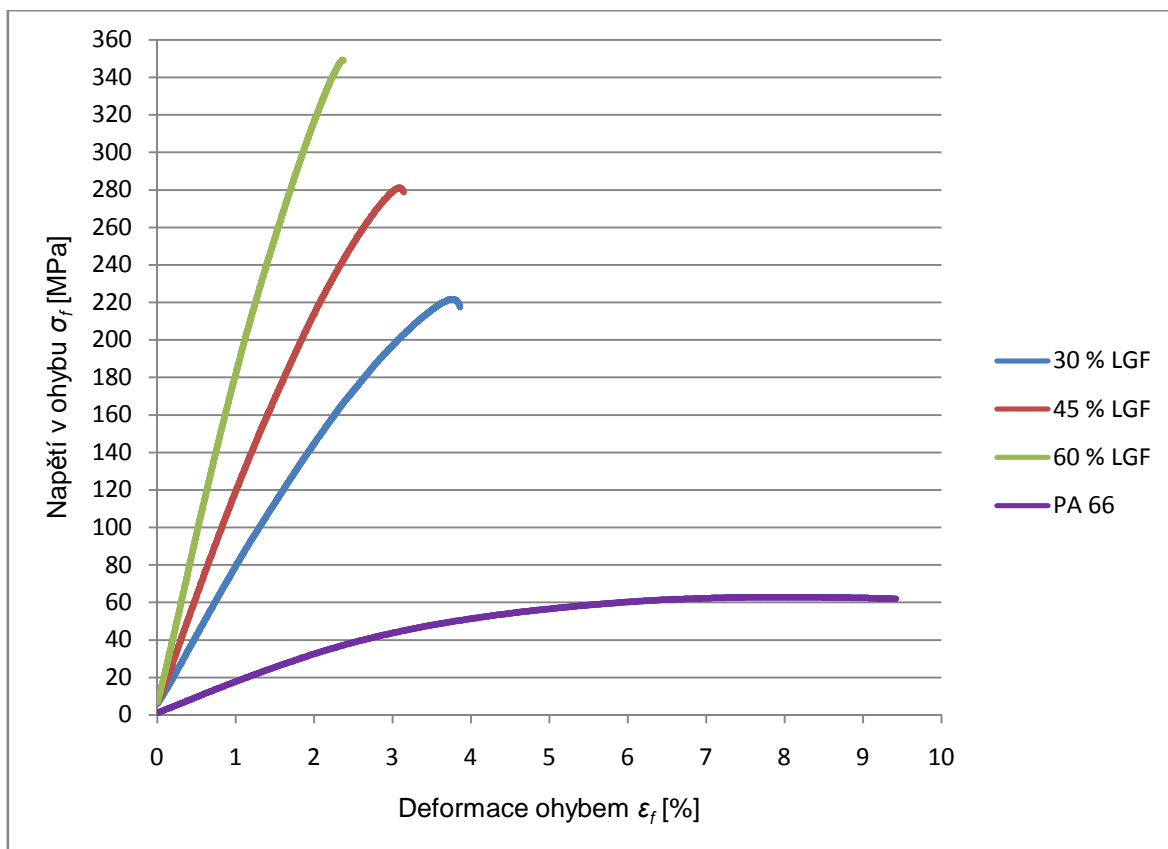
Obr. 3.5 Zkušební zařízení Hounsfield H10KT a uspořádání tříbodového ohybu

Tab. 3.5 Průměrné hodnoty a směrodatná odchylka meze pevnosti v ohybu (σ_{fM}) a modulu pružnosti v ohybu (E_f)

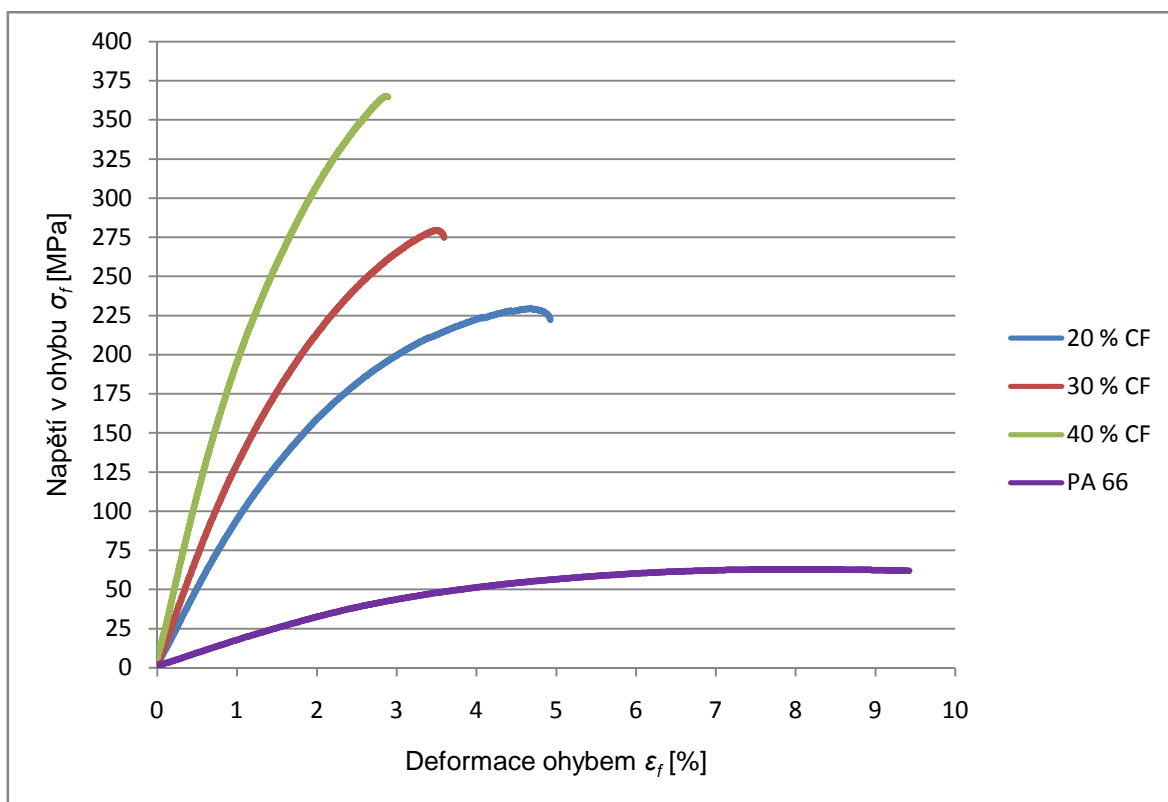
Kompozit		Mez pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa]	Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]
PA 66		63,0 ± 0,4	1 590,5 ± 61,1
PA 66 + GF	30 % GF	198,1 ± 2,3	6 804,0 ± 541,5
	40 % GF	246,0 ± 5,8	9 096,0 ± 549,1
	50 % GF	294,5 ± 2,3	12 240,0 ± 278,2
PA 66 + LGF	30 % LGF	222,1 ± 8,4	7 320,0 ± 520,3
	45 % LGF	278,8 ± 3,7	11 430,0 ± 540,0
	60 % LGF	351,8 ± 12,9	18 315,0 ± 705,8
PA 66 + CF	20 % CF	230,9 ± 2,9	9 600,0 ± 227,7
	30 % CF	279,1 ± 5,4	13 860,0 ± 73,5
	40 % CF	363,8 ± 6,4	21 565,0 ± 561,4



Obr. 3.6 Grafická závislost napětí v ohybu na deformaci u kompozitu PA 66 s krátkými skleněnými vlákny



Obr. 3.7 Grafická závislost napětí v ohybu na deformaci u kompozitu PA 66 s dlouhými skleněnými vlákny



Obr. 3.8 Grafická závislost napětí v ohybu na deformaci u kompozitu PA 66 s uhlíkovými vlákny

1.1.2 Stanovení tahových vlastností

Účelem této zkoušky bylo stanovit tahové vlastnosti jednotlivých zkušebních vzorků kompozitů. Pomocí jednoosého tahového zatížení byly měřeními zjištěny hodnoty pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu, poměrného prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení zkušebních vzorků v souladu s ČSN EN ISO 527-1/2. Zkouška byla provedena na zařízení Tira Test 2300 (viz obr. 3.9), kde rychlost zkoušení a rozsah snímací hlavy byly závislé na typu dané tahové vlastnosti. Zkušební vzorek byl upevněn mezi čelisti tak, aby nedocházelo k jeho vyklouznutí a případnému porušení, nebo rozmačkání. Poté se nastavila hodnota předpětí, která nesmí být záporná a zároveň vyšší než $\sigma_m / 100$, resp. $E_t / 2000$ [24]. V průběhu testování se zkušební těleso protahovalo ve směru své hlavní podélné osy konstantní zkušební rychlostí do jeho přetržení. Při samotné zkoušce se měřilo zatížení působící na zkušební těleso a poměrné prodloužení. Průběh celé zkoušky byl zaznamenáván do počítače, pomocí něhož bylo možné vygenerovat grafické závislosti napětí na poměrném prodloužení. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro jednotlivé šarže materiálu byla vypočtena z pěti naměřených vzorků zkušebních těles.



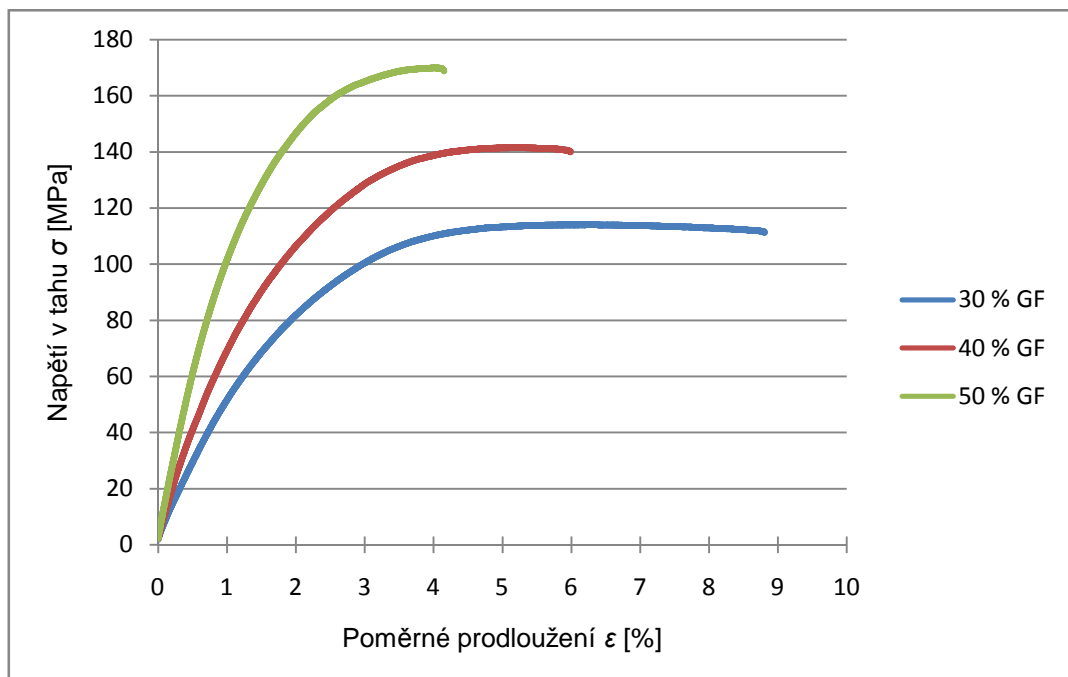
Obr. 3.9 Zkušební zařízení Tira Test 2300

Stanovení meze pevnosti v tahu

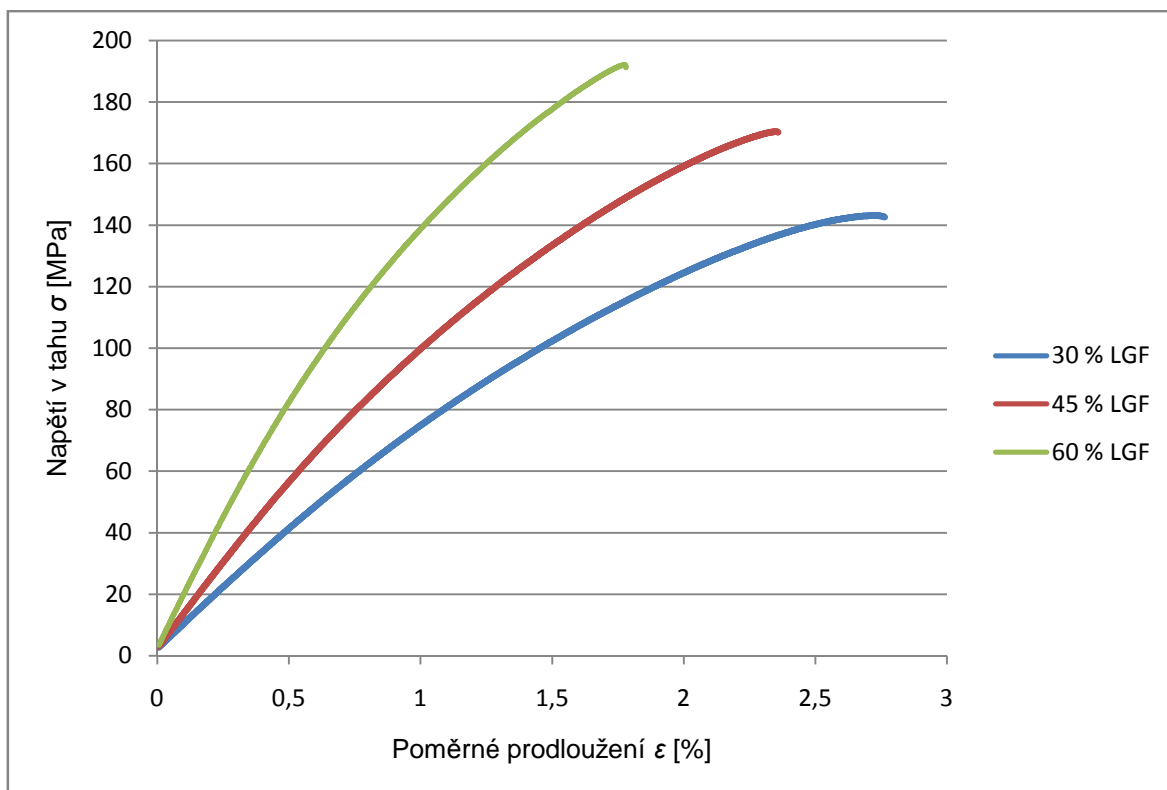
Mez pevnosti v tahu (σ_m) je smluvní napětí, odpovídající největšímu zatížení, které předchází porušení zkušebního vzorku. Výsledky měření pevnosti v tahu jsou uvedeny v tab. 3.6. Při měření bylo využito snímací hlavy, která měla použitelný rozsah do 100 kN. Zkušební těleso s počáteční měřenou délkou $L_0 = 80$ mm bylo protahováno ve směru hlavní podélné osy rychlostí $v = 5$ mm/min. Na obr. 3.10 až obr. 3.12 jsou znázorněny smluvní charakteristiky jednotlivých vzorků kompozitu a na obr. 3.13 je smluvní diagram samotného polyamidu PA 66.

Tab. 3.6 Průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu (σ_m) zkušebních vzorků kompozitu

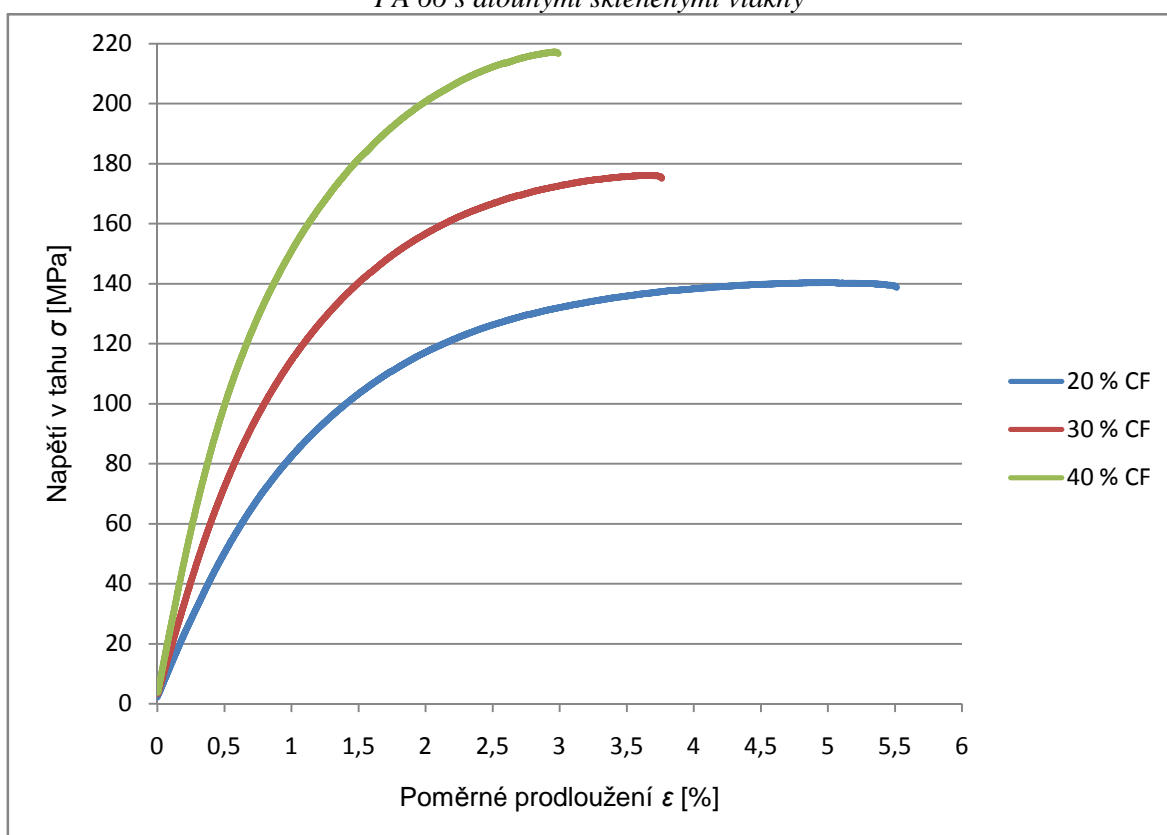
Kompozit		Napětí na mezi pevnosti v tahu σ_m [MPa]
PA 66		$55,0 \pm 0,2$
PA 66 + GF	30 % GF	$113,7 \pm 0,4$
	40 % GF	$141,6 \pm 0,5$
	50 % GF	$171,3 \pm 2,9$
PA 66 + LGF	30 % LGF	$134,7 \pm 5,1$
	45 % LGF	$168,9 \pm 3,8$
	60 % LGF	$192,0 \pm 5,7$
PA 66 + CF	20 % CF	$141,4 \pm 4,3$
	30 % CF	$175,9 \pm 1,6$
	40 % CF	$215,6 \pm 5,8$



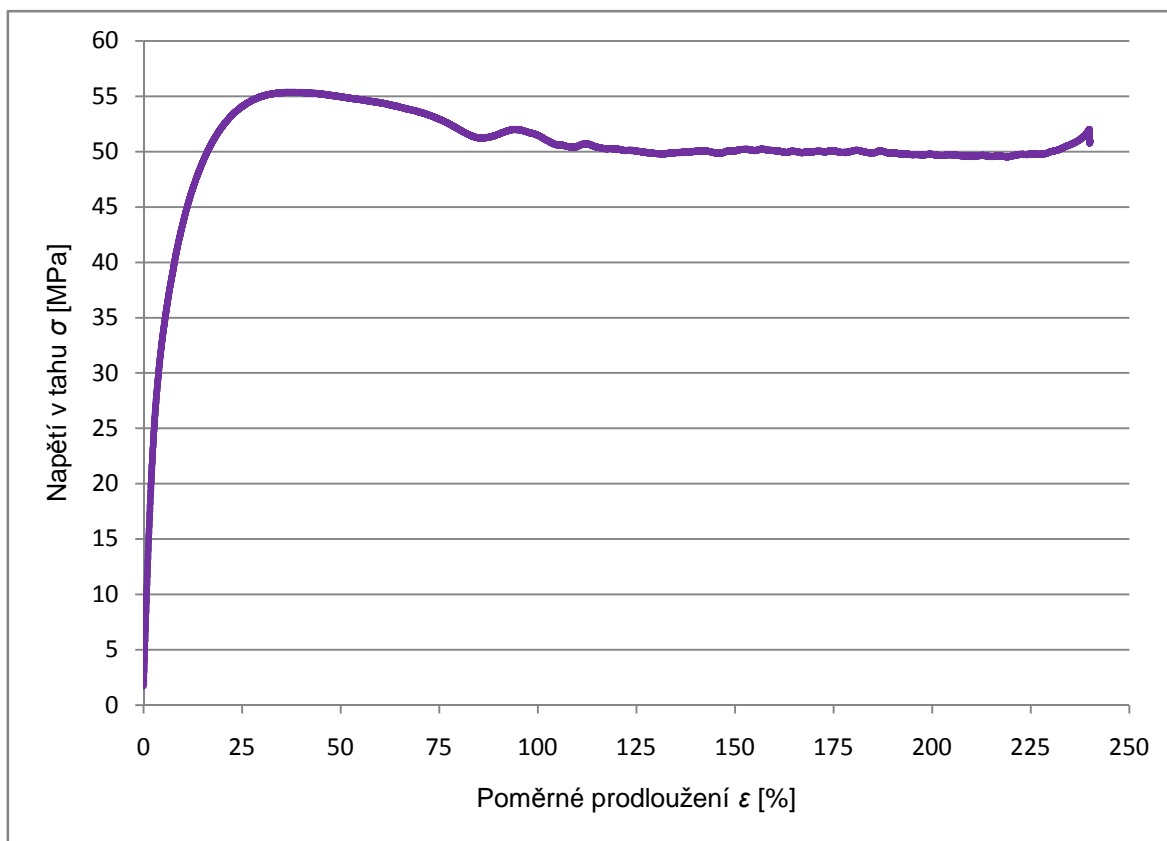
Obr. 3.10 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení u kompozitu PA 66 s krátkými skleněnými vlákny



Obr. 3.11 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení u kompozitu PA 66 s dlouhými skleněnými vlákny



Obr. 3.12 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení u kompozitu PA 66 s uhlíkovými vlákny



Obr. 3.13 Grafická závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení pro materiál PA 66

Stanovení modulu pružnosti v tahu

Počáteční měřená délka zkušební vzorku pro měření modulu pružnosti v tahu byla rovna $L_0=50$ mm. Zkouška probíhala za konstantní rychlosti $v = 1$ mm/min s rozsahem snímací hlavy 10 kN. Jako indikátor poměrného prodloužení byl použit průtahoměr Epsilon model 3542-010M-025-ST, který měl rozsah (10 – 80) mm. Modul pružnosti v tahu (E_t), jehož výsledky jsou uvedeny v tab. 3.7, byl stanoven u jednotlivých vzorků ze smluvního diagramu, jako sečna křivky závislosti $\sigma=f(\varepsilon)$ v souladu s normou ČSN EN ISO 527-2. Pro zjištění modulu pružnosti v tahu byly odečteny hodnoty napětí (σ_1) a (σ_2) při poměrném prodloužení (ε_1), (ε_2) a následně dosazeny do rovnice (3.2).

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.2)$$

kde je:

σ_1 tahové napětí stanovené při deformaci tahem $\varepsilon_1 = 0,05$ % [MPa]

σ_2 tahové napětí stanovené při deformaci tahem $\varepsilon_2 = 0,25$ % [MPa]

ε_1 poměrné prodloužení při 0,05 %

ε_2 poměrné prodloužení při 0,25 %

Tab. 3.7 Průměrné hodnoty a směrodatná odchylka modulu pružnosti v tahu (E_t) zkušebních vzorků kompozitu

Kompozit		Modul pružnosti v tahu E_t [MPa]
PA 66		1 376,4 ± 32,6
PA 66 + GF	30 % GF	6 447,7 ± 96,6
	40 % GF	9 025,4 ± 162,3
	50 % GF	12 146,6 ± 261,1
PA 66 + LGF	30 % LGF	7504,2 ± 261,1
	45 % LGF	11 455,9 ± 330,7
	60 % LGF	16 526,6 ± 582,7
PA 66 + CF	20 % CF	9 590,3 ± 274,1
	30 % CF	13 928,6 ± 370,9
	40 % CF	18 852,5 ± 864,6

Stanovení poměrného prodloužení na mezi pevnosti

Poměrné prodloužení na mezi pevnosti kompozitních vzorků bylo zjištěno pomocí průtahoměru MFN – B s rozsahem prodloužení 300 mm. Celá zkouška proběhla současně s měřením pevnosti v tahu, a proto jsou parametry počáteční měřené délky L_0 zkušebního vzorku, zkušební rychlosti v a rozsahu snímací hlavy stejné jako při stanovení meze pevnosti v tahu. Výsledky měření jsou uvedeny v tab.3.8.

Tab. 3.8 Průměrné hodnoty a směrodatná odchylka poměrného prodloužení na mezi pevnosti (ϵ_m) zkušebních vzorků kompozitu

Plnivo		Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [%]
PA 66		31,1 ± 1,9
PA 66 + GF	30 % GF	5,8 ± 0,4
	40 % GF	5,2 ± 0,1
	50 % GF	3,9 ± 0,3
PA 66 + LGF	30 % LGF	2,8 ± 0,1
	45 % LGF	2,5 ± 0,1
	60 % LGF	1,8 ± 0,1
PA 66 + CF	20 % CF	5,0 ± 0,1
	30 % CF	3,6 ± 0,1
	40 % CF	2,8 ± 0,2

Stanovení poměrného prodloužení při přetržení

Poměrné prodloužení při přetržení ε_b (viz rovnice 3.3) vyjadřuje celkovou tažnost a je definováno na základě změny délky měřeného úseku zkušební vzorku na počátku L_0 a při přetržení L_b . Čím je hodnota tažnosti vyšší, tím snadněji je materiál trvale deformovatelný. Jako indikátor poměrného prodloužení pro určení celkové tažnosti byl použit průtahoměr MFN – B. Výsledné hodnoty poměrného prodloužení při přetržení jsou uvedeny v tab.3.9.

$$\varepsilon_b = \frac{(L_b - L_0)}{L_0} \quad (3.3)$$

kde je:

ε_b poměrné prodloužení při přetržení zkušební vzorku [%]

L_b délka zkušební vzorku při přetržení [mm]

L_0 počáteční délka zkušební vzorku [mm]

Tab. 3.9 Průměrné hodnoty a směrodatná odchylka poměrného prodloužení při přetržení (ε_b) zkušebních vzorků kompozitu

Plnivo		Celková tažnost ε_b [%]
PA 66		Více jak 200
PA 66 + GF	30 % GF	$9,0 \pm 0,5$
	40 % GF	$5,8 \pm 0,2$
	50 % GF	$4,1 \pm 0,3$
PA 66 + LGF	30 % LGF	$2,9 \pm 0,1$
	45 % LGF	$2,5 \pm 0,1$
	60 % LGF	$1,8 \pm 0,1$
PA 66 + CF	20 % CF	$5,4 \pm 0,3$
	30 % CF	$3,7 \pm 0,1$
	40 % CF	$2,8 \pm 0,2$

3.2.3 Stanovení rázové houževnatosti Charpy

Rázová houževnatost Charpy (a_{cU}) udává odolnost materiálu vůči působení síly rázem u tělesa neobsahující vrub. Tato zkouška byla provedena na zařízení Resil 5.5 Ceast S.p.A (viz obr. 3.14) v souladu s ČSN EN ISO 179-1. Zkušební vzorek typu 1 měl rozměry (80×10×4) mm. Pro stanovení rázové houževnatosti Charpy bylo použito kladivo s nominální energií $E_{nom} = 5$ J. Při volbě kladiva bylo uvažováno s tím, že energie potřebná k přeražení zkušebního vzorku se musí nacházet v toleranci (10 až 80) % potenciální energie kladiva. Zkouška probíhala dle následujícího postupu. Před zapnutím přístroje bylo nasazeno kladivo. Následně po zapnutí přístroje proběhla kalibrace. Po kalibraci byla zaznamenána hodnota energie při prázdném kmitu kyvadla, která se musí odečíst od hodnoty naměřené při měření na zkušebním tělesu. Poté bylo kladivo zajištěno ve výchozí pozici pro započítání zkoušky. Zkušební těleso bylo umístěno vodorovně na podpěry vzdálené 62 mm, tak aby střed vzorku ležel v dráze kladiva a zkouška proběhla na užší stranu tělesa (viz obr. 3.15). Kladivo bylo uvolněno a přerazilo zkušební těleso rychlostí rázu $2,9$ m/s ± 10 %. Ze zaznamenané energie spotřebované k přeražení zkušebního tělesa byla vypočtena dle rovnice (3.4) rázová houževnatost Charpy. Vzhledem k vysoké rázové houževnatosti čisté polyamidové matrice PA 66 bylo pro zkušební vzorky ve spolupráci s katedrou materiálů FS TUL použito zařízení Zwick/Roell HIT 50 P, umožňující použití kladiva s rozsahem nominální energie až $E_{nom} = 50$ J a rychlostí rázu $3,8$ m/s ± 10 %. Avšak ani v tomto případě nedošlo k přeražení zkušebního tělesa. Z deseti zkušebních vzorků byla vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Výsledky měření rázové houževnatosti Charpy jsou uvedeny v tab. 3.10.

$$a_{cU} = \frac{E_C}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (3.4)$$

kde je:

a_{cU} rázová houževnatost Charpy zkušebního tělesa [kJ/m²]

E_C energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa [J]

h tloušťka zkušebního vzorku [mm]

b šířka zkušebního tělesa [mm]

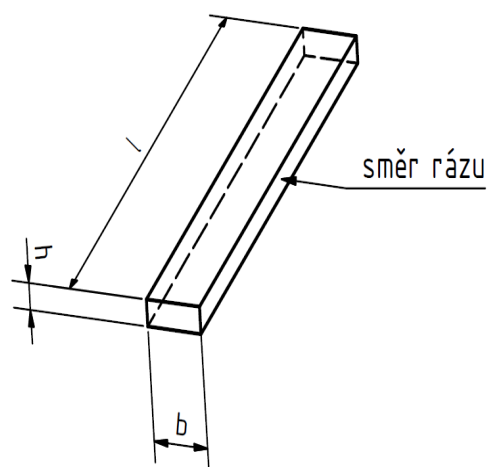
Tab. 3.10 Průměrné hodnoty a směrodatná odchylka rázové houževnatosti Charpy (a_{cU}) zkušebních vzorků kompozitu

Kompozit		Rázová houževnatost Charpy a_{cU} [kJ/m ²]
PA 66		NB
PA 66 + GF	30 % GF	84,7 ± 4,3
	40 % GF	84,0 ± 3,6
	50 % GF	92,5 ± 5,3
PA 66 + LGF	30 % LGF	49,6 ± 9,0
	45 % LGF	70,8 ± 12,7
	60 % LGF	83,2 ± 11,2
PA 66 + CF	20 % CF	74,2 ± 2,4
	30 % CF	71,8 ± 5,8
	40 % CF	84,7 ± 3,2

Poznámka: NB = nepřetrženo (not break)



Obr. 3.14 Zařízení Resil 5.5 Ceast S.p.A



Obr. 3.15 Ráz Charpy na užší stranu

3.2.4 Stanovení hustoty

Stanovení hustoty bylo provedeno imerzní metodou v souladu s ČSN EN ISO 1183-1 na analytické váze AND GF300 (viz obr. 3.16). Tato metoda využívá měření hmotnosti vzorku na vzduchu a v imerzní kapalině, která je v kádince na podstavci analytických vah se speciální konstrukcí. V tomto případě byl imerzní kapalinou methanol s hustotou $\rho = 791 \text{ kg/m}^3$ při teplotě $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Zkušební vzorek o hmotnosti větší než 1 g byl nejdříve umístěn na horní misku vahadla a zvážen na vzduchu. Poté se vzorek umístěný na spodní misce vahadla zvážil v imerzní kapalině. Z naměřených hodnot byla dle rovnice (3.5) vypočtena hustota kompozitního vzorku viz tab 3.11.



Obr. 3.16 Analytická váha AND GF300

$$\rho_S = \frac{m_{S,A} \cdot \rho_{IL}}{m_{S,A} - m_{S,IL}} \quad (3.5)$$

kde je:

ρ_S hustota zkušební vzorku [kg/m^3]

$m_{S,A}$ zdánlivá hmotnost zkušební vzorku na vzduchu [g]

$m_{S,IL}$ zdánlivá hmotnost zkušební vzorku v imerzní kapalině [g]

ρ_{IL} hustota imerzní kapaliny při teplotě 23°C [kg/m^3]

Tab. 3.11 Průměrné hodnoty a směrodatná odchylka hustoty (ρ_S) zkušebních vzorků kompozitu

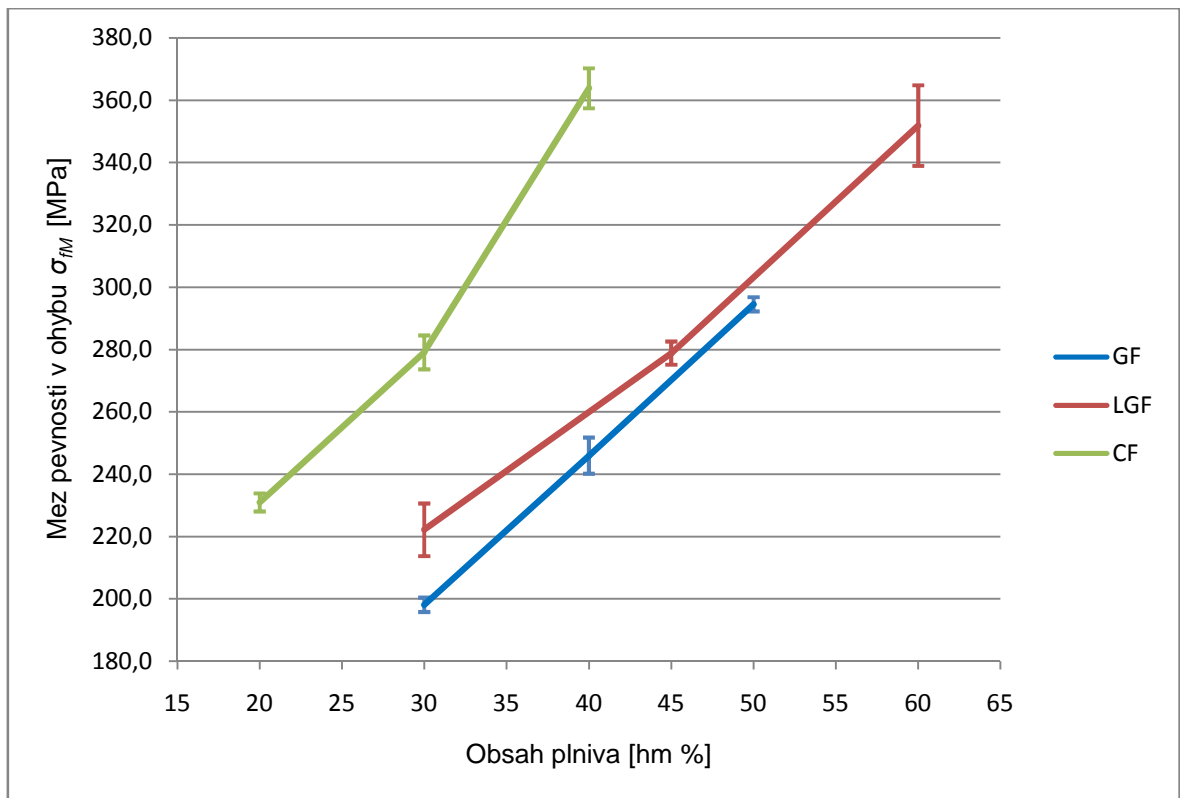
Kompozit		Hustota zkušební vzorku ρ_S [kg/m^3]
PA 66		1149 ± 1
PA 66 + GF	30 % GF	1365 ± 5
	40 % GF	1449 ± 1
	50 % GF	1562 ± 2
PA 66 + LGF	30 % LGF	1357 ± 6
	45 % LGF	1518 ± 5
	60 % LGF	1769 ± 5
PA 66 + CF	20 % CF	1222 ± 1
	30 % CF	1259 ± 2
	40 % CF	1309 ± 0

4 Vyhodnocení s diskuse výsledků

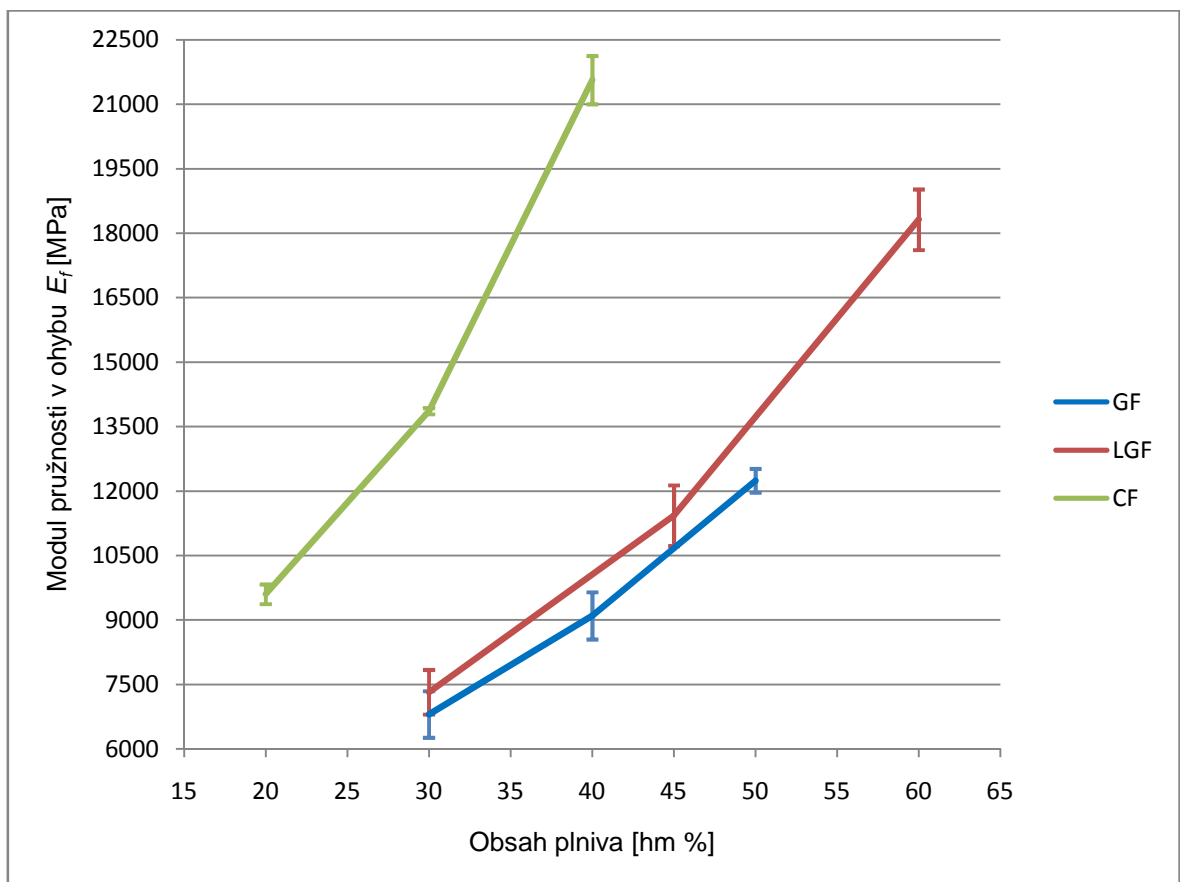
Tato kapitola bakalářské práce se zabývá vyhodnocením naměřených hodnot fyzikálně mechanických vlastností kompozitních výstřiků v závislosti na typu a množství vláknenného plniva v matrici PA 66.

4.1 Vyhodnocení ohybových vlastností

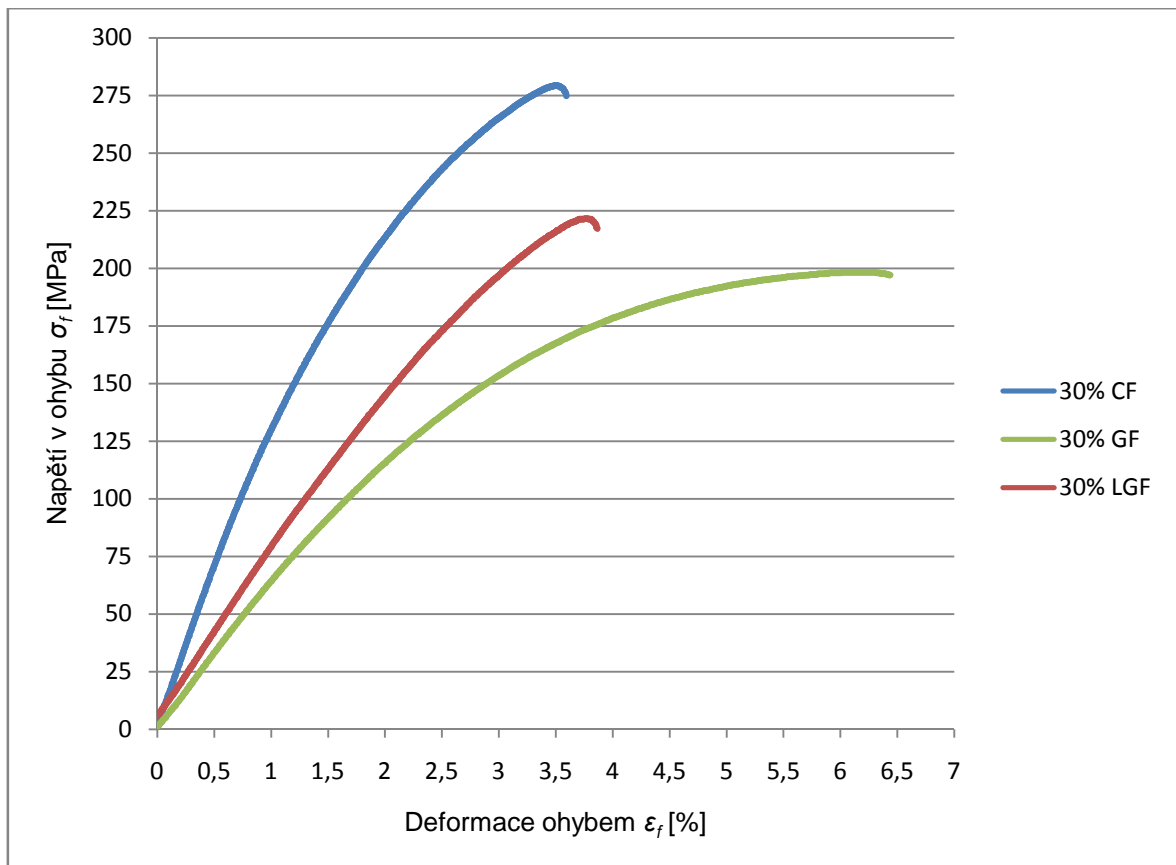
Ohybové vlastnosti jednotlivých vzorků kompozitu byly stanoveny v souladu s ČSN EN ISO 178. U ohybové zkoušky bylo měřeno napětí na mezi pevnosti (σ_{fM}) a modul pružnosti (E_f). Hodnoty získané měřením jsou uvedeny v tab. 3.5 (kapitola 3.2.1) a na obr.4.1 až obr.4.3. Z naměřených údajů a obr. 4.1 závislosti meze pevnosti v ohybu (σ_{fM}) na obsahu plniva lze sledovat, že s rostoucím množstvím vláken v polyamidové matrici vzrůstá mez pevnosti v ohybu. Dle obr. 4.2 lze tvrdit, že se zvyšujícím se obsahem plniva roste i modul pružnosti (E_f) u všech druhů zkoumaných vláken. Tím se potvrzují teoretické poznatky uvedené v kapitole 2.3.1 a kapitole 2.4, které uvádějí, že s rostoucím obsahem plniva se zvyšuje pevnost a tuhost polymerních kompozitů. Nejvyšší pevnost a modul pružnosti v ohybu byl dosažen u kompozitů s uhlíkovými vlákny. Pro porovnání meze pevnosti a modulu pružnosti v ohybu jednotlivých typů vláken v polyamidové matrici bylo vybráno stejné hmotnostní obsazení 30 % (viz obr 4.3). Při obsahu 30 % uhlíkových vláken činila pevnost v ohybu kompozitu $\sigma_{fM} = 279,1$ MPa. To odpovídá zvýšení pevnosti o 343 % vůči samotnému materiálu matrice a zvýšení modulu pružnosti o 503 %. Při porovnávání krátkých (GF) a dlouhých (LGF) skleněných vláken je patrný pozitivní vliv délky vláken na mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu kompozitu. Kompozity s obsahem 30 % GF vykazují oproti materiálu matrice PA 66 nárůst hodnoty (σ_{fM}) o 214 % a zvýšení modulu pružnosti o 428 %. Kompozity s obsahem 30 % LGF vykazují vyšší mez pevnosti v ohybu o 252 % a vyšší modul pružnosti o 360 %. Dlouhá skleněná vlákna jsou z hlediska přenosu zatížení v ohybu lepší variantou než krátká skleněná vlákna. Vysvětlení lze nalézt ve vyšším množství napěťových špiček u krátkovlákných kompozitů nebo v odlišném uspořádání vláken v matrici. Obdobné pevnosti v ohybu jako u kompozitu PA 66 + 40 % CF lze dosáhnout u kompozitu PA 66 + 60 % LGF, avšak tento kompozit bude při zpracování vyžadovat vyšší vstřikovací rychlost a vstřikovací tlak, vzhledem k horším tokovým vlastnostem taveniny kompozitu. Tato skutečnost se může ve výsledcích projevit např. vyšším vnitřním napětím výstřiku apod.



Obr. 4.1 Grafická závislost meze pevnosti v ohybu (σ_{fM}) na hmotnostním obsahu plniva kompozitu



Obr. 4.2 Grafická závislost modulu pružnosti v ohybu (E_f) na hmotnostním obsahu plniva kompozitu



Obr. 4.3 Grafická závislost napětí v ohybu (σ_f) na deformaci pro vzorky s hmotnostním obsahem plniva 30%

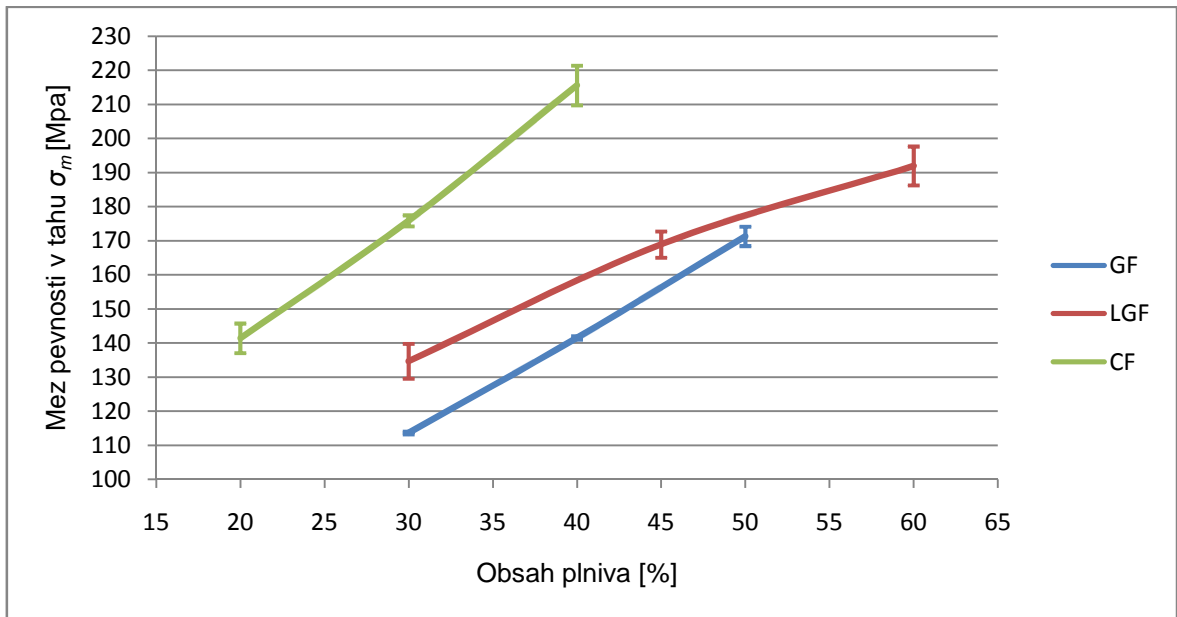
4.2 Vyhodnocení tahových vlastností

Tahové vlastnosti jednotlivých vzorků kompozitu byly stanoveny v souladu s ČSN EN ISO 527-1/2. Mezi tahové vlastnosti patří mez pevnosti v tahu (σ_m), modul pružnosti v tahu (E_t), poměrné prodloužení na mez pevnosti (ϵ_m) a poměrné prodloužení při přetržení (ϵ_b) neboli celková tažnost.

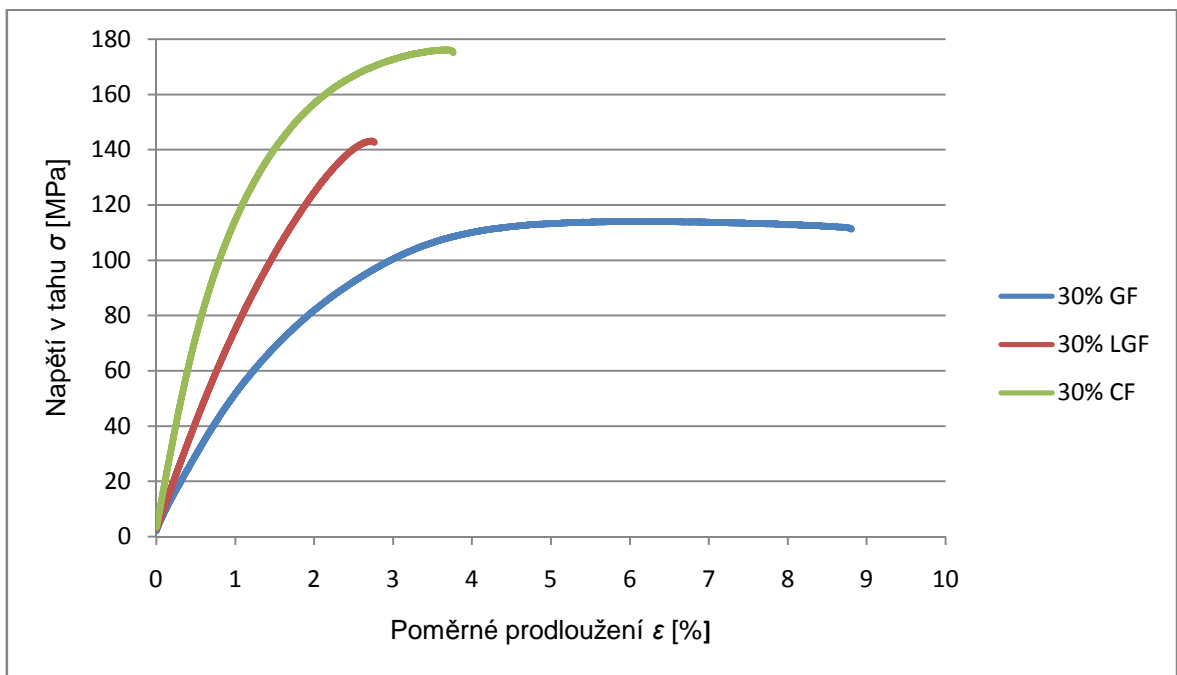
4.2.1 Vyhodnocení naměřených hodnot meze pevnosti v tahu

Z výsledků měření pevnosti v tahu, které jsou uvedeny v tab. 3.6 (kapitola 3.2.2) a na obr. 4.4, vyplývá, že přidáním všech tří druhů zkoumaných vláken dochází ke zvýšení meze pevnosti v matrici PA. Nejvyšších hodnot dosáhly kompozity s uhlíkovými vlákny (CF). Naopak nejnižší hodnoty vykazují kompozity s krátkými skleněnými vlákny (GF). Zkušební vzorek z PA 66 měl průměrnou hodnotu $\sigma_m = 55$ MPa. Pro porovnání může sloužit obr. 4.5 kde obsah plniva u všech kompozitů činí 30 %. Zde je patrné, že pevnost u skleněných vláken je ovlivněna jejich délkou. Rozdíl pevnosti v tahu pro tento případ

činní 21 MPa. Příčinou je množství napěťových špiček. Vnější zatížení je na vlákna přenášeno prostřednictvím matrice a na koncích se koncentruje napětí. Větších napěťových špiček je dosahováno u krátkovlákných kompozitů a ty mají za následek nižší hodnoty meze pevnosti. Při použití kompozitu vyztuženého 30 % uhlíkových vláken (CF) bylo oproti matrici PA 66 dosaženo zvýšení meze pevnosti o 157 %, při vyztužení 30 % dlouhých skleněných vláken (LGF) o 145 % a při vyztužení 30 % krátkých skelněných vláken (CF) o 107 %.



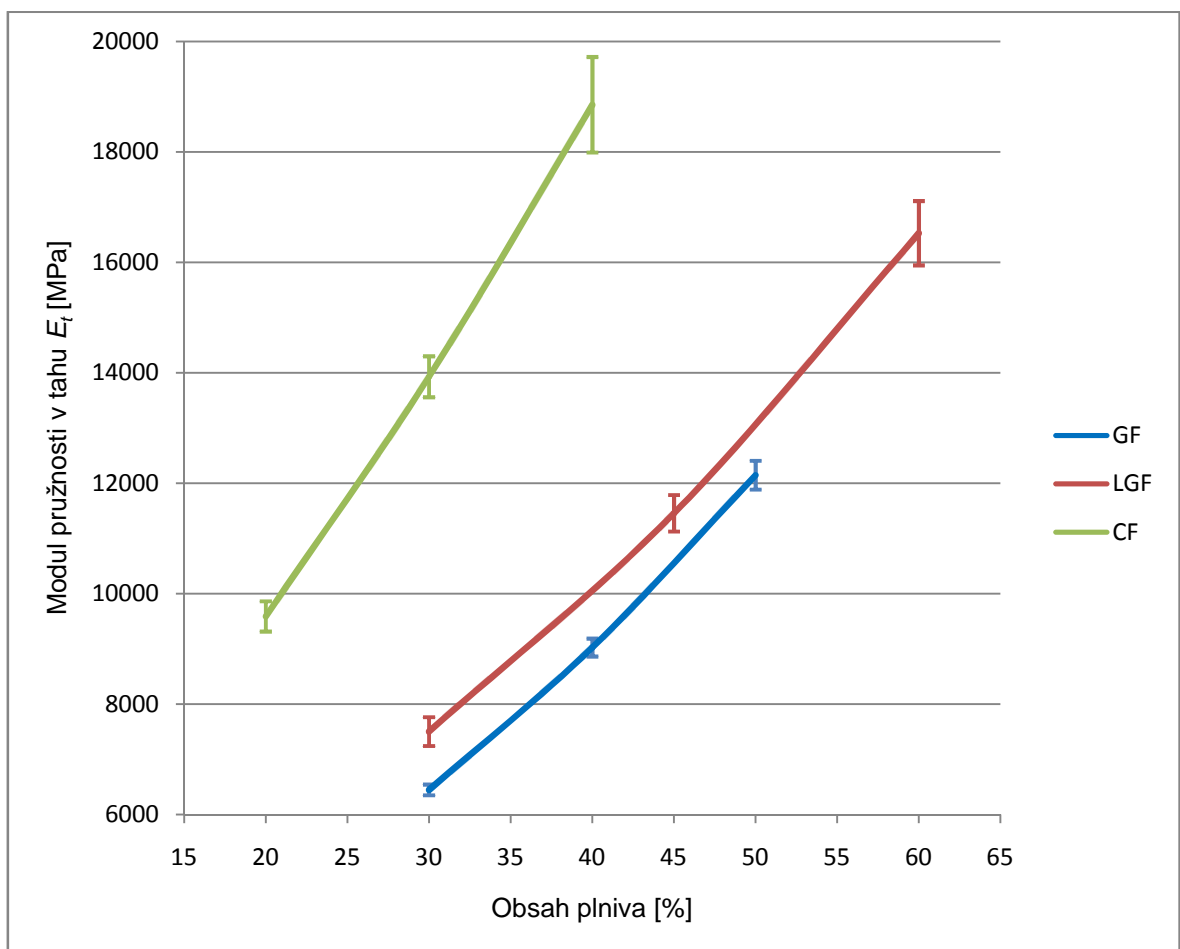
Obr. 4.4 Grafická závislost meze pevnosti v tahu (σ_m) na hmotnostním obsahu plniva kompozitu



Obr. 4.5 Grafická závislost napětí v tahu σ na deformaci pro vzorky s hmotnostním obsahem plniva 30%

2.1.2 Vyhodnocení naměřených hodnot modulu pružnosti v tahu

Díky naměřeným hodnotám modulu pružnosti v tahu, stanovených v tab. 3.7 (kapitola 3.2.2) byly zjištěny následující poznatky. S rostoucím obsahem uhlíkových a skleněných vláken v kompozitu s matricí PA 66 se zvyšuje modul pružnosti v tahu, což je znázorněno na obr. 4.6. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán u kompozitu s uhlíkovými vlákny (CF). Nárůst modulu pružnosti zkoumaných kompozitů se stejným obsahem plniva 30 %, činní procentuální diferencí u vzorků s krátkými skleněnými vlákny 368 % vůči materiálu matrice PA 66. U kompozitu s dlouhými skleněnými vlákny narostl modul pružnosti o 445 %. Kompozit s uhlíkovými vlákny nabyl rozdílu až 911 % vůči materiálu matrice PA 66.

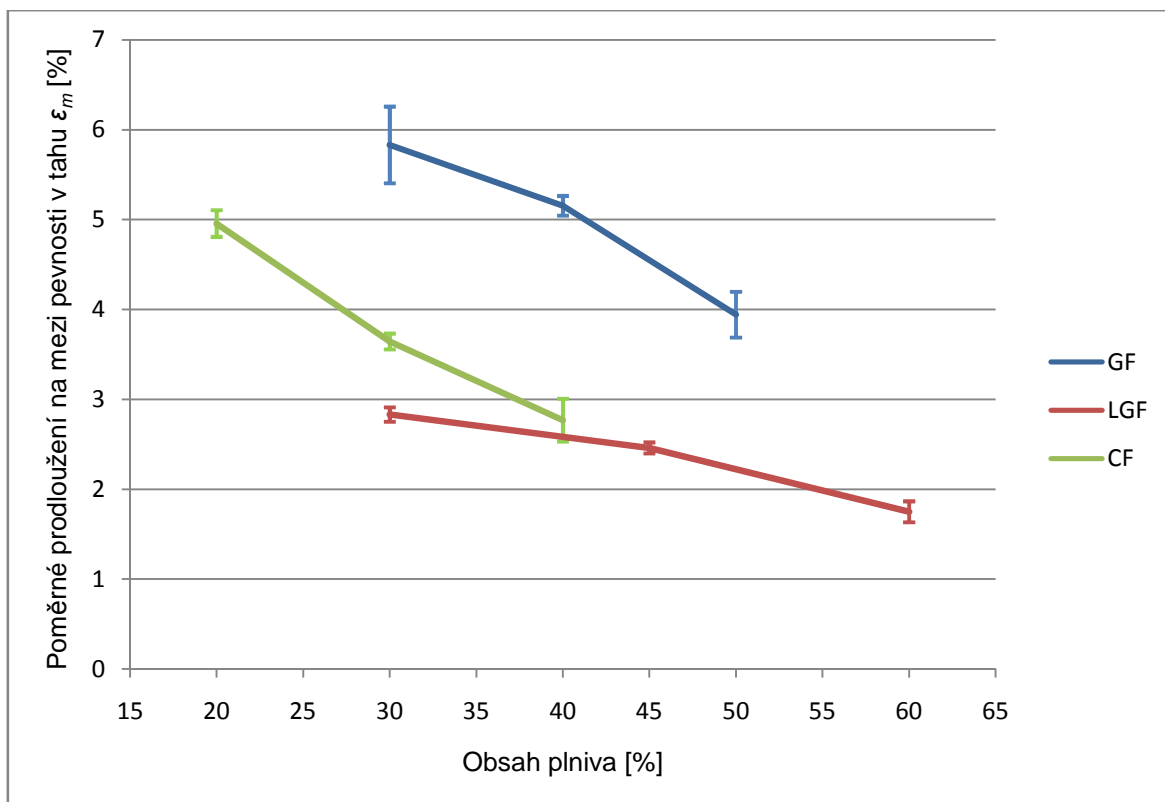


Obr. 4.6 Grafická závislost modulu pružnosti v tahu (E_t) na hmotnostním obsahu plniva kompozitu

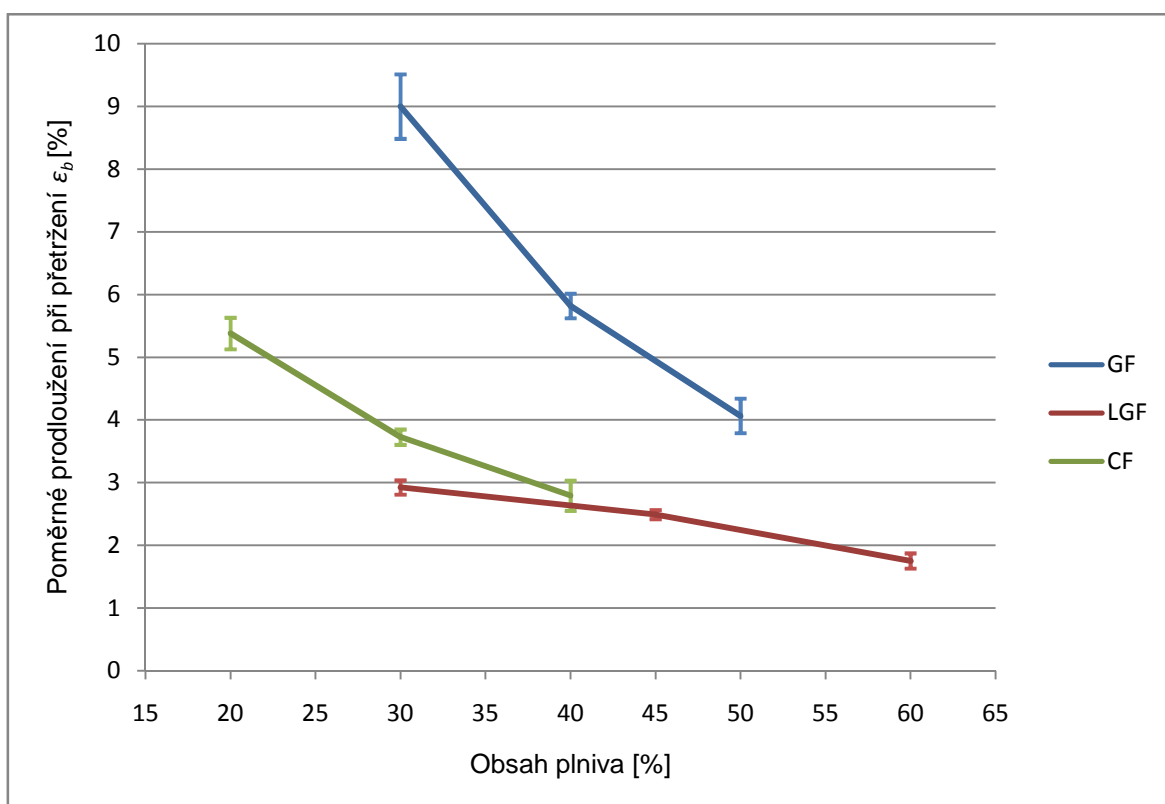
2.1.3 Vyhodnocení naměřených hodnot poměrného prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení

Z výsledků měření poměrného prodloužení, viz tab. 3.8 a tab 3.9 (kapitola 3.2.2) a obr. 4.7 až obr. 4.8 bylo zjištěno, že s přibývajícím množstvím plniva ve formě vláken klesá poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu (ε_m) a při přetržení (ε_b). Díky tomuto měření bylo odhaleno, že kompozity s krátkými skleněnými vlákny mají vyšší poměrné prodloužení než s dlouhými skleněnými vlákny nebo uhlíkovými vlákny. Z hlediska stejného procentuálního množství plniva 30 % bylo zjištěno následující snížení poměrného prodloužení na mezi pevnosti: u kompozitu s krátkými skleněnými vlákny (GF) se poměrné prodloužení na mezi pevnosti zmenšilo o 83 %, kompozit s dlouhými skleněnými vlákny (LGF) dosáhl snížení poměrného prodloužení na mezi pevnosti o 91 % a kompozit s uhlíkovými vlákny o 84 % vůči materiálu matrice PA 66. Materiál matrice PA 66 nabyt $\varepsilon_m = 31,1$ %. Nejhorších výsledků tedy dosáhl kompozit s dlouhými skleněnými vlákny, která mají nižší tažnost na rozdíl od uhlíkových a krátkých skleněných vláken [2].

V případě poměrného prodloužení při přetržení měl zkušební vzorek samotného materiálu matrice PA 66 celkovou tažnost přibližně $\varepsilon_b = 240$ %. U vzorků polymerních kompozitů vyztužených zkoumanými vlákny je celková tažnost velmi nízká. Nejvyšší vliv na poměrné prodloužení při přetržení kompozitů mají krátká skleněná vlákna, která mají dle teoretických poznatků větší tažnost než uhlíková a dlouhá skleněná vlákna. Například kompozit se 30 % krátkých skleněných vláken (GF) má hodnotu poměrného prodloužení při přetržení 9 %, což je o 6,1 % více než u dlouhých skleněných vláken (LGF) a 4,6 % u vláken uhlíkových (CF). V porovnání s materiálem matrice se celková tažnost kompozitů snížila o 96 % v případě krátkých skleněných vláken (GF), o 99 % u kompozitu s dlouhými skleněnými vlákny (LGF) a o 98 % pro kompozit s uhlíkovými vlákny (CF).



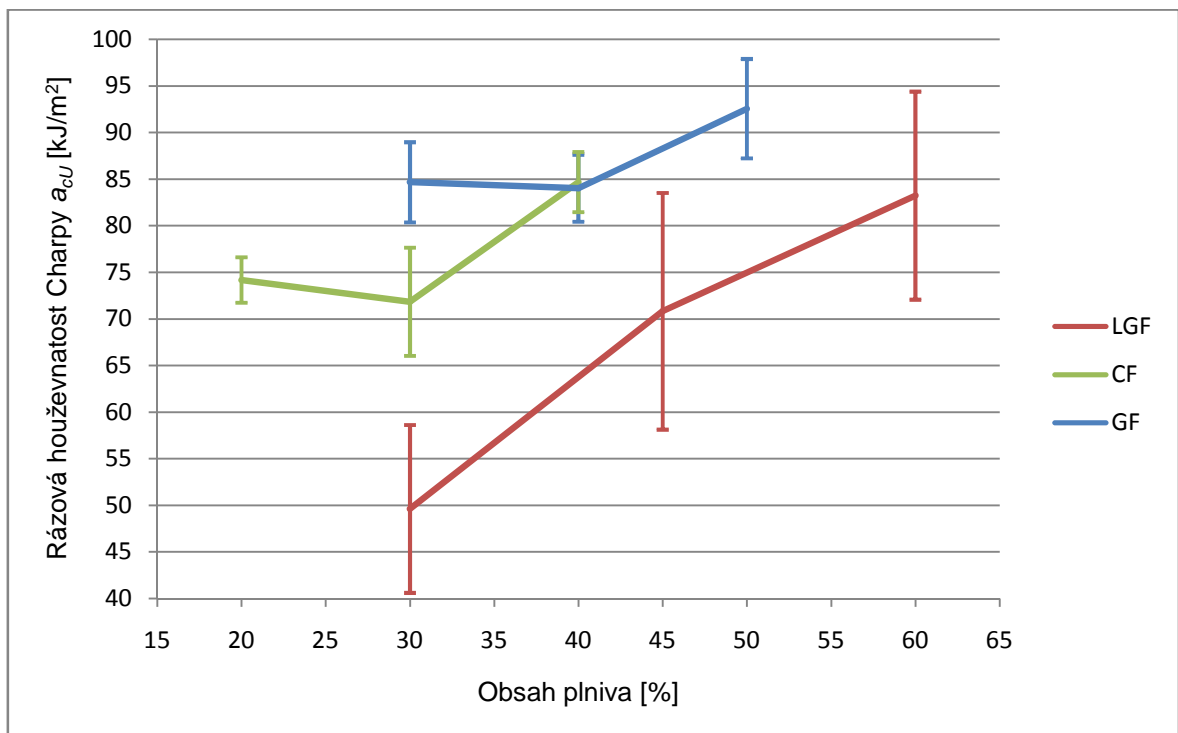
Obr. 4.7 Grafická závislost poměrného prodloužení na mezi pevnosti (ϵ_m) na hmotnostním obsahu plniva kompozitu



Obr. 4.8 Grafická závislost poměrného prodloužení při přetržení (ϵ_b) na hmotnostním obsahu plniva kompozitu

4.3 Vyhodnocení rázové houževnatosti Charpy

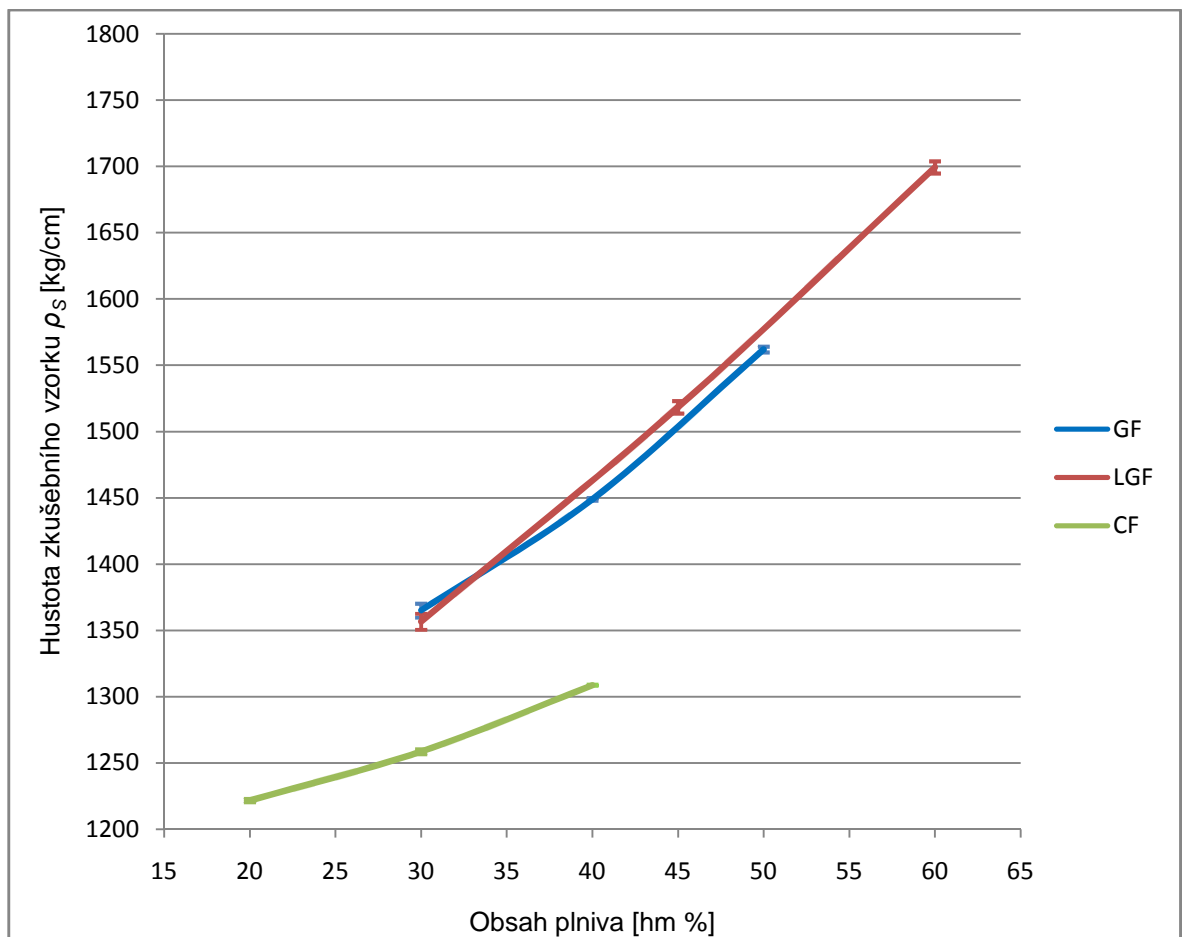
Hodnoty rázové houževnatosti Charpy byly stanoveny v souladu s ČSN EN ISO 179-1. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 3.10 (kapitola 3.2.3) a obr. 4.9. Z obr. 4.9 závislosti rázové houževnatosti Charpy na obsahu plniva lze na první pohled konstatovat, že se zvyšujícím se množstvím skleněných a uhlíkových vláken v matrici roste i rázová houževnatost Charpy (na rozdíl od kompozitů s přírodními vlákny [13]), která je však výrazně nižší oproti samotnému materiálu matrice PA 66. Nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti Charpy vykazují kompozity s krátkými skleněnými vlákny a naopak nejnižších hodnot dosahují kompozity s dlouhými skleněnými vlákny. Důvodem tohoto poklesu houževnatosti je délka vlákna, které má menší odolnost vůči rázu. Zkušební vzorky zhotovené z materiálu matrice PA 66 nebyly při zkoušce přeraženy ani na zařízení Zwick/Roel HIT 50 P, které umožňuje použít kladivo s nominální energií až 50 J. Potvrzuje se tak že materiál PA 66 je velmi houževnatý na rozdíl od vzorků kompozitů s vláknitým plnivem, které jsou ve srovnání s materiálem matrice křehké. Při srovnání kompozitů se 30 % zkoumaných vláken dosáhl kompozit s uhlíkovými vlákny (CF) 85 % z průměrné hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s krátkými skleněnými vlákny (GF). Kompozit s dlouhými skleněnými vlákny dosáhl 59 % z průměrné hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s krátkými skleněnými vlákny (GF).



Obr. 4.9 Grafická závislost rázové houževnatosti Charpy (a_{cU}) na hmotnostním obsahu plniva kompozitu

4.4 Vyhodnocení hustoty

V souladu s normou ČSN EN ISO 1183-1 bylo provedeno měření hustoty zkušebních vzorků, jejíž výsledky jsou uvedeny v tab. 3.11 (kapitola 3.2.4) a na obr. 4.10. Z naměřených hodnot vyplývá, že s rostoucím podílem plniva ve formě vláken roste i hustota kompozitu. Nejnižší hustota byla zjištěna pro kompozit s uhlíkovými vlákny, neboť uhlíková vlákna mají nižší hustotu než skleněná vlákna [9]. Samotný materiál matrice PA 66 měl hustotu $\rho_S = 1,15 \text{ kg/m}^3$. Z obr. 4.10 závislosti hustoty vzorku (ρ_S) na obsahu plniva lze vidět, že polymerní kompozit PA 66 + 30 % GF a LGF má stejnou hustotu, to znamená, že délka vláken nemá vliv na výslednou hustotu vzorku. Při srovnání kompozitů se 30 % zkoumaných plniv vyplývá, že kompozit s uhlíkovými vlákny má vyšší hustotu o 6 % vůči materiálu matrice PA 66. Kompozity se skleněnými vlákny mají nárůst hustoty o 19 % oproti materiálu matrice PA 66.



Obr. 4.10 Grafická závislost hustoty vzorku (ρ_S) na hmotnostním obsahu plniva kompozitu

5 Závěr

Tato bakalářská práce se v teoretické části zabývá všeobecným rozdělením kompozitů a následně podrobnější charakteristikou polymerních kompozitů vyztužených skleněnými a uhlíkovými vlákny. Rozebírá vlastnosti použitých vláken a polyamidové matrice použité při experimentálním měření.

Experimentální část je zaměřena na výrobu zkušebních těles vstřikováním a zároveň na měření mechanických a fyzikálních vlastností zhotovených polymerních kompozitů. Mezi sledované vlastnosti patří napětí na mezi pevnosti v tahu a ohybu, modul pružnosti v tahu i ohybu, poměrné prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení, rázová houževnatost Charpy a hustota zkušebních vzorků.

Z naměřených výsledků lze tvrdit, že se zvyšujícím se obsahem plniva roste hustota, ale zároveň stoupají mechanické vlastnosti: mez pevnosti v tahu a ohybu, modul pružnosti v tahu a ohybu. Naopak s přibývajícím obsahem plniva klesá poměrné prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení. Jak bylo uvedeno v teoretické části, polymerní kompozity vyztužené vlákny, vynikají poměrem měrné tuhosti (E_t/ρ_S) a měrné prvnosti (σ_m/ρ_S). V tab. 5.1 jsou uvedeny měrné pevnosti (σ_m/ρ_S) a tuhosti (E_t/ρ_S) v tahu pro polyamidovou matrici PA 66 a kompozitní materiály na bázi PA 66 vyztužené 30 % uhlíkových a skleněných vláken. Nejvyšších poměrů bylo dosaženo u kompozitu s uhlíkovými vlákny, kde uvedené podíly činily $\sigma_m/\rho_S = 115,7 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ a $E_t/\rho_S = 7,8 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ to dopovídá procentuálnímu zlepšení σ_m/ρ_S o 142 % a E_t/ρ_S o 550 % vůči materiálu matrice PA 66. U dlouhých skleněných vláken došlo k zlepšení poměrů σ_m/ρ_S o 107 % a poměr E_t/ρ_S o 358 % vůči materiálu matrice. V případě krátkých skleněných vláken narostl poměr σ_m/ρ_S o 74 % a poměr E_t/ρ_S o 292 % vůči materiálu matrice. Při porovnání dlouhých a krátkých skleněných vláken mezi sebou se zvýšil poměr σ_m/ρ_S u dlouhých vláken o 19 % a poměr E_t/ρ_S o 17 %.

Tab. 5.1 Poměry meze pevnosti v tahu (σ_m) ku hustotě vzorku (ρ_S) a modulu pružnosti v tahu (E_t) vůči hustotě vzorku (ρ_S)

Kompozit	σ_m [MPa]	ρ_S [kg/m ³]	E_t [MPa]	σ_m/ρ_S [m ² /s ²]	E_t/ρ_S [m ³ /s ²]
PA 66	55,0	1149	1 376,4	$47,9 \times 10^3$	$1,2 \times 10^6$
PA 66 + 30 % GF	113,7	1365	6 447,7	$83,3 \times 10^3$	$4,7 \times 10^6$
PA 66 + 30 % LGF	134,7	1357	7 504,2	$99,3 \times 10^3$	$5,5 \times 10^6$
PA 66 + 30 % CF	141,4	1222	9 590,3	$115,7 \times 10^3$	$7,8 \times 10^6$

Z výsledků lze konstatovat, že uhlíková vlákna jsou z hlediska své pevnosti a pružnosti v tahu i ohybu, nejlepším plnivem ze zkoumaných typů vláken pro náročné konstrukční aplikace. Všechny vzorky kompozitu byly porovnávány při stejném hmotnostním obsahu vláken 30 %. U kompozitů s uhlíkovými vlákny bylo zaznamenáno procentuální zvýšení meze pevnosti v ohybu o 343 %, modulu pružnosti v ohybu o 503 %, mez pevnosti v tahu o 157 % a modulu pružnosti v tahu o 911 % vůči materiálu matrice PA 66. Nejvyšší procentuální nárůst poměrného prodloužení na mezi pevnosti bylo zaznamenáno u kompozitu s 30 % dlouhých skleněných vláken o 91 % proti materiálu matrice PA 66. Poměrné prodloužení při přetržení kompozitů se s vyšším množstvím a délkou vláken výrazně snižuje. V případě dlouhých skleněných vláken kleslo poměrné prodloužení při přetržení o 99 % vůči materiálu matrice, což bylo nejvíce ze všech zkoumaných typů vláken o hmotnostním obsahu 30 %. Hodnota rázové houževnatosti Charpy s přibývajícím množstvím plniva ve zkušebních vzorcích rostla. U polyamidu s označením PA 66 užitého, jako pojivo polymerních kompozitů nedošlo ani v jednom případě k přeražení vzorku. Nelze tudíž porovnat procentuelní zhoršení houževnatosti, ale lze tvrdit, že vyztužená matrice PA 66 se všemi zkoumanými druhy vláken ztrácí houževnatost vůči původnímu materiálu matrice.

Použitá literatura

- [1] Definice, historie a použití kompozitních materiálů u lodí, letadel a v kosmonautice. [online]. [cit. 2015-1-3]. Dostupné na: <http://mujweb.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [2] Gottfried W. Ehrenstein. *Polymerní kompozitní materiály*. 1 vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] Časopis. *Průmyslové spektrum*. vyd.1,2. [cit. 2005-1-2].
- [4] Přednáška o kompozitech z předmětu Nauka o materiálu 2 TU v Liberci. [online]. [cit. 2015-1-5]. Dostupné na: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm
- [5] Přednáška o kompozitních materiálech z předmětu Základy materiálového inženýrství TU v Liberci. [online]. [cit. 2014-12-20]. Dostupné na: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf
- [6] Online skriptum Kompozitní materiály ČVUT Praha. [online]. [cit. 2015-1-6]. Dostupné na: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [7] DOMININGHAUS, Hans. *Plastics for engineers: materials, properties, applications*. New York: Hanser Publishers, 1993, 785 s. ISBN 3-446-15723-9.
- [8] Jančár J., *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [9] MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. V Liberci: Technická univerzita, 2012, 374 s. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [10] Cposites Design and Manufacture. [online]. [cit. 2015-3-20]. Dostupné na: <http://www.tech.plym.ac.uk/sme/mats324/characterisation.htm>
- [11] Přednáška Chemické základy moderních materiálů FP TU v Liberci [online]. [cit. 2015-3-10] Dostupné na: <http://www.slideshare.net/kchtul/che-kompozity-nanotechnologie>

- [12] Agarwal, Bhagwan D. *Vláknové kompozity*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 294 s.
- [13] Matocha P. Bakalářská práce. *Biopolymerní kompozity s rostlinnými vlákny juty a kokosu*. TU v Liberci, 2013, 58 s.
- [14] Termoplasty – základní druhy. [online]. [cit. 2015-2-15]. Dostupné na: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [15] Obrázek chemického vzorce polyamidu [online]. [cit. 2015-3-20]. Dostupné na: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyamidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [16] Obrázek ozubeného kola vyrobeného z polyamidu [online]. [cit. 2015-3-20]. Dostupné na: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/perspektivy-plastovych-ozubenych-prevodu.html>
- [17] KAW, Autar K. *Mechanics of composite materials*. 2.vyd Boca Raton, Fl: Taylor Francis, 2006, 466 s. ISBN 0-8493-1343-0.
- [18] Machek V. *Nauka o materiálu 4. část Polymery a kompozity s polymerní matricí*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [19] Všeobecné informace o polymerech. [online]. [cit. 2015-3-30] Dostupné na: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/vip.htm>
- [20] Informace o průtahoměru [online]. [cit. 2015-5-1] Dostupné na: <http://www.epsilontech.com/3542.htm>
- [21] ČSN EN ISO 1874-2 (64 3610). *Plasty – Polyamidy pro tváření – Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*.
- [22] ČSN EN ISO 1110 (64 3607). *Plasty – Polyamidy – Zrychlené kondicionování zkušebních těles*.
- [23] ČSN EN ISO 178 (64 0607). *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*.
- [24] ČSN EN ISO 527-1,2 (64 0604). *Plasty – Stanovení tahových vlastností*.
- [25] ČSN EN ISO 179-1 (64 0612). *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*.

- [26] ČSN EN ISO 1183-1 (64 0111). *Plasty – Metody stanovení hustoty nelehčených plastů – Část 1: Imerzní metoda s kapalinovým pyknometrem a titrační metoda.*