



Lehčené kompozitní struktury na bázi polymerů s přírodními vlákny

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Václav Pich**

Vedoucí práce: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav Pich**
Osobní číslo: **S12000166**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Lehčené kompozitní struktury na bázi polymerů s přírodními vlákny**
Zadávající 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. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Příprava krátkovláknových kompozitních struktur, výroba zkušebních vzorků vstříkáním.
3. Studium mechanického chování kompozitních struktur.
4. Vyhodnocení experimentálně získaných dat, diskuse výsledků, závěr.

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

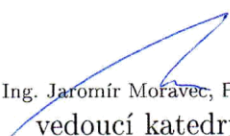
- [1] **EHRENSTEIN, Gottfried W.** *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
[2] **JANČÁŘ, Josef.** *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů: klasická a speciální*. Vyd. 1. Brno: VUT, 2003.
[3] **KAW, Autar K.** *Mechanics of composite materials*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. ISBN 0-8493-1343-0.
[4] **ZHENG, Rong, TANNER, Roger I. A Xi-Jun FAN.** *Injection Molding*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. ISBN 978-3-642-21262-8.
[5] **Technické normy ČSN EN ISO**

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

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. ledna 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Název bakalářské práce

Lehčené kompozitní struktury na bázi polymerů s přírodními vlákny

Bachelor thesis title

Lightweight composite structures based on polymers with natural fibers

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na výzkum vlastností lehčených polymerních kompozitů s přírodními vlákny celulózy. Vyhodnoceny jsou mechanické a fyzikální vlastnosti polymerního kompozitu složeného z PP matrice a 10 hm. % až 30 hm. % celulóзовých vláken. Zkušební tělesa pro tato měření byla zhotovena klasickým vstřikováním a také metodou MuCell (mikrobuněčné vstřikování). V závěru experimentální části jsou získané vlastnosti kompozitů porovnávány v závislosti na metodě výroby a hmotnostním procentuálním zastoupení vláken.

klíčová slova: kompozit, celulóзовá vlákna, PP matrice, mikrobuněčné vstřikování, MuCell

Annotation

This bachelor thesis is focused on research polymer composites with natural fibers of cellulose. In this thesis are evaluated mechanical and physical properties of composites consist of PP matrix and celluloses fibers (10 % - 30 %). Testing samples for this measurement were prepared by classic injection molding and MuCell technology (microcellular injection molding). In the end of of experimental part are obtained values compare according to how were making and how much weight of fibers they have.

Keywords: composite, cellulose fiber, PP matrix, microcellular injection molding, MuCell

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická část	10
2.1	Kompozitní materiály	10
2.1.1	Výztuž	11
2.1.2	Matrice	19
3	Experimentální část	23
3.1	Charakteristika polymerní matrice	23
3.2	Charakteristika použitých vláken	24
3.3	Příprava kompozitního systému	24
3.4	Vstřikování zkušebních těles	25
3.4.1	Výroba zkušebních těles konvenčním způsobem vstřikování	26
3.4.2	Výroba zkušebních těles technologií MuCell	27
3.5	Analýza užitečných vlastností kompozitních struktur	29
3.5.1	Stanovení hustoty	29
3.5.2	Stanovení tvrdosti Shore D	30
3.5.3	Stanovení rázové houževnatosti Charpy	32
3.5.4	Stanovení ohybových vlastností	34
3.5.5	Stanovení tahových vlastností	35
4	Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze	38
4.1	Vyhodnocení hustoty	38
4.2	Vyhodnocení tvrdosti Shore D	38
4.3	Vyhodnocení rázové houževnatosti Charpy	39
4.4	Vyhodnocení ohybových vlastností	40
4.5	Vyhodnocení tahových vlastností	42
5	Závěr	45
	Použitá literatura	47

Seznam zkratek a symbolů

<u>zkratka/symbol</u>	<u>vysvětlení</u>	<u>jednotka</u>
CeF	celulózové vlákno (cellulose fiber)	
SCF	superkritická tekutina (supercritical fluid)	
Al	hliník	
Ar	argon	
B	bor	
Ca	vápník	
K	draslík	
Mg	hořčík	
N ₂	dusík	
Na	sodík	
Pb	olovo	
C ₆ H ₁₀ O ₅	celulóza	
CO ₂	oxid uhličitý	
HCN	kyanovodík	
SiO ₂	oxid křemičitý	
NH ₄ HCO ₃	hydrogenuhličitan amonný	
(NH ₄) ₂ CO ₃	uhličitan amonný	
NH ₂	amidový anion	
PAN	polyakrylonitril	
PA	polyamid	
PE	polyethylen	
PET	polyethylentereftalát	
PP	polypropylen	
PLA	kyselina polylaktidová (polymléčná)	
PF	fenol-formaldehydová pryskyřice	
UP	polyesterová pryskyřice	
σ_{fM}	mez pevnosti v ohybu	[MPa]

σ_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
E_f	modul pružnosti v ohybu	[MPa]
E_t	modul pružnosti v tahu	[MPa]
ε_m	poměrné prodloužení na mezi pevnosti	[%]
ε_b	poměrné prodloužení při přetržení	[%]

1 Úvod

Vláknové kompozitní materiály používal člověk již dávno, aniž by tyto materiály uměl popsat a porozumět mechanismům, které v nich probíhají. Jako příklad lze uvést "kompozitní" cihly složené z jílu (matrice) a kousků slámy (vláknenné výztuže). Přidáním takovéto výztuže došlo ke snížení křehkosti materiálu. Cílený intenzivní výzkum a vývoj kompozitních materiálů probíhal však až ve druhé polovině 20. století. Z velké části pro potřeby vojenského a kosmického průmyslu [1].

Použití polymerních kompozitů ve strojírenství (na bázi uhlíkových, skleněných a jiných typů vláken) vycházelo v minulosti zejména ze snahy nahrazovat ocel, ale i jiné kovové materiály (často i neopodstatněně). Hlavním argumentem u většiny případů bylo snížení hmotnosti dílu nebo zlepšení jeho korozní odolnosti. V posledních letech se navíc ukazuje, že stále náročnější požadavky lidské společnosti kladené na strojírenské výrobky je možné naplnit právě využitím kompozitů na bázi polymerů. Polymerní kompozity a s nimi související technologie pomáhají přesvědčivým způsobem rozvíjet strojírenství jako celek. Největšího významu nabývají prozatím v leteckém průmyslu (primární a sekundární kompozitní konstrukce), automobilovém průmyslu (díly interiéru i exteriéru) a výrobě plavidel všeho druhu. Ve stále větší míře se prosazují také při stavbě chemických a energetických strojů a zařízení (jako součásti čerpadel, odsiřovacích jednotek apod.). Polymerní kompozity umožňují dosáhnout nejen primárního požadavku, čímž je snížení hmotnosti dílu, ale také mnohem větší "svobodu konstruování" a tím i lepší podmínky pro inovace [2].

V posledních letech nabývá na popularitě náhrada syntetických vláken přírodními vlákny (např. vlákny juty, kokosu, konopí apod.), která jsou z hlediska environmentálních aspektů příznivější. Předložená bakalářská práce je zaměřena na studium mechanických a fyzikálních vlastností lehčeného polymerního kompozitu s celulózovými vlákny zhotoveného metodou mikrobuněčného vstřikování MuCell, tj. pomocí fyzikálního nadouvadla v tavenině materiálu v tzv. superkritickém fluidním stavu.

2 Teoretická část

2.1 Kompozitní materiály

Slovním spojením kompozitní materiál nebo také kompozit se rozumí heterogenní materiál složený ze dvou či více fází (složek), které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Přechody mezi jednotlivými fázemi lze pozorovat pouhým okem. Kompozity se dělí dle různých kritérií. Jedním z nich je typ použité matrice v kompozitu:

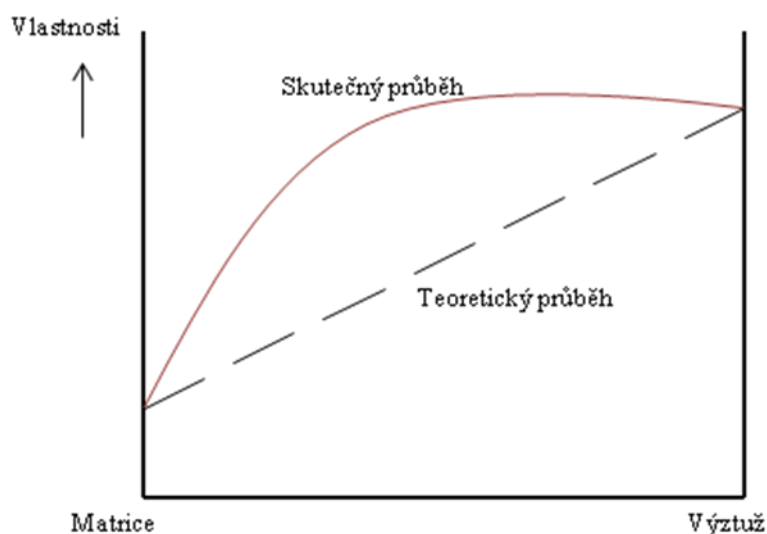
- polymerní,
- kovové,
- keramické,
- uhlíkové [3].

V následujících odstavcích je s ohledem na zadání bakalářské práce věnována pozornost polymerním kompozitům. Tyto kompozity se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek, kdy jedna nebo více nespojitých fází je ponořena do fáze spojitě. Nespojitá fáze bývá obvykle tvrdší a pevnější a nazývá se výztuž či vyztužovací materiál. Bývá obvykle v podobě vláken, které musí mít zastoupení alespoň 5 %, aby bylo možné hovořit o kompozitním materiálu. Naproti tomu fáze spojitá se nazývá matrice a slouží ke spojení jednotlivých složek v celek. Pro dobré výsledné vlastnosti kompozitu je nutné zajistit vysokou adhezi výztuže a matrice na jejich rozhraních s mezivrstvou a zajistit tak co nejlepší přenos napětí při zatěžování celého kompozitu. Kompozitní materiály se vyznačují tzv. synergickým účinkem (viz obr. 2.1), jehož výsledkem je materiál, který má lepší vlastnosti, než které by odpovídaly pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek v kompozitu.

Polymerní kompozity se mohou vyznačovat následujícími vlastnostmi:

- vyšší hodnotou pevnosti a tuhosti oproti běžné polymerní matici (ve speciálních případech se mohou přibližovat hodnotám kovových materiálů),
- lepší odolností proti únavě než u kovů,
- vysokou rázovou a vrubovou houževnatostí a odolností proti šíření trhlin,
- vysokou teplotní odolností,

- schopností tlumit vibrace,
- balistickými vlastnostmi,
- nehořlavostí,
- bariérovými vlastnostmi,
- nízkou teplotní roztažností,
- korozní odolností proti vysoce agresivnímu chemickému prostředí,
- recyklovatelností [2].



Obr. 2.1 Synergický jev

2.1.1 Výztuž

Podle tvaru výztuže lze dělit kompozity na vláknové (dlouhovláknové a krátkovláknové) a částicové (izotermické a anizotermické). Částice se přidávají do polymerních matic pro zvýšení jejich tuhosti. Částice sférického tvaru (izometrické) by neměly být příliš velké, aby negativně neovlivňovaly pevnost kompozitu, ale ani příliš jemné, protože potom by bylo obtížné dosáhnout jejich rovnoměrného rozptýlení. Nejčastějším případem částicové výztuže v polymerní matici jsou skleněné kuličky, které mohou být i duté o rozměrech 15 μm až 30 μm . Tyto kuličky jsou obvykle vyrobeny z borosilikátového skla, které je nerozpustné ve vodě a má také velmi vysokou chemickou odolnost. Hodnota meze pevnosti v tlaku je u těchto kuliček udávána přibližně 200 MPa. Tyto kuličky s úspěchem odolávají při míchání, vstřikování a vytlačování termoplastů a jejich použitím lze snížit hmotnost výrobku až o 30 % [4]. Anizometrické částice (tvar destiček, jehlic, disků) mohou matici nejen vyztužovat, ale také významně

zpevňovat. Částicový kompozit má oproti polymeru větší tvarovou stálost za tepla, menší smrštění, větší tepelnou vodivost a menší tepelnou roztažnost. Používají se mikromleté minerály (talek, slída, vápenec apod.). Nejrozšířenější tvarovou výztuží jsou však vlákna. Vlákna jsou vždy mnohem pevnější než stejný materiál v kompaktní podobě. Pro vlákna je charakteristické to, že v podélném směru mají lepší mechanické vlastnosti než ve směru příčném. Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem a pevnost polymerních kompozitů s výztuží v podobě vláken výrazně převyšuje vlastnosti běžného polymeru.

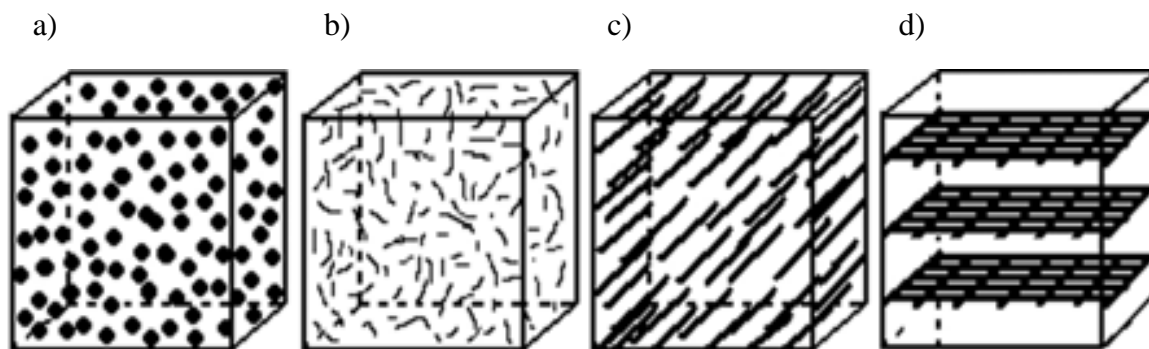
Příčiny vysoké pevnosti vláken lze spatřovat v:

- poklesu velikosti a pravděpodobnosti výskytu defektů ve vláknech (dutin, mikrotrhlin),
- orientaci pevných vazeb ve směru osy vláken (uplatnění zejména u polymerních vláken, provádí se u nich tzv. dloužení, což je mechanické natahování vláken, při kterém dojde k orientaci polymerních řetězců),
- orientaci defektů ve směru osy vláken (tyto defekty mají výrazně méně škodlivý vliv, než defekty orientované kolmo k ose vláken) [5].

Špičkových hodnot mechanických vlastností lze dosáhnout pouze u struktur s dlouhovláknovou výztuží v různé formě (rovingy, rohože, tkaniny). Největším přínosem pro oblast kompozitů jsou z mechanického hlediska uhlíková vlákna (mají nejširší spektrum mechanických vlastností), kromě toho jejich cena klesá a po technicko-ekonomické stránce se stávají vedle skleněných vláken stále žádanějším vyztužujícím materiálem [4]. Typickým rysem pro vláknové kompozity je jejich anizotropie vlastností, modul pružnosti a pevnost bývá ve směru osy vyšší než ve směru kolmém [6].

Polymerní kompozity lze dále rozdělit dle délky vláken na kompozity s krátkými vlákny (krátkovláknové) a s dlouhými vlákny (dlouhovláknové). Toto rozdělení se určuje dle vztahu L/D (délka/průměr), kdy u krátkovláknových kompozitů tvoří sekundární fázi vlákna (výztuž) v poměru $L/D < 100$ a v matrici jsou rozložena buď náhodně nebo s přednostní orientací (viz obr. 2.2). U dlouhovláknových kompozitů je poměr vláken $L/D < 100$ a jsou orientována buď náhodně, nebo s přednostní orientací v ploše, prostoru. Krátkovláknové kompozity se s předností používají pro vstříkované výlisky nebo pro extrudované plastové výrobky. Dlouhovláknové kompozity se nejčastěji používají u velkých konstrukcí [12]. Principem vláknového vyztužení je ta skutečnost, že vyztužující vlákna mají o jeden až dva řády vyšší tuhost a pevnost než samotná polymerní matrice.

Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer, které v případě adheze mezi oběma komponentami umožňují přenos veškerého napětí z nepevné matrice do vláken, která jsou schopna nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné, ale deformované pojivo je prakticky bez napětí [5].



Obr. 2.2 Rozdělení kompozitu dle typu výztuže
a) částicový b) krátkovláknový c,d) dlouhovláknový [7]

Hlavním cílem výztuži u polymerních kompozitních materiálů je zajistit jejich výrazně lepší mechanické vlastnosti při nižší hmotnosti dílu. Mohou však ovlivňovat jeho tepelnou a elektrickou vodivost, tvarovou stálost apod. Běžně užívaným typem výztuže jsou skleněná vlákna, uhlíková vlákna, aramidová (kevlarová) vlákna a v posledních letech také stále více přírodní vlákna.

Skleněná vlákna

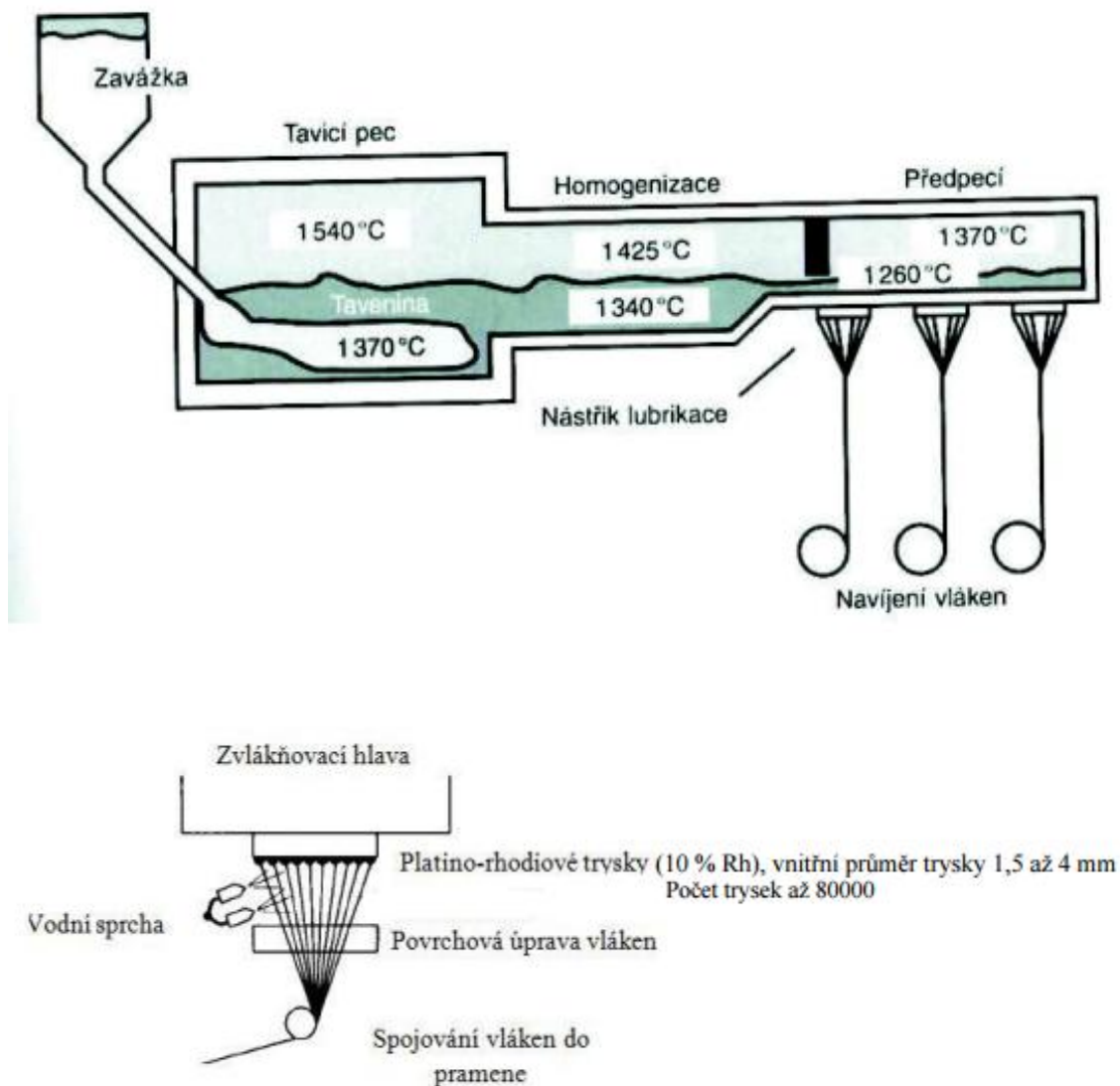
Skleněná vlákna jsou vlákna anorganická a jsou také nejpoužívanějšími vlákny v polymerních kompozitech (viz př. na obr. 2.3). Hlavním důvodem je skutečnost, že skleněná vlákna jsou oproti dalším běžně používaným vláknům, kterými jsou vlákna uhlíková a aramidová, výrazně levnější. Jejich vlastnosti v podélném i příčném směru se předpokládají shodné.

Nejběžnější skleněná vlákna se vyrábějí z tzv. E skla (skloviny), které se vyznačuje příznivou kombinací mechanických a elektrických vlastností. Používá se nejčastěji v kombinaci s polyestery. Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K.



Obr. 2. 3 Příklad použití polymerního kompozitu se skleněnými vlákny v automobilovém průmyslu [8]

Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla tekoucího platinorhodiiovými tryskami (průměr trysky je 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna se po povrchové úpravě sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Tato vlákna mají nejčastěji průměr v rozmezí od 3,5 μm do 20 μm . Najednou se táhne 51 až 408 vláken [9]. Sdružením pramenů vzniká roving (pramenec). Schéma výroby vláken je znázorněno na obr. 2.4. Ještě před samotným navinutím je vlákno, které je samo o sobě velmi abrazivní a lámavé, opatřeno lubrikací a apreturou. Samotná lubrikace je nevhodná, protože by se sice zlepšila manipulovatelnost s vlákny, ale vlákna by měla prakticky nulovou adhezi k polymerní matrici. Proto se již přímo ve výrobě vláken opatřují tzv. apretační vrstvou (vazebným prostředkem), která zlepší vazbu mezi vláknem a polymerem [10]. Nevýhodou E-skla, obsahující alkalické oxidy, je absorpce vody a malá korozní odolnost proti vodním roztokům kyselin a zásad [9].



Obr. 2.4: Schéma výroby skleněných vláken [10]

Dalšími typy skleněných vláken jsou D, S, C a L sklo. D sklo má nižší mechanické vlastnosti jak E sklo, ale na druhé straně je jeho výhodou nízká dielektrická hodnota, proto si nachází využití zejména v elektrotechnice a energetice. Sklo typu S se pro své nejvyšší mechanické vlastnosti používá především pro vojenské účely, letectví a v raketové technice (viz tab. 2.1). Sklo typu C nachází své využití zejména v chemickém průmyslu a to pro svou chemickou stálost a odolnost proti kyselinám. Nevýhodou C skla, oproti E sklu, jsou jeho horší mechanické vlastnosti. Sklo typu L je speciální sklo s vysokým obsahem oxidu olova. Obsah olova ve vláknech má význam v tom, že způsobuje nepropustnost rentgenového záření kompozitem. Toho se využívá zejména v lékařství, vojenské technice a ve vědeckých přístrojích [9].

Tab. 2.1 Vlastnosti jednotlivých typů skelných vláken [9]

Typ skla	S	D	L	C	E
Hustota [g/cm ³]	2,49	2,16	4,3	2,49	2,54
Mez pevnosti [GPa]	4,65	2,45	1,68	2,8	3,5
Modul pružnosti v tahu [GPa]	86,8	52,5	51,1	70	73,5
Poměrné prodloužení na mezi pevnosti [MPa]	5,4	4,7	-	-	4,8
Dielektrická hodnota, 20 °C, 10 ⁶ Hz	4,53	3,56	9,49	6,24	5,8

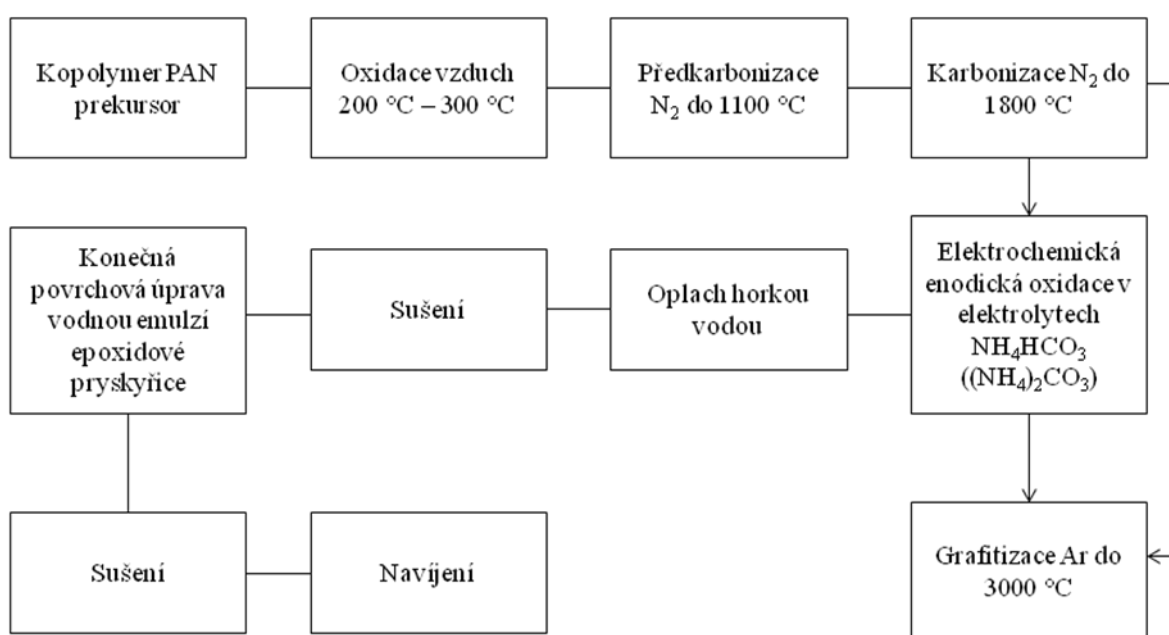
Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou na rozdíl od amorfních skleněných vláken krystalická, jsou mnohem křehčí a oproti ostatním vláknům poskytují nejširší spektrum mechanických vlastností při velmi malých hustotách. Skvělé mechanické vlastnosti těchto vláken vyplývají z vysoce anizotropní hexagonální struktury, kterou se vyznačuje grafit. To znamená, že ve směru kolmém k bazálním rovinám šesterečné mřížky působí jen slabé Van der Waalsovy síly, zatímco v rovinách bazálních vrstev jsou atomy vázány velice pevnými kovalentními vazbami. Pevnost grafitového monokrystalu namáhaného tahem ve směru rovnoběžném s bazálními rovinami je několikanásobně větší než polykrystalického grafitu s náhodně orientovanými krystaly [5].

Klasifikace uhlíkových vláken není zcela jednoznačná. V technické literatuře se pod pojmem "uhlíková vlákna" nachází jak vlákna uhlíková tak také grafitová, přičemž se rozlišují podle teploty, při které vznikají. Pro uhlíková vlákna je to v rozmezí teplot od 800 °C do 1600 °C a pro grafitová vlákna při teplotách nad 2200 °C. Dalším kritériem, podle kterého se tyto vlákna dělí, je množství obsaženého uhlíku ve vláknech. Do 92 % uhlíku se hovoří o vláknech uhlíkových, s vyšším obsahem uhlíku o vláknech grafitových [9], [13].

Uhlíková vlákna jsou vyráběna z vláken polyakrylonitrilových (PAN) a novoloidu fenolu. Dále se získávají například ze smoly, která je získávána z černého uhlí nebo ze zbytků po destilaci ropných smol). Ze smoly se vyrábějí ta nejužší uhlíková vlákna,

nicméně nejčastější způsobem, jak jsou uhlíková vlákna vyráběna, je právě z vláken PAN. Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN je možné rozdělit do tří etap: deoxidace, karbonizace a grafitizace (ne vždy se provádí), (viz obr. 2.5). První etapa probíhá v oxidační atmosféře při teplotách okolo 200 °C - 300 °C a po pozvolném náběhu polymerují postranní nitrilové skupiny, odštěpuje se voda a vznikají tak stabilní struktury. V druhé etapě, v interní atmosféře (velice čistý dusík), se při teplotě 1000 °C - 1800 °C odštěpuje HCN a CO₂ a dochází ke karbonizaci. Po dokončení této operace obsahuje vlákno zhruba 80 % - 95 % uhlíku. Ve třetí etapě se při grafitizaci při teplotách do 3000 °C (v prostředí argonu) ještě zvyšuje procentuelní zastoupení uhlíku ve vlákne [8].



Obr. 2.5 Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN [5].

Přírodní vlákna

V posledních letech, kdy je kladen velký důraz na šetrnost k životnímu prostředí, se stále více snaží v průmyslu využívat materiálů, které by tento požadavek splňovaly. Použití přírodních vláken místo vláken syntetických je výraznou materiálovou obměnou, která samozřejmě směřuje také do automobilového průmyslu (viz obr. 2.6). Přírodní vlákna se obvykle dělí na vlákna rostlinného, živočišného a minerálního původu. Přírodní vlákna s největším významem jsou získávána z rostlin (vzhledem k zadání bakalářské práce je těmto vláknům věnován následující odstavec).



Obr. 2.6 Příklad použití polymerního kompozitu s přírodními vlákny (oranžově vyznačené části)

[11]

Vlákna rostlinného původu

Rostlinná vlákna se mohou rozdělovat podle toho, z jaké části rostliny jsou vlákna získávána:

- ze stonků (konopí, juta, len, kopřiva),
- ze semen (bavlna, kapok),
- z listů (sisal, manilské konopí, novozélandský len),
- z plodů rostlin (kokosová vlákna).

Tab. 2.2 Porovnání vybraných mechanických vlastností přírodních vláken používaných v kompozitech [5]

Typ vlákna	Hustota [g/cm ³]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Poměrné prodloužení při přetržení [%]
Celulóza	1,5	675	35	6,2
Juta	1,3 - 1,5	183 - 773	30 - 55	1,4 - 3,1
Konopí	1,4 - 1,5	580 - 1100	30 - 90	1,3 - 4,7
Len	1,53	800 - 1795	40 - 85	1,1 - 1,5
Kokos	0,7 - 1,0	1060 - 2700	37	30 - 40
Bavlna	1,5 - 1,6	287 - 597	5,5 - 12,8	3 - 10

Základní složkou všech rostlinných vláken je celulóza. Rostlinná vlákna jsou obnovitelným surovinovým zdrojem. Dalšími výhodami jsou také jejich biodegradovatelnost na konci jejich životnosti, nenáročnost produkce ve srovnání s vlákny

syntetickými a nízké abrazivní chování ve srovnání se skleněnými vlákny. V neposlední řadě je jejich velkou předností nízká hustota a snadná zpracovatelnost [9]. Hlavními nevýhodami rostlinných vláken je značný vliv klimatických podmínek ovlivňující jejich, hydrofilní chování a také jejich teplotní stabilita cca do 200 °C. Základní vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.2. Velké množství technických termoplastů, mezi které patří polyamidy, polyestery, polykarbonáty a další, vyžadují vyšší zpracovatelské teploty. Proto se nejčastěji používají kompozity s polypropylenovou a polyethylenovou matricí, případně na bázi polyvinylchloridu nebo kyseliny polymléčné (biodegradovatelný plast). Další nevýhodou je jejich proměnná délka a šířka, které jsou člověkem jen velmi těžko ovlivnitelné.

2.1.2 Matrice

Matrice je spojitá složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání ji před vlivy okolí. Funkci pojiva by si měla udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Polymerní matrice jsou výrazně poddajnější než vlákna, pevnost v tahu je u všech matric menší než pevnost v tahu vláken (u polymerních matric až o dva řády menší než pevnost vláken) [13].

Úkolem matrice je zavedení a přenos sil, zaručení stálého geometrického tvaru a ochrana vláken, tj.:

- přenos mechanického namáhání na vlákna,
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku,
- převedení namáhání vlákna na vlákno,
- překlenutí povrchové vady na vláknech,
- ochrana vláken proti vlivům okolního prostředí a proti poškození při zpracování [13].

Mezi hlavní výhody polymerních matric patří především jejich nízká hustota a dobrá chemická odolnost (co se týká kyselin a zásad), dobré třecí vlastnosti a skvělé zpracovatelské vlastnosti. Za nevýhody lze považovat nízké mechanické vlastnosti, značný kríp a nízkou teplotní stabilitu polymerů nebo jejich degradaci vlivem působením ultrafialového záření [15].

Jako matrice se využívají reaktoplasty a termoplasty. Každý typ matrice má své výhody a nevýhody a je vhodný pro jiné aplikace. Při volbě matrice se zohledňují její mechanické a fyzikální vlastnosti, které spolu s parametry výztuže tvoří výsledné vlastnosti pro použití daného kompozitního systému.

Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou polymery, které nevratnou chemickou reakcí tzv. vytvrzováním, (zahřátím nebo přidáním vytvrzovacího materiálu), přecházejí z lineárního viskózního stavu do zesíťovaného stavu, což má za následek větší tepelnou a rozměrovou stabilitu i odolnost vůči chemikáliím. Touto chemickou reakcí materiál ztrácí termoplastický charakter, je netavitelný a nerozpustný. Materiál má malou houževnatost a nelze recyklovat, což je největší problém posledních let, kdy je kladen velký důraz na ochranu životního prostředí a tím i na recyklovatelnost použitých materiálů. Tato skutečnost má za následek trend nahrazovat reaktoplasty termoplasty. Reaktoplasty oproti termoplastům mají však tu výhodu, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a mají tak nižší teplotu tání. To je také jedním z důvodů, proč je zpracovatelnost reaktoplastů jednodušší. Z toho vyplývá, že energetické nároky na prosycování vláken při tvorbě kompozitů jsou ve srovnání s termoplasty nižší. Další výhodou je i možnost regulace hustoty zesíťování matrice a tím i optimalizace mechanických vlastností kompozitů, kterých se využívá zejména pro konstrukční a tepelně namáhané aplikace. Reaktoplasty se dělí na fenoplasty, aminoplasty, epoxidy, polyestery a polyuretany. Každý z těchto druhů má rozdílné zpracování a rozdílné průmyslové využití [15].

Fenoplasty, neboli také fenolytické pryskyřice, vznikají polykondenzací fenolu s aldehydy za vzniku fenol-formaldehydové pryskyřice (PF). Jejich využití je zejména na lamináty (vrstvené hmoty), kde slouží jako pojivo vrstvě tkanin. Dále se používají jako tmely, lepidla, lékařské pryskyřice aj. Výrobky nelze používat ve styku s potravinami.

Aminoplasty vznikají kondenzací látek, které obsahují v molekule aminoskupinu NH_2 s aldehydy. Dalším účinkem tepla přechází na vytvrzené plasty. Jejich využití je různorodé. Používají se jako pojiva, lepidla a jelikož jsou zdravotně nezávadné, vyrábějí se z nich i různé pomůcky do kuchyně.

Polyesterové pryskyřice (UP) jsou nenasyčené polyestery rozpuštěné v reaktivním monomeru (nejobvyklejší je styren) schopné kopolymerace. Svoje využití nacházejí v

galanterním zboží (knoflíky), bižuterie nebo nátěrové hmoty. Také se velmi často využívají s výztuží skleněných vláken (známé jako sklolaminát) pro výrobu střešních krytin nebo lodí [10].

Termoplasty

Termoplasty jsou polymery složené z lineárních molekul s dlouhým řetězcem, které lze ohřevem opakovaně převést do taveniny a ochlazením nechat ztuhnout. Přestože jsou chemici schopni vytvořit obrovské množství různých termoplastů, jsou ve výsledku z více jak 75 % používány tyto typy: polyetylen (PE), polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS), polyethyltereftalát (PET) a polyamid (PA). Pro sériově vyráběné kompozity se nejvíce používají polypropylen a polyamid. Jednou z největších překážek pro větší rozšíření termoplastů je především velká viskozita taveniny při zpracování, která se pohybuje o 2 až 4 řády výše než u běžných reaktoplastů. V tab. 2.3 je uvedeno srovnání některých druhů termoplastů a reaktoplastů podle vybraných mechanických vlastností. Vysoká viskozita způsobuje při smáčení výztuže defekty, kterými jsou bubliny, nesmočené pramence vláken apod. Vzniká tak kompozit s nestálými mechanickými vlastnostmi. K předcházení těchto vad je třeba používat již předem upravená vlákna impregnací (tzv. prepregy), která však mají za následek nárůst ceny při výrobě a tím i cenu výrobku [16].

Kromě synteticky připravovaných termoplastů se v současné době jako matrice používají také tzv. biodegradabilní termoplasty získávané z přírodních zdrojů. Příkladem je třeba kyselina polymléčná (PLA), která vzniká polymerací kyseliny mléčné, kterou je možné získat fermentačním kvašením glukózy. Surovina je získávána štěpením škrobu extrahovaného z běžných zemědělských plodin. Nejčastěji z kukuřice, cukrové řepy a cukrové třtiny.

Podle délky vláken se termoplastické kompozity rozdělují na materiály vyztužené krátkými vlákny (v délce od 0,2 mm do 1 mm), které se obvykle zpracovávají vstřikováním a na materiály s výztuží dlouhých vláken (v délce od 2 mm do 25 mm), které se mohou dávkovat přím do taveniny postranním plničem na vstřikovací jednotce. Dále je také možné kompozity rozdělit na termoplasty vyztužené tkaninami nebo rohožemi a k dispozici jsou také termoplastické prepregy [13].

Tab. 2.3 Srovnání vybraných druhů termoplastických a reaktoplastických matic [9]

Matrice	Hustota [g/cm³]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Poměrné prodloužení při přetržení [%]
Termoplasty	0,9 - 1,5	1,0 - 4,0	5 - 150	20 - 250
PP	0,9	1,1 - 1,5	10 - 700	28 - 41
PA	1,4	2,8 - 3,4	60 - 300	76 - 83
PC	1,2	2,1 - 2,8	110 - 130	62 - 76
Reaktoplasty	1,1 - 1,7	1,3 - 6,0	1 - 30	20 - 180
Epoxidy	1,1 - 1,4	2,1 - 6,0	1 - 10	35 - 90
Polyestery	1,1 - 1,5	1,3 - 4,5	1 - 5	45 - 85
Fenoplasty	1,3	4,4	1 - 3	50 - 60

3 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce je zaměřena na studium fyzikálních a mechanických vlastností kompozitních výstřiků složených z polypropylenové matrice a přírodních vláken na bázi celulózy. Výstřiky byly zhotoveny technologií MuCell (mikrobuněčného vstřikování). Podstatou tohoto procesu je vstřikování stlačených neaktivních plynů, jako je dusík nebo oxid uhličitý, ve formě superkritických fluidů (SCF) s vysokou rozpustností do roztaveného termoplastu v plastifikační části válce vstřikovacího stroje. Po vstříknutí plastu do dutiny formy a poklesu tlaku dochází k vytvoření lehčené struktury s uzavřenými póry, v níž jsou po ztuhnutí ve formě uzavřeny miliony plynových bublinek. Ty po ochlazení dosahují velikosti 5 μm až 50 μm a svým tlakem kompenzují smrštění dílu. Oba plyny používané pro proces jsou levné, nehořlavé, nejedovaté a atmosférické bez škodlivého vlivu na životní prostředí [17]. Výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti výstřiků s lehčenou strukturou byly porovnávány s vlastnostmi kompozitních výstřiků zhotovených konvenčním způsobem vstřikování.

3.1 Charakteristika polymerní matrice

K experimentálnímu měření bylo použito matrice na bázi homopolymeru s obchodním označením SABIC PP 595A. Výběr typu matrice byl ovlivněn fází výzkumné činnosti na katedře strojírenské technologie v oblasti polymerních kompozitů, jíž je bakalářská práce dílčí součástí. Použitý typ polypropylenu se vyznačuje vynikajícími tokovými vlastnostmi, které podporují jeho použití pro přípravu vyztuženého kompozitního systému. Vzhledem k vysoké tuhosti je používán pro vstřikované díly automobilového průmyslu. Základní užité vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Základní vlastnosti materiálu Sabc PP 595A [18]

Polypropylen - homopolymer			
Vlastnosti	Hodnota	Jednotky	Metoda
Hustota	0,905	g/cm ³	ISO1183-1
Hmotnostní index toku taveniny (230 °C;2,16 kg)	47	g/10 min	ISO 1133-1
Pevnost v tahu	36	MPa	ISO 527/1A/50
Modul pružnosti v tahu	1750	MPa	ISO 527/1A/1
Vrubová houževnatost Charpy	3	kJ/m ²	ISO 179-1/1eU

3.2 Charakteristika použitých vláken

Pro studium fyzikálních a mechanických vlastností polymerních kompozitních struktur byla použita dodaná vlákna celulózy, která svým chemickým složením patří mezi polysacharidy. Základní stavební jednotkou celulóзовého řetězce je D-glukóza. Její sumární vzorec je $(C_6H_{10}O_5)_n$. Přínosem celulózy je vysoká pevnost ve směru osy vláken a nevýhodou je její absorpce vlhkosti. Jak již bylo zmíněno, celulóza se nachází ve všech rostlinách, což by mohlo vést k domněnce, že její zdroje jsou téměř neomezené, avšak velmi záleží v jaké formě nebo čistotě se celulóza v rostlině nachází. Postupným zkoušením se lidstvo dostalo ke dvěma hlavním zdrojům celulózy a to ze dřeva a z bavlny. Tím rozhodně nelze tvrdit, že by se celulózová vlákna nezískávala i z dalších rostlin, ale oproti výše zmíněným jsou zanedbatelné. Obsah celulózy ve dřevě se pohybuje v rozmezí od 40 % do 50 %. V bavlně se celulóza vyskytuje téměř v čisté podobě, její obsah může přesahovat i 94 %.

3.3 Příprava kompozitního systému

Krátkovláknový kompozitní materiál byl připraven technologií granulace za studena. Přírodní vlákna byla dodána od dodavatele po úpravě tzn. zbavena nečistot. Před samotnou granulací krátkovláknového kompozitu byla přírodní vlákna namleta na nožovém střížném mlýnu RETSCH SM 300 s cyklónovým odlučovačem a se síty lichoběžníkových otvorů o rozměru 0,75 mm viz obr. 3.1 a) na vyhovující optimální délku

0,5 mm až 2 mm při otáčkách 3000 min^{-1} . V poslední části přípravy byla vlákna zbavena vlhkosti. Sušení probíhalo v horkovzdušné sušárně VENTICELL viz obr. 3.1 b), která byla vybavená nucenou cirkulací vzduchu, což zaručilo homogenní rozložení teploty. Sušení probíhalo za podmínek $80 \text{ }^\circ\text{C}$ v časovém úseku 2 až 4 hodin. Takto upravená vlákna byla následně použita pro granulaci za studena. Granulát byl připraven na granulační lince ZAMAK EHP - 2x130di (viz obr. 3.1 c), která byla tvořena dvoušnekovým extrudérem se segmentovými šneky, dále pak granulační hlavou, vodní lázní, vodícími válečky, ventilátorem a nožovým mlýnem včetně podavače.



Obr. 3.1 Zařízení určené k přípravě kompozitního materiálu

a) Sřizný mlýn Retsch SM 300 b) sušárna VENTICELL c) granulační linka ZAMAK

Jako vstupní materiál pro granulaci za studena byla použita polypropylénová matrice a upravená celulózová vlákna. Polypropylénová matrice byla vložena do násypky vytláčovacího stroje. Odtud byl materiál dávkován do tavicí komory, kde byl vlivem teplotního ohřevu a tlaku způsobeného rotací šneku plastifikován. Vlákna celulózy byla do procesu granulace dávkována v oblasti přední pozice šneku v tavicí komoře, a to z toho důvodu, aby nedošlo k jejich tepelné degradaci a k poškození smykovým namáháním při hnětení a plastifikaci materiálu. Vytlačená struna se po ochlazení nasekala na požadovaný rozměr granulátu. Výsledkem granulace bylo vytvoření polypropylénového kompozitního systému s 10 hm. %, 20 hm. % a 30 hm. % vlákenné výztuže na bázi celulózy.

3.4 Vstřikování zkušebních těles

Z připraveného kompozitního materiálu v podobě granulátu byla technologickým postupem vstřikování zhotovena víceúčelová zkušební tělesa typu A ve tvaru oboustranných lopatek dle mezinárodního předpisu ČSN EN ISO 3167. Zkušební tělesa tohoto tvaru jsou určena pro stanovení tahových vlastností materiálu. Jednoduchým

obráběním bylo možné z jejich střední části také získat zkušební tělesa ve tvaru hranolu, která sloužila pro hodnocení dalších mechanických vlastností při ohybovém nebo rázovém namáhání. K výrobě zkušebních těles byla použita univerzální dvoudesková forma se dvěma tvarovými dutinami, odpovídající tvaru víceúhelníkového zkušebního tělesa s filmovým ústím vtoku (viz obr. 3.4).



Obr. 3.4 Tvarová deska (tvárnice) vstříkací formy

3.4.1 Výroba zkušebních těles konvenčním způsobem vstříkování

Výroba zkušebních těles konvenčním způsobem vstříkování byla provedena na vstříkovacím stroji Arburg 270 S 400-100 (viz obr. 3.2) v souladu s mezinárodními předpisy ČSN EN ISO 294-1 a ČSN EN ISO 1873-2. Technologické parametry vstříkování jsou uvedeny v tab. 3.2.



Obr. 3.2 Vstříkovací stroj Arburg 270 S 400-100

Tab. 3.2 Technologické parametry pro výrobu zkušebních těles konvenčním vstřikováním

Parametr	Hodnota	Jednotka
Teplota taveniny	200	°C
Teplota temperačního média formy	40	°C
Doby cyklu	60	s
Doba dotlaku	40	s
Velikost dotlaku	40	MPa
Velikost dávky	40	cm ³
Bod přepnutí na dotlak	16	cm ³
Vstřikovací rychlost	30	cm ³ /s

3.4.2 Výroba zkušebních těles technologií MuCell

Výroba zkušebních těles technologií mikrobuněčného vstřikování byla provedena na stroji Arburg ALLROUNDER 470S 1000-400, který je vybaven vstřikovací jednotkou pro technologii MuCell s příslušnými periferiemi (viz obr. 3.3). Při plastifikaci taveniny byl před čelo šneku do taveniny dávkován dusík ve formě superkritického fluidního média (SCF). Vhodné difuze SCF v tavenině bylo dosaženo pomocí speciální konstrukce šneku, který kromě dopravní, kompresní a homogenizační zóny byl navíc vybaven stírací a míchací částí, zajišťující rozdělování proudu dávkovaného SCF média do komory a jeho intenzivní promíchání s taveninou plastu. Tělesa byla vstřikována v souladu s mezinárodními předpisy ČSN EN ISO 294-1 a ČSN EN ISO 1873-2 při nastavení technologických podmínek uvedených v tab. 3.3.



Obr. 3.3 Vstřikovací stroj Arburg ALLROUNDER 470 S 1000-400
s modulem pro technologii MuCell

Tab. 3.3 Technologické parametry pro výrobu zkušebních těles technologii MuCell

Parametr	Hodnota	Jednotka
Teplota taveniny	200	°C
Teplota temperačního média formy	40	°C
Doby cyklu	60	s
Doba dotlaku	40	s
Velikost dotlaku	40	MPa
Velikost dávky	40	cm ³
Bod přepnutí na dotlak	16	cm ³
Vstřikovací rychlost	30	cm ³ /s
Hmotnostní tok SCF	0,45	kg/h
Hmotnostní tok SCF	0,45	kg/h
Doba dávkování SCF	6	s
Dopravní tlak SCF	20,5	MPa
Pracovní tlak (MPP)	20	MPa

3.5 Analýza užitečných vlastností kompozitních struktur

V souladu se zadáním bakalářské práce byly naměřeny a následně vyhodnoceny fyzikální a mechanické vlastnosti krátkovláknového polymerního kompozitu v souladu s mezinárodními předpisy. Zkušební tělesa byla zhotovena dvěma způsoby popsanými výše v kapitolách 3.4.1 a 3.4.2

3.5.1 Stanovení hustoty

Materiály s co nejnižší hmotností dílu a se zachováním nebo ještě lépe s vylepšením jejich mechanických vlastností, to je to, po čem v posledních letech volá především automobilový a letecký průmysl. A právě zde přichází na řadu polymerní kompozitní materiály, které tyto požadavky splňují. Hustota zkušebních těles byla stanovena dle mezinárodní normy ČSN EN ISO 1183-1 imerzní metodou. Postup při určování hustoty imerzní metodou spočívá v tom, že se nejprve zkušební vzorek zváží na vzduchu a poté v imerzní kapalině pomocí analytických vah opatřených speciální konstrukcí (viz obr. 3.5).



Obr. 3.5 Analytické hustotní váhy AND GF 300

Jako imerzní kapaliny pro vzorky zhotovené konvenčním vstřikováním bylo použito methanolu s hustotou $0,791 \text{ g/cm}^3$ při teplotě $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro vzorky zhotovené technologií MuCell bylo zapotřebí použít kapaliny o nižší hustotě. Použito bylo petrolejového etheru (petroletheru), rafinované frakcionované lehce vroucí benzinové frakce parafinické a naftenické řady s hustotou $0,650 \text{ g/cm}^3$ při teplotě $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro výpočet hustoty zkušebních vzorků byla použita rovnice (1) a jejich průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami jsou zaznamenány v tab. 3.4.

$$\rho_s = \frac{m_{S,A} \times \rho_{IL}}{m_{S,A} - m_{S,IL}} \quad (1)$$

kde je

ρ_s	hustota zkušební vzorku o teplotě 23 °C	[g/cm 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 o teplotě 23 °C	[g/cm ³]

Tab. 3.4 Hustota kompozitů

Zkušební vzorek		Hustota ρ [g/cm ³]
PP bez vláken		0,906 ± 0,001
PP kompozit s CeF	10 %	0,938 ± 0,004
	20 %	0,978 ± 0,004
	30 %	1,023 ± 0,003
PP kompozit s CeF + N ₂	10 %	0,739 ± 0,010
	20 %	0,773 ± 0,011
	30 %	0,810 ± 0,009

3.5.2 Stanovení tvrdosti Shore D

Měření tvrdosti zkušebních vzorků metodou Shore D bylo provedeno na tvrdoměru Instron (viz obr. 3.6) v souladu s normou ČSN EN ISO 868. Podstatou zkoušky je měření hloubky vtlačení zkušební hrotu do vzorku materiálu za stanovených podmínek. Hodnota tvrdosti je nepřímo úměrná hloubce vtlačení hrotu. K měření byly použity vzorky o tloušťce 4 mm. Měření proběhlo celkem na deseti místech vzorku v předepsané vzdálenosti od kraje vzorku a mezi vpichy. Při měření se zkušební těleso umístilo na tvrdý vodorovný povrch, tvrdoměr se přiložil kolmo na zkušební těleso tak, aby opěrná patka byla co nejrychleji a bez nárazu přitlačena na zkušební těleso. Tvrdost byla odečtena na

stupnici přístroje po patnácti sekundách od docílení pevného kontaktu mezi opěrnou patkou a zkušebním tělesem. Střední hodnoty tvrdosti materiálu Shore D včetně jejich směrodatných odchylek jsou zaznamenány v tab. 3.5.



Obr 3.6 Tvrdoměr Shore D s vodícím stojánkem

Tab. 3.5 Střední hodnoty tvrdosti Shore D kompozitů

Zkušební vzorek		Tvrdoměr Shore D [-]
PP bez vláken		63,4 ± 0,4
PP kompozit s CeF	10 %	64,9 ± 0,3
	20 %	65,1 ± 0,5
	30 %	66,6 ± 0,5
PP kompozit s CeF +N ₂	10 %	62,3 ± 1,9
	20 %	61,9 ± 1,6
	30 %	60,9 ± 2,6

3.5.3 Stanovení rázové houževnatosti Charpy

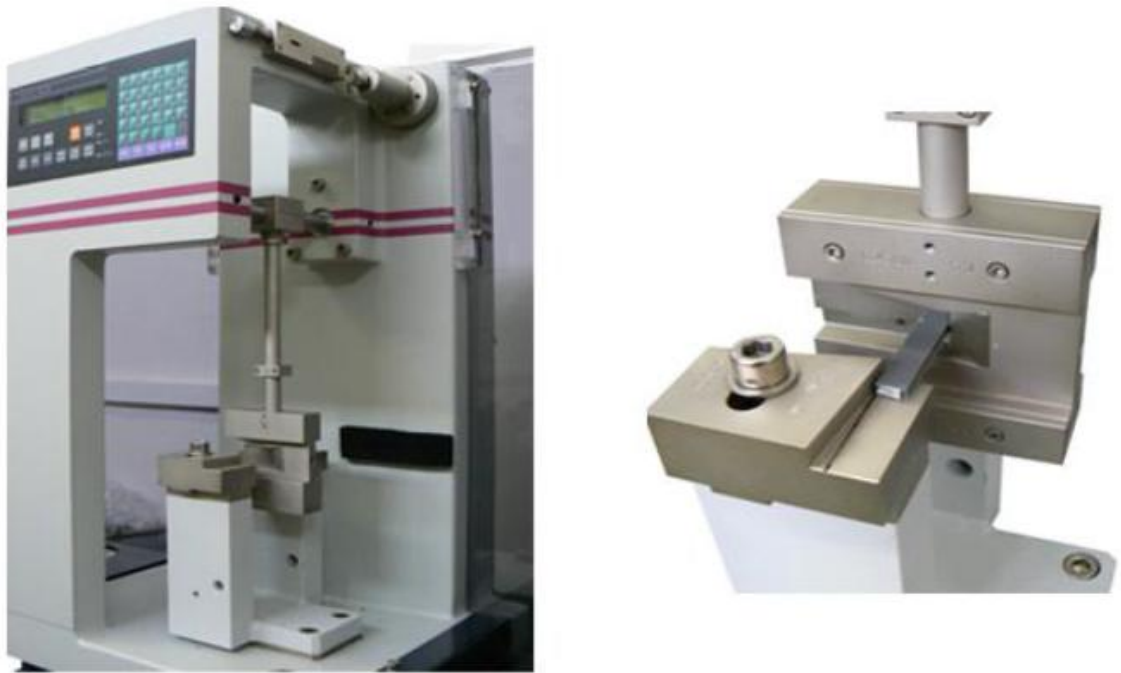
Stanovení rázové houževnatosti Charpy bylo provedeno za standardních podmínek podle předpisu ČSN EN ISO 179-1 metodou 179-1/1eU (ráz na užší stranu). Před samotným započítáním zkoušky bylo nutné měřicí zařízení Ceast Resil 5.5 (viz obr. 3.7) kalibrovat a seřídít tak, aby došlo při nárazu k dotyku celou plochou zkušební tělesa. Poté následoval ráz kladiva naprázdno, aby byla zjištěna ztráta energie mechanickým třením a odporem vzduchu. Pro stanovení rázové houževnatosti těles zhotovených konvenčním vstřikováním bylo použito kladivo s nominální energií 5 J a pro zkušební tělesa zhotovená technologií MuCell bylo použito kladiva s nominální energií 2 J. Použití kladiv s rozdílnou nominální energií bylo zapotřebí z důvodu, že energie spotřebovaná k přeražení zkušební tělesa musí ležet v toleranci 10 % až 80 % potenciální energie kladiva. Rázová houževnatost byla stanovena na zkušebních tělesech o rozměrech (80 x 10 x 4) mm, dle předpisu ČSN EN ISO 179-1, která byla zhotovena z víceúčelových zkušebních těles typu A mechanickým obráběním. Samotný průběh zkoušky spočíval v nastavení rázového kladiva do výchozí pozice a umístění zkušební tělesa na podpěry tak, aby střed tělesa ležel v dráze kladiva. Po uvolnění kladiva došlo k úplnému přeražení tělesa a zaznamenání energie potřebné k přeražení. Toto měření proběhlo vždy na deseti vzorcích. Z korigované energie spotřebované při přeražení tělesa byla následně (z rovnice 2) vypočítána rázová houževnatost Charpy.

$$a_{cu} = \frac{E_c}{h \times b} \times 10^3 \quad (2)$$

kde je

a_{cu}	rázová houževnatost Charpy	[kJ/m ²]
E_c	korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušební tělesa	[J]
h	tloušťka zkušební tělesa	[mm]
b	šířka zkušební tělesa	[mm]

Průměrné hodnoty rázové houževnatosti Charpy obou typů zkušebních těles včetně jejich směrodatných odchylek jsou zaznamenány v tab. 3.6.



Obr. 3.7 Měřicí zařízení Ceast Resil 5.5

Tab. 3.6 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti Charpy kompozitů

Zkušební vzorek		Rázová houževnatost a_{cu} [kJ/m ²]
PP bez vláken		79,2 ± 1,5
PP kompozit s CeF	10 %	31,9 ± 2,0
	20 %	25,4 ± 3,7
	30 %	27,8 ± 2,1
PP kompozit s CeF + N ₂	10 %	16,1 ± 2,9
	20 %	15,7 ± 2,6
	30 %	15,3 ± 2,3

3.5.4 Stanovení ohybových vlastností

Ohybová zkouška se řadí mezi zkoušky statické a slouží k hodnocení zkušebnímu materiálu při namáhání ohybem. Touto zkouškou lze získat pevnost v ohybu a další závislosti mezi napětím a deformací při daných podmínkách dle ČSN EN ISO 178. Pevnost v ohybu byla stanovena na zkušebních tělesech o rozměrech (80 x 10 x 4) mm, dle normy ČSN EN ISO 178, která byla zhotovena mechanickým obráběním ze zkušebních víceúčelových těles typu A. Samotná zkouška ohybem byla provedena na zařízení HOUNSFIELD H10KT s rozsahem snímací hlavy do 500 N. Zkušební těleso bylo umístěno na dvou podporách ve vzdálenosti 64 mm a zatěžováno zkušebním trnem působícím uprostřed zkušebnímu tělesu konstantní rychlostí 2 mm/min do doby, dokud nebyla dosaženo pevnosti v ohybu. Průměrné hodnoty meze pevnosti v ohybu (σ_{fM}) a modul pružnosti v ohybu (E_f) včetně jejich směrodatných odchylek byly vypočítány (dle rovnice 3) a zaznamenány v tab. 3.7. Modul pružnosti v ohybu byl stanoven v souladu s normou ČSN EN ISO 178 dle rovnice (3) z hodnot napětí a průhybu odpovídající hodnotám deformace ohybem 0,05 % a 0,25 %.

Tab. 3.7 Průměrné hodnoty ohybových vlastností kompozitu včetně jejich směrodatných odchylek

Zkušební vzorek		Pevnost v ohybu σ_{fM} [MPa]	Modul pružnosti E_f [MPa]
PP bez vláken		48,3 ± 0,3	1485 ± 75
PP kompozit s CeF	10%	57,9 ± 1,1	2140 ± 102
	20%	59,9 ± 0,9	2385 ± 96
	30%	63,7 ± 0,5	2635 ± 68
PP kompozit s CeF +N ₂	10%	48,3 ± 1,7	2205 ± 82
	20%	47,7 ± 0,9	2291 ± 51
	30%	46,0 ± 1,6	2394 ± 84

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (3)$$

kde je:

σ_{f1}	hodnota napětí na v ohybu při deformaci ε_{f1}	[MPa]
σ_{f2}	hodnota napětí na v ohybu při deformaci ε_{f2}	[MPa]
ε_{f1}	hodnota poměrného prodloužení 0,05 %	
ε_{f2}	hodnota poměrného prodloužení 0,25 %	

3.5.5 Stanovení tahových vlastností

Zkouška tahem patří do skupiny zkoušek statických. Těleso je při této zkoušce namáháno jednoosým tahovým zatížením obvykle až do přetržení. Měření tahových vlastností zkušebních těles bylo prováděno na trhacím zařízení TiraTest 2300 (viz obr. 3.8) s průtahoměrem MFA, resp. Epsilon (model 3542-010M-025-ST) se snímací hlavou s rozsahem 100 kN, resp. 10 kN. Jako zkušební vzorek bylo použito víceúčelové zkušební těleso ve tvaru oboustranných lopatek typu A, které bylo protahováno ve směru podélné osy a to až do jeho přetržení (počáteční měřená délka byla 50 mm). Zkušební rychlost 5 mm/min byla volena v souladu s normou ČSN EN ISO 1873-2. Tímto postupem byla stanovena závislost působící síly na délce vzorku, resp. závislost napětí na poměrném prodloužení zkušební tělesa. Měření modulu pružnosti v tahu bylo provedeno při rychlosti zkoušení 1 mm/min dle ČSN EN ISO 1873-2. Modul pružnosti v tahu byl poté stanoven dle rovnice (4) z naměřených hodnot napětí a poměrného prodloužení v souladu s normou ČSN EN ISO 527-2. Stanovení tahových vlastností (meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti, poměrného prodloužení na mezi pevnosti a připřetržení, resp. celková tažnost) bylo provedeno celkem na 10 vzorcích od každé šarže a výsledné hodnoty byly zaznamenány do tab. 3.8 a tab.3.9.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2)$$

kde je:

σ_1	hodnota napětí na v ohybu při deformaci ε_{f1}	[MPa]
σ_2	hodnota napětí na v ohybu při deformaci ε_{f2}	[MPa]

ε_1 hodnota poměrného prodloužení 0,05 %

ε_2 hodnota poměrného prodloužení 0,25 %



Obr. 3.8 Měřicí zařízení TiraTest 2300

Tab. 3.8 Průměrné hodnoty tahových vlastností kompozitu včetně směrodatných odchylek

Zkušební vzorek		Mez pevnosti v tahu σ_m [MPa]	Modul pružnosti E_t [MPa]
PP bez vláken		32,4 ± 0,1	1635 ± 61
PP kompozit s CeF	10 %	33,8 ± 0,6	2073 ± 115
	20 %	34,9 ± 0,6	2401 ± 83
	30 %	37,3 ± 0,8	2752 ± 87
PP kompozit s CeF + N ₂	10 %	23,4 ± 0,7	1657 ± 11
	20 %	23,8 ± 0,7	1745 ± 69
	30 %	22,2 ± 0,8	1746 ± 51

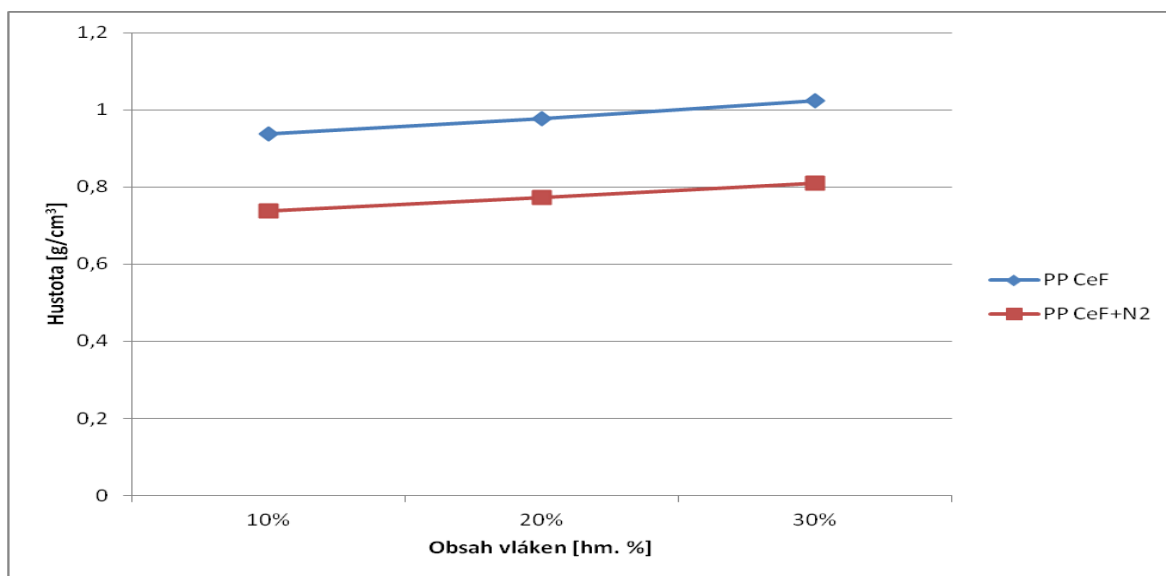
Tab. 3.9 Průměrné hodnoty poměrného prodloužení kompozitů

Zkušební vzorek		Poměrné prodloužení ε_m [%]	Poměrné prodloužení ε_b [%]
PP bez vláken		$9,4 \pm 0,1$	< 250
PP kompozit s CeF	10 %	$5,4 \pm 0,4$	$6,0 \pm 0,6$
	20 %	$4,4 \pm 0,3$	$4,7 \pm 0,4$
	30 %	$4,6 \pm 0,3$	$5,1 \pm 0,4$
PP kompozit s CeF +N ₂	10 %	$3,8 \pm 0,4$	$4,3 \pm 0,7$
	20 %	$4,0 \pm 0,6$	$4,2 \pm 0,8$
	30 %	$3,2 \pm 0,5$	$3,3 \pm 0,5$

4 Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

4.1 Vyhodnocení hustoty

Měření hustoty zkušebních těles imerzní metodou bylo provedeno v souladu s předpisem normy ČSN EN ISO 1183-1. Ze získaných hodnot v tab. 3.4 bylo provedeno vyhodnocení výsledků viz obr. 4.1. Z grafické závislosti je patrné, že při zvyšování obsahu vlákně výztuže se zvyšuje i hustota výstřiků a to jak u zkušebních těles zhotovených konvenčním vstřikováním, tak i u těles zhotovených technologií MuCell. Nárůst hustoty se dá považovat za lineární a její hodnota se při navyšování obsahu vlákně výztuže o 10 % zvyšuje přibližně o 4,6 %. Dále je také z obr. 4.1 zřejmé, že zkušební tělesa zhotovená technologií MuCell vykazují s ohledem na lehčenou strukturu výrazně nižší hustotu, ca. o 21 % menší než kompozitní díl stejného složení vyráběný konvenčním vstřikováním.

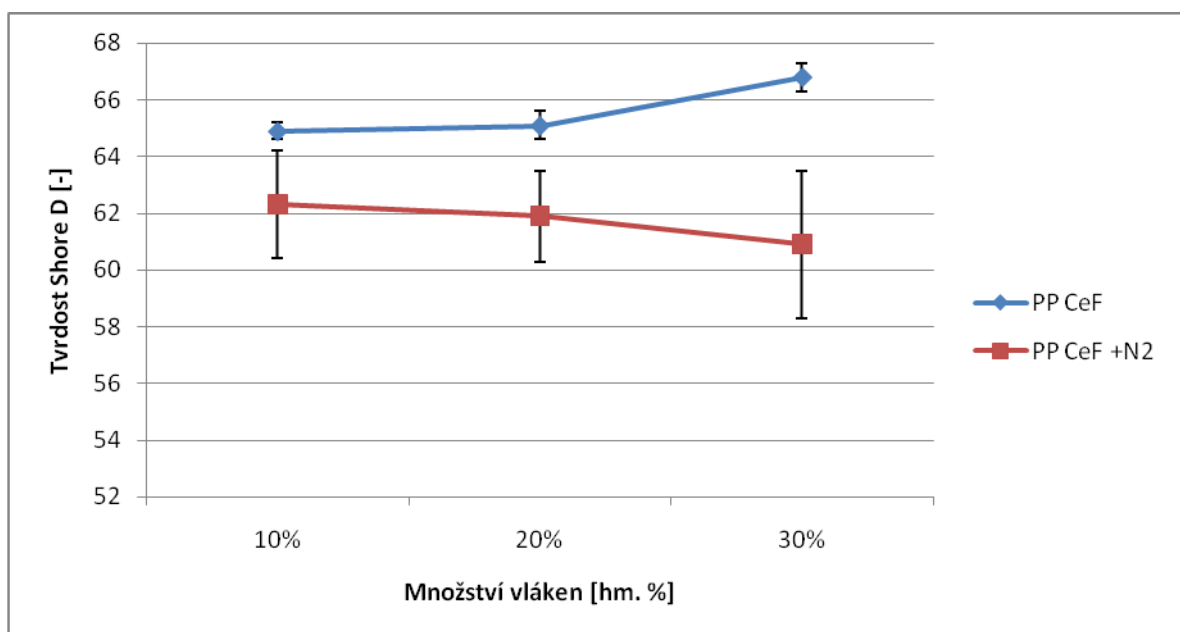


Obr. 4.1 Porovnání hustoty běžného a lehčeného kompozitu

4.2 Vyhodnocení tvrdosti Shore D

Měření tvrdosti zkušebních těles metodou Shore D bylo provedeno v souladu s předpisem normy ČSN EN ISO 868. Z naměřených hodnot tvrdosti Shore D, viz tab. 3.5 byla zhotovena grafická závislost tvrdosti kompozitu na hmotnostním obsahu vláken celulózy v PP matrici (viz obr. 4.2), z níž vyplývá, že u zkušebních těles zhotovených

konvenčním vstřikováním tvrdost mírně roste. Vzhledem k velikosti rozptylu naměřených hodnot, vyjádřených směrodatnou odchylkou, je tento nárůst zanedbatelný. U zkušebních těles zhotovených technologií MuCell je s ohledem na velikost směrodatné odchylky tvrdost kompozitů s rostoucím obsahem vlákenné výztuže neměnná. Z obr. 4.2 je dále patrné, že při porovnávání vzorků zhotovených běžným vstřikováním a technologií MuCell je tvrdost Shore D u vzorků s 10 hm.% vláken (s ohledem na velikost směrodatné odchylky) stejná. U 20 hm.% vlákenné výztuže je rozdíl hodnot přibližně 5 % a u 30 hm.% vláken je tento rozdíl 9 % ve prospěch běžného kompozitu. Opět se dá ale konstatovat, že vzhledem k velkému rozptylu naměřených hodnot u vzorků zhotovených technologií MuCell je tento rozdíl zanedbatelný.

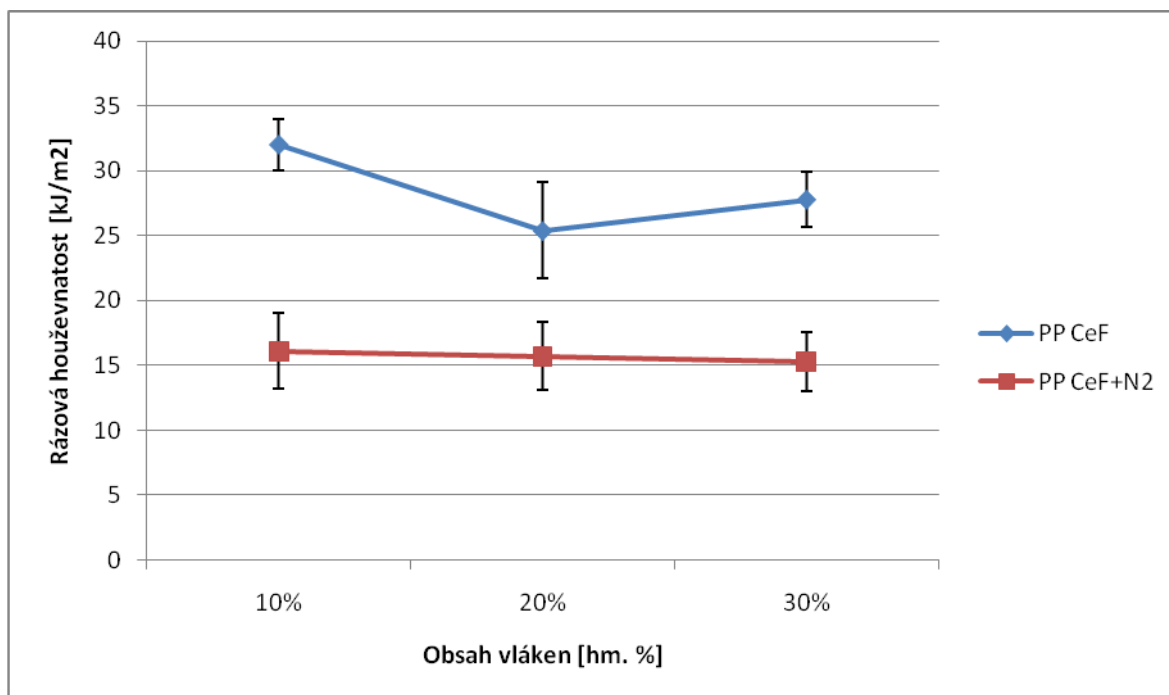


Obr. 4.2 Porovnání tvrdosti Shore D u běžného a lehčeného kompozitu

4.3 Vyhodnocení rázové houževnatosti Charpy

Měření rázové houževnatosti Charpy zkušebních těles bylo provedeno v souladu s předpisem normy ČSN EN ISO 179-1. Vlákenná výztuž v PP matrici má za následek snížení hodnoty rázové houževnatosti výstřiku (při 10 hm.% vláken celulózy o 60 %, resp. o 80 % v případě lehčené struktury). Z naměřených hodnot rázové houževnatosti Charpy (viz tab. 3.6) byla zhotovena grafická závislost rázové houževnatosti kompozitu na obsahu vlákenné výztuže v PP matrici (viz obr. 4.3), z níž je patrné, že u vzorků zhotovených konvenčním vstřikováním rázová houževnatost kolísá. Nejvyšší hodnotu mají vzorky s obsahem vláken 10 %. Vzhledem k velikosti rozptylu měřených hodnot, vyjádřených

směrodatnou odchylkou, jsou tyto změny zanedbatelné. U vzorků zhotovených metodou MuCell jsou s ohledem na velikost směrodatné odchylky hodnoty rázové houževnatosti Charpy kompozitů s rostoucím obsahem vlákenné výztuže shodné. Z obr. 4.3 při srovnání lehčené kompozitní struktury a výstřiků zhotovených standardním vstřikováním je dále patrné, že při 10 hm.% vlákenné výztuže je pokles rázové houževnatosti u lehčených struktur o 50 %, při 20 hm.% vláken o 39 % a při 30 hm.% hmotnostním obsahu vláken o 45 %.

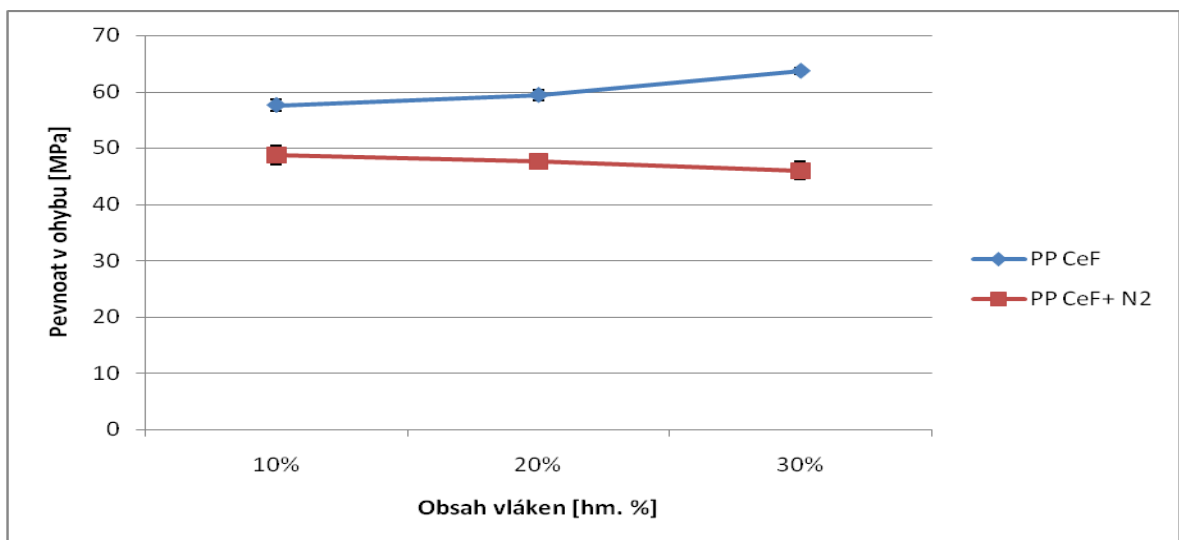


Obr. 4.3 Porovnání rázové houževnatosti Charpy u běžného a lehčeného kompozitu

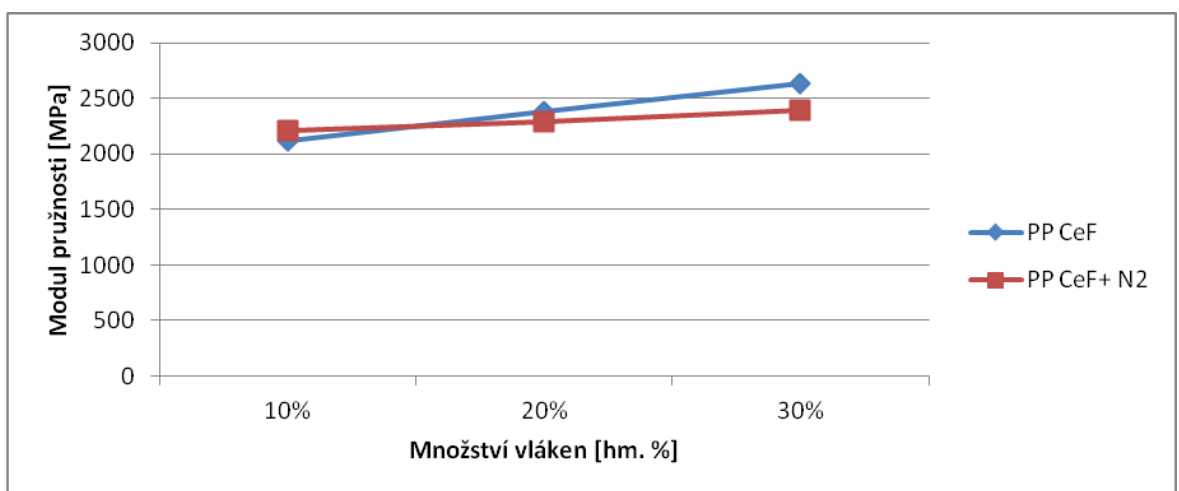
4.4 Vyhodnocení ohybových vlastností

Měření ohybových vlastností zkušebních vzorků bylo provedeno v souladu s předpisem normy ČSN EN ISO 178. Z naměřených hodnot viz tab. 3.7 byly zhotoveny grafické závislosti pevnosti a modulu pružnosti v ohybu na hmotnostním obsahu vlákenné výztuže viz obr. 4.4 a obr. 4.5, z nichž vyplývá, že při zvyšování obsahu vláken v kompozitu zhotoveného konvenčním vstřikováním roste pevnost i modul pružnosti v ohybu a to až o 44 %, resp. o 77 % v případě modulu pružnosti při použití 30 hm.% celulósových vláken v PP matrici (u lehčené struktury se pevnost v ohybu výrazně nemění a roste pouze modul pružnosti v ohybu). Mezi vzorky s 10 hm.% a 20 hm.% vláken je rozdíl pevnosti ca. 3 % a mezi vzorky s 20 hm.% a 30 hm.% vlákenné výztuže je 7 %.

Vzhledem k rozptylu měřených hodnot, vyjádřených směrodatnou odchylkou, jsou rozdíly hodnot u vzorků s 10 hm.% a 20 hm.% vláken zanedbatelné. Modul pružnosti v ohybu u zkušebních těles s obsahem 10 hm.% a 20 hm.% celulóзовých vláken zvyšuje o 11,4 % a u vzorků s 20 hm.% a 30 hm.% o 10,5 %. U lehčených vzorků jsou rozdíly hodnot pevnosti a modulu pružnosti v ohybu s rostoucím obsahem vláken celulózy zanedbatelné (s ohledem na velikost směrodatné odchylky). Při porovnání lehčené kompozitní struktury s výstřiky zhotovenými běžným způsobem vstřikováním je při 10 hm.% vlákenné výztuže pokles pevnosti o 16,6 %, při 20 hm.% vláken o 20 % a při 30 hm.% obsahu vláken o 28 %. Rozdíly hodnot modulu pružnosti u vzorků s 10 hm.% a 20 hm.% vláken jsou vzhledem k velikosti rozptylu naměřených hodnot (vyjádřených směrodatnou odchylkou) zanedbatelné. U výstřiků s 30 hm.% hmotnostním obsahem vláken je rozdíl hodnot 9 %.



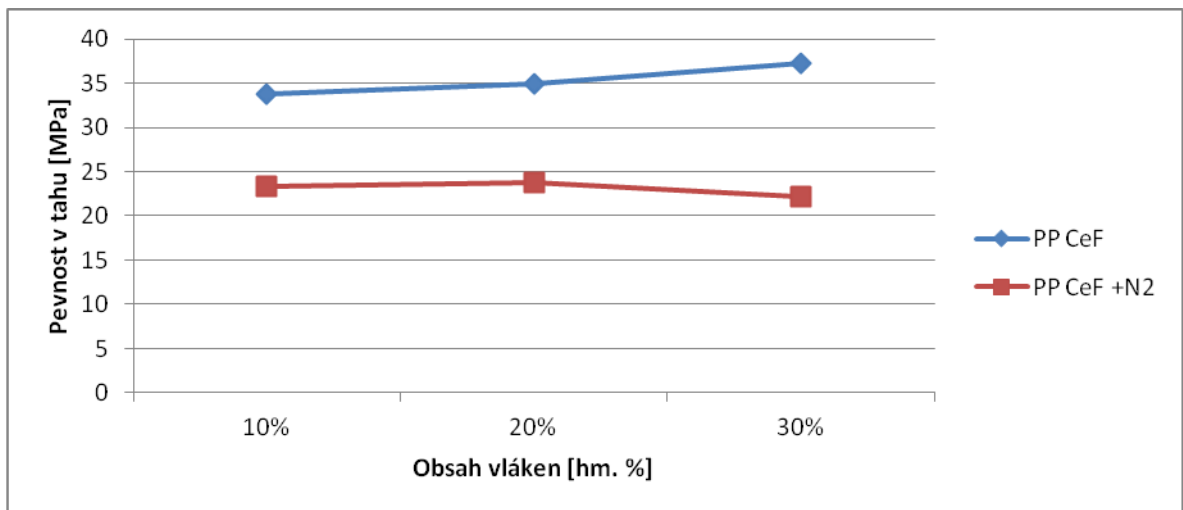
Obr. 4.4 Porovnání pevnosti běžného a lehčeného kompozitu



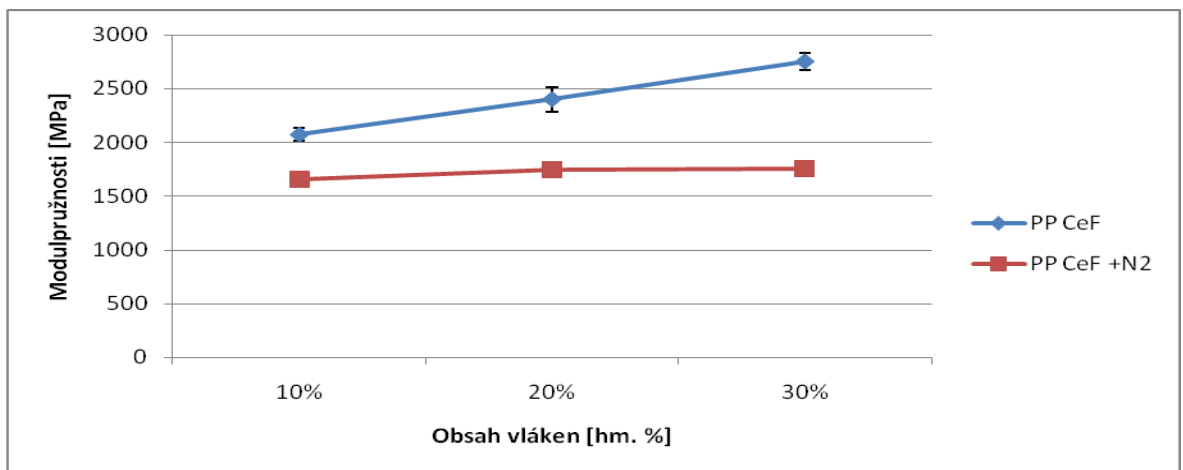
Obr. 4.5 Porovnání modulu pružnosti běžného a lehčeného kompozitu

4.5 Vyhodnocení tahových vlastností

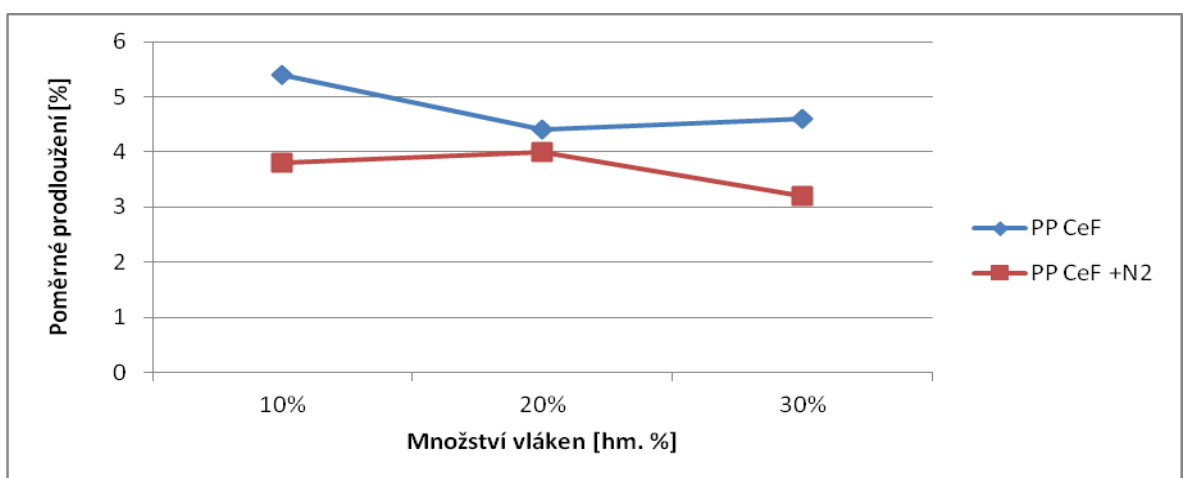
Tahové vlastnosti kompozitu byly stanoveny v souladu s předpisem ČSN EN ISO 527-2. Z naměřených hodnot (viz tab. 3.8) byly zhotoveny grafické závislosti pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu, poměrného prodloužení na mezi pevnosti a poměrného prodloužení při přetržení v závislosti na hmotnostním obsahu vlákně výztuže (viz obr. 4.6, až obr. 4.9). Z obr. 4.6 je zřetelné, že u vzorků zhotovených konvenčním vstřikováním dochází při zvyšování obsahu vlákně výztuže v matrici k nárůstu pevnosti v tahu a to až o 15 % při 30 hm.% celulósových vláken v PP matrici. Mezi vzorky s 10 hm.% a 20 hm.% vláken je rozdíl hodnot 3 % a mezi výstřiky s 20 % a 30 % hmotnostním zastoupením vláken je rozdíl 7 %. U kompozitních těles zhotovených technologií MuCell byl zaznamenán pokles pevnosti v tahu (vzhledem k PP matrici) a to ca. 31 % . S ohledem na velikost směrodatné odchylky je pevnost v tahu s rostoucím obsahem vlákně výztuže neměnná. Při porovnání lehčeného kompozitu a výstřiku zhotoveného běžným způsobem vstřikováním je při 10 hm.% vláken zaznamenán pokles pevnosti o 31 %, při 20 hm.% vláken o 32 % a u vzorků s 30 hm.% vláken o 40 %. Další hodnocenou vlastností při tahovém zatížení byl modul pružnosti. Z naměřených hodnot lze konstatovat, že hodnoty modulu pružnosti při postupném zvyšování hmotnostního procentuálního zastoupení vláken v matrici narůstají pouze u kompozitu zhotoveného konvenčním vstřikováním (a to až o 68 % při 30 hm.% celulósových vláken), zatímco u lehčeného kompozitu odpovídají téměř hodnotám PP matrice.. U zkušebních těles zhotovených běžným způsobem vstřikováním dochází mezi vzorky s 10 hm.% a 20 hm.% vláken k nárůstu modulu pružnosti o 16 % a mezi s 20 hm.% a 30 hm.% vláken o necelých 15 %. U lehčených kompozitů jsou hodnoty modulu pružnosti (s ohledem na rozptyl měřených hodnot) totožné. Z obr. 4.7 je dále patrné, že lehčené struktury zaostávají za vzorky zhotovenými běžným vstřikováním. U vzorků s 10 hm.% vláken o 20 %, při 20 hm.% vláken o 27 % a při 30 hm.% vláken o téměř 37 %. Poslední hodnocenou vlastností kompozitů při tahovém zatížení je poměrné prodloužení při přetržení (celková tažnost), které u kompozitních struktur přidáním vlákně výztuže klesá (viz tab. 4.9). U vzorků zhotovených jak běžným způsobem vstřikováním, tak metodou MuCell je změna celkové tažnosti (s ohledem na velikost směrodatné odchylky) zanedbatelná.



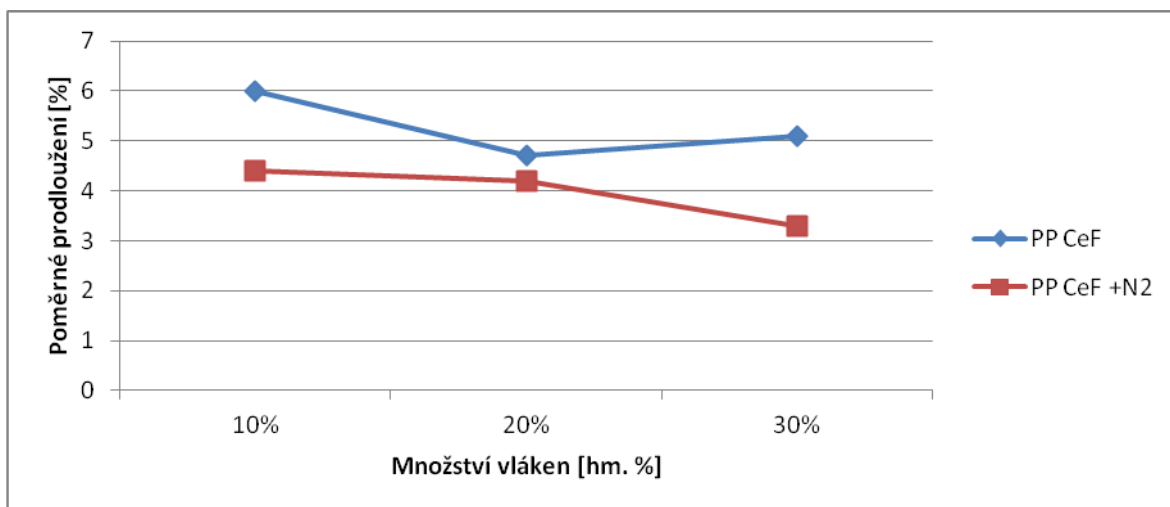
Obr. 4.6 Porovnání meze pevnosti běžného a lehčeného kompozitu



Obr. 4.7 Porovnání modulu pružnosti běžného a lehčeného kompozitu



Obr. 4.8 Porovnání poměrného prodloužení na mezi pevnosti běžného a lehčeného kompozitu



Obr. 4.9 Porovnání poměrného prodloužení při přetržení běžného a lehčeného kompozitu

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo studium mechanických a fyzikálních vlastností lehčené kompozitní struktury složené z PP matrice s 10 hm.%, 20 hm.% 30 hm.% celulóзовých vláken a následné porovnání se vzorky zhotovenými konvenčním způsobem vstřikováním.

Z naměřených hodnot hustoty je možné zkonstatovat, že u lehčených vzorků došlo ke snížení hustoty o 21 % oproti výtřikům zhotovených běžným způsobem a s přibývajícím obsahem celulóзовých vláken v matrici narůstala hustota o ca. 4,6 %.

Z měření tvrdosti Shore D je zřejmé, že tvrdost lehčené kompozitní struktury zhotovené technologií MuCell dosahuje (s ohledem na velikost směrodatné odchylky) totožných hodnot jako běžné kompozity. Z toho vyplývá, že lehčená struktura nemá prakticky žádný vliv na tvrdost kompozitu.

Z výsledků naměřených hodnot rázové houževnatosti Charpy lze uvést, že v případě lehčené struktury má vlákenná výztuž v PP matrici za následek snížení rázové houževnatosti až o 80 % (při 30 hm.% vláken). Dále je také zřejmý pokles hodnot rázové houževnatosti u lehčených kompozitních struktur oproti vzorkům zhotovených konvenčním vstřikováním a to až o 50 % (při 10 hm.% vláken).

Z vyhodnocení ohybových vlastností lze vyčíst, že s navyšováním hm.% vláken v lehčené kompozitní struktuře se pevnost v ohybu výrazně nemění a roste pouze modul pružnosti v ohybu. V rámci porovnání naměřených hodnot lehčených vzorků s výtřiky zhotovenými běžným způsobem je patrný pokles hodnot pevnosti a to o 28 % (při 30 hm.% vláken).

Z měření tahových vlastností lehčeného kompozitního materiálu je patrný pokles pevnosti v tahu (vzhledem k PP matrici) a to o ca. 31 %. Při zvyšování hm.% vláken celulóзы v lehčené kompozitní struktuře je pevnost v tahu (s ohledem na velikost směrodatné odchylky) neměnná. Při porovnání naměřených hodnot pevnosti vzorků zhotovených technologií MuCell s výtřiky vyrobenými běžným způsobem je zřejmý pokles pevnosti a to o 40 % (při 30 hm.% vláken). Z naměřených hodnot lze dále konstatovat, že hodnoty modulu pružnosti jsou u lehčených vzorků s přibývajícím hm.% vláken totožné. Při porovnání lehčených kompozitů se vzorky zhotovenými konvenčním způsobem vstřikováním dochází u lehčených struktur k poklesu modulu pružnosti v tahu o

30 % (při 30 hm.% vláken). Při tahovém zatížení bylo dále vyhodnoceno poměrné prodloužení při přetržení (celková tažnost), které přidáním vláknové výztuže výrazně kleslo a to jak vzorků zhotovených technologií MuCell tak i u zkušebních těles vyrobených konvenčním vstřikováním.

Použitá literatura

- [1] POLÁČEK, Petr. *Vláknové kompozitní materiály – znovuobjevovaný typ materiálu*. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/polacek>
- [2] Steidl, J.: Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství. *MM průmyslové spektrum*, č. 1,2,2005. ISSN 1212-2572
- [3] JANOVEC, J., CEJP, J., STEIDL, J. *Perspektivní materiály*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 2008
- [4] *Duté skleněné mikrokuličky v plastech* [online]. 2006, 2006 [cit. 2016-07-06]. Dostupné z: <http://www.technickytydenik.cz>
- [5] <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [6] <http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf>
- [7] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [8] <http://www.plasticportal.cz/image/clanky/2653/5194.jpg>
- [9] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [10] MILITKÝ, Jiří. *Přednášky: textilní vlákna : speciální vlákna*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-892-2.
- [11] <http://www.techmagazin.cz/obrazky/tm012016/1Elix.jpg>
- [12] <http://www.gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/kompozity.pdf>
- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [14] ŠIMKO, M.: Diplomová práce - Přírodní rostlinná vlákna jako vyztužující prvky polymerních matic kompozitních systémů. Liberec: TU v Liberci, 2007
- [15] <https://publi.cz/books/180/21.html>
- [16] <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [17] Vstříkování plastů procesem MuCell. <Http://www.mmspektrum.com/> 2002

- [18] <https://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?I=9837&U=0&CULTURE=en-US&E=290434>
- [19] ČSN EN ISO 1183-1 (640111). *Plasty – Metody stanovení hustoty nelehčených plastů.* 2008
- [20] ČSN EN ISO 868 (640624). *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore).*
- [21] ČSN EN ISO 179-1 (640612). *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy.* 2010
- [22] ČSN EN ISO 178 (640607). *Plasty – Stanovení ohybových vlastností.* 2011
- [23] ČSN EN ISO 527-1,2 (640604). *Plasty – Stanovení tahových vlastností.* 2012