



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Pevnostní charakteristiky kompozitů na bázi polypropylenu a skelných vláken zhotovených technologií MuCell

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Jiří Šrytr**

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



Strength characteristics of polypropylene- glass composites made by MuCell

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering

Author: Jiří Šrytr
Supervisor: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří Šrytr**
Osobní číslo: **S13000196**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Pevnostní charakteristiky kompozitů na bázi polypropylenu
a skelných vláken zhotovených technologií MuCell**
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. Zpracování rešerše na dané téma.
2. Výroba zkušebních těles konvenčním vstřikováním a technologií MuCell.
3. Stanovení fyzikálních a pevnostních vlastností kompozitních struktur.
4. Zpracování experimentálních dat, diskuse dosažených výsledků, závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, obrázky**
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] KAW, Autar K. *Mechanics of composite materials*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. ISBN 0-8493-1343-0.
- [3] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů: klasická a speciální*. Vyd. 1. Brno: VUT, 2003.
- [4] ZHENG, Rong, TANNER, Roger I. A Xi-Jun FAN. *Injection Molding*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. ISBN 978-3-642-21262-8.
- [5] Odborné podklady firmy Trexel, Inc.
- [6] Technické normy ČSN EN ISO.

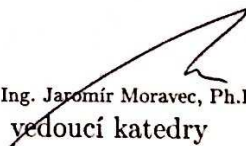
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. dubna 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vzta-huje 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 pří-padě 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 elek-tronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování:

Rád bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubošovi Běhálkovi, Ph.D. za odborné vedení, podnětné rady, připomínky a pomoc při psaní mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a pomoc.

Název bakalářské práce

Pevnostní charakteristiky kompozitů na bázi polypropylenu a skelných vláken zhotovených technologií MuCell

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na výzkum vlastností, zejména pevnostních charakteristik, lehčených kompozitních výstřiků na bázi polypropylenu a skelných vláken o obsahu 20 hm. % a 30 hm. %. Lehčených kompozitních struktur bylo dosaženo pomocí fyzikálního nadouvadla ve formě superkritického fluidního média technologií mikrobuněčného vstřikování MuCell.

klíčová slova: polymerní kompozity, skleněná vlákna, polypropylenová matrice, mikrobuněčné vstřikování, MuCell

Bachelor thesis title

Strength characteristics of polypropylene-glass composites made by MuCell

Annotation

The bachelor thesis is directed for the attribute research, particularly the strength characteristics, of the light weighting composites injection on the base of propylene and glass fibre with content of 20 and 30 percentage by weight. The light weighting composition structures were achieved using the physical blowing agent in the form of supercritical fluid agent of the microcellular injection technology MuCell.

Keywords: polymeric composites, glass fiber, polypropylene matrix, microcellular injection, MuCell

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Teoretická část.....	10
2.1	Polymerní kompozity	10
2.1.1	Polymerní matrice	11
2.1.2	Výztuž	13
2.1.3	Částicové kompozity.....	18
2.2	Technologie vstřikování lehčených struktur MuCell.....	19
2.2.1	Konstrukce stroje pro vstřikování technologií MuCell.....	21
2.2.2	Výhody a nevýhody technologie MuCell.....	22
3	Experimentální část.....	24
3.1	Charakteristika polymerní matrice.....	24
3.2	Vstřikování zkušebních těles	25
3.3	Stanovení fyzikálních a mechanických vlastností kompozitních struktur	28
3.3.1	Stanovení tahových vlastností	28
3.3.2	Stanovení ohybových vlastností	30
3.3.3	Stanovení rázové houževnatosti Charpy	32
3.3.4	Stanovení hustoty.....	33
4	Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.....	35
4.1	Vyhodnocení tahových vlastností	35
4.2	Vyhodnocení ohybových vlastností	37
4.3	Vyhodnocení rázové houževnatosti Charpy	39
4.4	Vyhodnocení hustoty.....	40
5	Závěr	41
	Použitá literatura	43
	Seznam příloh	45

Seznam zkratek a symbolů

<u>zkratka/symbol</u>	<u>vysvětlení</u>	<u>jednotka</u>
E_f	Modul pružnosti v ohybu	[MPa]
E_t	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
a_{cu}	Rázová houževnatost Charpy	[kJ/m ²]
σ_{fM}	Mez pevnosti v ohybu	[MPa]
σ_m	Mez pevnost v tahu	[MPa]
α	Teplotní roztažnost	[K ⁻¹]
ε_b	Poměrné prodloužení při přetržení	[%]
λ	Teplotní vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
μ	Poissonův poměr	[-]
ρ	Hustota	[g·cm ⁻³]
GF	Skleněná vlákna (glass fiber)	
MuCell	Mikrobuněčné vstřikování plastů	
SCF	Superkritická tekutina (supercritical fluid)	
EP	Epoxidové pryskyřice	
PA	Polyamid	
PC	Polykarbonát	
PE	Polyethylen	
PF	Fenol-formaldehydové pryskyřice	
PMMA	Polymethylmethakrylát	
PP	Polypropylen	
PS	Polystyren	
PTFE	Polytetrafluorethylen	
UF	Melaminové pryskyřice	
UP	Polyesterové pryskyřice	

1 Úvod

Technologický vývoj je závislý na úrovni materiálového inženýrství. S vývojem lidské společnosti je úzce spjat vývoj požadavků na výrobky a zařízení, které společnost pro svůj život nezbytně potřebuje. Jsou kladeny požadavky na nízkou hmotnost, odolnost proti korozi a v neposlední řadě estetické a povrchové vlastnosti. Do budoucna pak mají klíčový význam požadavky na funkční integraci dílů, miniaturizaci součástí, a nakonec přijatelnou likvidaci výrobků. V dnešní době jsou stále vyšší požadavky na strojírenské díly, kterých je možno docílit s použitím plastů a kompozitů, a tím dosáhnout požadovaných vlastností.

Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství. Jsou kladeny stále vyšší požadavky na zlepšování jejich stávajících vlastností. Použití těchto materiálů v minulosti vycházelo ze snahy nahrazovat kovové materiály za účelem snížení hmotnosti, zvýšení korozní odolnosti, zvýšení spolehlivosti a životnosti případně pro dobré elektrické izolační vlastnosti. Polymerním materiálům bránily v širším použití jejich nepříznivé vlastnosti, kterými jsou tuhost, pevnost případně časová a teplotní nestabilita. Tyto nepříznivé vlastnosti můžeme ovlivnit vytvořením kompozitu, a to přidáním výztuže v podobě vláken případně částic, které mají vysokou pevnost, tuhost, a jsou teplotně i časově stálé. Význam těchto materiálů je především v leteckém průmyslu a automobilovém průmyslu. Tyto materiály se také stále více prosazují ve stavbě chemických a energetických strojů.

Cílem bakalářské práce je vyhodnocení pevnostních charakteristik lehčených dílů s různým obsahem fyzikálního nadouvadla a skelných vláken. Zkušební tělesa na bázi polypropylenu byla zhotovena technologií MuCell dle mezinárodních norem. V teoretické části práce je věnována pozornost polymerním kompozitům, kde jsou popsány vlastnosti a složení kompozitu (matrice, výztuž). Dále se práce zabývá výrobou lehčených struktur technologií MuCell. Zde je vysvětlen princip této technologie a konstrukce stroje. V experimentální části je charakterizována výroba zkušebních těles, a to jak konvenčním způsobem, tak technologií MuCell. Vzorky byly podrobeny analýze fyzikálních a mechanických vlastností, a to při daném obsahu fyzikálního nadouvadla a skelných vláken.

2 Teoretická část

Teoretická část bakalářské práce se s ohledem na řešenou problematiku zabývá kompozitními materiály na bázi polymerů a technologií vstřikování lehčených polymerních dílů.

2.1 Polymerní kompozity

Nároky kladené na konstrukční materiály mají vzrůstající tendenci. Často je požadována jejich vysoká pevnost a nízká hmotnost. Tento problém řeší kompozitní materiály, které mají velice dobrý poměr tuhosti a pevnosti k jejich hustotě. Vývoj nových kompozitních struktur se v současnosti zaměřuje na splnění i dalších materiálových požadavků, které jsou u klasických materiálů mnohdy jen těžko dosažitelné: dostatečná houževnatost, teplotní stabilita, mechanické tlumení, modifikace elektrických vlastností, nízká teplotní roztažnost, apod. Vlastnosti výsledného kompozitu jsou závislé na použité matici a podílu výztuže, která se může pohybovat až do 70 %, ale i na mezifázovém rozhraní. Maximální podíl výztuže závisí na typu polymeru a jeho viskozitě. [2]

Kompozitní systémy s polymerní maticí se řadí mezi nejčastěji používané kompozity vůbec. Jedná se o heterogenní materiály dvou a více fází, které mají odlišné fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti. Jednotlivé fáze mají různé specifické vlastnosti, které jsou kombinovány a vytvářejí tak kompozitní strukturu, která dosahuje lepších vlastností než jednotlivé fáze. Tato struktura je tvořena vždy maticí a výztuží. Spojitá fáze, neboli matrice, je z houževnatějšího materiálu, který slouží ke spojení jednotlivých složek do kompaktní formy. Aby bylo dosaženo požadovaných vlastností kompozitu, je nutné zajistit dobré adhezivní vlastnosti mezi výztuží a maticí (cílenou povrchovou úpravou výztuže, případně adhezivními činidly) a zajistit tím tak co možná nejlepší přenos napětí při zatěžování kompozitu. Nespojité fáze, neboli výztuž, bývá pevnější a tvrdší. Může být v podobě vláken, drceného prášku či kuliček. Aby se jednalo o kompozitní materiál, musí být přidáno alespoň 5 % výztuže. Přejechy mezi jednotlivými fázemi lze pozorovat pouhým okem. Při vytvoření kompozitního materiálu vzniká tzv. synergický jev, kdy má výsledný kompozit lepší vlastnosti než součet vlastností obou materiálů. [1]

Parametry ovlivňující chování kompozitů:

- Vlastnosti, tvar a orientace výztuže
- Vlastnosti matrice
- Podíl výztuže v matrici
- Mezifázové rozhraní

Kompozitních materiálů je v technické praxi velké množství, liší se druhem matrice, materiálem výztuže a její orientací a dělí se nejčastěji proto dle:

- Typu matrice – na kovové, polymerní a keramické kompozity
- Materiálu výztuže – na kovové, organické (polymerní), anorganické kompozity
- Tvaru výztuže – na částicové, vláknové a strukturní kompozity (viz obr. 1)



Obr. 1 Rozdělení kompozitů podle typu a uspořádání výztuže [4]

2.1.1 Polymerní matrice

Matrice tvoří spojitou část kompozitu a má základní funkci, která spočívá v přenosu vnějšího zatížení na vyztužující fázi, které je přenášeno díky adhezi, tj. třením na hranici výztuž-matrice. Matrici tvoří buď termoplast nebo reaktoplast. Výjimkou však není ani vulkanizovaný elastomer. Každý z těchto materiálů má své výhody a nevýhody a je vhodný pro jiné aplikace. Přehled mechanických vlastností vybraných matric je uveden v tab. 1.

Reaktoplasty jsou polymery, které se dají zpracovávat pouze po omezenou dobu a následným zahřátím nebo přidáním síťovacích činidel, aktivátorů a urychlovačů

síťování přechází z lineárně viskózního stavu do prostorově sesíťovaného. Vytvrzováním vznikají chemické vazby, které vytváří prostorovou síť a po vytvrzení jej lze pokládat za jednu velkou makromolekulu. Výrobek chladne mimo nástroj, jelikož je po sesíťování tvarově stálý. To má za následek jeho větší rozměrovou přesnost a chemickou odolnost. Po vytvrzování jsou reaktoplasty již netavitelné a nelze je opět převést do plastického stavu. S tím souvisí jejich recyklovatelnost, která je díky sesíťované struktuře velmi obtížná. Do reaktoplastických matric patří zejména epoxidové pryskyřice (EP), nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP), melaminové (UF) a fenol formaldehydové pryskyřice (PF). **Matrice** na bázi reaktoplastu se vyznačují nízkou hustotou a výbornou odolností křípu i vysokým teplotám. U reaktoplastových matric je však nutné řešit řadu problémů spojených se smáčivostí výztuže pryskyřicí, rychlostí vytvrzování, skladovatelností prepregů, smršťováním při reakci, vedlejšími reakcemi apod. [2]

Termoplasty jsou polymerní materiály složené z lineárních nebo rozvětvených makromolekul, které se při zahřívání stávají plastickými a chovají se jako viskózní newtonovská kapalina. Při ohřevu nad teplotu tání se materiál stává plastickým a následným ochlazením pod tuto teplotu materiál tuhne. Při ohřevu materiálu a v průběhu jeho zpracování neprobíhá žádná chemická reakce, struktura se nemění. Do plastického stavu je lze převést teoreticky opakovaně a následně chladit. To však může mít za následek zkracování makromolekulového řetězce a tím degradaci materiálu. Termoplast lze rozdělit na:

- amorfní - polystyren (PS), polykarbonát (PC), polymethylmethakrylát (PMMA) apod.
- semikrystalické - polyamid (PA), polyethylen (PE), polypropylen (PP), polytetrafluorethylen (PTFE), apod.

Termoplastická matrice má určitá omezení, která brání v širším uplatnění. Viskozita termoplastů je o 3 až 4 řády vyšší než u reaktoplastů, a má za následek vznik defektů jako jsou bubliny, nesmočená vlákna nebo špatná smáčivost tkanin. Tento problém lze částečně vyřešit impregnací vláken, případně jejich povrchovou úpravou, která má však za následek zvýšení ceny kompozitu. [2]

Polymerní matrice musí zajišťovat:

- Přenos sil na výztuž
- Přenos napětí mezi vlákny
- Ochranu výztuže před vlivy okolí
- Geometrickou polohu výztuže
- Geometrickou stálost

Tab. 1 Mechanické vlastnosti polymerních matic [1,2]

Matrice	Hustota ρ [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Yongův modul E [MPa]	Poissonův poměr μ	Pevnost v tahu σ [GPa]	Poměrné prodloužení při přetržení ϵ_b	Teplotní roztažnost α [10^{-6}K^{-1}]	Teplotní vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Reaktoplasty							
Epoxidy	1,1-1,4	3,0-6,0	0,38-0,40	0,035-0,1	1,0-6,0	60,00	0,10
Polyestery	1,2-1,5	2-4,5	0,37-0,39	0,04-0,09	2,0	100-200	0,20
Termoplasty							
PA 6.6	1,14	1,4-2,8	0,30	0,06-0,07	40-80	90,00	0,20
PP	0,90	1,0-1,4	0,30	0,02-0,04	300,00	110,00	0,20
PEEK	1,26-1,32	3,6	0,30	0,17	50,00	47,00	0,20

2.1.2 Výztuž

Výztuž je možné považovat za takovou složku kompozitu, kvůli níž se kompozit vytvořil, tzn., že má nějakou výhodnou vlastnost, kterou lze v aplikaci využít. Nejčastěji to je pevnost, modul pružnosti a malá deformace. Hlavní funkcí výztuže je přenos převážné části vnějšího zatížení. Pevnostní chování kompozitu je závislé na tvaru, koncentraci a orientaci výztuže.

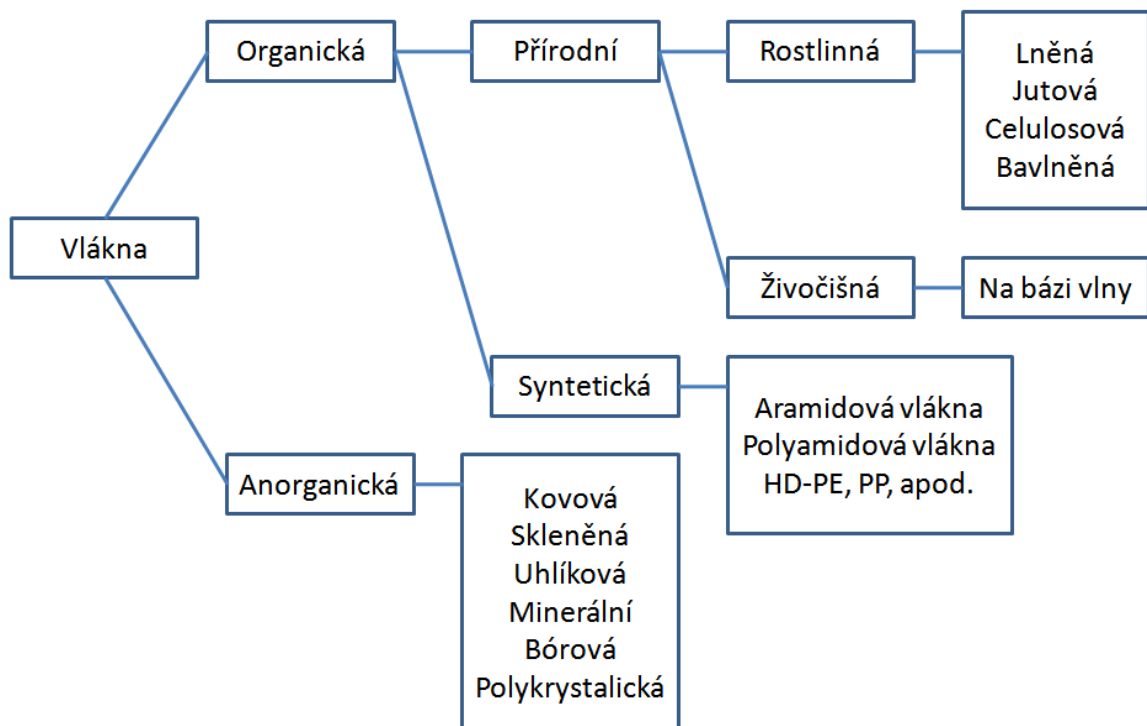
Struktura a vlastnosti kompozitů z hlediska parametrů výztuže ovlivňuje:

- Chemické složení výztuže
- Tvar a velikost výztuže
- Vzdálenost mezi částicemi výztuže
- Typ vazby, navlhavost
- Tvrdost – abrazivní chování

2.1.2.1 Vláknová výztuž

Mezi nejpoužívanější vláknovou výztuž se řadí uhlíková a skelná vlákna, která mají zmínku použití již v roce 1612. Již tehdy bylo známo, že materiál ve formě vláken má ve směru osy vyšší pevnost v tahu, než je pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Pevnost vlákna závisí především na jeho průřezu (se zmenšujícím se průřezem vlákna poroste pevnost) a délce (rostoucí délka vlákna zvyšuje jeho pevnost v tahu a ohybu a zároveň zvyšuje modul pružnosti). Pro vlákna je rovněž charakteristická anizotropie vlastností – pevnost a modul pružnosti bývají ve směru osy vyšší než ve směru kolmém. Dalšími typy vláken mohou být např. aramidová vlákna, nebo z environmentálního hlediska stále více používaná vlákna přírodní, rostlinného nebo živočišného původu. [2]

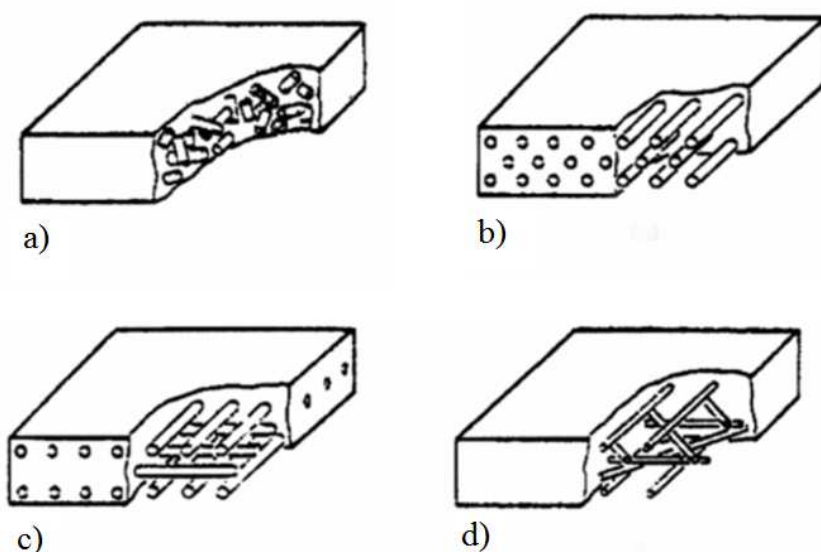
V technické praxi polymerních kompozitů je používáno velké množství typů vláknenné výztuže (viz obr. 2). Vzhledem k zaměření bakalářské práce je v následujících odstavcích věnována pozornost výhradně skleněným vláknům.



Obr. 2 Schematické rozdělení vláknenné výztuže polymerních kompozitů [2]

Vláknové kompozity mohou být rozlišovány s jednosměrnou nebo vícesměrnou orientací vláken. Jednosměrné vláknové kompozitní struktury mají vlákna uspořádány do jednoho směru, nejčastěji ve směru namáhání. Lze je dále rozdělit na krátkovláknové

(viz obr. 3a), které mají poměr délka/ průměr < 100 a na dlouhvláknové (viz obr 3b), které mají poměr délka/ průměr > 100 . Vícesměrné kompozitní struktury mohou mít vlákna uspořádána dvěma či více směry (viz obr. 3c) nebo s náhodnou orientací (viz obr. 3d). Špičkových hodnot mechanických vlastností lze dosáhnout u kompozitních struktur s dlouhvláknovou výztuží v různé formě rovingu, rohože a tkaniny. Největším přínosem pro oblast kompozitů jsou z mechanického hlediska uhlíková a skelná vlákna. [5]



Obr. 3 Uspořádání vláken v kompozitu [2]

a) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny, b) jednosměrně orientovaný dlouhvláknový kompozit, c) kompozit s dvousměrnou výztuží (tkanina), d) kompozit s náhodně orientovanými dlouhými vlákny – netkaná rohož

Textilní skelná vlákna neboli Glass Fiber (GF) je název pro vlákna kruhového průřezu o průměru (3,5 až 20) μm , které jsou taženy z roztavené skloviny. Jsou nejpoužívanější vláknovou výztuží, a to i přes nižší pevnost oproti uhlíkovým a aramidovým vláknům. Velkou oblibu si zasloužily z důvodu jejich nízké ceny, která je oproti aramidovým a uhlíkovým vláknům několikanásobně nižší. Jsou charakteristické svojí vysokou pevností, rázovou houževnatostí, dobrou chemickou odolností a izotropií. Většina skelných vláken je na bázi oxidu křemičitého (SiO_2) s příměsí oxidu boritého, vápenatého, hlinitého a hořečnatého. Přehled vybraných druhů sklovin a jejich vlastností jsou uvedeny v tab. 2. [1] Na trhu existuje více typů skel:

E-skla jsou nejpoužívanější skelná vlákna na trhu (tvoří 90 % z produkce skelných vláken), která vynikají jako dobrý elektrický izolant s vysokou propustností záření.

S-skla jsou charakteristická svojí vysokou pevností, která dosahuje hodnot uhlíkových a aramidových vláken. Jejich cena je však vysoká.

D-skla vynikají nízkou dielektrickou konstantou. Využívají se především v elektrotechnice a energetice, kde nevadí horší mechanické vlastnosti.

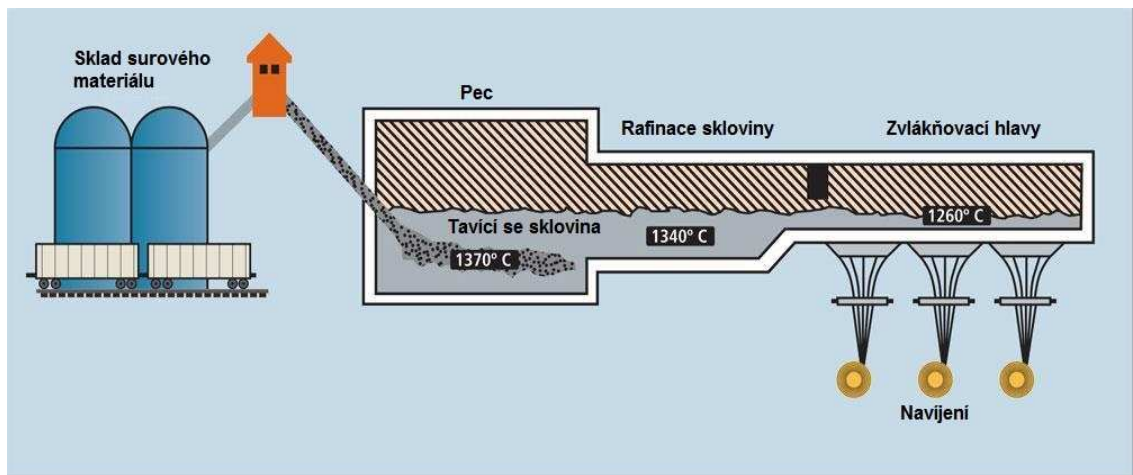
C-skla jsou skla dobře odolávající chemikáliím. Jejich uplatnění je zejména v chemickém průmyslu. [1]

M-skla jsou vysoce modulová skla, která vykazují nejvyšší modul pružnosti ze všech skel (až 110 GPa).

Tab. 2 Vlastnosti skelných vláken [1, 2]

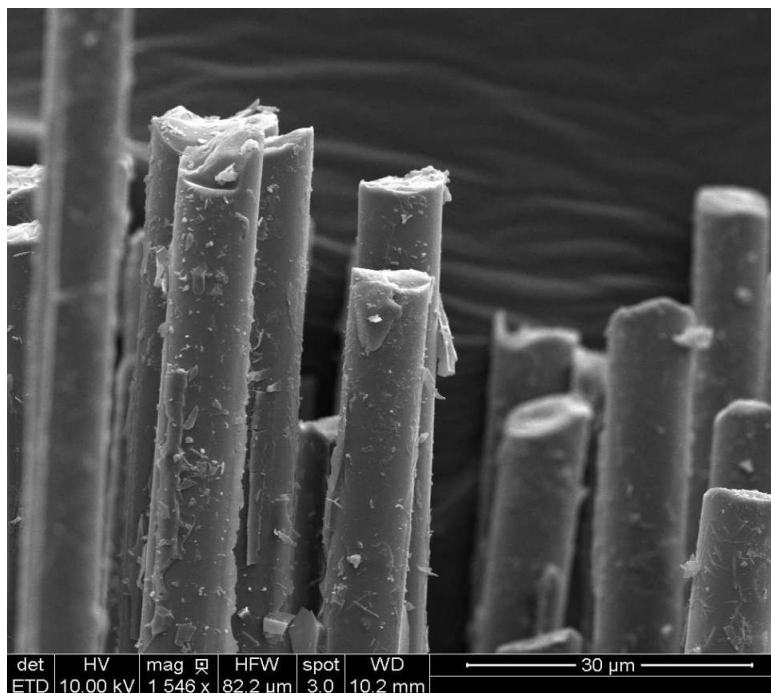
Vlastnosti	Jednotky	Typ skleněných vláken			
		E	S	D	C
Hustota	g/cm ³	2,54	2,49	2,16	2,49
Modul pružnosti	GPa	73,5	86,8	52,5	70,0
Pevnost v tahu	MPa	3500	4650	2450	2800
Poměrné prodloužení na mezi pevnosti	%	4,8	5,4	4,7	3,5
Součinitel tepelné roztažnosti	10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	5	4	2-3	7,2
Relativní dielektrická konstanta	-	6,3	5	3,6	6,2

Z tab. 2 je zjevné, že skelná vlákna mají vysoký modul pružnosti. To je důsledkem silné kovalentní vazby mezi křemíkem a kyslíkem, která závisí také na druhu použitých oxidů kovů. Vyrábí se tažením z trysek ze sklářské pece, která je vyzděná žáruvzdornou keramikou za teploty okolo 1400 °C. V peci se roztaví křemičitý písek (SiO₂), vápenec (CaCO₃), kaolin (Al₄[Si₄O₁₀](OH)₈), dolomit (CaMg(CO₃)₂), kyselina boritá (B(OH)₃) a kazivec (CaF₂). Na E sklovinu se několik dní číří a pak se vede kanálky z předpecí do spřádacích trysek (bushings). Zvláknovací hlava je z platino-rhodioné slitiny a je ohřívána tak, aby sklovina pomalu vytékala z 200 až 4000 trysek. Takto vyrobená vlákna jsou asi 2 mm silná a teprve dloužením vysoce viskózních vláken se prodlužují až na 40 000 násobnou délku. Schéma výroby skelných vláken je znázorněno na obr. 4. Vlákna se po povrchové úpravě navíjí na cívku. [1]



Obr. 4 Výroba skleněných vláken [7]

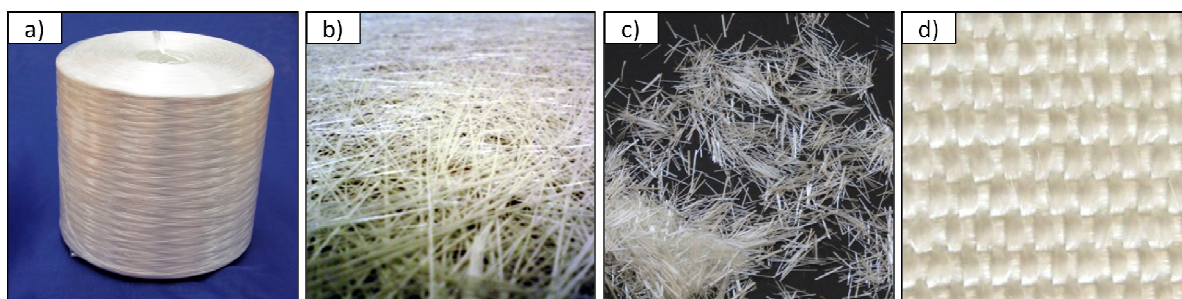
V průběhu výroby vláken se na čerstvě tažená vlákna průběžně nanáší vodní emulze (lubrikace). Účelem lubrikace je spojit jednotlivá vlákna do manipulovatelného sprádacího vlákna, chránit povrch křehkých vláken, připravit vlákna k dalšímu zpracování a zlepšit vazby mezi maticí a vláknem. Jelikož se vlákno v průběhu výroby ochlazuje a na povrchu vlákna tuhne, vzniká při tažení na povrchu vlákna napětí. Obal vlákna je přiměřeně natahován napětím, přičemž vnitřní část je v tekutém stavu a nevykazuje vnitřní napětí. Po ochlazení vlákna v celém jeho průřezu je ukončeno tažení a vlákno je navinuto na cívku. Mikroskopický snímek povrchu skelných vláken je uveden na obr. 5.



Obr. 5 Mikrosnímek skleněných vláken (SEM) [8]

Skelná vlákna jsou používána samostatně jen ve výjimečných případech, používají se pro textilní zpracování a jako výztuže polymerních matic a lehčených struktur. Vlákna se dále zpracovávají na:

- a) **Příze** - spřádaná vlákna, která se zpracovávají na tkaniny a pletené výrobky.
- b) **Nitě** - skládají se z jedné nebo více spředených přízí.
- c) **Pramenec (roving)** - sdružené, rovnoběžně uložená vlákna s 20 až 60 konci. Lze je zpracovávat sekáním, navíjením, tkaním nebo navíjením nekonečného pramence (viz obr. 6a).
- d) **Rohože** – jsou vyráběny z 25 až 20 mm dlouhých vláken, která jsou nepravidelně rozložena. Lze je také vyrábět z nekonečných vláken, která jsou nepravidelně rozmístěna (viz obr. 6b).
- e) **Krátká vlákna** – jsou sekána na požadovanou délku 0,1 až 0,5 mm (viz obr. 6c)
- f) **Tkaniny** - plošný výrobek vznikající vzájemným propojením pravoúhlých soustav vláken nebo pramenců (viz obr. 6d) [1]



Obr. 6 Skelná vlákna [9, 10, 11, 12]

c) pramenec, d) rohož, e) krátká vlákna, f) tkaniny

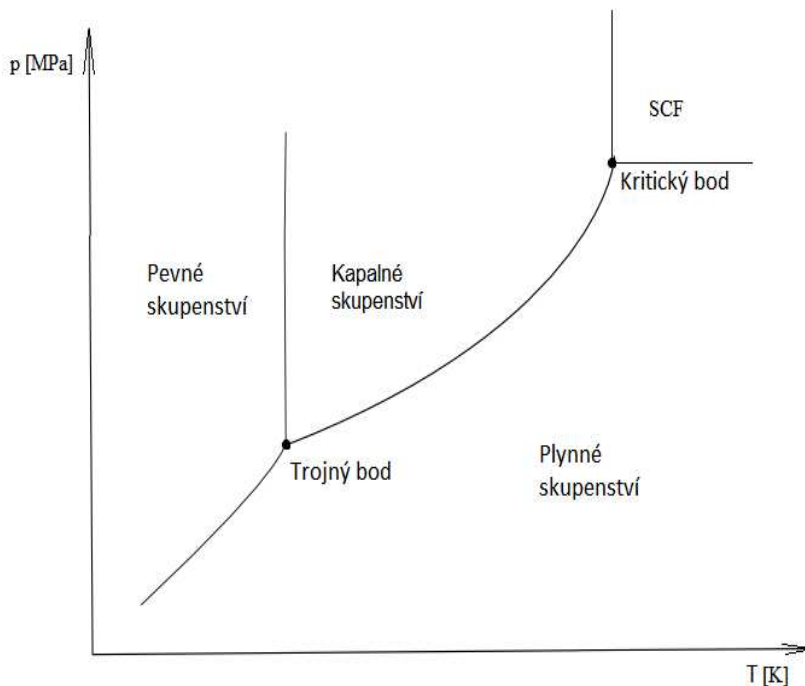
2.1.3 Částicové kompozity

Částicové kompozity jsou materiály, které mají v matici rozptýleny částice různých tvarů o velikosti obvykle (1 až 10) μm . Jedná se o nevlákněné částice s malými rozměry, které mohou mít tvar kuliček, destiček nebo jehliček. Tyto kompozity mívají nižší houževnatost a cena bývá nižší. [2] Typickým částicovým plnivem v polymerních kompozitech jsou např. skleněné kuličky, které mohou být i duté, saze, oxidy hliníku,

uhličitan vápenatý apod. [6]. S použitím těchto plniv lze získat různé vlastnosti, jako je nižší cena, zlepšení mechanických vlastností nebo tvarová stabilita dílu. [20]

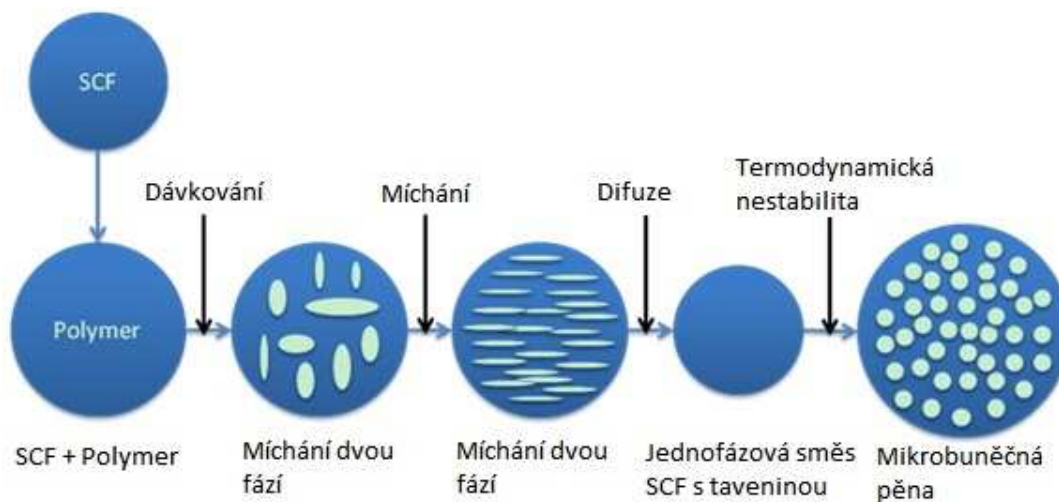
2.2 Technologie vstřikování lehčených struktur MuCell

Technologie MuCell (Microcellular Foam Molding - mikrobuněčné vstřikování) byla vyvinuta americkou firmou Trexel ve spolupráci s Massachusetts Institute of Technology, která byla představena v roce 2001 na mezinárodním veletrhu Düsseldorfu. Její počátky však sahají do konce 80 let, kdy na Massachusetts Institute of Technology (MIT) se zabývali extruzí. Jedná se o běžné vstřikování plastu, kdy do taveniny je vstřikován stlačený plyn ve stavu superkritické tekutiny (SCF) a to ještě před samotným vstřikováním za účelem vytvoření lehčené mikrobuněčné struktury. Nejčastěji se používá dusík (N_2), méně používaným plynem je pak oxid uhličitý (CO_2). Superkritická tekutina (supercritical fluid) označuje stav látky, kdy její teplota i tlak jsou vyšší, než jsou jejich kritické hodnoty (viz fázový diagram na obr. 7). Látky v tomto stavu vykazují vlastnosti mezi tekutinou a plynem. Tyto kapaliny mají viskozitu blízkou se plynům a hustotu blízkou se kapalinám a mají schopnost difundovat skrz pevné látky. [17, 21]



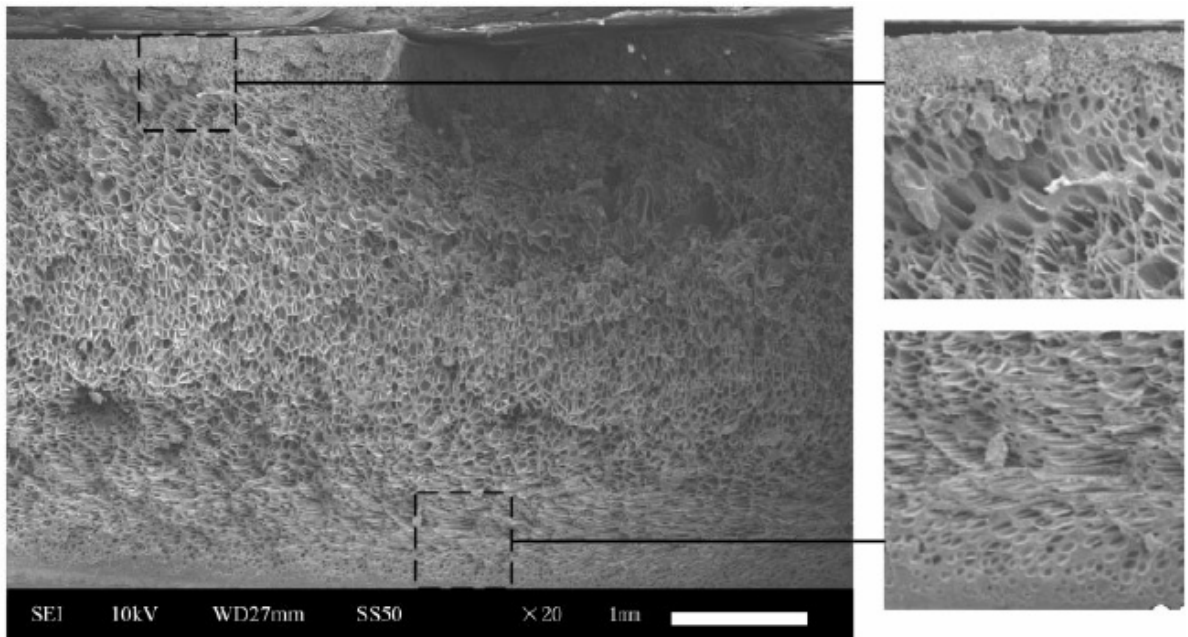
Obr. 7 Fázový diagram [14]

Technologie MuCell vyžaduje vstřikovací stroj, který je vybavený jednotkou pro přesné dávkování plynu a upraveným šnekem pro dokonalé promísení polymeru a plynu ve stavu superkritické tekutiny (SCF). Při vlastním procesu vstřikování je při plastikaci polymeru injektován průběžně do taveniny plyn ve formě superkritické tekutiny (SCF). Tavenina je následně vstřikována do dutiny formy, kde probíhá dotlak (expanzí plynu), chlazení materiálu a vyhození výrobku z formy. Aby plyn v tavenině zůstal ve stavu SCF, je zapotřebí udržovat vysoký tlak uvnitř tavicí komory, což je docíleno vysokým přitlakem (cca 20 MPa). Dále je zapotřebí zajistit, aby obě složky byly spojené difúzí. Toho je docíleno speciální konstrukcí šneku, která je popsána v kap. 2.2.1. Difuze plynu v tavenině je znázorněna na obr. 8. [19, 21]



Obr. 8 Difuze plynu v tavenině [13]

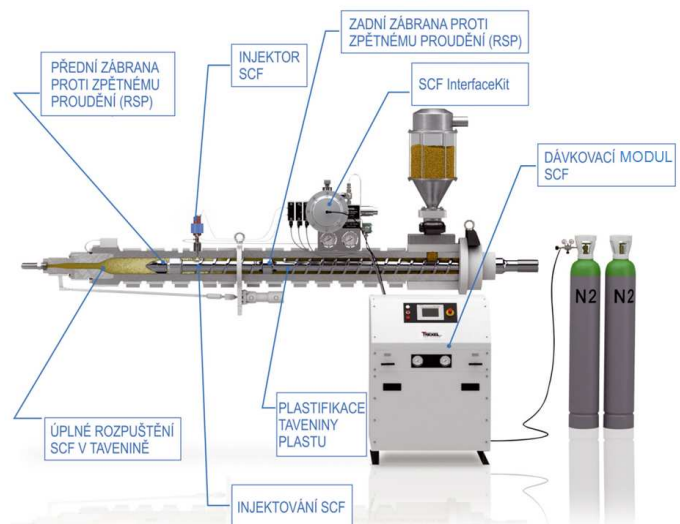
Při vstřikování materiálu do dutiny formy dochází k poklesu tlaku taveniny, plyn rozpuštěný v tavenině začíná expandovat a vytváří zárodky bublinek. Ideálním stavem je vytvoření rovnoměrné nukleace v celém dílu. Tohoto stavu však nelze dosáhnout, jelikož při styku taveniny s formou dochází k rychlému ochlazení, a tím tuhnutí materiálu v malé vrstvě na povrchu formy. Nukleace tak probíhá uvnitř dílu, kde tavenina tuhne pomaleji. V místě nukleace rostou mikroskopické bublinky (viz obr. 9), které expandují a vytváří tak přetlak, který nahrazuje funkci dotlaku při konvenčním vstřikování. Dotlak má doplňovat materiál do dutiny formy, avšak zde je nahrazen růstem bublin v jádru dílu. [19]



Obr. 9 Mikroskopický pohled na vnitřní strukturu dílu vyrobenou technologií mikrobuňčného vstřikování MuCell [15]

2.2.1 Konstrukce stroje pro vstřikování technologií MuCell

V podstatě se jedná o upravený konvenční vstřikovací lis, opatřený speciální vstřikovací jednotkou injektoru pro dávkování SCF, modulem pro přípravu SCF a tlakových láhví s plynem N_2 nebo CO_2 (viz obr. 10). Dávkovací systém pro technologii vstřikování MuCell zajišťuje jediná firma Trexel, která stojí za vývojem této technologie. Stroj uzpůsobený pro technologii MuCell si lze buď zakoupit od různých výrobců vstřikovacích lisů, anebo pokud již vlastníme vstřikovací lis, lze provést výměnu modulární vstřikovací jednotky. Modifikace konvenčního lisu může být však často složitá. [18]



Obr. 10 Vstřikovací jednotka technologie

Konstrukce šneku pro technologii MuCell se podobá konstrukci šneku pro běžné vstřikování. Úkolem je dopravit granulát do tavicí komory, převést materiál do homogenního plastického stavu (třením a vnějším ohřevem) a zajistit homogenní rozptýlení SCF tekutiny. Pro tento účel je šnek navíc vybaven stírací a míchací částí. **Stírací** část má za úkol rozdělit dávku SCF na co možná nejmenší části tak, aby bylo zajištěno co možná nejefektivnější rozpouštění v polymeru. Takto vyrobená směs polymeru s SCF je dvoufázová. Tavenina je otáčením šneku posouvána do **míchací** části. Tato část je tvořena šroubovicí, podobně jako stírací část, která však má vyšší stoupání závitu a má rovnoměrně vybroušeny drážky. V této části šneku dochází k intenzivnímu mísení polymeru a SCF tak, že dochází k úplnému promísení. Takto promíchaný polymer a SCF je jednofázovou směsí. Konstrukce šneku je závislá na polymeru a jeho plniva. Musí být konstruován tak, aby dobře mísil taveninu a SCF, bral ohled na druh plniva, a aby jej případné vyztužující materiály nepoškozovaly. Šnek má vždy zpětné **kroužky** a **ventily**. Tyto části zajišťují, aby tavenina byla tam, kde je požadováno a nevracela se zpět do zadní části šneku. Jeden ventil je umístěn před stírací částí a slouží k zamezení toku stlačené taveniny proti směru toku materiálu. Druhý je umístěn za míchací částí, který tak odděluje dávku již promísené směsi od té ještě nepromísené. Navíc je nutné zajistit, aby promísený polymer a SCF zůstaly pod vysokým tlakem v homogenním stavu. Používána je proto uzavíratelná tryska (zabraňující předčasné expanzi plynu), která je otevřená pouze ve vstřikovací fázi. Po vstříknutí se opět uzavírá a udržuje tlak v komoře. [18]

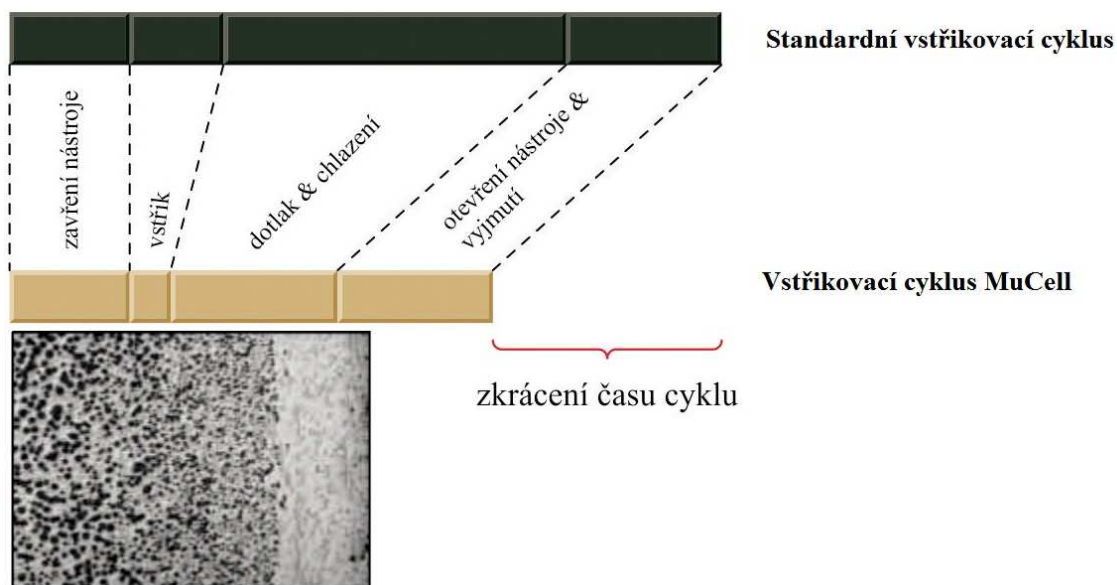
2.2.2 Výhody a nevýhody technologie MuCell

Technologie MuCell má řadu výhod ale i nevýhod. V následujících odstavcích jsou popsány základní vlastnosti lehčených struktur a jsou porovnány s konvenčním vstřikováním nelehčených dílů.

Hmotnost výrobku je při použití technologie MuCell nižší a to díky plynu, který se přidává po polymerního materiálu a vytváří mikrobuněčnou (lehčenou) strukturu. Podle některých studií lze hovořit o úspoře až 30 % při zachování mechanických vlastností dílu. [19]

Jelikož tavenina tuhne na povrchu vstřikovací formy velmi rychle, zamezuje se tím u tenkostěnných dílů nukleaci a růstu bublinek v jádru výrobku, proto je vhodné volit větší **tloušťky stěn**.

Fáze **dotlaku** je u technologie MuCell malá, často však není zapotřebí. Je způsobena rozpínáním mikroskopických bublin přidaného plynu, který kompenzuje smrštění. To má za následek nižší **uzavírací síly**, a to až o 60 %. Jelikož je vnitřní tlak rovnoměrný, přispívá tím ke snížení vnitřního napětí výstřiku. S tím souvisí i **rozměrová přesnost výstřiku**, která je u technologie MuCell vysoká. Tyto parametry snižují celkovou dobu cyklu (viz obr. 11). [16]



Obr. 11 Porovnání technologie vstřikování s technologií MuCell [16]

Mezi nevýhody technologie MuCell patří především optické vlastnosti povrchu vstřikovaného dílu. Na povrchu výrobku se vytváří vzduchové šmouhy (viz obr. 12), které jsou způsobeny uvolňováním plynu z taveniny ještě před kontaktem s dutinou formy. Tuto povrchovou vadu lze eliminovat temperací formy, případně současným použitím technologie sendvičového vstřikování.



Obr. 12 Vzduchové šmouhy na povrchu vstřikovaného dílu technologií MuCell [16]

3 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce se zabývá studiem pevnostních charakteristik a ostatních užitečných vlastností lehčených kompozitních výstřiků na bázi polypropylenu a skelných vláken o obsahu 20 hm. % a 30 hm. %. Lehčená kompozitní struktura výstřiků byla zhotovena pomocí fyzikálního nadouvadla na bázi dusíku ve formě superkritické kapaliny (SCF) technologií MuCell. Množství injektovaného plynu do taveniny, řízené především dobou dávkování SCF, bylo provedeno se záměrem redukovat hmotnost výstřiku o (5 až 15) %. Výsledné vlastnosti lehčených výstřiků byly porovnány s výstřiky, zhotovenými konvenčním způsobem vstřikování. K tomuto účelu byla vstřikována víceúčelová zkušební tělesa typu A dle ČSN EN ISO 3167.

3.1 Charakteristika polymerní matrice

Pro přípravu kompozitních struktur s obsahem 20 hm. % a 30 hm. % skelných vláken bylo použito dvou polymerních matric na bázi PP. Prvním materiálem byl neplněný homopolymer polypropylenu obchodního označení SABIC PP 595A s běžnou aditivací pro potřeby dílů automobilového průmyslu, druhý homopolymer polypropylenu s obsahem 40 hm. % krátkých skelných vláken obchodního označení SABIC PP G3240A, který je na stejném chemickém i strukturním základě (z pohledu molekulové struktury) jako SABIC PP 595A. Oba dva materiály jsou speciálně vyvinuty pro díly automobilového průmyslu, neplněný typ polypropylenu se vyznačuje výbornými tokovými vlastnostmi a vysokou tuhostí. Typické vlastnosti materiálů jsou uvedeny v tab. 3. Hmotnostních podílů skelných vláken v polypropylenové matrici: 20 hm. % a 30 hm. %, bylo dosaženo mísením těchto materiálů.

Tab. 3 Typické vlastnosti materiálu SABIC PP 595A a SABIC PP G3240A

Vlastnosti	SABIC PP 595A	SABIC PP G3240A	
	Hodnota	Hodnota	Metoda
Hustota [g/cm ³]	0,905	1,220	ISO 1183-1
Pevnost v tahu [MPa]	36	111	ISO 527/1A/50
Modul pružnosti v tahu [MPa]	1750	8900	ISO 527/1A/1
Vrubová houževnatost Charpy [kJ/m ²]	3	10	ISO 179-1/1eA

3.2 Vstřikování zkušebních těles

Víceúčelová zkušební tělesa typu A byla zhotovena technologií vstřikování z připravené směsi granulátu dle mezinárodních předpisů ČSN EN ISO 294-1, ČSN EN ISO 19069-2 a technologických podmínek uvedených v tab. 4 a tab. 5. Takto vyrobená zkušební tělesa jsou určena k stanovení tahových vlastností. Jednoduchým obrobením střední části zkušebních těles bylo možné připravit zkušební vzorky pro hodnocení dalších vlastností výstřiků při ohybovém a rázovém namáhání. K výrobě zkušebních těles bylo použito ISO formy typu A s dvěma tvarovými dutinami, jednou dělicí rovinou a kuželovým vtokem, viz obr. 13.



Obr. 13 Pohyblivá část vstřikovací formy

Výroba zkušebních těles zhotovených konvenčním způsobem vstřikování byla provedena na vstřikovacím lisu Arburg 270 S 400-100 (viz obr. 14) v souladu s výše uvedenými mezinárodními předpisy a technologickými podmínkami uvedenými v tab. 4.



Obr. 14 Vstřikovací lis Arburg 270 S 400-100

Tab. 4 Vstřikovací parametry pro konvenční vstřikování

Parametr	Hodnota
Teplota taveniny [°C]	230
Teplota temperačního média formy [°C]	40
Doba cyklu [s]	60
Doba dotlaku [s]	40
Velikost dotlaku [MPa]	40
Velikost dávky [cm ³]	40
Bod přepnutí na dotlak [cm ³]	16
Vstřikovací rychlost [cm ³ /s]	30

Výroba lehčených zkušebních těles technologií MuCell byla provedena na vstřikovacím lisu Arburg ALLROUNDER 470S 1000-400 (viz obr. 15) v souladu s mezinárodními standardy ČSN EN ISO 294-1 a ČSN EN ISO 1873-2 a technologickými podmínkami uvedenými v tab. 5. Pro mikrobuněčné vstřikování lehčených struktur technologií MuCell byl vstřikovací stroj vybaven vstřikovací jednotkou (viz obr. 15) se speciální konstrukcí šneku, injektory pro dávkování plynu a dávkovacím SCF modulem.

Ve fázi plastifikace materiálu byl před čelo šneku dávkován dusík ve formě superkritického média, který difundoval do taveniny. Vzorky byly vyráběny tak, aby jejich hmotnost byla redukována o (5, 10 a 15) %. Pro přehlednost značení jsou vzorky označovány jako 5N₂, 10N₂ a 15N₂.

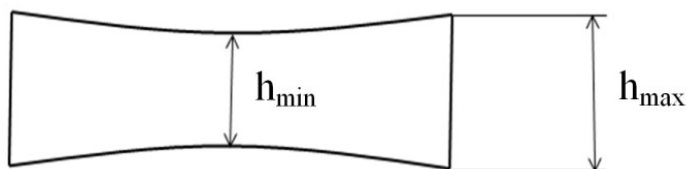


Obr. 15 Vstřikovací lis Arburg ALLROUNDER 470S 1000-400 s modulem pro přípravu SCF

Tab. 5 Vstřikovací parametry pro technologii MuCell

Parametr	Hodnota		
	5N ₂	10N ₂	15N ₂
Teplota taveniny [°C]	230		
Teplota temperačního média formy [°C]	40		
Doba cyklu [s]	60		
Doba dotlaku [s]	40		
Velikost dotlaku [MPa]	40		
Velikost dávky [cm ³]	40		
Bod přepnutí na dotlak [cm ³]	16		
Vstřikovací rychlost [cm ³ /s]	30		
Hmotnostní tok SCF [kg/h]	0,38	0,38	0,45
Doba dávkování SCF [s]	2,5	3,8	4,0
Dopravní tlak SCF [MPa]	15		
Pracovní tlak (MPP) [MPa]	14		
% SCF	0,5		

Vzorky vstřikované technologií MuCell vykazovaly vyšší tvarovou přesnost než vzorky vstřikované konvenčním způsobem, u nichž docházelo vzhledem k rozdíům v historii chlazení k propadlinám (tloušťka ve středu tělesa je menší než na okraji). Rozdíl tlouštěk zkušebního tělesa na okraji „h_{max}“ a ve středu „h_{min}“ činil 0,18 mm (viz obr. 16), zatímco v případě lehčených výstřiků maximálně 0,05 mm. Je to způsobeno růstem mikrobuněčné struktury uvnitř dílu, která eliminuje propadliny.



Obr. 16 Řez zkušebním tělesem

3.3 Stanovení fyzikálních a mechanických vlastností kompozitních struktur

3.3.1 Stanovení tahových vlastností

Tahová zkouška spočívá v jednoosém namáhání zkušebního tělesa obvykle až do jeho přetržení. Zaznamenává se závislost napětí na poměrném prodloužení za účelem zjištění modulu pružnosti v tahu (E_t), meze pevnosti v tahu (σ_m) a poměrného prodloužení při přetržení (ϵ_b). Zkušební tělesa odpovídala tvarem i rozměry víceúčelovým zkušebním tělesům v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1. Zkouška byla prováděna na zkušebním zařízení TIRAtest 2300 (viz obr. 17).

V první fázi experimentálního měření byla stanovena mez pevnosti a celková tažnost. Zkušební těleso bylo upevněno do čelistí tak, aby jeho osa byla totožná se směrem zatěžování vzorku



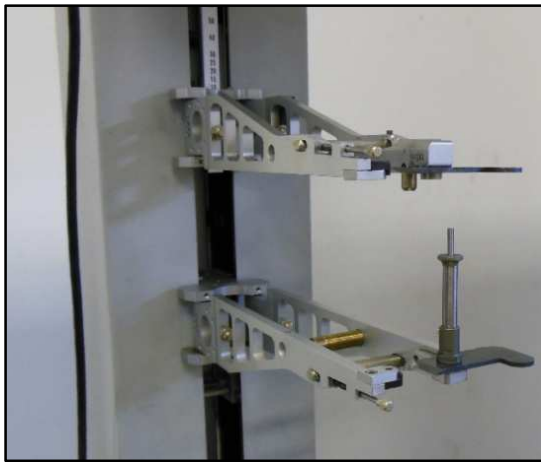
Obr. 17 Měřící zařízení TIRAtest 2300

(velikost snímací hlavy 100 kN). Na zkušební vzorek byl připevněn externí průtahoměr MFN A Standart (viz obr. 18), a vzorek byl zatěžován ve směru osy rychlostí 5 mm/min v souladu s normou ČSN EN ISO 19069-2 a to až do přetržení. Během testu byla zaznamenána zatěžující síla a prodloužení vzorku z počáteční měřené délky (50 mm), nichž byla stanovena mez pevnosti v tahu a poměrné prodloužení při přetržení (celková tažnost).

V druhé fázi bylo provedeno měření modulu pružnosti v tahu s průtahoměrem EPSILON Tech 3542 (viz obr. 19) na vzorku s počáteční délkou 50 mm. Modul pružnosti v tahu je stanoven jako sečna křivky napětí a poměrného prodloužení při hodnotách $\epsilon_1 = 0,05 \%$ a $\epsilon_2 = 0,25 \%$ dle rovnice (1). Zkušební vzorky byly zatěžovány rychlostí 1 mm/min v souladu s normou ČSN EN ISO 19069-2. (velikostí snímací hlavy 10kN). Výsledné hodnoty tahových vlastností včetně jejich směrodatných odchylek jsou zapsány v tab. 6 a tab. 7.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1)$$

- Kde: σ_1 je tahové napětí při deformaci $\varepsilon_1 = 0,05 \%$ [MPa]
 σ_2 je tahové napětí při deformaci $\varepsilon_2 = 0,25 \%$ [MPa]
 ε_1 je poměrné prodloužení 0,05 %
 ε_2 je poměrné prodloužení 0,25 %



Obr. 18 Průtahoměr MFN A Standart



Obr. 19 Průtahoměr EPSILON Tech 3542

Tab. 6 Průměrné hodnoty tahových vlastností kompozitních struktur

Složení vzorku		Mez pevnosti v tahu σ_m [MPa]	Modul pružnosti v tahu E_f [MPa]
PP + 20 %GF		69,6 ± 0,9	5088 ± 83,3
PP + 20 %GF	+5N ₂	49,5 ± 0,7	3803 ± 84,6
	+10N ₂	46,9 ± 1,2	3663 ± 124,1
	+15N ₂	44,0 ± 2,0	3559 ± 183,0
PP + 30 %GF		88,1 ± 1,1	7238 ± 201,6
PP + 30 %GF	+5N ₂	65,1 ± 3,4	5732 ± 109,1
	+10N ₂	62,7 ± 1,0	5368 ± 211,7
	+15N ₂	57,3 ± 0,7	4930 ± 111,6

Tab. 7 Průměrné hodnoty poměrného prodloužení Kompozitních struktur

Složení vzorku		Poměrné prodloužení na mezi pevnosti [%]	Poměrné prodloužení při přetržení [%]
PP + 20 %GF		2,8 ± 0,07	3,0 ± 0,14
PP + 20 %GF	+5N ₂	2,9 ± 0,05	3,3 ± 0,12
	+10N ₂	3,0 ± 0,07	3,3 ± 0,12
	+15N ₂	2,6 ± 0,23	2,7 ± 0,28
PP + 30 %GF		2,6 ± 0,07	2,7 ± 0,12
PP + 30 %GF	+5N ₂	2,5 ± 0,09	2,6 ± 0,13
	+10N ₂	2,7 ± 0,11	2,8 ± 0,15
	+15N ₂	2,8 ± 0,08	2,9 ± 0,17

3.3.2 Stanovení ohybových vlastností

Ohybová zkouška slouží k hodnocení ohybových vlastností zkoumaného materiálu, u kterého zjišťujeme pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu a další závislosti mezi deformací a napětím v souladu s normou ČSN EN ISO 178. Zkušební vzorky obdélníkového průřezu o rozměrech (80 x 10 x 4) mm byly získány mechanickým obrobením ze střední části víceúčelových zkušebních těles. Zkouška byla prováděna na stroji HOUNSFIELD H10KT s rozsahem snímací hlavy 500 N při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 50 %. Zkušební vzorek byl umístěn na dvou podporách s rozpětím 64 mm a zatěžován uprostřed zkušebním trnem rychlostí 2 mm/min (viz obr. 20). Zkouška byla ukončena při dosažení meze pevnosti v ohybu (σ_{fM}). Modul pružnosti v ohybu (E_f) byl vypočítán dle rovnice (2) a průměrné hodnoty včetně jejich směrodatných odchylek byly zaznamenány do tab. 8.

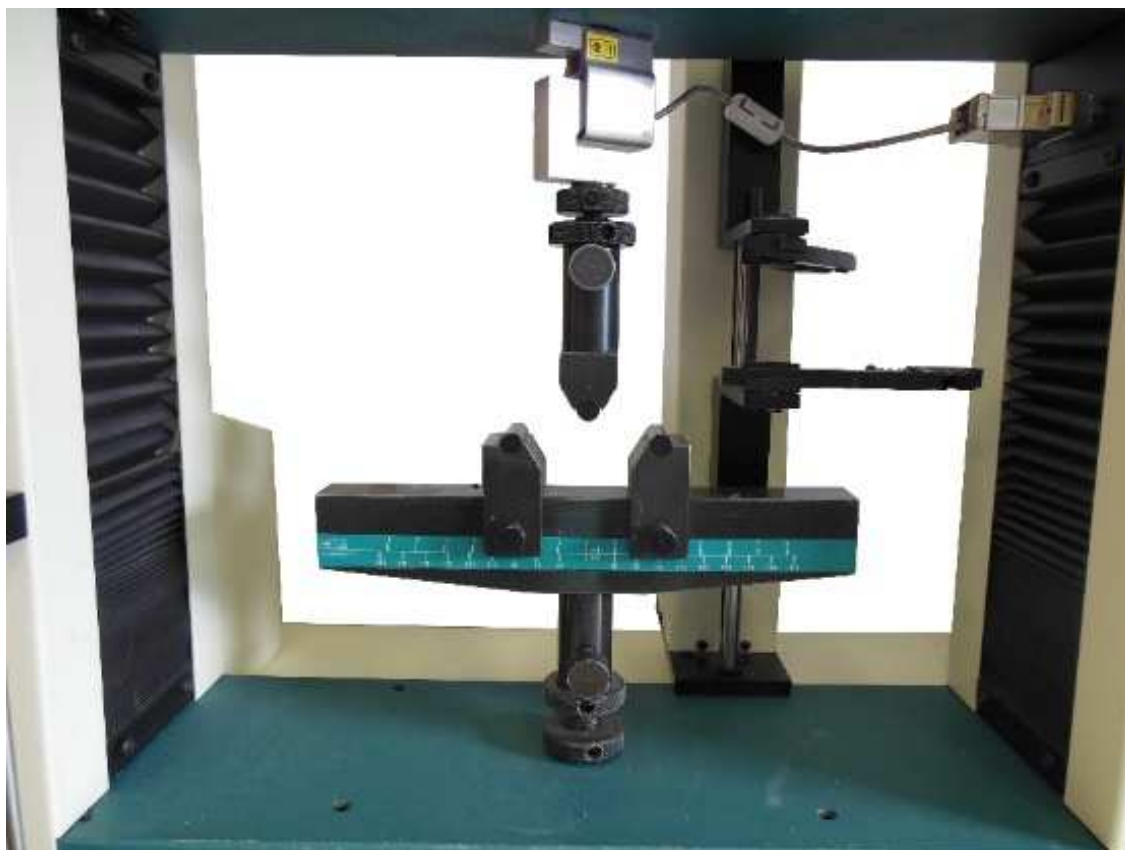
$$E_f = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2)$$

Kde: σ_1 je ohybové napětí při deformaci $\varepsilon_1 = 0,05$ % [MPa]

σ_2 je ohybové napětí při deformaci $\varepsilon_2 = 0,25$ % [MPa]

ε_1 je deformace ohybem 0,05 %

ε_2 je deformace ohybem 0,25 %



Obr. 20 Třibodový ohyb dle ČSN EN ISO 178

Tab. 8 Průměrné hodnoty ohybových vlastností kompozitních struktur

Složení vzorku		Pevnost v ohybu σ_{fM} [MPa]	Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]
PP + 20 %GF		115,6 ± 1,7	4931 ± 179
PP + 20 %GF	+5N ₂	80,7 ± 0,9	3860 ± 52
	+10N ₂	76,7 ± 2,0	3640 ± 285
	+15N ₂	75,1 ± 4,2	3693 ± 203
PP + 30 %GF		147,5 ± 1,8	7119 ± 141
PP + 30 %GF	+5N ₂	106,8 ± 1,7	5623 ± 142
	+10N ₂	102,6 ± 1,1	5635 ± 81
	+15N ₂	96,3 ± 0,9	5171 ± 30

3.3.3 Stanovení rázové houževnatosti Charpy

Rázová houževnatost udává, kolik bylo spotřebováno energie k přeražení zkušebního tělesa o daných rozměrech. Zkouška byla prováděna na zkušebním zařízení Ceast Resil 5.5 (viz obr. 21) za standardních podmínek zkoušení 23/50 rázem na užší stranu metodou 179-1/1eU. Před započítáním zkoušky bylo nutné vybrat vhodné kladivo a následně zkalibrovat zařízení. Kladivo bylo zvoleno tak, aby energie potřebná pro přeražení vzorku ležela v rozmezí (10 až 80) % celkové energie kladiva. Pro měření rázové houževnatosti bylo použito kladivo o nominální energii $E_{\text{nom}} = 5 \text{ J}$. Kalibrace zařízení spočívala ve zjištění ztrátové energie, která je způsobena mechanickým třením a odporem vzduchu a byla stanovena spuštěním kladiva na prázdno. Tato energie byla zohledněna při měření rázové houževnatosti. Zkušební vzorky měly tvar obdélníkového průřezu o rozměrech (80 x 10 x 4) mm a byly získány obrobením ze střední části víceúčelových zkušebních těles. Měření spočívalo v umístění kladiva do výchozí polohy, vložení zkušební vzorku na podpěry a uvolnění kladiva, které vzorek přerazilo. Zařízení následně zaznamenalo spotřebovanou energii, níž byla dle rovnice (3) stanovena rázová houževnatost. Průměrné hodnoty včetně jejich směrodatných odchylek jsou zaznamenány v tab. 9.



Obr. 21 Měřicí zařízení Ceast Resil 5.5

Tab. 9 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti kompozitních struktur

Složení vzorku		Rázová houževnatost a_{cu} [kJ/m ²]
PP + 20 %GF		38,8 ± 2,6
PP + 20 %GF	+5N ₂	32,1 ± 4,3
	+10N ₂	32,8 ± 2,2
	+15N ₂	32,9 ± 0,9
PP + 30 %GF		47,5 ± 2,9
PP + 30 %GF	+5N ₂	39,8 ± 2,4
	+10N ₂	37,0 ± 2,5
	+15N ₂	37,8 ± 2,6

$$a_{cu} = \frac{E_c}{h \cdot b} \quad (3)$$

- Kde: a_{cu} je rázová houževnatost Charpy zkušebního tělesa [kJ/m²]
 E_c je energie, která byla spotřebována k přeražení zkušebního tělesa [J]
 h je tloušťka zkušebního tělesa [mm]
 b je šířka zkušebního tělesa [mm]

3.3.4 Stanovení hustoty

Měření hustoty probíhalo na analytických hustotních vahách AND GF 300 (viz obr. 22) imerzní metodou, dle předpisu ČSN EN ISO 1183-1. Podstatou metody bylo vážení vzorku na vzduchu a v imerzní kapalině. Jako imerzní kapalina byl použit petroleum ether o hustotě $\rho_{ik} = 650 \text{ g/cm}^3$ při teplotě 23 °C. Hustota byla vypočtena z rovnice (4) a jejich průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek jsou zapsány v tab. 10.

$$\rho = \frac{m_{vz}}{m_{vz} - m_{vzik}} \cdot \rho_{ik} \quad (4)$$

- Kde: ρ je hustota zkušebního vzorku při teplotě 23°C [g/cm³]
 m_{vz} je zdánlivá hmotnost zkušebního vzorku na vzduchu [g]
 m_{vzik} je zdánlivá hmotnost zkušebního vzorku v imerzní kapalině [g]
 ρ_{ik} je hustota imerzní kapaliny při teplotě 23°C [g/cm³]



Obr. 22 Analytické hustotní váhy AND GF 300

Tab. 10 Průměrné hodnoty hustoty kompozitních struktur

Složení vzorku		Hustota [g/cm ³]
PP + 20 %GF		1,058 ± 0,035
PP + 20 %GF	+5N ₂	0,957 ± 0,003
	+10N ₂	0,886 ± 0,015
	+15N ₂	0,839 ± 0,011
PP + 30 %GF		1,122 ± 0,003
PP + 30%GF	+5N ₂	1,007 ± 0,004
	+10N ₂	0,989 ± 0,069
	+15N ₂	0,884 ± 0,004

4 Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

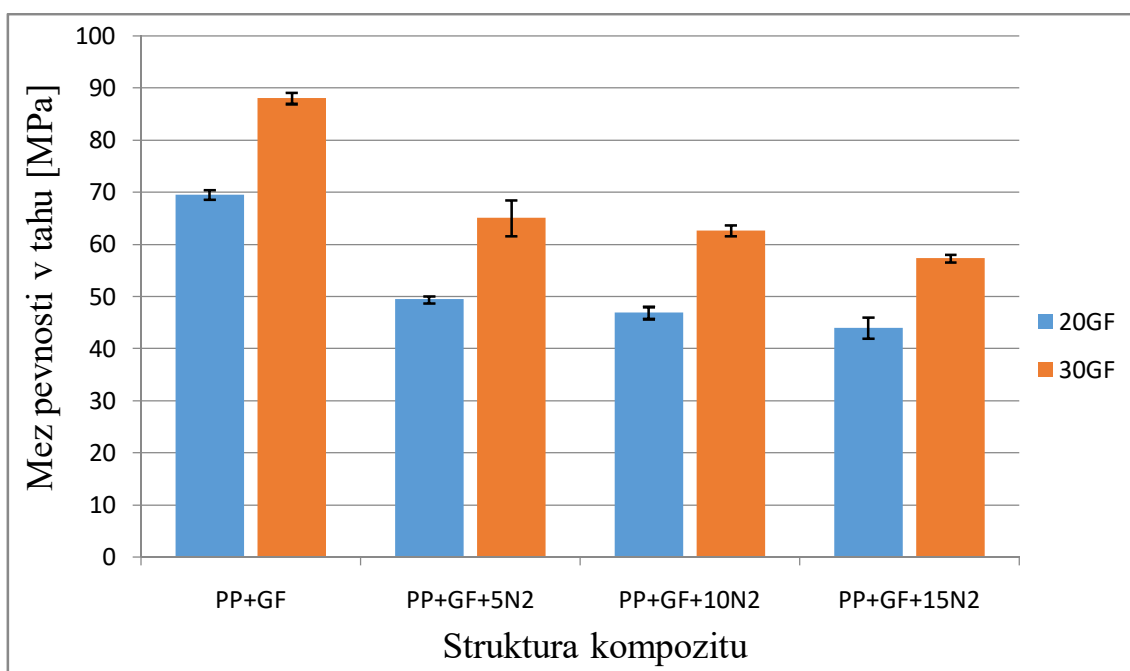
4.1 Vyhodnocení tahových vlastností

Grafické závislosti tahových vlastností byly vytvořeny z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tab. 6. Vyhodnocena byla mez pružnosti v tahu a modul pružnosti v tahu, jejichž závislosti na struktuře kompozitu jsou uvedeny na obr. 23 a obr. 24. Mez pevnosti u lehčených struktur s 20 hm. % skelné výztuže poklesla ca. o 29 % bez rozdílu množství fyzikálního nadouvadla ve struktuře (s ohledem na rozptyl měřených hodnot). U kompozitu s 30 hm. % skelné výztuže je pokles ca. o 26 % s redukcí hmotnosti o 5 % a 10 %. S redukcí hmotnosti dílu o 15 % došlo ke snížení meze pevnosti o ca. 35 %.

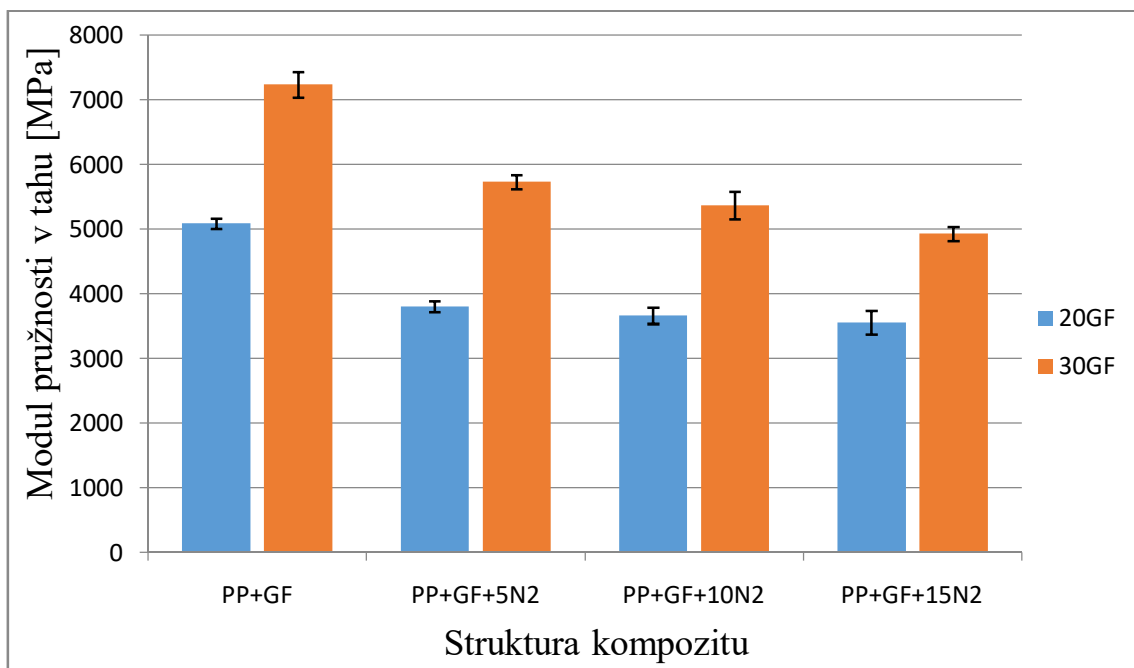
Rozdíl meze pevnosti v tahu mezi kompozity PP GF20 a PP GF30 je ca. 23 % a nezávisí na obsahu nadouvadla.

Modul pružnosti v tahu lehčených struktur s 20 hm. % skelné výztuže poklesl ca. o 25 %, a s ohledem na rozptyl měřených hodnot zůstává nezávislý na množství nadouvadla v rozsahu experimentálního měření. U kompozitu s 30 hm. % skelných vláken je pokles ca. o 21 %, při redukcí hmotnosti výstřiku o 5 %. S vyšší redukcí hmotnosti dílu o 15 % došlo ke snížení modulu pružnosti o 32 %.

Rozdíl modulu pružnosti v tahu u kompozitů PP GF20 a PP GF30 je ca. 30 % a nezávisí na obsahu nadouvadla.

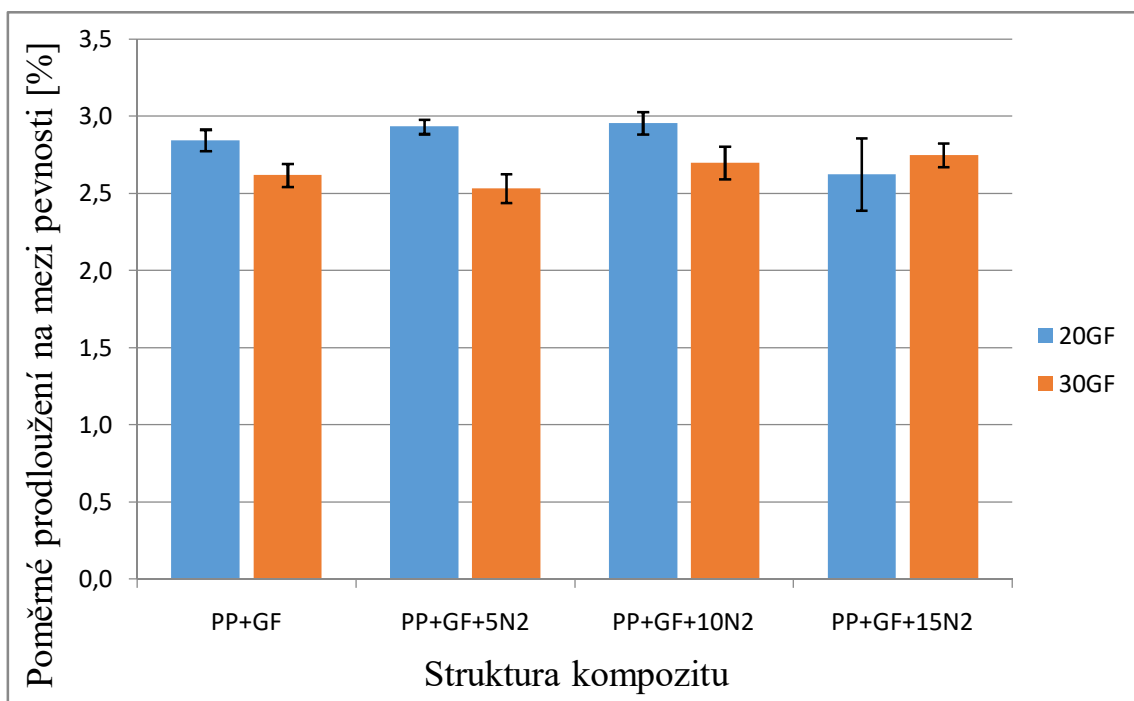


Obr. 23 Závislost meze pevnosti v tahu na množství nadouvadla a skelných vláken

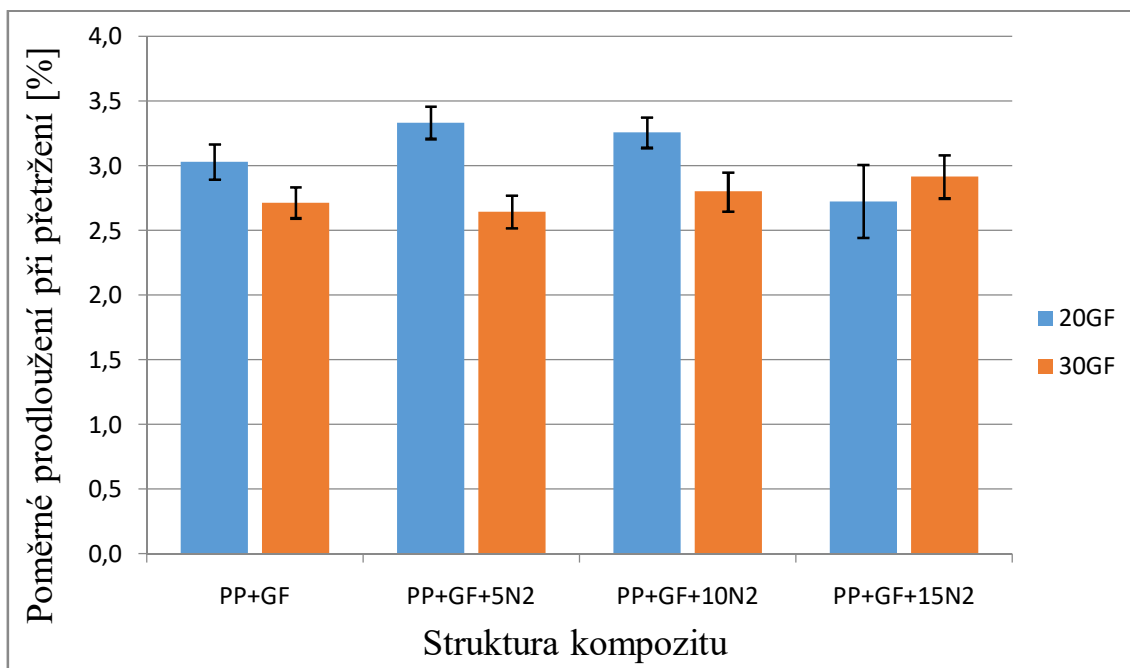


Obr. 24 Závislost modulu pružnosti v tahu na množství nadouvadla a skelných vláken

Grafické závislosti poměrného prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení na struktuře kompozitu (viz obr. 25 a obr. 26) byly vytvořeny z naměřených hodnot uvedených v tab. 7. Z obr. 25 a obr. 26 lze s ohledem na rozptyl měřených hodnot konstatovat, že hodnoty poměrného prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení se u lehčených kompozitních výstřiků od standardních konvenčních kompozitů neliší.



Obr. 25 Poměrného prodloužení na mezi pevnosti na množství dusíku a skelných vláken



Obr. 26 Poměrného prodloužení při přetržení na množství dusíku a skelných vláken

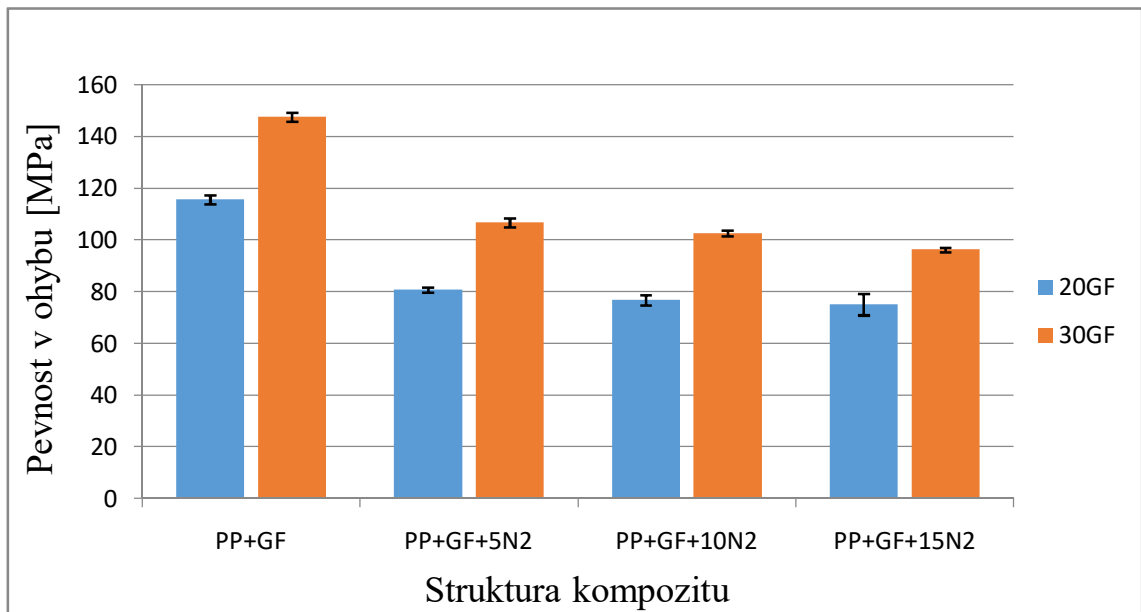
4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností

Grafické závislosti ohybových vlastností byly vytvořeny z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tab. 8. Vyhodnocena byla pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu, jejichž závislosti na struktuře kompozitu jsou uvedeny na obr. 27 a obr. 28. Při použití technologie lehčených struktur pevnost v ohybu u kompozitních výstřiků s 20 hm. % skelné výztuže klesla ca. o 30 %, resp. ca. o 28 % při obsahu vláken 30 hm. %. Se zvyšujícím se obsahem fyzikálního nadouvadla pevnost mírně klesá, zejména u kompozitu PP GF30, kdy s redukcí hmotnosti o 5 % klesá pevnost v ohybu taktéž ca. o 5 %. U kompozitu PP GF20 je tato změna statisticky nevýznamná.

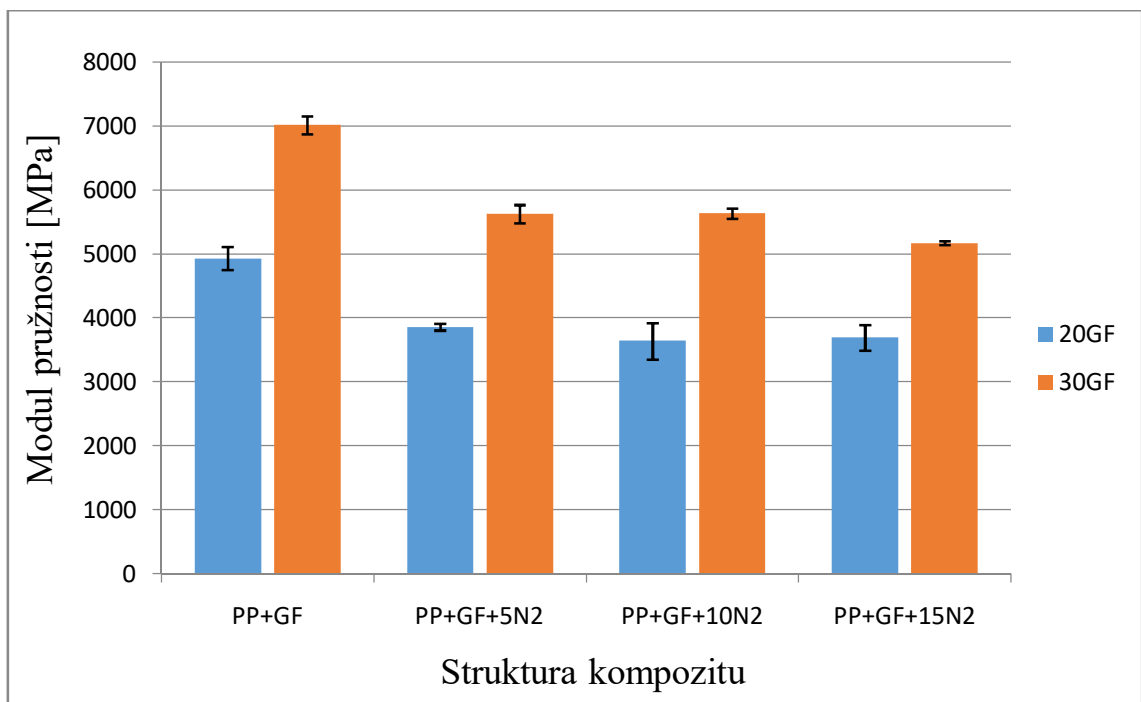
Rozdíl pevnosti v ohybu mezi kompozity PP GF20 a PP GF30 je ca. 22 % a nezávisí na obsahu nadouvadla.

Modul pružnosti u lehčených struktur s 20 hm. % skelné výztuže poklesl ca. o 22 % bez rozdílu množství fyzikálního nadouvadla v jejich struktuře (s ohledem na rozptyl měřených hodnot). U kompozitu s 30 hm. % skelné výztuže je pokles modulu pružnosti v ohybu při redukcí hmotnosti výstřiku o 5 % resp. 10 % obdobný (21 %). S redukcí hmotnosti dílu o 15 % došlo ke snížení modulu pružnosti o dalších 6 %, resp. o 27 % ve vztahu ke konvenčnímu nelehčenému výstřiku PP GF30.

Rozdíl modulu pružnosti v ohybu u kompozitů PP GF20 a PP GF30 je ca. 31 % a nezávisí na obsahu nadouvadla.



Obr. 27 Závislost pevnosti v ohybu na množství nadouvadla a skelných vláken

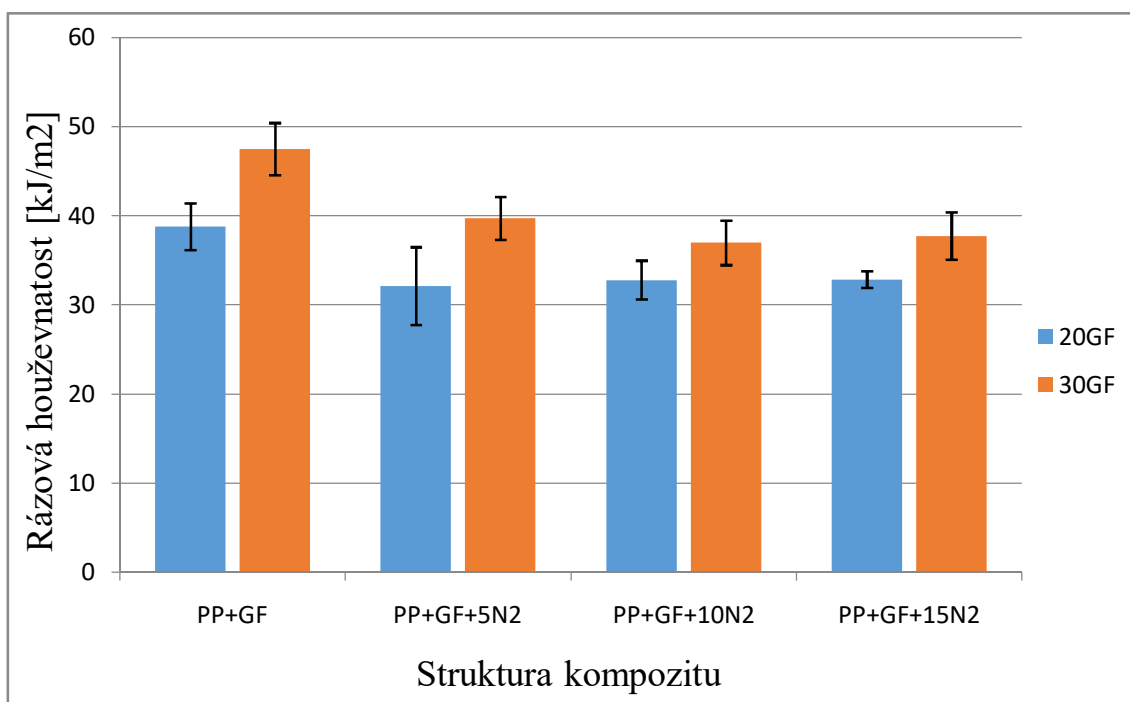


Obr. 28 Závislost modulu pružnosti na množství nadouvadla a skelných vláken

4.3 Vyhodnocení rázové houževnatosti Charpy

Grafická závislost rázové houževnatosti Charpy byla vytvořena z naměřených hodnot, které jsou zapsány v tab. 9. Vyhodnocena byla rázová houževnatost Charpy v závislosti na struktuře kompozitu, která je uvedena na obr. 29. Pro lehčené kompozity PP GF20 a PP GF30 s redukcí hmotnosti o 5 % byl zaznamenán shodný pokles rázové houževnatosti ca. o 16 %. Se zvyšující se koncentrací fyzikálního nadouvadla (redukcí hmotnosti výstřiku) je hodnota rázové houževnatosti Charpy téměř neměná a to s ohledem na rozptyl měřených hodnot, který je vyjádřený směrodatný odchylkou (drobné nuance jsou statisticky nevýznamné).

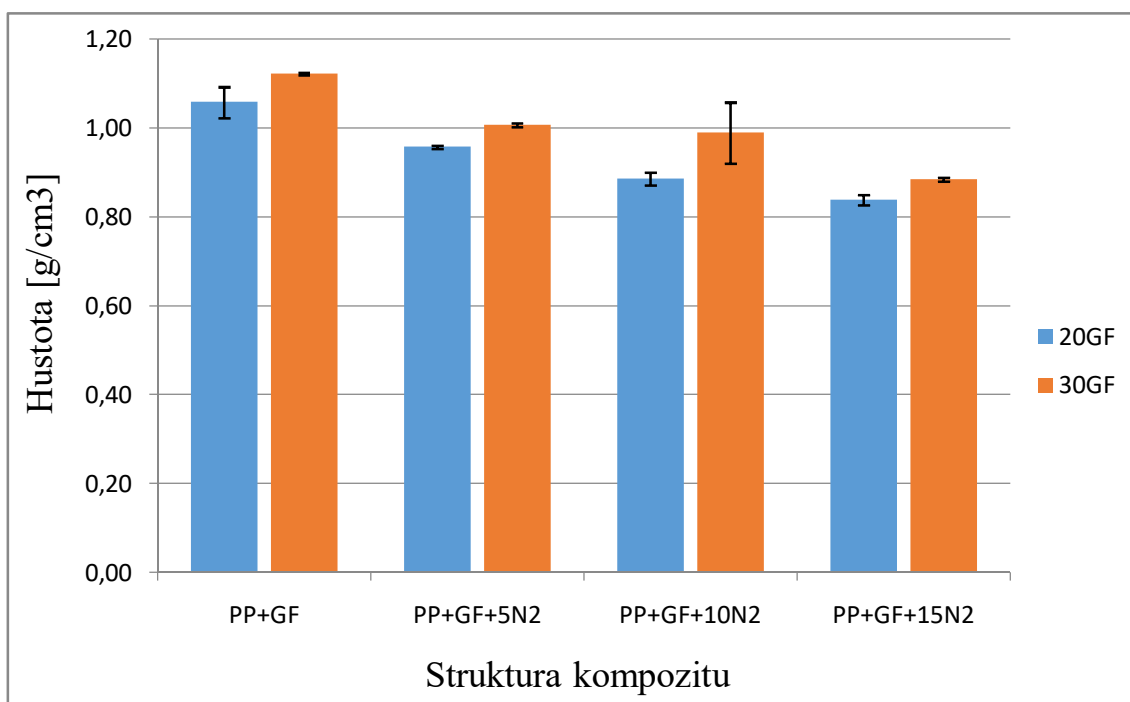
Rozdíl rázové houževnatosti Charpy mezi kompozity PP GF20 a PP GF30 je ca. 18 %, avšak na rozdíl od ohybových vlastností je závislý na obsahu fyzikálního nadouvadla, resp. stupni odlehčení. Při redukcí hmotnosti dílu o 10 % činila 11 % a při redukcí hmotnosti dílu o 15 % je tento rozdíl ca. 13 %.



Obr. 29 Závislost rázové houževnatosti Charpy na množství nadouvadla a skelných vláken

4.4 Vyhodnocení hustoty

Grafické závislosti hustoty kompozitních výstřiků na stupni odlehčení (množství fyzikálního nadouvadla, resp. redukce hmotnosti), viz obr. 30, byly vytvořeny z naměřených hodnot uvedených v tab. 10. Lehčené vstříkované vzorky byly vyrobeny tak, aby změnou dávkování fyzikálního nadouvadla došlo k redukci hmotnosti výstřiku o 5 %, 10 % a 15 %. Toto bylo kontrolováno vážením vzorků z obou tvarových dutin včetně vtokové soustavy, přičemž expanze plynů v tvarové dutině formy a ve vtokové soustavě není z principu vlastní technologie shodná a výstřiky tak mohou mít výrazně nižší hustotu, než je teoretický předpoklad. Tuto skutečnost potvrzují i provedená měření, neboť hustota vlastních výstřiků při teoretické redukci hmotnosti 5 %, 10 %, resp. 15 % u kompozitu PP GF20 klesá o 9,5 %, 16,3 %, resp. 20,7 % a u kompozitu PP GF30 pak o 10,2 %, 11,9 % (zde však dochází k velkému rozptylu měřených hodnot, a to až v rozmezí 7 %), resp. 21,2 %. Rozdíl hustoty mezi jednotlivými šaržemi lehčených kompozitů (v závislosti na množství nadouvadla) zůstává skutečně 5 %.



Obr. 30 Závislost hustoty na množství nadouvadla a skelných vláken

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnocení mechanických a fyzikálních vlastností lehčených polymerních kompozitů na bázi polypropylenové matrice s obsahem 20 hm. % a 30 hm. % skelné výztuže a jejich porovnání se vzorky, které byly zhotoveny konvenčním způsobem vstřikováním.

Z tahové zkoušky je patrné, že pevnost v tahu lehčených kompozitů klesá až o 29 % a ve sledovaném rozsahu odlehčení je nezávislá na množství nadouvadla ve struktuře materiálu. Velmi podobně je na tom modul pružnosti v tahu, který vykazuje pokles až o 21, resp. 25 % v závislosti na obsahu skelné výztuže. Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu a při přetržení (celková tažnost) jsou s ohledem na rozptyl měřených hodnot obdobné jako u konvenčních kompozitů.

Přítomnost mikrobuněčné struktury mělo za následek snížení meze pevnosti v ohybu a to o (28 až 30) % v závislosti na množství skelných vláken. Při zvyšování koncentrace fyzikálního nadouvadla (v rozsahu experimentálního měření) již k dalšímu snižování pevnosti nedocházelo. Zajímavý pohled je na měrnou pevnost v ohybu, která se zvyšující se redukcí hmotnosti roste, avšak nedosahuje takových hodnot jako při konvenčním vstřikování nelehčeného kompozitního dílu.

Rovněž v případě modulu pružnosti v ohybu dochází u lehčených kompozitních struktur k jeho poklesu a to ca. o (21 až 22) % v závislosti na množství skelných vláken v polypropylenové matrici. U vzorků s 20 hm. % skelných vláken je modul pružnosti v ohybu nezávislý na stupni odlehčení, u kompozitu s 30 hm. % skelných vláken dochází k jeho mírnému poklesu. Při pohledu na měrný modul pružnosti v ohybu lze konstatovat, že se zvyšujícím se obsahem nadouvadla roste. Již při (teoretické) redukci hmotnosti o 15 % se výsledky přibližují k hodnotám konvenčního vstřikování nelehčených dílů.

Z naměřených hodnot rázové houževnatosti Charpy lze konstatovat, že u lehčených struktur dochází k poklesu houževnatosti ca. o 16 % (ve vztahu ke konvenčnímu nelehčenému výstřiku). S rostoucím stupněm odlehčení zůstává hodnota rázové houževnatosti ve sledovaném rozsahu neměnná.

Stanovením hustoty kompozitních struktur bylo potvrzeno, že technologií Mucell dochází v důsledku mikrobuněčné struktury výstříků k jejich odlehčení. Vstřikováním byly připraveny lehčené struktury s poklesem hustoty materiálu ca. o 10 %, 15 % a 20 %, která „nekoresponduje“ s hmotností výstříků vážených po výrobě včetně vtokové soustavy, neboť podmínky expanze v dutině formy a ve vtokových kanálech jsou z principu vlastní technologie odlišné. Značení redukce hmotnost 5 %, 10 % a 15 % je tak pouze teoretické a odpovídá teoretickému úbytku hmotnosti výstříku včetně vtokové soustavy.

Použitá literatura

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [3] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [4] NESVATBOVÁ, Renata. *Výroba nenormalizovaných polotovarů* [online]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3711707/>
- [5] *Výroba kompozitních materiálů* [online]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/kompozity.pdf>
- [6] ZEMAN, Lubomír. *Kompozity s termoplastickou maticí* [online]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/kompozity-s-termoplastickou-matrici-a-automobilovy-prumysl-2-cast/c/2653>
- [7] *Výroba skleněných vláken* [online]. Dostupné z: <http://i0.wp.com/www.glass-fiber.com/wp-content/uploads/2015/03/Glass-Melting.jpg>
- [8] *Mikrosnímek skleněných vláken (SEM)* [online]. Dostupné z: http://3.bp.blogspot.com/-5U-_7RNkh4I/USE5K5XF37I/AAAAAAAAAlk/4eQSI6ynWWI/s1600/Plastic+Resin+Fiberglass+Burned+1546x.jpg
- [9] *Pramenec* [online] dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/krosglass/product-55248-1258727.html>
- [10] *Rohož* [online] dostupné z: <http://polyglass.cz/praskove-a-emulzni-rohoze/>
- [11] *Krátká vlákna*[online]. Dostupné z: https://www.lorencic.at/fasern-estrichzusaetze-verbinder-ausgleichsmoertel-estrichbeschleuniger_09-8_3.htm
- [12] *Tkaniny* [online]. Dostupné z: <http://textilelearner.blogspot.cz/2012/12/dyeing-process-of-glass-fiber-filaments.html>
- [13] *Foam injection molding* [online]. Dostupné z: <http://www.moldex3d.com/en/products/solution-addons/mucell>
- [14] *Fázový diagram* [online]. Dostupné z: http://abetterchemtext.com/Condensed/images/phs_diag1.png
- [15] *Mikroskopický pohled na vnitřní strukturu dílu vyrobenou technologií mikrobuněčného vstříkávání* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Guiwei_Dong/publication/277563616/figur

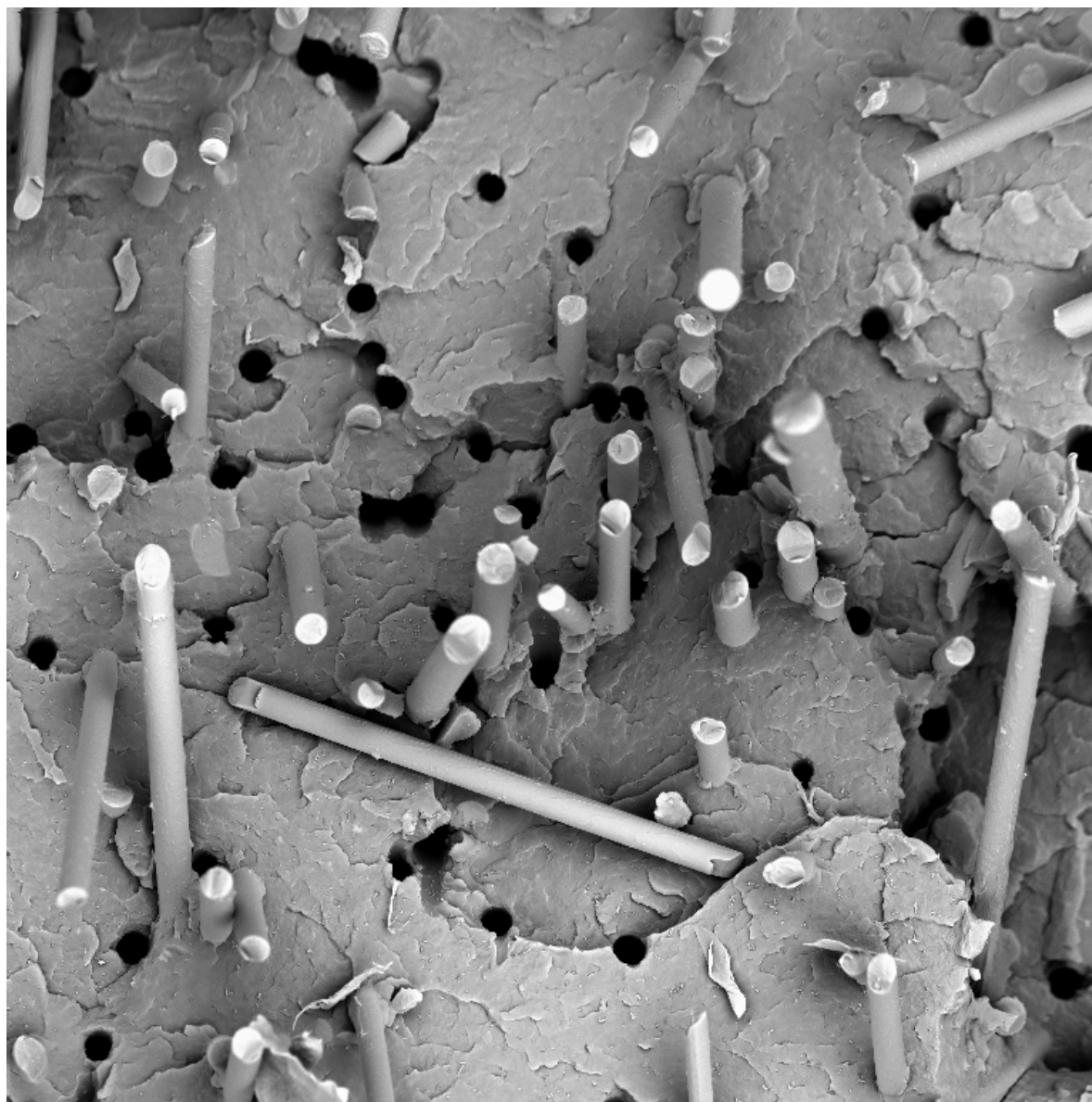
e/f g14/AS:302476931682326@1449127528663/Figure-14-SEM-micrographs-of-the-cross-section-of-the-gate-position-in-microcellular.png

- [16] *Vstřikování termoplastů s napěňováním – úspory díky metodě MuCell* [online]. Dostupné z:
<http://www.plasticportal.cz/cs/vstrikovani-termoplastu-s-napenovanim-uspory-diky-medode-mucell/c/2416>
- [17] *Superkritické tekutiny* [online]. Dostupné z:
https://is.muni.cz/th/77987/prif_m/superkriticke_kapaliny.pdf
- [18] KOLSHORN, U. *MuCell Technology*. [Dokument PDF] Wiehl : Trexel GmbH, 2007.
- [19] Trexel GmbH. *MuCell Technische Dokumentation*. [Dokument] Wiehl : Trexel GmbH, 2012.
- [20] AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J. *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. 296 s. ISBN 04-217-87.
- [21] *MuCell molding technology* [online]. Dostupné z:
<http://www.trexel.com/en/mucell-injection-molding>
- [22] ČSN EN ISO 1183-1 (640111). *Plasty – Metody stanovení hustoty nelehčených plastů*. 2013
- [23] ČSN EN ISO 179-1 (640612). *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. 2010
- [24] ČSN EN ISO 178 (640607). *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. 2011
- [25] ČSN EN ISO 527-1,2 (640604). *Plasty – Stanovení tahových vlastností*. 2012

Seznam příloh

Příloha č. 1: Mikroskopické snímky lomové plochy z rastrovacího elektronového mikroskopu

**Příloha č. 1: Mikroskopické snímky lomové plochy
z rastrovacího elektronového mikroskopu**



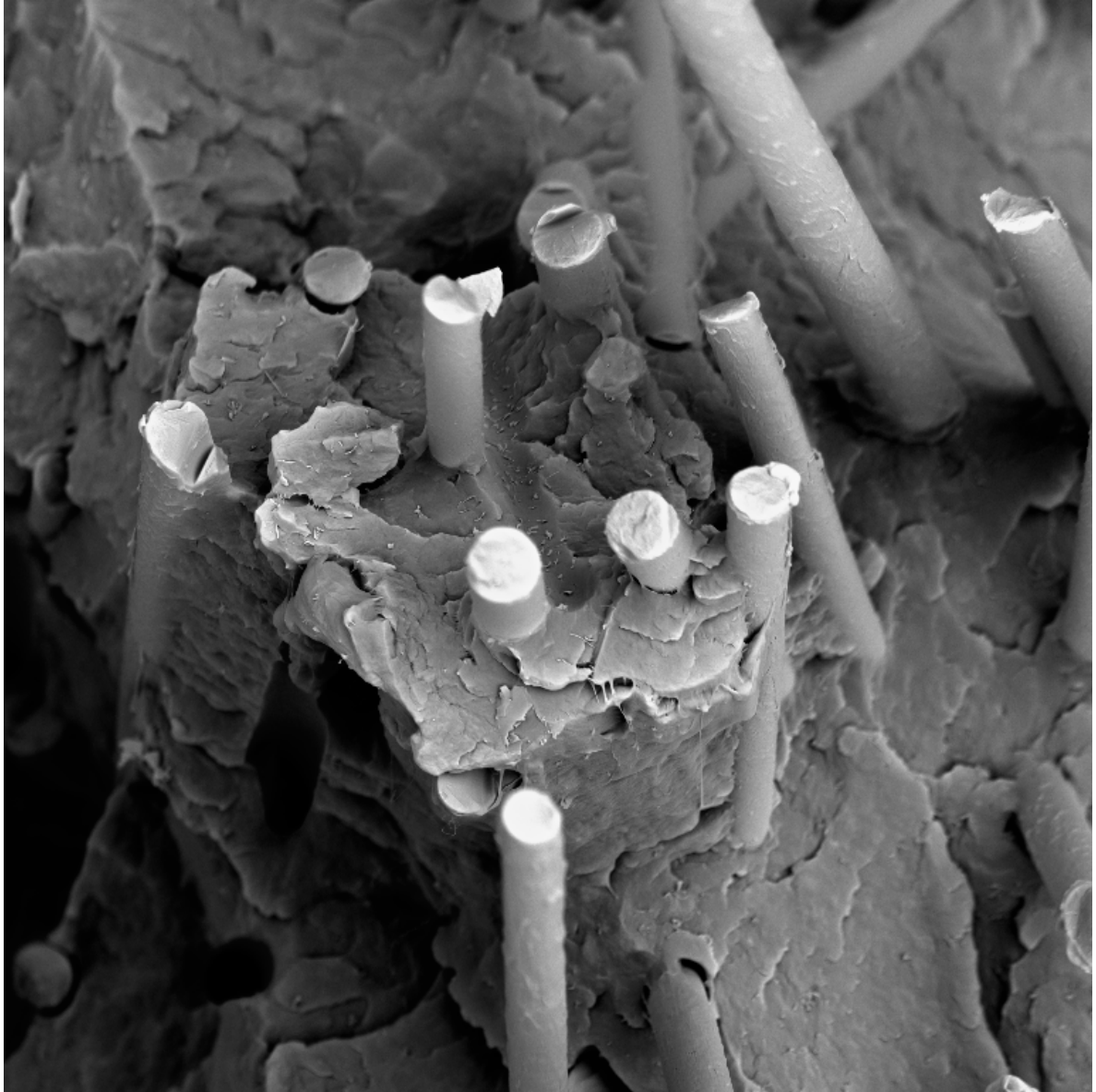
SEM MAG: 500 x
HV: 20.0 kV
VAC: HiVac

DET: BE Det + SE Det
DATE: 01/14/16
Device: TS5130

200 um

Vega ©Tescan
TU Liberec

Obr. P1 Mikroskopický snímek kompozitu na bázi PP a GF (SEM)



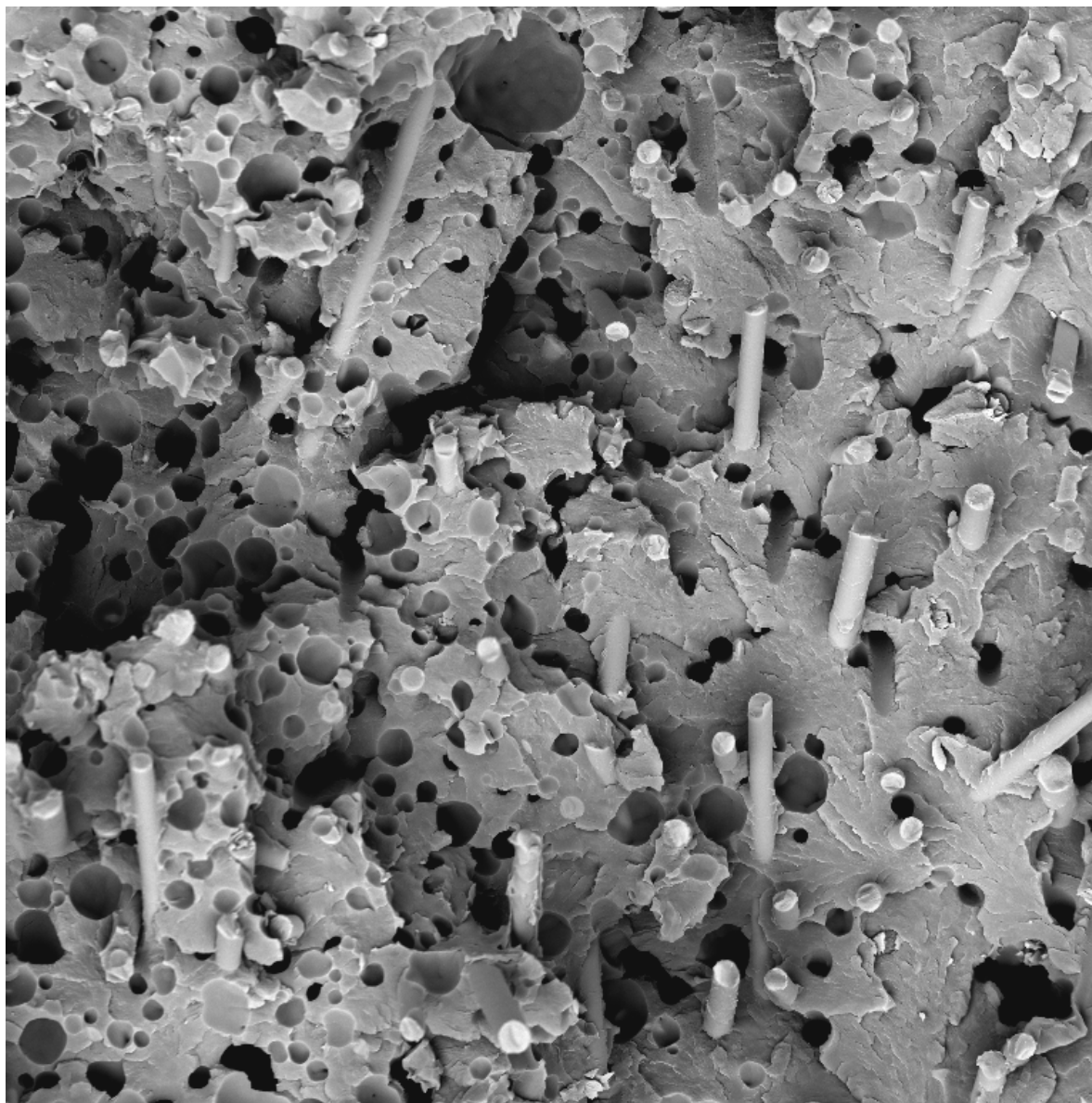
SEM MAG: 1.00 kx
HV: 20.0 kV
VAC: HiVac

DET: BE Det + SE Det
DATE: 01/17/16
Device: TS5130

100 um

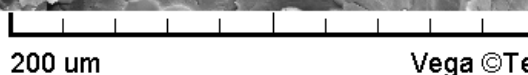
Vega ©Tescan
TU Liberec

Obr. P2 Mikroskopický snímek kompozitu na bázi PP a GF (SEM)



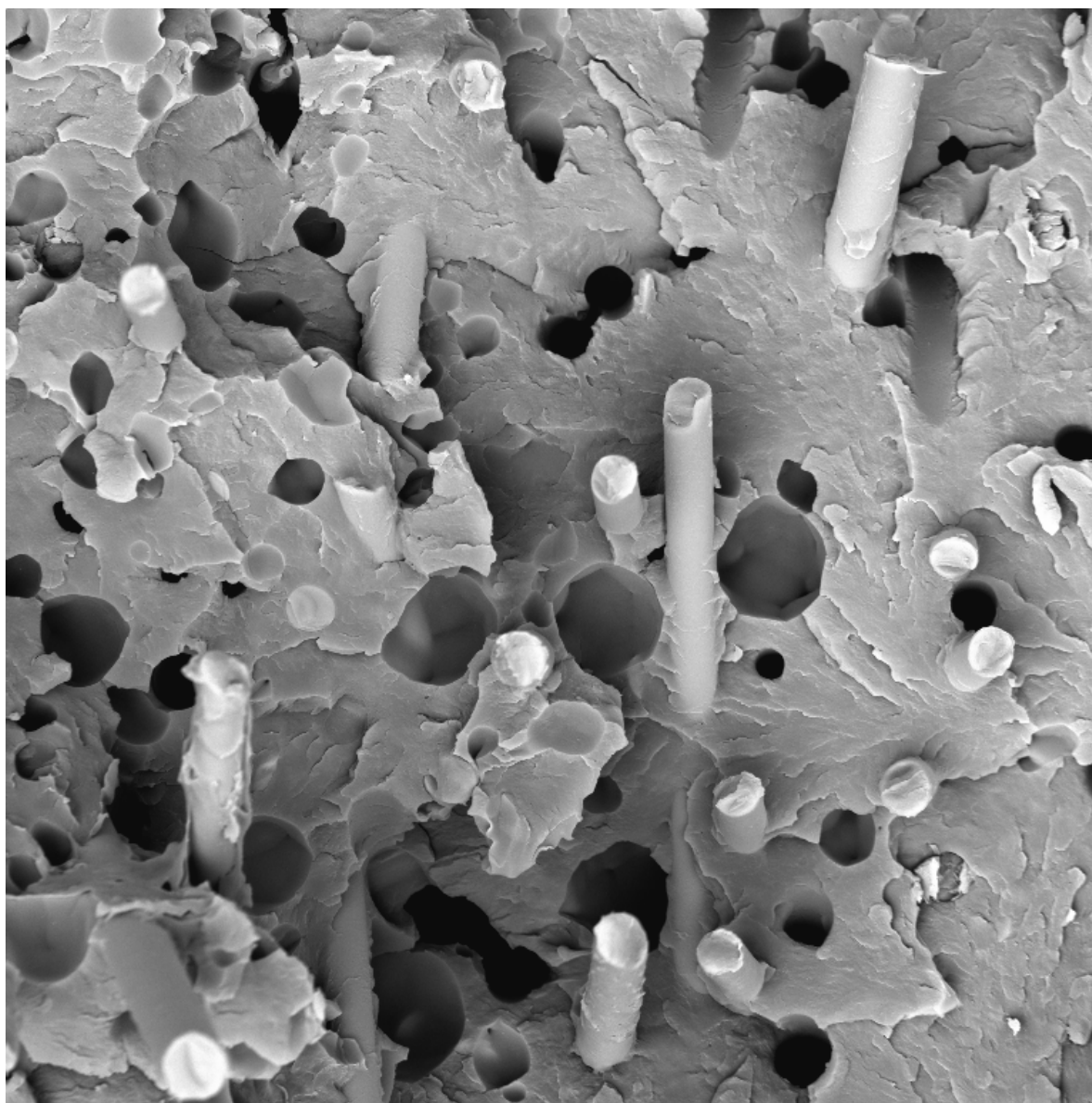
SEM MAG: 500 x
HV: 20.0 kV
VAC: HiVac

DET: BE Det + SE Det
DATE: 01/13/16
Device: TS5130



Vega ©Tescan
TU Liberec

Obr. P3 Mikroskopický snímek lehčeného kompozitu na bázi PP a GF, zhotoveného technologií MuCell (SEM)



SEM MAG: 1.00 kx

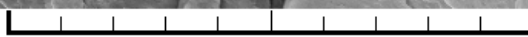
HV: 20.0 kV

VAC: HiVac

DET: BE Det + SE Det

DATE: 01/13/16

Device: TS5130



100 um

Vega ©Tescan

TU Liberec

Obr. P4 Mikroskopický snímek lehčeného kompozitu na bázi PP a GF, zhotoveného technologií MuCell (SEM)