

LEHČENÝ POLYPROPYLEN

ONDŘEJ VIDRMAN

Bakalářská práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Vidrman**
Osobní číslo: **T12230**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Lehčený Polypropylen**

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je vytvořit ucelenou rešerši týkající se výroby, zpracování, vlastností a použití polypropylenových pěn. Expandovaný polypropylen (EPP) se velmi podobá expandovanému polystyrenu (EPS), jelikož se získává z tuhých granulí tepelnou expanzí, což vede k vytvoření struktury s uzavřenými buňkami. Nicméně EPP má lepší tvarovou paměť, která materiálu propůjčuje lepší pružnost a umožňuje deformaci bez poškození. EPP se stále více používá v automobilovém průmyslu a dalších průmyslových odvětvích.



Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Karger-Kocsis, J.: Polypropylene An A-Z Reference, Springer Verlag, 1999, ISBN: 0-412-80200-7

2. Maier, C.; Calafut, T.: Polypropylene The Definitive User's Guide and Databook, William Andrew Publishing/Plastics Design Library, 1998, ISBN: 1-884207-58-8

3. Pasquini, N.; Addeo, A.: Polypropylene Handbook, 2nd ed., Munich: Hanser, 2005, 584 s. ISBN 3446229787 and scientific articles

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.**

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 1. března 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10.5.2016


.....

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

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

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

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

¹⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3;*

(3) *Do práva autorského také nezahrnuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, u něhož nikdo ze účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dle vytvořené dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

²⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo;*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají na obvyklých podmínkách právo na uvození literární srovnání a užití školního díla (§ 25 odst. 3). Odporů-li autor takového díla učelit svolení bez výslovného souhlasu, mohou se tyto osoby domáhat natvrzení chybného projevu jeho vůle a soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce představuje rešerši týkající se výroby, zpracování, vlastností a použití polypropylenových pěn. Expandovaný polypropylen (EPP) se velmi podobá expandovanému polystyrenu (EPS), jelikož se získává z tuhých granulí tepelnou expanzí, což vede k vytvoření struktury s uzavřenými buňkami. Nicméně EPP má lepší tvarovou paměť, která materiálu propůjčuje lepší pružnost a umožňuje deformaci bez poškození. EPP se stále více používá v automobilovém průmyslu a dalších průmyslových odvětvích.

Klíčová slova: polypropylen, expandovaný polypropylen, polypropylenová pěna, polyolefinová pěna, uzavřené buňky, nadouvadlo

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the production, processing, properties and using of polypropylene foams. Expanded polypropylene is very similar to expanded polystyrene, which is obtained from solid granules using thermal expansion, and this leads to creating the structures with closed cells. However, EPP has better shape memory giving material better elasticity and allows deformation without damage. EPP is increasingly used in automotive and other industries.

Keywords: polypropylene, expanded polypropylene, polypropylene foam, polyolefin foam, closed cells, blowing agent

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Janě Navrátilové, Ph.D., za odborné vedení, poskytnuté rady a připomínky k této práci. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu, zvláště mé manželce, která vytvářela prostředí k tvorbě této práce a v neposlední řadě své sestře za trpělivost.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYPROPYLEN	11
1.1 STRUKTURA	11
1.2 VLASTNOSTI.....	13
1.3 POUŽITÍ.....	13
2 LEHČENÝ POLYPROPYLEN	14
2.1 ÚPRAVA POLYPROPYLENU PRO LEHČENÍ	15
2.1.1 Kopolymery polypropylenu	15
2.1.2 Polypropylen s dlouhými větvemi	15
2.1.3 Síťování polypropylenu.....	16
2.1.4 Směsi polypropylenu.....	16
2.1.5 Další možnosti úpravy polypropylenu	17
3 LEHČENÍ	18
3.1 FYZIKÁLNÍ LEHČENÍ	18
3.2 CHEMICKÉ LEHČENÍ	19
4 VÝROBA A ZPRACOVÁNÍ LEHČENÉHO POLYPROPYLENU	21
4.1 ČÁSTICOVÁ PĚNA	22
4.2 VYTlačOVÁNÍ PĚNY	23
4.3 VSTŘIKOVÁNÍ PĚNY.....	23
5 STRUKTURA A VLASTNOSTI LEHČENÉHO POLYPROPYLENU	26
6 POUŽITÍ LEHČENÉHO POLYPROPYLENU	28
ZÁVĚR	29
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	31
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	36
SEZNAM OBRÁZKŮ	37
SEZNAM TABULEK	38

ÚVOD

S rostoucí poptávkou po levnějších technologiích a zároveň kvalitnějších produktech domácích spotřebičů, obalových materiálů, hygienických a protetických potřeb nebo po zvýšené bezpečnosti v automobilech, roste tlak na vývoj a výzkum nových materiálů. Pozornost se zaměřuje také na polymerní pěny, tedy lehčené polymery.

Polymerní pěny, např. polystyrenová (PS), polyetylenová (PE) a polyuretanová (PU) se v praxi často používají, zejména díky nízké ceně na objem, nízké tepelné vodivosti, výborné tepelné a zvukové izolaci a vysoké absorpci energie [1-3]. Jednou z často používaných polymerních pěn je lehčený polypropylen. Lehčený polypropylen (EPP) nedosahuje takových vlastností jako běžný polypropylen (PP), avšak vykazuje své specifické charakteristiky [4,5]. Zatímco teplota použití PS pěny je pod 80 °C a PE pěny mezi 70 a 80 °C, lehčený polypropylen se trvale používá až do 130 °C. Má také dobré mechanické vlastnosti. Struktura je homogenní s uzavřenými buňkami. Je odolný olejům, s obecně velmi dobrou chemickou odolností. Navíc při hoření se neuvolňují žádné toxické plyny, na rozdíl od PS pěny. Je recyklovatelný a vykazuje vyšší odolnost vůči degradaci než PS pěny.

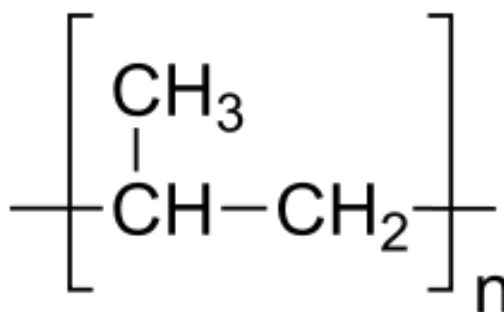
Polypropylen vykazuje poměrně vysokou krystalinitu a nízkou viskozitu taveniny, kterou je ve srovnání s amorfními materiály těžké kontrolovat. Plyn se v krystalických oblastech nerozpouští a roztok polymer-plyn vzniklý během výroby buněčné struktury není jednotný. Kromě toho má PP nízkou pevnost taveniny (nízkou elongační viskozitu) a čistý PP je navíc převážně lineární, a jako takový nevykazuje dostatečné deformační zpevnění, které je nutné v pozdějším stádiu růstu buněk při výrobě. Proto je těžké vyrobit pěnu s jednotnou a jemnou buněčnou strukturou, vysokým poměrem lehčení a nízkým obsahem otevřených buněk. Pro výrobu PP pěn se proto používá různě upravený polypropylen, nejčastěji se jedná o kopolymery či o větvený polypropylen [6,7].

Lehčený polypropylen se používá zejména v automobilovém průmyslu, na tepelné izolace, obaly a hračky, i jako konstrukční materiál. Pro takové aplikace musí materiál splňovat určité požadavky, např. rozměrovou stabilitu a pružnost, kterých nelze dosáhnout u lehčeného polystyrenu či polyetylenu. EPP má navíc výbornou rázovou houževnatost.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYPROPYLEN

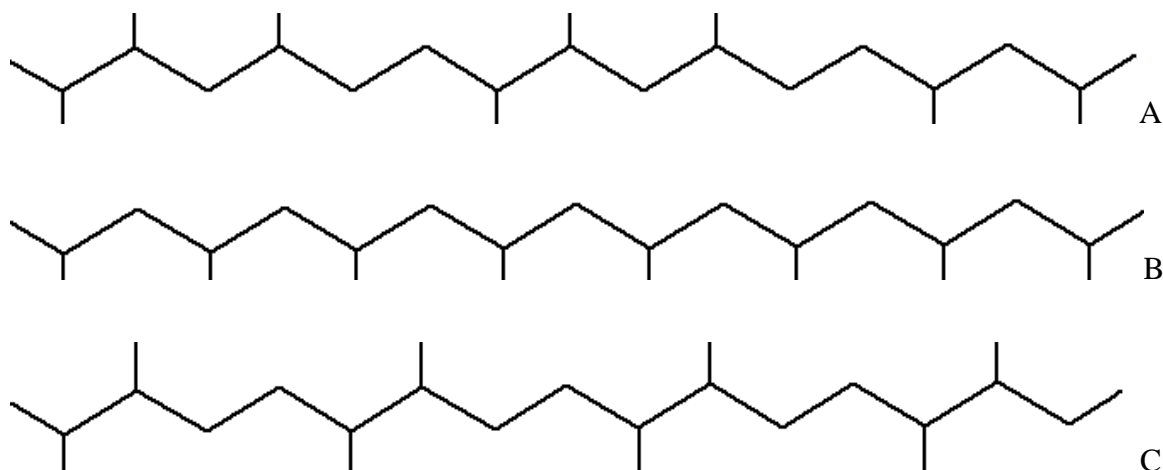
Polypropylen je univerzální materiál hojně využívaný v mnoha odvětvích. Polymeraci propylenu, tj. reakci propylenu s kyselinou sírovou, provedl jako první Marcellin Berthelot roku 1869. Vytvořený produkt byla lepkavá sraženina, která byla nepoužitelná. Historie polypropylenu začala v roce 1954, kdy německý chemik Karl Rehn a italský chemik Giulio Natta jako první vyrobili izotaktický polypropylen. O tři roky později došlo k jeho komerční výrobě. Natta poté syntetizoval také syndiotaktický polypropylen [8]. Na Obr. 1 je znázorněna základní jednotka polypropylenu, která se skládá ze tří uhlíků a šesti vodíkových atomů [9].



Obr. 1. Základní jednotka polypropylenu

1.1 Struktura

Polypropylen je lineární polymer a je klasifikován jako polyolefin. Charakteristická je metylová skupina $-\text{CH}_3$. V závislosti na prostorovém uspořádání (Obr. 2) těchto skupin k hlavnímu uhlíkovému $-\text{C}-\text{C}-$ řetězci se rozlišuje ataktický polypropylen (aPP) s nepravidelným uspořádáním skupin $-\text{CH}_3$, izotaktický polypropylen (iPP) s $-\text{CH}_3$ skupinami na jedné straně uhlíkového řetězce a syndiotaktický polypropylen (sPP) se střídavým uspořádáním skupin $-\text{CH}_3$ [9].



Obr. 2. Molekulární struktura polypropylenu (A – ataktický PP, B – izotaktický PP, C – syndiotaktický PP) [2]

Ataktický polypropylen má velmi nízkou teplotu tání a je prakticky nežádoucím produktem. Vzrůstající takticita (pravidelnost $-CH_3$ uspořádání) vede k růstu stupně krystalinity, teploty tání, pevnosti a tvrdosti [9].

O izotaktický polypropylen je v současné době velký zájem (stupeň krystalinity je 40 až 60 %) a je masově vyráběn [9]. Konformace řetězce izotaktického polypropylenu je šroubovice se třemi mery na jeden závit, která může být levo i pravotočivá s periodou 0,65 nm. Pozice bočních metylových skupin v izotaktickém polypropylenu je vždy na stejné straně podél osy hlavního řetězce (referenční osa), a tato konfigurace je příčinou čtyř různých variant šroubovice v izotaktickém polypropylenu v krystalickém stavu, které jsou vztaženy k referenční ose [10]. Materiál je tedy polymorfni a může krystalizovat v závislosti na podmínkách do čtyř forem. α -forma izotaktického polypropylenu krystalizuje v monoklinické krystalické mřížce. Je to primární forma polypropylenu. β -forma izotaktického polypropylenu má hexagonální mřížku a je neuspořádanější než α -forma. Lamely tvoří sférolitickou strukturu se vzájemně propojenými hranicemi. Vzniká při specifických krystalizačních podmínkách, zejména v přítomnosti nukleačních činidel. γ -forma izotaktického polypropylenu má ortorombickou (kosočtverečnou) mřížku. Vzniká při vysokých tlacích nebo při použití metallocenových katalyzátorů v materiálech s nízkou molekulovou hmotností [10].

Syndiotaktický polypropylen se v malém měřítku komerčně vyrábí pomocí metallocenových katalyzátorů [9].

Polypropylen se často míchá s různými přísadami či jinými polymery. Vytváření takových polymerních systémů je jednoduchým nástrojem pro úpravu vlastností polypropylenu. Jako přísady se často používají nukleační činidla, zjasňovací činidla, různá plniva jako minerály či vlákna nebo elastomer s nízkou teplotou tání. Elastomer s nízkou teplotou tání zlepšuje viskozitu a pevnost taveniny, takže zlepšuje pěnicí proces při výrobě lehčeného polypropylenu. Typická směs používaná pro výrobu lehčeného materiálu je polypropylen/polyetylen, polypropylen/kaučuk a polypropylen/styrenový plast [11].

1.2 Vlastnosti

Polypropylen křehne při teplotě 0 °C, kolem 140 až 150 °C měkne a kolem 160 až 170 °C se taví. Je odolný vůči olejům, organickým rozpouštědlům a alkoholům, dobře se rozpouští v xylenech či tetrahydraftalenu. Polypropylen vyniká velmi dobrou chemickou a mechanickou odolností. Vlastnosti polypropylenu jsou určeny použitou polymerací a použitými katalyzátory [12].

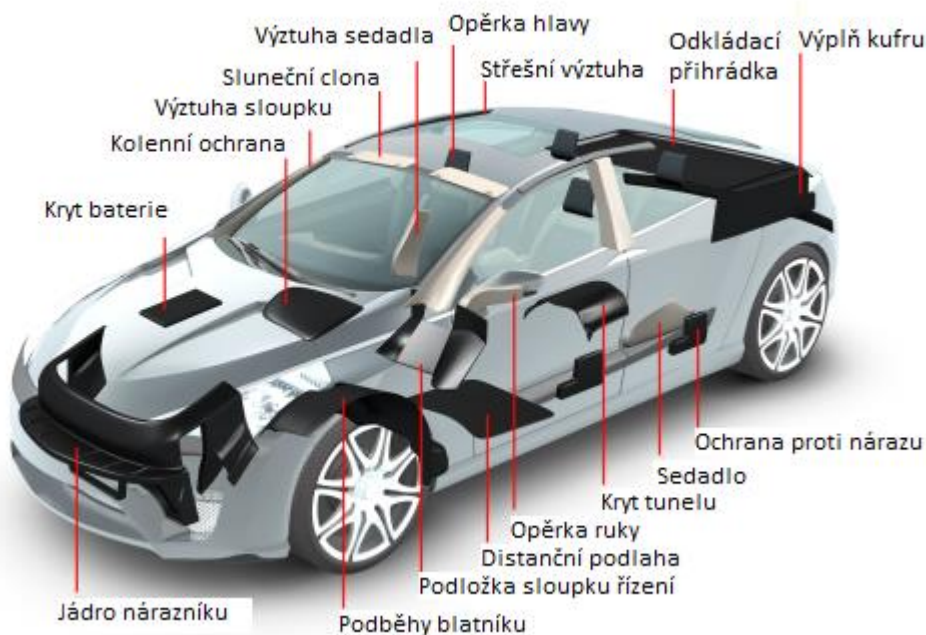
1.3 Použití

Využití polypropylenu je rozmanité. Podle dostupných informací je na globálním trhu asi 45 100 000 t tohoto polymeru, což odpovídá asi 65 miliardám dolarů. Monomerní jednotkou pro výrobu polypropylenu je propylen (propen), který je jednou z nejdostupnějších petrochemických surovin. Propylen se používá jako monomer pro výrobu polymerů (polypropylen a jeho kopolymery), meziproduct pro výrobu chemických látek (oxoalkoholů, kyseliny akrylové aj.) a jako technický plyn pro svařování, řezání apod. Polypropylen je jedním z ekonomicky nejdůležitějších termoplastických materiálů. Používá se v široké škále aplikací, jako jsou obaly na potraviny, tkaniny, automobilové součásti, lékařské přístroje a spotřební zboží [8].

2 LEHČENÝ POLYPROPYLEN

Expandovaný polypropylen (EPP) je technický plast, který se hojně využívá pro své unikátní vlastnosti. Vyniká odolností proti teplu, tuhostí a zpracovatelností. Využívá se v různých aplikacích jako například obaly, automobilové díly, průmyslové komponenty apod. Během posledních 50 let způsobily nové materiály a technologie velkou změnu ve vnímání dřívějších materiálů [13].

Expandovaný granulát polypropylenu (částicová pěna) byla nejprve vyvinuta firmou JSP v roce 1970 jako výsledek výzkumu nových forem polypropylenu. První aplikace materiálu byly pro automobilový průmysl v Japonsku v roce 1982. Poptávka na EPP od té doby dramaticky vzrostla ve všech zemích. Byla částečně založena na potřebě automobilek zlepšit správu energie při současném snížení hmotnosti a zlepšení vlivu na životní prostředí. Prvním požadavkem bylo využití EPP pěny v dílech systému nárazníku, které umožňují absorpci energie [14]. EPP je nyní široce využíván pro řadu dalších automobilových dílů a systémů, včetně sedadel a dalších interiérových prvků, viz Obr. 3 [15].



Obr. 3. EPP v automobilu [15]

2.1 Úprava polypropylenu pro lehčení

U klasického polypropylenu se při zvýšení teploty nad teplotu tání výrazně a rychle sníží viskozita taveniny a také pevnost taveniny (elongační viskozita), takže tavenina pak není dostatečně pevná, aby zadržela vypěňující plyn. To poté vede k protržení stěny buňky vlivem elongačních sil přítomných při růstu buněk. Proto je nutné pro výrobu lehčeného polypropylenu zvýšit pevnost taveniny výchozího materiálu. Nejčastěji se tak činí pomocí zavedení dlouhých větví do jinak lineárního polypropylenu. Takový větvený polypropylen pak vykazuje značnou pevnost taveniny a deformační zpevnění, které hrají významnou roli při růstu bublin a nedochází k jejich zhroucení [16-19].

2.1.1 Kopolymery polypropylenu

Pro výrobu PP pěn se homopolymer zpravidla nepoužívá. Vhodné je použití kopolymerů jako propylen-etylen kopolymer nebo propylen-buten kopolymer, případně terpolymer propylen-etylen-buten [20].

2.1.2 Polypropylen s dlouhými větvemi

Polypropylen s dlouhými větvemi (LCB PP) se nejčastěji a nejefektivněji vyrábí začleněním dlouhých větví (LCB) chemickou modifikací na lineární řetězec polypropylenu. Vytvoření větvené struktury obecně vede ke zlepšení pevnosti taveniny, která je důležitá zejména při vypěňování materiálu [21].

Začlenění dlouhých větví lze provést několika způsoby, např. použitím metallocenových katalyzátorů [22] nebo Ziegler-Nattových katalyzátorů [23]. Využit lze také ionizující záření [24].

Polypropylen s dlouhými větvemi se často používá ve směsi s homopolymerem PP nebo kopolymery PP. Tím se dají do značné míry ovlivnit vlastnosti konečného produktu.

2.1.3 Síťování polypropylenu

Ke zlepšení pevnosti taveniny vede síťování polypropylenu, které zvyšuje také teplotní rozsah při pění a tepelnou a chemickou odolnost PP. Při určitých podmínkách mohou PP řetězce síťovat a vytvářet tak trojrozměrnou sesíťovanou strukturu. Existují tři hlavní metody síťování: radiační síťování, peroxidické či chemické síťování a síťování pomocí silanů.

Radiační síťování elektronovými paprsky (EB) se může provádět bez ohřevu s absencí síťovacího činidla. Volné radikály či ionty mohou reagovat a spojovat polymerní řetězce přímo či iniciovat roubovací reakce [25]. Obecně se ozařování provádí ve vakuu, aby se zabránilo oxidačním reakcím.

Při chemickém síťování je nutné použití peroxidů, které však způsobuje řadu problémů, zejména nestabilitu terciálního uhlíku polypropylenu. Proto je chemické síťování značně limitováno [26].

Technologické zlepšení síťování polypropylenu představuje použití silanů. Roubování silanu a následné síťování polyolefinů dává několik výhod, např. jednoduché zpracování, nízké náklady, výhodné vlastnosti [27]. Během procesu se nejprve naroubuje na hlavní řetězec silan pomocí volných radikálů. Takto roubovaný polymer je potom hydrolyzován a sesíťován za tvorby Si-O-Si vazeb [28,29].

2.1.4 Směsi polypropylenu

Vytváření směsí je efektivní a jednoduchou cestou pro úpravu vlastností polypropylenu. Často se přidává elastomer nebo kopolymer s nízkou teplotou tání pro snížení tuhosti a teploty zpracování a naopak pro zvýšení viskozity taveniny a pevnosti taveniny, tedy pro zlepšení procesu vypěňování. Typické směsi PP pro mikrobuňččné pění zahrnují PP/PE, PP/kaučuk a PP/PS. PP/PE směsi jsou nemísitelné, ačkoliv určité interakce vedou ke kokrytalizaci. Fakticky PE a PP tvoří komplexní binární směsi. Výslednou morfologii směsi ovlivňují zejména velikost sférolitů, tloušťka lamel, interlamelární amorfní oblast, dokonalost krystalitů, konečná krystalinita a možnost epitaxiální krystalizace [30-32].

Kvůli vysoké pružnosti a houževnatosti kaučuku se na modifikaci PP kaučukem zaměřuje značná pozornost už od sedmdesátých let minulého století [33,34].

PP/PS směs je typickou nemísitelnou polymerní směsí, ve které tvoří PP semikrystalickou fází a PS amorfní fází. Tato směs se lépe vypěňuje, dosáhne se menší velikosti buněk než u PS [35].

2.1.5 Další možnosti úpravy polypropylenu

Jednou z dalších možností úpravy vlastností PP je použití dřeva jako plniva, tedy výroba dřevo-plastových kompozitů. Nedávné studie uvádějí, že takový kompozit se snáze vypěňuje než čistý PP [36,37].

Jiným vhodným plnivem může být nano uhlíčan vápenatý [38]. Ukázalo se, že vlivem nukleace buněk se dosáhne jejich malé velikosti a tudíž vysoké hustoty.

Další plniva, která byla použita pro výzkum vypěňování PP kompozitů jsou jílová nanoplňiva [39], která pozitivně ovlivnila buněčnou morfologii, hustotu buněk a stupeň lehčení.

3 LEHČENÍ

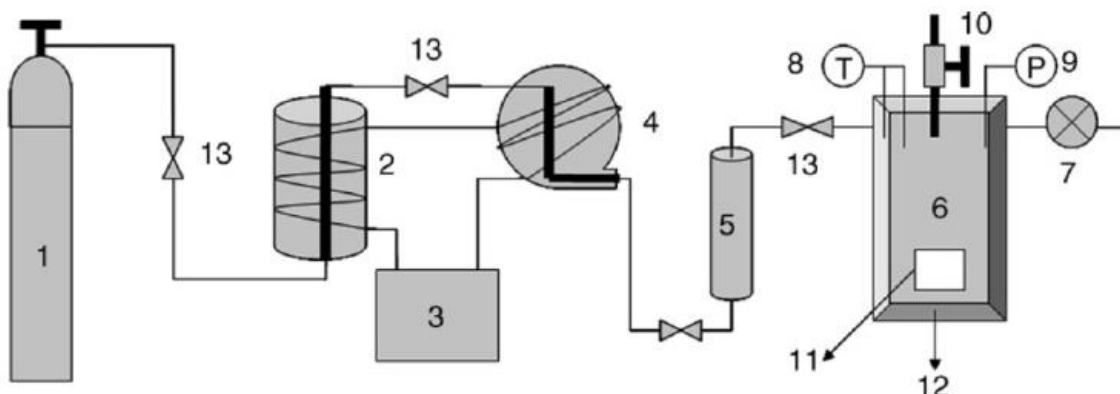
Při výrobě pěnového materiálu hraje důležitou roli výrobní metoda. Ta rozhoduje o struktuře pěny, stupni zesíťování i přítomnosti vedlejších produktů. Pěna může být vyrobena síťovacím i nesíťovacím procesem dle požadavků na pěnu. Rozdíl mezi nimi je v zachování, popřípadě nezachování jejich základního tvaru při zvýšení teploty nad teplotu tání polymeru [11].

Mikroporézní pění je složitý proces, kvůli mnoha proměnným, které ovlivňují reologii a mikrostrukturu pěnového produktu. Výroba lehčeného polypropylenu byla předmětem mnoha studií. Růst bublin je jedním z nejdůležitějších fází procesu napěňování, protože má přímý vztah ke konečné velikosti bublin a mikrostruktuře [11].

Expandovaný polypropylen je pěna s uzavřenými buňkami a vyrábí se fyzikálním nebo chemickým lehčením [11].

3.1 Fyzikální lehčení

V současné době je fyzikální pění nejčastější metoda. Rozděluje se na pění inertním plynem, vypěňování granulátu (částicová pěna) a začlenění dutých kuliček. Obecně se pro výrobu EPP využívá běžných fyzikálních nadouvadel, jako je CO_2 , N_2 , butan, isobuten, cyklopentan a isopentan. Nejvíce se využívá CO_2 [11]. V poslední době je pozornost zaměřena také na pění s využitím nadkritického CO_2 (Sc- CO_2), a to díky jeho regulovatelné rozpustnosti, možnosti změkčovat řadu polymerů a možnosti zvýšit rychlost difuze [40]. Na Obr. 4 je znázorněno schéma zařízení pro lehčení kompozitů s využitím Sc- CO_2 [41].



Obr. 4. Schéma vypěňování PP nadkritickým CO_2 (1) láhev s CO_2 ; (2) chladič; (3) chladicí jednotka; (4) pumpa; (5) vyrovnávací nádrž; (6) tlaková nádoba; (7) zpětný tlakový ventil; (8) indikátor teploty; (9) manometr; (10) odzdušňovací ventil; (11) vzorek; (12) topný plášť; (13) ventil [41]

3.2 Chemické lehčení

Metoda chemického pění spočívá v přidání chemického nadouvadla do polymeru. Při udržování určité teploty a tlaku se chemická nadouvadla rozkládají a uvolňují plyn pro napěňování. Velmi důležitý je správný výběr chemického nadouvadla. Chemická nadouvadla lze rozdělit na anorganická a organická [11].

Anorganická nadouvadla jsou obvykle hydrogenuhličitan sodný, hydrogenuhličitan amonný, atd. Uhličitan sodný reaguje s okolní vlhkostí a někdy zanechává bělavý zbytek na technologickém zařízení, což omezuje jeho použití [11].

Organická nadouvadla jsou rozmanitější. Měla by splňovat tyto požadavky: krátká doba uvolňování plynu, nastavitelná rychlost uvolňování, nastavitelná teplota rozkladu, malé, homogenní a snadno rozptýlitelné částice s velkou kapacitou pro tvorbu pěny, vysoká rychlost reakce s malým uvolňováním tepla, netoxická, neškodná a neznečišťující. Organická nadouvadla obsahují obvykle azo-sloučeniny, derivát močoviny a hydrazidové sloučeniny. Mezi nejdůležitější indikátory chemických nadouvadél patří teplota rozkladu a vývoj plynu. Teplota rozkladu určuje rozsah použití a pěnící podmínky, zatímco vývoj plynu je důležitým ukazatelem pro měření pěnívosti chemického nadouvadla. Polypropy-

len má teplotu tání mezi 164 a 170 °C, takže rozklad chemických látek se musí realizovat při vyšších teplotách. V Tabulce 1 jsou uvedena nejběžnější chemická nadouvadla [11].

NÁZEV	VZOREC	TEPLOTA ROZKLADU [°C]	VYVÍJENÍ PLYNU [ml/g]
Azodikarbonamid (AC)	$\text{HN}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{N}=\text{N}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}$	195 - 210	250 - 300
(DMAD, DEAD, DIAD,..)	$\text{RO}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{N}=\text{N}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OR}$	100 - 200	125 - 260
BaAC		245	177
OBSH	$\text{NH}_2-\overset{\text{H}}{\text{N}}-\text{SO}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_2-\overset{\text{H}}{\text{N}}-\text{NH}_2$	157 - 160	125
	$\text{CH}_3-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_2-\overset{\text{H}}{\text{N}}-\overset{\text{H}}{\text{N}}-\text{CONH}_2$	213 - 225	140 - 150
Derivát močoviny	$\text{H}_2\text{N}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{S}}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{S}}-\text{NH}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}_2$	210 - 220	145
	$\text{NH}_2-\overset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{NH}-\text{NO}_2$	235 - 240	280 - 310

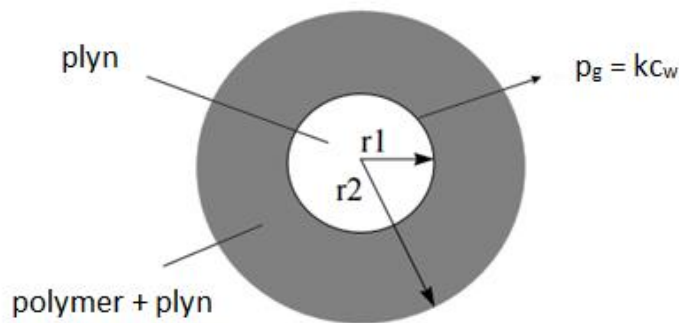
Tabulka 1. Nejběžnější chemická nadouvadla [11]

4 VÝROBA A ZPRACOVÁNÍ LEHČENÉHO POLYPROPYLENU

Běžnými metodami výroby a zpracování lehčeného polypropylenu jsou výroba lehčeného granulátu (expandované granule, částicová pěna), který se následně lisuje, vytlačuje a vstříkuje, dále vytlačování či vstřikování pěny [42].

Růst bublin

Jakmile je vnější tlak nasyceného polymeru snižován buňkami pěny, začínají růst rychleji. Když rozpuštěný plyn difunduje do pěnových „embryí“ z bezprostředního poloměru polymeru (r^2-r^1), viz Obr. 5, objeví se pěnové buňky. Růst bublin je řízen rychlostí difúze rozpuštěného plynu do rozhraní polymer–plyn, stupněm přesycení a viskozitou taveniny. Účinnost difúze je silně závislá na teplotě [43].



Obr.5. Bublina a difúze plynu v polymeru (r_1 =poloměr pěnové bubliny, r^2 =poloměr směsi polymer/plyn, kde dochází k difúzi, p_g =tlak plynu, k =Henryho konstanta, c_w =hmotnostní podíl plynu na povrchu bubliny) [43]

Koncentrace plynu nemá téměř žádný vliv na difúzi v pevných polymerech, protože je mezi plynem a polymerem nízká interakce i rozpustnost. Rozpustnost se výrazně zvyšuje v roztavených polymerech (při vytlačování pěny). Molekulová velikost, tvar a reaktivita mají zásadní vliv na difúzi. Když se teplota zvyšuje, viskozita polymeru se sníží a difúze plynu kolem pěnové bubliny se zvýší. Ke zhroucení bublin může dojít během zvýšení teploty v důsledku elasticity polymerů, která se snižuje se zvyšující se teplotou. Beckman a spol. dokázali, že velikost bublin může být snížena zvýšením tlaku nasycení v dávkovaném

pěnění s nadkritickým CO₂. Zvýšením tlaku nasycení je podpořena homogenní nukleace a vznik menších bublin [43].

V první fázi jsou vytvořené bubliny kruhové. Když pěna dosáhne více než 74 %, stěny bublin změny tvar a struktura vypadá jako včelí plástve [43].

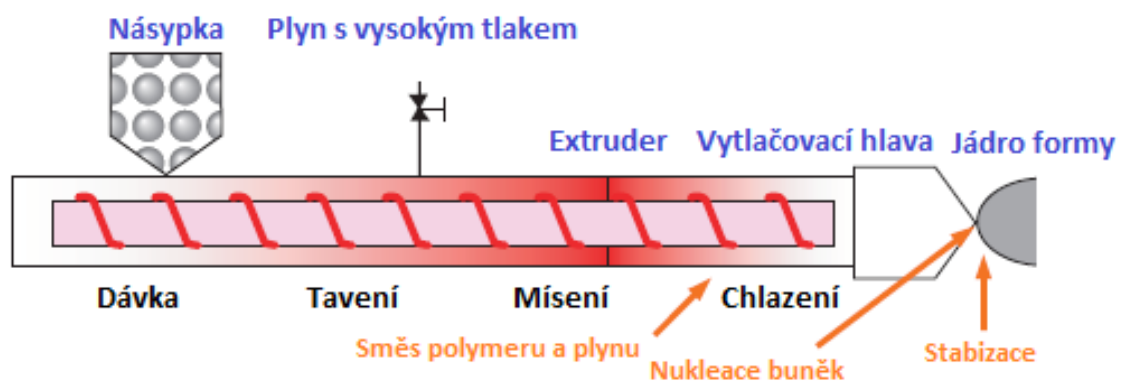
4.1 Částicová pěna

Výroba lehčeného polypropylenu ve formě granulátu probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je výroba minipelet z polypropylenového granulátu. Z těchto minipelet je možné vyrobit expandovaný polypropylen, neboť běžný granulát je příliš rozměrný. Vyrobené minipelety jsou pak v autoklávu vystaveny působení vysokého tlaku kolem 20 bar, teploty kolem 150 °C a oxidu uhličitého jako nadouvadla. K lehčení nedochází ve vlastním autoklávu, ale až v okamžiku, kdy minipelety opouštějí autokláv. Každá minipeleta při expanzi mnohonásobně zvětší svůj objem. Řízením technologických parametrů lze dosáhnout požadované měrné hmotnosti suroviny, která se může pohybovat v rozmezí od 18 do 250 g/l. Nejnižších měrných hmotností se dosahuje dvojnásobnou expanzí, kdy již expandovaný polypropylen je podroben ještě jedné následné expanzi v autoklávu. Tato druhá expanze se z důvodů snížení nákladů na dopravu často provádí až u odběratele materiálu. Takto se lehčený PP granulát vyrábí např. ve firmě JSP, která má výrobní závod mimo jiné také v České republice v Chebu. Vyrábí se tam lehčený polypropylen pod obchodním označením ARPRO [42]. Vyrobený expandovaný polypropylen (granulát) se expeduje kamionovou dopravou odběratelům, jimž slouží jako surovina k dalšímu zpracování. Do podoby finálních výrobků se zpravidla lisuje. Granule se umístí do formy v lisu, zahřejí se párou na cca 130 °C, čímž se jednotlivé granule navzájem spékají. Následuje ochlazení a odformování. Výrobní cyklus je velmi krátký, trvá asi jen okolo 150 s, a ve srovnání s klasickým vstřikováním je výroba velmi efektivní.

Výroba EPP granulí je diskontinuální. Tento proces je nákladnější než vytlačování pěny, ale dokáže vytvářet kuličky s vyšší buněčnou hustotou a větším obsahem uzavřených buněk, protože se dá lépe regulovat než kontinuální proces [44].

4.2 Vytlačování pěny

Při vytlačování pěny probíhá nejprve standardní plnění vytlačovacího stroje přes násypku a poté tavení granulátu, tak jako u klasického vytlačování. Nicméně následující tři kroky jsou velmi specifické a důležité pro celý proces vytlačování pěny (Obr. 6). Tyto tři kroky jsou: 1. rozpouštění nadouvadla v tavenině polymeru, 2. nukleace buněk, 3. růst buněk a následná stabilizace. Aby mohly proběhnout všechny tyto popsané děje, bývá vytlačovací stroj delší než běžný typ, většinou s L/D poměrem větším než 40, a to jak u jednošnekového tak i u dvoušnekového stroje [45].



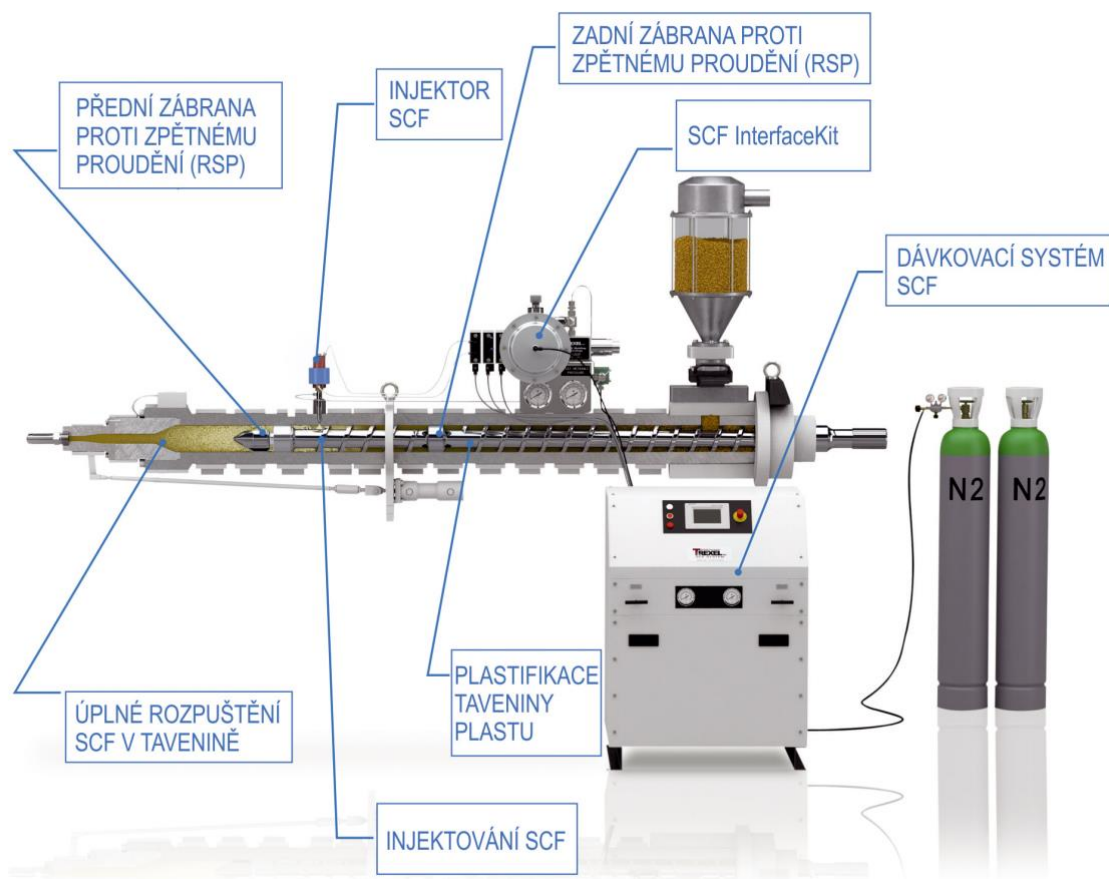
Obr. 6. Vytlačování pěny [45]

Na základě termodynamiky je systém polymer/plyn stabilnější, pokud obsahuje ve stejném objemu méně větších buněk než více malých. Proto u polypropylenu s nízkou pevností taveniny dochází ke slučování buněk, což pak vede ke zhoršení mechanických vlastností pěny [11].

4.3 Vstřikování pěny

Při výrobě pěnových výrobků se často využívá vstřikování, a to kvůli nízkým nákladům. Vstřikování obecně zahrnuje tavení nebo plastikaci, vstřikování do formy, setrvání v uzavřené formě a ochlazení vstřikovaného materiálu. Vstřikovací jednotka vykonává funkci plastikace a vstřikování a uzavírací jednotka ovládá formu [13].

V současné době se při vstřikování pěny využívá často technologie MuCell vyvinuté firmou Trexel Inc., Wilmington, USA (Obr. 7).



Obr. 7. Koncepce zařízení pro metodu vstřikování pěny MuCell [43]

U tohoto způsobu fyzikálního napěňování se jedná o vstřikování se sycením plynem. Předpokladem je použití vstřikovacího stroje s kontrolou pozice šneku a zvýšeným vstřikovacím výkonem. Srdcem je plastifikační jednotka se speciálním šnekem. Plyn v nadkritickém stavu (SCF) je vstřikován přímo do taveniny plastu. Šnek vytváří z obou složek homogenní směs. Zpětný ventil ve střední části šneku zabraňuje předčasné expanzi směsi taveniny a plynu ve směru k materiálovému vstupu; na přední straně je pohyb taveniny omezen uzavíratelnou tryskou. Jako napěňovadlo je používán dusík nebo CO_2 (Obr. 7).

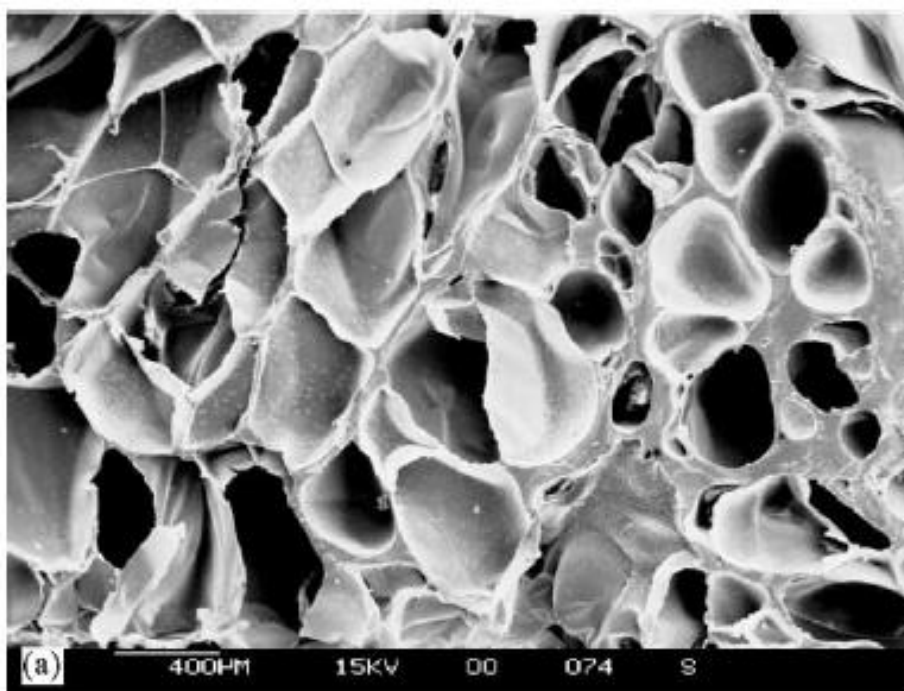
Důležité je, aby tlak taveniny v plastifikaci a případném systému horkých kanálů nepoklesl v celém cyklu pod kritickou hodnotu SCF. Proto je potřebná regulace polohy šneku, která rovněž zajišťuje, aby zůstal tlak zachován i po otevření bezpečnostních dveří. Ze stejného důvodu se na stroji používá uzavíratelná tryska, u nástrojů s horkými kanály dosedá tryska na pouzdro formy, přičemž během otevírání uzavírací jednotky dojde pouze ke snížení přitlaku trysky. Aby byl pokles tlaku a tím i začátek procesu napěnění odsunut, pokud možno na konec procesu plnění, a aby bylo zajištěno napěnění i na konci dráhy materiálu, musí být vstřík rychlý. Proto je nutné, aby stroj disponoval vysokým vstřikovacím výkonem.

Jako fyzikální napěňovadlo snižuje plyn viskozitu taveniny, čímž je rychlé vstříknutí usnadněno. Při poklesu tlaku po vstříknutí do kavity nástroje začnou vznikat bublinky plynu, které způsobí napěnění taveniny. Na rozdíl od chemického napěňování se u metody MuCell jedná o větší množství rovnoměrně rozložených bublinek. Tímto rovnoměrným rozložením je zajištěno vytvoření mnoha malých, stejně velkých a uzavřených komůrek s průměrem pod 100 μm . V průřezu dílu vznikne tzv. integrální pěnová struktura: napěněné jádro s nízkou hustotou, obklopené tenkou kompaktní krycí vrstvou s vysokou hustotou. Povrch je sice uzavřený, nemá však kvalitu povrchu kompaktně odstříknutého dílce [46].

5 STRUKTURA A VLASTNOSTI LEHČENÉHO POLYPROPYLENU

Lehčený polypropylen se vyznačuje specifickými vlastnostmi, jako např. dobré akustické vlastnosti, tepelná odolnost, odolnost proti nárazu, schopnost absorpce energie a také izolace. Je plně recyklovatelný a odolný vůči vodě, chemikáliím, olejům, i oděru [47-49]. EPP se používá v náročných aplikacích, například v energetice nebo v automobilovém průmyslu pro zlepšení bezpečnosti vozů [50-52].

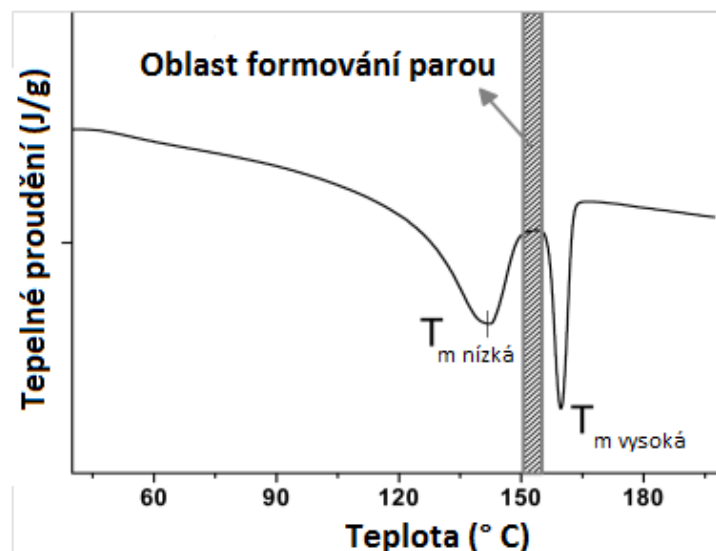
Stejně jako u všech pěn, závisí vlastnosti především na typu polypropylenu, obsahu uzavřených a otevřených buněk, hustotě pěny, přítomnosti přísad, struktuře a charakteru buněk. Polyolefinové pěny obsahují téměř všechny buňky uzavřené a modifikující přísady jsou většinou omezeny na malé množství pigmentů, nukleární činidla a pomocné látky, z nichž žádné nemají zásadní vliv na vlastnosti. Polymerní pěna má jedinečné fyzikální, mechanické a tepelné vlastnosti, které mohou být přičítány polymerní matici. Tato matrice je tvořena buněčnou strukturou a složením plynu, viz Obr. 8 [53]. Vlastnosti této kompozitní matrice jsou závislé na složkách a jejich rozptylu. Termodynamické vlastnosti jako měrné teplo a rovnovážné konstanty, apod. jsou řízeny molekulovou hmotností jednotlivých zúčástněných komponent [54].



Obr. 8. Morfologie EPP [53]

Polymerní pěny vždy vykazovaly nižší hodnoty maximální síly v porovnání s blokem pevného materiálu. Při vyšší zátěži se napětí zvyšuje velmi rychle. Mechanické vlastnosti pěny jsou obecně řízeny tlakem plynu, vlastnostmi základního materiálu, geometrií buněk a výrobním postupem. V případě pěny s vysokou hustotou překročí síla kritickou hodnotu před dosažením dostatečné absorpce energie a vede k částečnému využití stlačeného napětí. Vnitřní struktura hraje důležitou roli při definování mechanických vlastností. Pro dané množství energie s nízkou hustotou pěny dochází k velké deformaci díky rychlému zhušťování. Na druhé straně pěna s vysokou hustotou způsobí nízkou deformaci při stejném množství energie. Proto je ideální pěna střední hustoty [55].

U lehčeného polypropylenu vyrobeného expanzí granulátu (částicové pěny) se při studiu tepelného chování pomocí diferenciální snímací kalorimetrie pozoruje dvojitý pík tání. Takový profil tání vzniká v důsledku výrobního procesu, kdy se nejprve vyrábějí nepěnové PP mikropelety vytlačováním. Následně jsou PP mikropelety napuštěny fyzikálním nadouvadlem za zvýšeného tlaku a teploty. Teplota je určitou dobu vyšší než teplota tání PP. Po dostatečně dlouhé době, během které nadouvadlo naplní pelety, se uvolní tlak a vytvoří se expandovaný granulát. Během fáze napouštění vznikne za zvýšené teploty nový pík tání krystalu (Obr. 9). Fenomén vytvoření více píků tání se může vyskytovat ve většině semikrystalických polymerů. Výskyt nového píku může být způsoben různými krystalickými strukturami, různými velikostmi krystalu, a také přeskupením během ohřívání nebo izotermického zpracování [43].



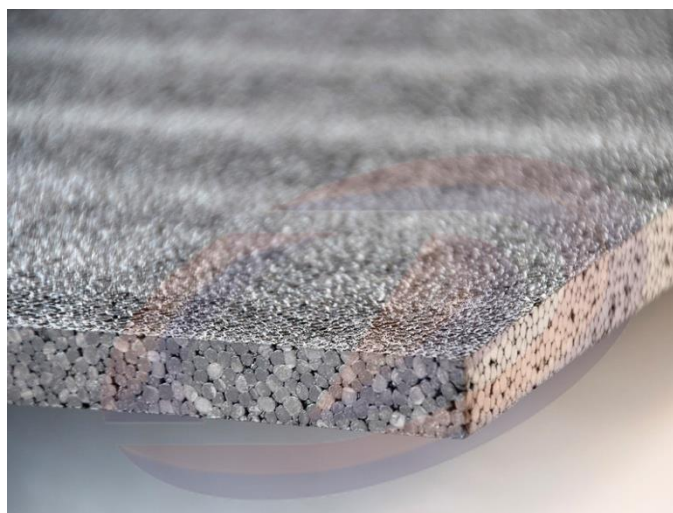
Obr. 9. Dvojitý pík tání lehčeného polypropylenu[43]

6 POUŽITÍ LEHČENÉHO POLYPROPYLENU

Konstruktéři často lehčený polypropylen využívají pro nahrazení materiálů, jako jsou kovy, dřevo a různé jiné plasty [8]. Globální průmysl polypropylenů má vzrůstající tendenci a předpokládá se, že bude stále růst. Tomuto průmyslu dominuje Asie s 55 % světového trhu. Kombinace faktorů – demografické podmínky, ekonomická stabilita a environmentální předpisy měly významný dopad na průmyslovou dynamiku [13].

Polyolefinové pěny mají extrémně širokou škálu aplikací a existuje jen málo průmyslových odvětví, kde se pěny nepoužívají. Pěny je možné najít v komponentech sušiček, dveřních vložek u myček nádobí, ručních mixérech, ve vysoušeči vlasů a dalších domácích spotřebičích. EPP je dostatečně pevný pro použití do automobilových sedadel, nahrazuje kovovou konstrukci a umožňuje zjednodušení platformy automobilu.

Polypropylenová pěna se široce používá v náraznících, které pohlcují nárazy. Dokáže absorbovat energii nárazu a pak se vrátit do původního stavu. EPP je velmi oblíbený v automobilových interiérech a rozsáhle používaný v bočních „stěnách“ jako ochrana proti nárazu, opěrkách i sloupcích. Je ideální pro osobní ochranné pomůcky a zařízení, např. v helmě. Stavební průmysl používá EPP pěnu v polstrování parkovacích sloupků a akustických aplikacích (Obr. 10) [56]. EPP se stejně dobře hodí jako obalový materiál pro léky, protézy a hygienické produkty [13].



Obr. 10. Lehčený polypropylen [56]

ZÁVĚR

Expandované materiály, jako např. polystyren a polyetylen již nestačí vysokým nárokům na materiály, a proto je v současnosti expandovaný polypropylen velmi využívaný pro své specifické vlastnosti.

Běžný lineární izotaktický polypropylen není pro lehčení vhodný, protože vykazuje malou elongační viskozitu a proto při lehčení může docházet k protržení stěn buněk při jejich růstu. Proto se používá polypropylen upravený s vyšší pevností taveniny, např. se často využívá kopolymerů propylenu s dalším olefinem. Další možností je začlenění dlouhých větví na lineární řetězec polypropylenu. Toto začlenění lze provést pomocí metaloocenových katalyzátorů, Ziegler-Nattových katalyzátorů nebo pomocí ionizujícího záření. Zvýšení pevnosti taveniny je možné dosáhnout také síťováním polypropylenu, při kterém dochází ke vzniku trojrozměrné síťované struktury. Síťování se provádí radiačně, chemicky, a také za použití silanů. V neposlední řadě se mohou využít směsi polymerů.

Lehčení polypropylenu může být prováděno fyzikálně i chemicky. Při fyzikálním lehčení se využívá například butan, cyklopentan, dusík a nově i nadkritický CO₂, kvůli regulovatelné rozpustnosti, schopnosti změkčovat řadu polymerů a také zrychlení difuze. U chemického lehčení se přidává chemické nadouvadlo do polymeru. Nadouvadla mohou být organická (azodikarbonamid) i anorganická (hydrogenuhlíčitan amonný).

Pěna lehčeného polypropylenu se může vytlačovat, vstříkovat nebo se může vyrábět částicová pěna, kdy dochází k napěnění PP granulí. Vypěněné granule se dále zpracovávají lisováním.

Vlastnosti polypropylenové pěny závisí na obsahu uzavřených a otevřených buněk, hustotě pěny, přítomnosti přísad, struktuře a charakteru buněk. Vlastnosti jako měrné teplo a rovnovážné konstanty jsou dány molekulovou hmotností jednotlivých komponent.

K přednostem lehčeného PP patří vynikající mechanické vlastnosti – pružnost, pevnost v tlaku, schopnost velké absorpce energie, výborné akustické a tepelně izolační vlastnosti, odolnost proti chemikáliím, ekologická šetrnost, 100% recyklovatelnost a v neposlední řadě také nízká cena. Tento materiál nejenže snáší teploty až 110 °C, ale splňuje i

estetické nároky na povrch vyráběných dílů. Převážně se využívá v automobilovém průmyslu, ale i ve stavebnictví, potravinářství, obalové technice, hračkářství a nábytkářství [42].

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Sauceau M, Fages J, Common A, et al. New Challenges in Polymer Foaming: A Review of Extrusion Processes Assisted by Supercritical Carbon Dioxide. *Prog. Polym. Sci.*, 2011, 36(6), pp. 749-766
- [2] Sorrentino L, Aurilia M, Iannace S. Polymeric Foams from High-Performance Thermoplastics. *Adv. Polym. Tech.*, 2011, 30(3), pp. 234-243
- [3] Gautam R, Bassi AS, Yanful EK. A Review of Biodegradation of Synthetic Plastic and Foams. *Appl. Biochem. Biotech.*, 2007, 141, pp. 85-108
- [4] Liu H, Chuai C, Iqbal M, et al. Improving Foam Ability of Polypropylene by Crosslinking. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2011, 122(2), pp. 973-980
- [5] Viot P, Beani F, Lataillade JL. Polymeric Foam Behavior under Dynamic Compressive Loading. *J. Mater. Sci.*, 2005, 40(22), pp. 5 829-5 837
- [6] Choi, J. B.; Chung, M. J.; Yoon, J. S. Formation of Double Melting Peak of Poly(propylene-co-ethylene-co-1-butene) during the Preexpansion Process for Production of Expanded Polypropylene. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005, 44, p. 2776
- [7] Tripathi, D. *Practical Guide to Polypropylene*; Rapra Technology Ltd.: Telford, U.K., 2002, pp. 9-10
- [8] Composite [online]. [cit. 2015-09-13]. Dostupné z: <http://composite.about.com/od/Plastics/a/What-Is-Polypropylene.htm>
- [9] Polypropylen [online]. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/polypropylen.aspx>
- [10] <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/8094>
- [11] Development and application of expanded polypropylene foam. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2013, 28, pp. 737-738. DOI: 10.1007/s11595-013-0698-1
- [12] ŠUTA, Miroslav. *Chemické látky v životním prostředí a zdraví*. Brno: ZO ČSOP Veronica, 2008. ISBN 978-80-87308-00-4.
- [13] A Review on Manufacturing, Properties and Expanded Polypropylene. *MIT International Journal of Mechanical Engineering*. 2014, 2014, 4, pp. 22-28. ISSN 2230-7680
- [14] Expanded Polypropylene (EPP) [online]. [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: http://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Polymers/Expanded_Polypropylene_EPP.aspx
http://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Polymers/Expanded_Polypropylene_EPP.aspx

- [15] Foams-Neopolen (EPP) [online]. [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en_GB/portal/show/content/products/foams/neopolen_p_automotive
- [16] Gotsis, A. D., Zeevenhoven, B. L. F., Hogt A. H. *Polymer Engineering and Science*, 2004, 5, pp. 973-982
- [17] Graebing, D. *Macromolecules*, 2002, 12, pp. 4602-4610
- [18] Kurzbeck, S., Oster, F., Munstedt, H. *Journal of Rheology*, 1999, 2, pp. 343-359
- [19] Stange, J., Uhl, C., Munstedt, H. *Journal of Rheology*, 2005, 5, pp. 1049-1059
- [20] Choi, J. B.; Chung, M. J.; Yoon, J. S. Formation of Double Melting Peak of Poly(propylene-co-ethylene-co-1-butene) during the Preexpansion Process for Production of Expanded Polypropylene. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005, 44, 2776
- [21] Park CB, Cheung LK. A Study of Cell Nucleation in the Extrusion of Polypropylene Foams. *Polym. Eng. Sci.*, 1997, 37(1), pp. 1-10
- [22] Li S, Xiao M, Guan Y, et al. A Novel Strategy for The Preparation of Long Chain Branching Polypropylene and the Investigation on Foamability and Rheology. *Eur. Polym. J.*, 2012, 48(2), pp. 362-371
- [23] Stadlbauer M, Ernst E. Polypropylene Foam. EP Patent: 1900764, 2009
- [24] Cheng S, Phillips E, Parks L. Processability Improvement of Polyolefins Through Radiation-Induced Branching. *Radiat. Phys. Chem.*, 2010, 79(3), pp. 329-334
- [25] Yoshiga A, Otaguro H, Parra DF, et al. Controlled Degradation and Crosslinking of Polypropylene Induced by Gamma Radiation and Acetylene. *Polym. Bull.*, 2009, 63(3), pp. 397-409
- [26] YU Liping, ZHU Qiqiang, YU Jiaying. Development and Application of Expanded Polypropylene Foam. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2013, 28(2), pp. 373-379
- [27] Okura T, Kourogl M, Fukui Y, et al. Foam Made from Modified Polypropylene Resin and Process for the Production Thereof. US Patent: 6077878, 2000
- [28] Chaudhary BI, Sengupta SS, Cogen JM, et al. Silane Grafting and Moisture Crosslinking of Polypropylene. *Polym. Eng. Sci.*, 2011, 51(2), pp. 237-246
- [29] Song G, Yang S, Yang C, et al. Foaming Polypropylene Prepared by a Novel One-Step Silane-Grafting and Crosslinking Method. *J. Porous Mater.*, 2006, 13(3-4), pp. 297-301

- [30] Okura T, Kourogil M, Fukui Y, et al. Foam Made from Modified Polypropylene Resin and Process for the Production Thereof. US Patent: 6077878, 2000
- [31] Teh JW, Rudin A, Keung JC. A Review of Polyethylene-Polypropylene Blends and Their Compatibilization. *Adv. Polym. Tech.*, 1994, 13(1), pp. 1-23
- [32] Liu C, Jiang X-L, Liu T, et al. Multifractal Analysis of the Fracture Surfaces of Foamed Polypropylene/Polyethylene Blends. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, 255(7), pp. 4 239-4 245
- [33] Liang JZ, Li RK. Rubber Toughening in Polypropylene: A Review. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2000, 77, pp. 409-417
- [34] Chen YK, Xu CH, Wang YP. Preparation and Properties of Peroxide Dynamically Vulcanized Polypropylene/Ethylene-Propylene-Diene Monomer/Zinc Dimethacrylate Thermoplastic Olefin. *Polym. Eng. Sci.*, 2013, 53(1), pp. 27-33
- [35] Brostow W, Datashvili T, Hackenberg KP. Effect of Different Types of Peroxides on Properties of Vulcanized EPDM + PP Blends. *Polym. Composite.*, 2010, 31(10), pp. 1 678-1 691
- [36] Zhang S, Rodrigue D, Riedl B. Preparation and Morphology of Polypropylene/Wood Flour Composite Foams via Extrusion. *Polym. Composite.*, 2005, 26(6), pp. 731-738
- [37] Bledzki AK, Faruk O. Injection Moulded Microcellular Wood Fibre–Polypropylene Composites. *Compos. Part A-Appl. S.*, 2006, 37(9), pp. 1 358-1 367
- [38] Ding J, Shanguan JA, Ma W, et al. Foaming Behavior of Microcellular Foam Polypropylene/Modified Nano Calcium Carbonate Composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2012, DOI: 10.1002/app.38416
- [39] Zheng WG, Lee YH, Park CB. Use of Nanoparticles for Improving the Foaming Behaviors of Linear PP. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2010, 117(5), pp. 2 972-2 979
- [40] Jiang XL, Liu T, Xu ZM, et al. Effects of Crystal Structure on the Foaming of Isotactic Polypropylene using Supercritical Carbon Dioxide as a Foaming Agent. *J. Supercrit. Fluid.*, 2009, 48(2), pp. 167-175
- [41] PETR, Tomáš. Vliv lehčení na strukturu a výsledné fyzikální vlastnosti kompozitních polymerních pěn. [online]. Zlín, 2013 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/25238><https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/25238>

- [42] PAVEL, Marek. MM Průmyslové spektrum, [online] 2013, č. 1 [cit.2013-02-13]
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-a-aplikace-expandovaneho-polypropylenu.html>
- [43] A new technology to manufacture polypropylene foam sheet and biaxially oriented foam film [online]. ESPOO, 1998 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1998/P361.pdf><http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1998/P361.pdf>
- [44] Double Crystal Melting Peak Generation for Expanded Polypropylene Bead Foam Manufacturing [online]. 2013, 2297–2303 [cit. 2016-04-03]. DOI:
10.1021/ie302625e<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie302625e>
- [45] Borealis AG, Daploy HMS Polypropylene for Foam Extrusion, 2007, Vienna, Austria
- [46] Vstřikování termoplastů [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z:
<http://www.plasticportal.cz/cs/vstrikovani-termoplastu-s-napenovanim-uspory-diky-medode-mucell.html/c/2416><http://www.plasticportal.cz/cs/vstrikovani-termoplastu-s-napenovanim-uspory-diky-medode-mucell.html/c/2416>
- [47] Bureau, M.N., Champagne, M.F. Gendron, R. Impactcompression-Morphology Relationship in Polyolefin Foams. *Journal of cellular plastics*. 2005; 41(1):73-85
- [48] Beverte, I., Deformation of Polypropylene foam Neopolen ® P in compression, *Journal of Cellular Plastics*. 2004, 40(3), pp. 191-204
- [49] Bouix, R. Viot, P. Lataillade, J.L., Polypropylene foam Behaviour under Dynamic Loadings: Strain Rate, Density and Microstructure Effects. *International Journal of Impact Engineering*. 2009, 36(2), pp. 329-342
- [50] Rossacci J, Shivkumar S. Beadfusion in Polystyrene foams. *Journal of materials science*. 2003, 38(2), pp. 201-206
- [51] Stupak PR, Donovan JA. The Effect of Bead Fusion on the Energy Absorption of Polystyrene Foam. Part II: Energy Absorption. *Journal of Cellular Plastics*. 1991, 27(5), pp. 506-513
- [52] Lee ST, Park CB, Ramesh NS. *Polymeric foams: science and technology*. Vol 3: CRC Press; 2006
- [53] Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *International Journal of Impact Engineering* [online]. pp. 455-472 [cit. 2016-05-16]

-
- [54] Marsavina L, Sadowski T, Constantinescu DM, Negru, R. Polyurethane Foams Behaviour. Experiments versus Modeling. Key Engineering Materials. 2009;399:123-130
- [55] Avalle M, Belingardi G, Montanini R. Characterization of polymeric structural foam under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. International Journal of Impact Engineering. 2001, 25, pp. 455-472
- [56] Aplikace [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupné z:
<http://www.dajo.nl/en/applications/protectionpackaging/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AC	Acetát
aPP	Ataktický polypropylen
a_w	Hmotnostní podíl plynu na povrchu bubliny
BaAC	Baryum acetát
DEAD	Diethyl azodikarboxylát
DIAD	Diizopropyl azodikarboxylát
DMAD	Dimethyl acetylendikarboxylát
EB	Radiační síťování elektronovými paprsky
EPP	Expandovaný polypropylen
EPS	Expandovaný polystyren
iPP	Izotaktický polypropylen
JSP	Název firmy
k	Henryho konstanta
LCB PP	Polypropylen s dlouhými větvemi
OBSH	Oxydibenzensulfonyl hydrazid
PE	Polyetylen
p_g	Tlak plynu
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PU	Polyuretan
r^2	Poloměr směsi polymer/plyn
SCF	Plyn v nadkritickém stavu
sPP	Syndiotaktický polypropylen

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Základní jednotka polypropylenu</i>	11
<i>Obr. 2 Molekulární struktura polypropylenu</i>	12
<i>Obr. 3. EPP v automobilu [15]</i>	14
<i>Obr. 4 Schéma zařízení pro lehčení kompozitů s využitím Sc-CO₂</i>	19
<i>Obr. 5 Bublina a difúze plynu v polymeru [43]</i>	21
<i>Obr. 6 Vytlačování pěny [45]</i>	23
<i>Obr. 7 Koncepce zařízení pro metodu vstřikování pěny MuCell [43]</i>	24
<i>Obr. 8 Morfologie EPP [53]</i>	26
<i>Obr. 9 Dvojitý pík tání lehčeného polypropylenu[43]</i>	27
<i>Obr. 10 Lehčený polypropylen [56]</i>	28

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1</i> Nejběžnější chemická nadouvadla [11].....	20
--	----