



Aplikovatelnost technologie mikrobuněčného vstřikování pro termoplastické materiály

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Vojtěch Rajnoha**
Vedoucí práce: Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Rajnoha**
Osobní číslo: **S17000116**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Aplikovatelnost technologie mikrobuněčného vstřikování pro termoplastické materiály**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

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

1. Obecný rozbor problematiky termoplastických materiálů a mikrobuněčného vstřikování.
2. Rozbor problematiky mikrobuněčného vstřikování termoplastických materiálů.
3. Návrh experimentálního měření.
4. Realizace mikrobuněčného vstřikování pro vybranou skupinu termoplastických materiálů.
5. Hodnocení mikrobuněčné struktury a jejího vlivu na mechanické vlastnosti.
6. Diskuze výsledků a závěr.

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

Seznam odborné literatury:

- [1] HEIM, H. P. *Specialized Injection Molding Techniques*. 1st Edition, William Andrew Oxford, UK, 2013. ISBN 978-0-323-34100-4.
[2] JINGYI, X. *Microcellular Injection Molding*. Wiley, Jon Wiley&sons, New Jersey, Canada, 2010. ISBN 978-0-470-46612-4.
[3] ROSATO, D. V., ROSATO, M. G. *Injection Molding Handbook*. Springer Science+Business Media New York, USA, 2000. ISBN 978-1-4615-4597-2.
[4] MARTINEZ K. L. *Microcellular Injectionmolding of Polypropylenes Containing Nucleating Agents*. Universtiy of Wisconsin, Madison, USA, 2010. p. 240.

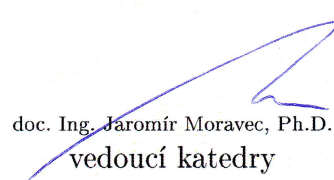
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **27. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27. ledna 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




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

V Liberci dne 27. října 2017

Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum:

Podpis:



Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Pavlu Brdlíkovi, Ph.D. za odborné vedení a čas, který mi věnoval při psaní této práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a pomoc.





Aplikovatelnost technologie mikrobuněčného vstřikování pro termoplastické materiály

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá vstřikováním termoplastických materiálů za pomoci technologie MuCell, namísto konvenčního vstřikování. Hodnocení aplikovatelnosti probíhalo na dvou procesních variantách. Posuzována byla vzniklá struktura vzhledem k úspoře hmotnosti a změně mechanických vlastností.

Klíčová slova:

Vstřikování, termoplasty, strukturní pěny, MuCell

Applicability of Microcellular Injection Molding for Thermoplastic Materials

Annotation

This bachelor thesis deals with injection molding of thermoplastic materials using MuCell technology instead of conventional injection molding. Appraisal assessment was conducted in two process variants. The resulting structure was judged in terms of weight saving and mechanical properties.

Keywords:

Injection molding, thermoplastic, structural foam, MuCell





1	Úvod.....	9
2	Teoretická část	10
2.1	Technologie vstřikování.....	10
2.2	Vstřikování strukturních pěn.....	11
2.2.1	Použití chemických nadouvadecí	11
2.2.2	Použití způsobu fyzikálního nadouvání (Mikrobuněčné vstřikování).....	11
2.3	Obecné rozdělení plastů	16
2.4	Materiály a technologie mikrobuněčného vstřikování.....	18
2.4.1	Polypropylen (PP).....	19
2.4.2	Polyamid (PA)	20
2.4.3	Polyethylen (PE)	21
2.4.4	Akrylonitril-butadien Styren (ABS)	22
2.4.5	Polykarbonát (PC).....	22
2.4.6	Polystyren (PS)	23
3	Experimentální část.....	24
3.1	Volba materiálu.....	24
3.2	Realizace mikrobuněčného vstřikování	25
4	Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.....	28
4.1	Stanovení úspory hmotnosti.....	28
4.2	Mikrobuněčná struktura	29
4.3	Stanovení mechanických vlastností ze zkoušky v tahu.....	31
4.3.1	Stanovení modulu pružnosti v tahu	31
4.3.2	Stanovení pevnostních a deformačních charakteristik tahovou zkouškou	32
4.4	Stanovení modulu pružnosti v ohybu.....	34
4.5	Stanovení pevnostních charakteristik ohybovou zkouškou	35
4.6	Stanovení vrubové houževnatosti	35
4.7	Stanovení tvrdosti.....	37
5	Závěr	38
	Použitá literatura.....	40





Seznam zkratek a symbolů

Zkratka / symbol	Vysvětlení	Jednotka
MuCell	Mikrobuněčné vstřikování plastů (Microcellular Foam Molding)	
SFC	Superkritická tekutina (supercritical fluid)	
PS	Polystyren	
PMMA	Polymethylmetakrylát	
PC	Polykarbonát	
PE	Polyetylen	
PP	Polypropylen	
PA	Polyamid	
PTFE	Polytetrafluorethylen	
POM	Polyoxymethylen	
PE-HD	Vysokohustotní polyetylen (High density polyethylene)	
PE-LD	Nízkohustotní polyetylen (Low density polyethylene)	
PE-MD	Středněhustotní polyetylen (Middle density polyethylene)	
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	
UV	Ultrafialové	
E_f	Modul pružnosti v ohybu	[MPa]
E_t	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
a_{cu}	Rázová houževnatost Charpy	[kJ/m ²]





1 Úvod

V dnešní době jsou termoplasty běžně užívané materiály a to zejména díky jejich dostupnosti, snadnému zpracování, nebo recyklovatelnosti. Existuje jich celá řada, přičemž jejich vlastnosti závisí zejména na vstupních surovinách a kvalitě jejich zpracování. Je možné je používat jak v „čistém“ stavu tak se do nich přidávají různá plniva pro úpravu mechanických i chemických vlastností. Díky jejich velkému množství se používají téměř ve všech oblastech výroby, ať už jako konstrukční materiály tak i jako izolační materiály.

Mezi jednu z nejpoužívanějších technologií zpracování termoplastů patří vstřikování. V dnešní době již dochází ke vstřikování velmi tvarově složitých dílů, přičemž jsou neustále navyšovány nároky na přesnost a tvarovou stálost výrobku, společně s dobrou kvalitou povrchu. Kvůli zvyšujícím se nárokům jsou ve výrobě zaváděny nové metody vstřikování, které se od konvenčního vstřikování liší. Cílem těchto metod je především zlepšení kvality výsledného výrobku nebo zvýšení ekonomičnosti výroby. Jednou z těchto metod je technologie MuCell, díky které můžeme odstranit velké množství vad, jež vznikají při konvenčním vstřikování. Hlavní rozdíl spočívá v použití fyzikálního nadouvadla, které je do taveniny přidáváno v tavicí komoře v podobě superkritického média (SFC), přičemž je vytvořena jednofázová směs. Po vstřiku této směsi do formy dochází, díky rovnoměrně rozloženému tlaku uvnitř taveniny, ke kompenzaci smrštění výrobku a tím je zaručena větší rozměrová stálost. Další výhodou této metody je odlehčení výsledného výrobku díky vzniklým kavitám a tedy výrazná finanční úspora.

Cílem této práce je vyhodnocení možnosti použití mikrobuněčného vstřikování pro termoplasty. Vyhodnocení probíhá s ohledem na vytvořenou mikrobuněčnou strukturu při dvou různých procesních variantách (bez dotlaku, s 5s dotlakem). Zkoumána je změna mechanických vlastností s ohledem na úbytek hmotnosti.

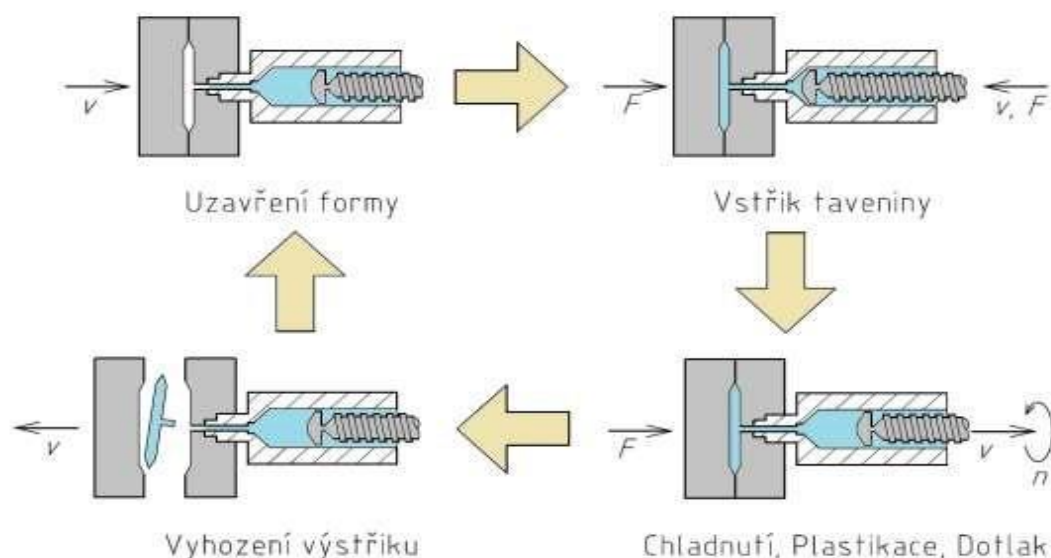


2 Teoretická část

Teoretická část je s ohledem na řešenou problematiku rozdělena do dvou hlavních okruhů, přičemž v první části je rozebrána problematika vstřikování strukturálních pěn a v druhé části jsou popsány materiály vhodné pro mikrobuněčné vstřikování.

2.1 Technologie vstřikování

Proces vstřikování je termodynamický, cyklický děj při, kterém dochází k natavení materiálu a jeho následném vstříknutí do formy pod vysokým tlakem. Celý tento proces je rozdělen do několika základních fází (viz obr. 1).



Obr. 1 Fáze vstřikování [1]

První výrobní fázi je plastifikace materiálu. V této části cyklu se surovina, zpravidla granulát, taví a homogenizuje. Další fází je proces vstřikování již plastifikovaného materiálu do formy, při kterém dojde k vyplnění dutiny formy, přičemž potřebný vstřikovací tlak je závislý hlavně na viskozitě taveniny a složitosti formy. Následuje fáze dotlaku, kdy při současném chladnutí výstřiku je dotlačována tavenina pro kompenzaci smrštění materiálu způsobené chladnutím. Operace chlazení je časově nejnáročnější částí procesu. Po dostatečném ochlazení výrobku v dutině formy dochází k odformování produktu a jeho následnému vyhození z formy. [1]





2.2 Vstřikování strukturních pěn

Mezi technologiemi vstřikování existuje velké množství technologií, které mají za účel zefektivnit proces výroby, zlepšit kvalitu dílů či snížit jejich hmotnost. Jednou z těchto technologií je vstřikování strukturních pěn, kterou můžeme rozdělit do dvou základních kategorií. První z nich je vstřikování s použitím chemického nadouvadla. Při druhém způsobu tvorby porézní struktury je aplikován fyzikální způsob, kde je používán nejčastěji dusík nebo oxid uhličitý.[2]

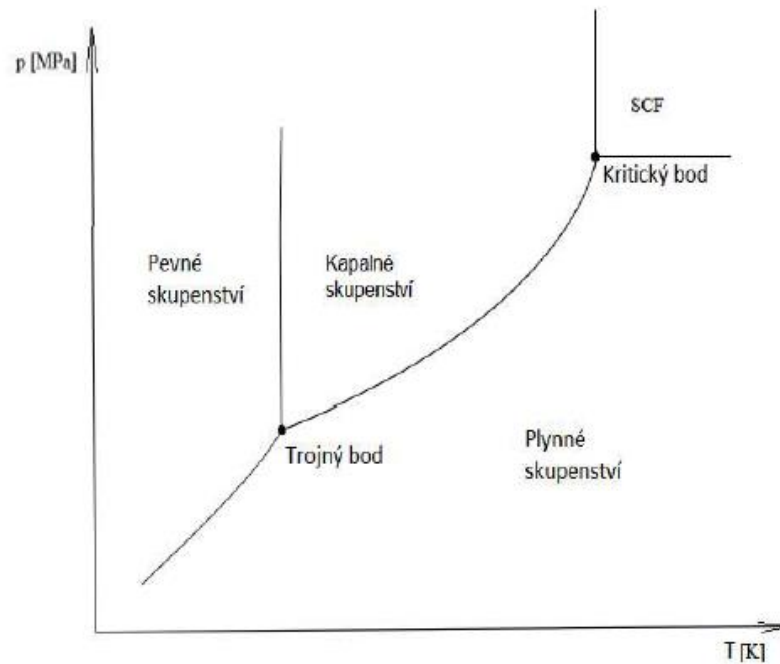
2.2.1 Použití chemických nadouvadla

Chemická nadouvadla se v důsledku zpracování, zvýšení teploty, rozkládají na plyn, díky čemuž je dosaženo tvorby kavit ve výrobku a tím následné pórovitosti, díky které dojde k odlehčení výrobku. Tyto nadouvadla jsou přidávána již do granulátu před samotným začátkem procesu. Hlavní výhodou tohoto způsobu je možnost použití konvenčních vstřikovacích strojů a nízká cena. Nevýhodou je pak nehomogenní pórovitost výrobku, z důvodu velikosti a nerovnoměrnosti distribuce kavit, díky čemuž jsou pak docíleny velmi nízké mechanické vlastnosti produktů.[2]

2.2.2 Použití způsobu fyzikálního nadouvání (Mikrobuněčné vstřikování)

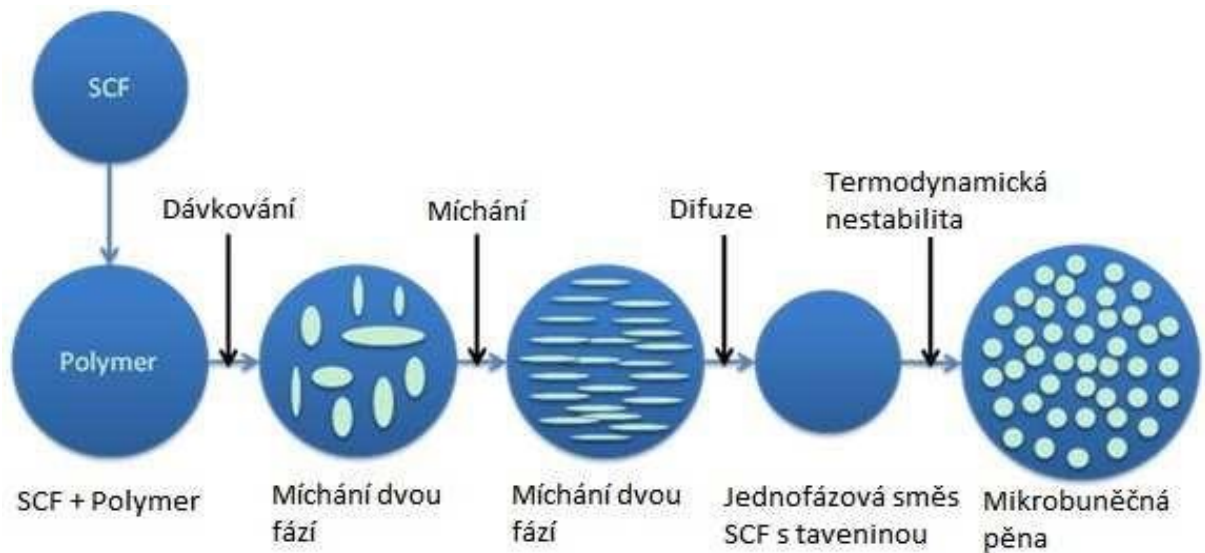
Počátky technologie mikrobuněčného vstřikování a tím i technologie MuCell (Microcellular Foam Molding) je datováno ke konci 80. let. První způsob mikrobuněčného vstřikování byl vyvinut na Massachusetts Institute of Technology. Principem této technologie je vstřikování stlačeného plynu v superkritickém stavu (SCF – supercritical fluid) do taveniny ještě před samotným vstřikováním. Nejčastěji používaným plynem je dusík (N_2). Dále se v menším množství používá též oxid uhličitý (CO_2). Obě látky se používají v tzv. superkritickém stavu (viz obr. 2), to znamená, že teplota i tlak jsou za kritickým bodem. SCF mají tedy hustotu podobnou kapalinám, ale viskozitou se blíží spíše plynům. Díky těmto vlastnostem dochází při míchání ke snadnější homogenizaci.[3, 4]





Obr. 2 Fázový diagram [5]

Technologie MuCell dále vyžaduje speciálně upravenou vstřikovací jednotku která je oproti běžné jednotce vybavena speciálním vybavením pro dávkování plynu do taveniny. Další důležitou úpravou je pak pozměnění šneku, popsané v následující kapitole, který musí být uzpůsoben pro dokonalé promísení polymeru s plynem. Pro udržení superkritického stavu je nutné v tavící komoře udržovat neustále velmi vysoký tlak (cca 20 MPa). Průběh difuze je znázorněn na obr. 3.

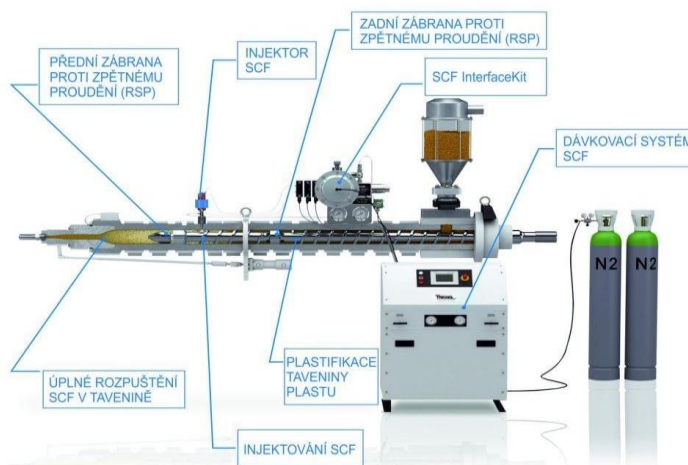


Obr. 3 Difuze plynu v tavenině [6]

Po docílení jednofázového promísení následuje plnění kavit, kde dochází k poklesu tlaku v tavenině, následkem čehož dochází k expanzi plynu, a následně tvorbě zárodků bublinek. Ideálního stavu by bylo docíleno rovnoměrným rozmístěním bublinek v celém průřezu dílu, čehož se v praxi nedá dosáhnout z důvodu rychlejšího ochlazení při kontaktu taveniny s formou. Nukleační podmínky ani podmínky růstu kavit tedy nejsou v celém průřezu shodné. V jádře produktu, vlivem vyšších teplot, zpravidla kavity vykazují vyšších rozměry než tomu je na opačné straně, kde vlivem rychlého ochlazení produktu může být docíleno úplnému zamezení jejich tvorbě a růstu. U této technologie není zapotřebí aplikace dotlaku, jelikož expanze plynu působí rovnoměrným tlakem ve všech částech dílu. [3, 7]

2.2.2.1 Vybavení pro technologii MuCell

V předchozí kapitole bylo zmíněno, že pro technologii MuCell je třeba použít speciální vstřikovací jednotky pro zajištění hladkého procesu přípravy taveniny společně s přesným dávkováním SCF. Samostatnou částí je připojená jednotka vytvářející SCF, ke které je připojen zásobník plynu (nejčastěji tlakové lahve). Samotné stroje pro technologii MuCell je možné realizovat dvěma způsoby. Jednou z možností je zakoupení kompletního vstřikovacího stroje, který byl vyroben speciálně pro technologii MuCell (viz obr. 4). Druhá možnost je uplatňována, zejména pokud již vlastníme konvenční vstřikovací stroj a spočívá ve výměně vstřikovací jednotky. Tato možnost je však často velmi složitá z důvodů odlišností vstřikovacích jednotek. [8]

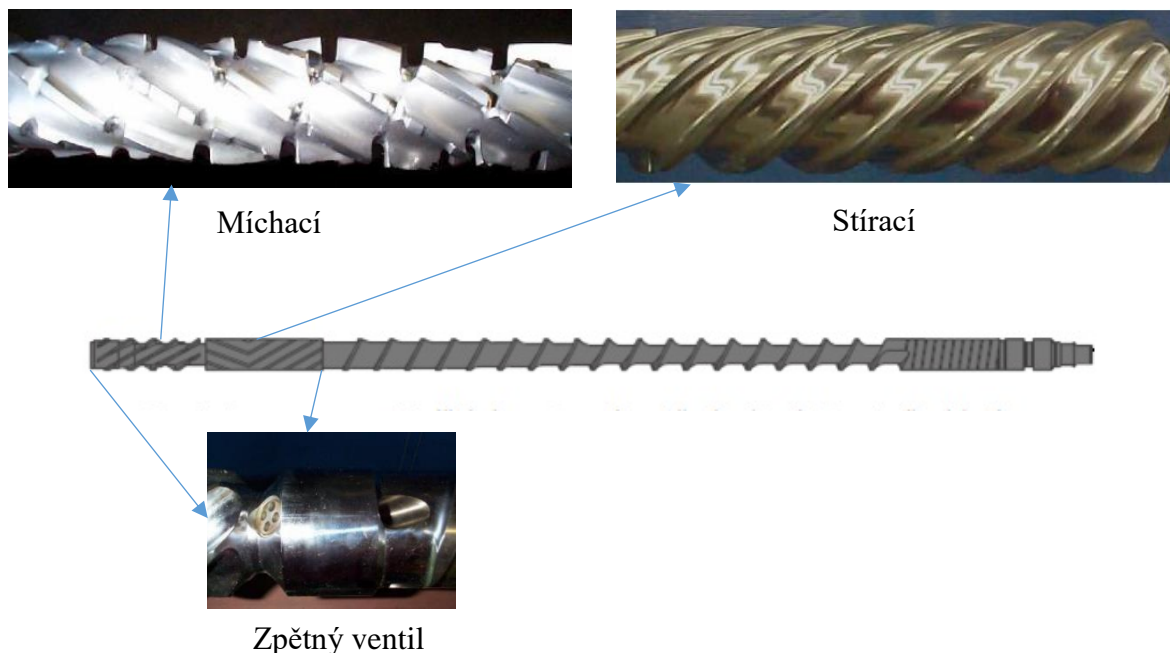


Obr. 4 Vstřikovací jednotka pro technologii MuCell [7]



Dalším podstatným rozdílem oproti konvenčnímu vstřikování je pak vlastní konstrukce šneku, který oproti běžně používanému šneku obsahuje speciální stírací a míchací část (viz obr. 5). Tyto části zajišťují homogenní rozptýlení SCF v tavenině.

Stírací část rozděljuje dávku SCF, která byla dopravena do komory, na co nejvíce fragmentů, které se následně mohou v polymeru rozpouštět efektivněji. Po průchodu stírací částí šneku je směs stále ještě dvoufázová, neboť stále obsahuje oddělený polymer a SCF. Míchací část jak už název napovídá, zajišťuje intenzivní promíchání polymeru a SCF. Stejně jako stírací část je tvořena šroubovicí, ale má vyšší stoupání závitu spolu s vybroušenými drážkami na vnějším průměru závitu. Díky této části dojde k velmi intenzivnímu promísení polymeru a SCF, čímž dochází k vytvoření jednofázové směsi. Poslední neméně důležitou částí šneku jsou zpětné ventily (viz obr. 5) a kroužky. První můžeme nalézt před stírací částí, kde zamezuje vracení směsi, která je již velmi stlačená, směrem k násypce. Druhý zpětný ventil pak nalezneme za míchací částí. Tento odděluje již promísenou jednofázovou směs, která je připravena pro vstřik, od ještě nedokonale promísené dvoufázové směsi v míchací oblasti. Z důvodu nutnosti udržování vysokého tlaku v komoře šneku je nutná i přítomnost uzavíratelné vstřikovací trysky, která se otevře jen po nezbytně dlouhou dobu pro vstřikování. [7, 8]

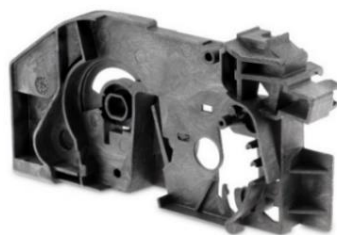


Obr. 5 Konstrukce šneku [7, 8]

2.2.2.2 Výhody a nevýhody technologie MuCell

Technologie MuCell přináší oproti konvenčnímu vstřikování řadu odlišností, které jsou sepsány v následujících bodech.

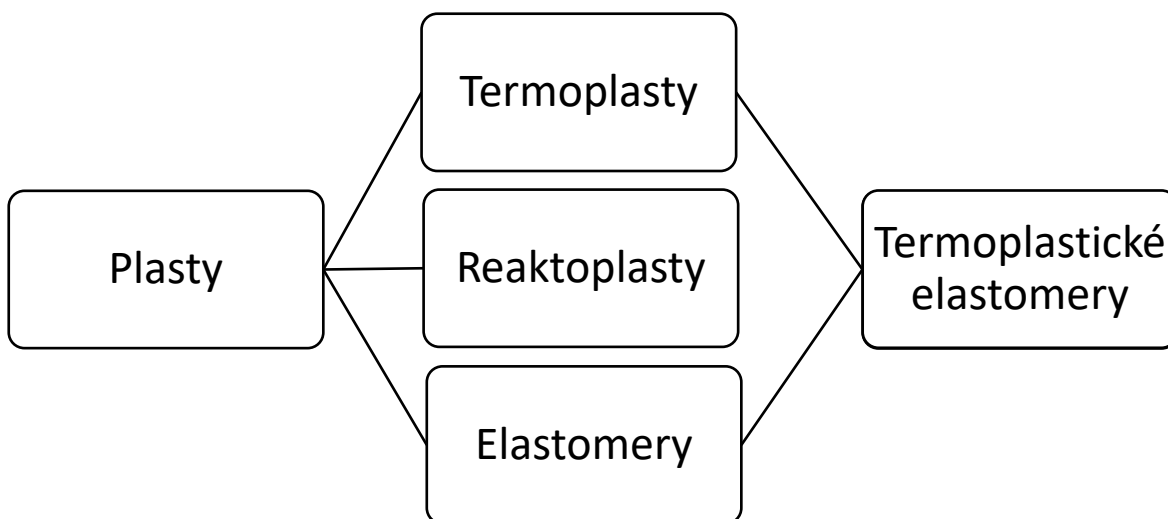
- Hmotnost výsledného výrobku je jednou z hlavních předností technologie MuCell. Díky mikrobuněčné struktuře dochází ke značné úspoře materiálu a tedy ke snížení pořizovacích nákladů na vstupní suroviny. Výsledné snížení hmotnosti se dle společnosti Trexel běžně pohybuje do 30%, přičemž ve speciálních případech je možné dosáhnout snížení hmotnosti až o 40% při zachování dobrých mechanických vlastností [7]
- Vnitřní napětí ve výrobku je v případě technologie MuCell značně redukováno. Díky expanzi bublinek je dosaženo kompenzace smrštění plastu a díky rovnoměrnosti vnitřního tlaku dochází k výraznému snížení vnitřního napětí.[7]
- Doba výrobního cyklu je proti konvenčnímu vstřikování zpravidla kratší o (20 až 50%).[9]
- Vyšší zabíhavosti směsi díky přítomnosti SCF. [8]
- Další výhodou je vyšší rozměrová přesnost výrobku, díky rovnoměrné expanzi SCF (bezdotlaková technologie)
- Hlavní nevýhodou této technologie je pak kvalita povrchu, kde se při běžných podmínkách objevují vzduchové šmouhy (viz obr. 14), které jsou způsobeny uvolněním plynu z taveniny před kontaktem s povrchem formy. Díky této vlastnosti se tato technologie využívá převážně na nepohledové díly. Tuto vadu lze odstranit použitím speciální temperované formy, která však zvyšuje celkové náklady. Další možností je použití sendvičového vstřikování.
- Posledním významným rozdílem je použitelnost u tenkostěnných dílů, kde není technologie MuCell díky rychlému ochlazení příliš vhodná.



Obr. 6 Vzduchové šmouhy vzniklé na povrchu dílu [10]

2.3 Obecné rozdělení plastů

Plasty jsou materiály, jejichž podstatou jsou makromolekulární látky, které mohou být přírodní či syntetické. Mohou být děleny podle mnoha hledisek, přičemž pro účel této práce je nejvhodnější zvolit rozdělení na základě jejich chování za zvýšené teploty. Podle tohoto rozdělení jsou děleny běžně do tří hlavních skupin (viz obr. 7).



Obr. 7 Rozdělení plastů [11]

Jak již z názvu vypovídá, tak termoplasty jsou plasty tavitelné teplem. Působením zvýšené teploty dochází k jejich měknutí a mohou být zpracovány např. technologií tvarování. Při dalším zvyšování teploty, kdy je dosažen bod tání, se materiál dostává do viskózního stavu a je ho v této formě možné zpracovat technologií vstřikování. Následným ochlazením dojde k tuhnutí, přičemž nedojde ke ztrátě původních vlastností daného materiálu. Teoreticky je tedy možné tento proces nekonečněkrát opakovat. Termoplasty jsou složeny z vláknitých makromolekul (viz obr. 8a) a mezi typické příklady termoplastů patří polyvinylchlorid, polystyren, polypropylen či polyester a mnoho dalších.

Dalším zástupcem plastů jsou reaktoplasty, které byly dříve nazývané jako duroplasty či termosety. Tento druh plastu je teplem vytvrditelný, přičemž po vytvrzení je již není možné dále tepelně zpracovávat. Pokud dochází po jejich vytvrzení k nadměrnému zahřívání, tak degradují. Hlavní způsob zpracování je vstřikování a lisování, kdy ve formě za působení tepla dojde k reakci chemické povahy - zesíťování (viz obr. 8b). Typičtí zástupci reaktoplastů jsou fenoplasty, epoxidy či polyuretany.

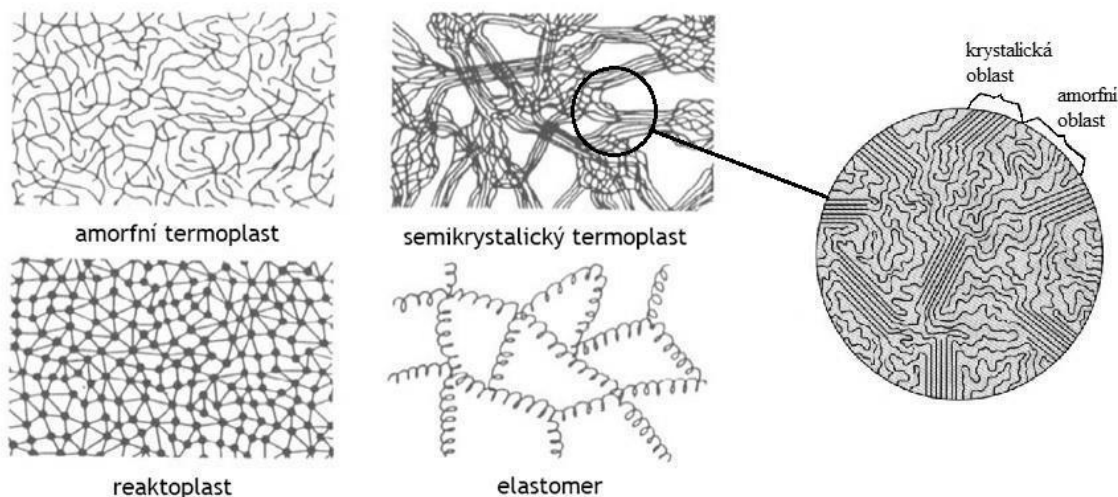




Obr. 8a Vlákenná makromolekula [12] Obr. 8b Zesíťování reaktoplastů [12] Obr. 8c Zesíťování elastomerů [12]

Poslední základní skupinou jsou elastomery, jak již z názvu vyplývá, mající elastické vlastnosti, které nejsou z velké části závislé na teplotě. Typickým představitelem této skupiny jsou kaučuky, využívající se k výrobě pryží. Vyráběny jsou za pomoci procesu vulkanizace, při kterém dochází k vytvoření chemických vazeb mezi makromolekulami (viz obr. 8c).

Dalším možným dělením plastů je dle jejich nadmolekulární struktury, která je nadřazená makromolekulární struktuře. Podle tohoto se pak plasty dělí na amorfnní a krystalické (semikrystalické) viz obr. 9. U amorfnních plastů jsou makromolekuly rozmístěny v náhodných pozicích. Jejich charakteristické vlastnosti jsou tvrdost, křehkost, vysoká pevnost a díky nízkému indexu lomu světla jsou čiré nebo i průhledné. Jejich použitelnost je až do teploty zesíťování. Mezi typické druhy patří PS, PMMA, PC apod. Oproti tomu semikrystalické plasty mají již částečně uspořádanou strukturu, která se označuje jako stupeň krystalinity a pohybuje se mezi (40-90)%. Je vyjádřen jako relativní podíl uspořádaných oblastí a oblastí amorfnních. Jejich index lomu je větší a bývají proto mléčně zakalené. Jsou typické svojí houževnatostí, pevností a modul pružnosti se zvyšuje se zvyšující se úrovní krystalinity. Jejich využití je až do teploty tání a charakterističtí zástupci této skupiny jsou: PE, PP, PA, PTFE, POM, atd.



Obrázek 9 Nadmolekulární struktura [13]

2.4 Materiály a technologie mikrobuněčného vstřikování

Tvorba mikroporézní struktury je ovlivněna velikostí dávky, teplotou taveniny, dekompresí, časem vstřikování, časem a úrovní dotlaku, teplotou a časem temperace/chlazení, aj. Každopádně utvářená struktura je z velké části vymezena schopností plynu difundovat, rozpouštět se a nukleovat v použitém polymeru. Je-li porovnána rozpustnost plynu u amorfních (PS, PMMA) a semikrystalických polymerů (PE, PP), z tab. 1. je zřejmé, že hodnoty semikrystalických materiálů vyznačují více jak dvou-násobným, množství (dávkou) saturovaného N₂. To je důvod proč polyolefinové materiály vyžadují výrazně vyšší množství (dávky) plynu pro docílení dobré struktury, než většina ostatních materiálů. Polymerní materiály nejsou standardně používány v průmyslové praxi v čisté podobě, nýbrž velmi často jsou do nich přidávány rozličné přísady. Jedny z velmi často používaných přísad jsou například skelná vlákna či minerální plnivo – talek. Přidání těchto přísad do základního materiálu snižuje nezbytnou úroveň plynu (nadouvadla) potřebného k docílení dobré struktury.

Tabulka 1 Henryho konstanta pro nasycení polymeru N₂

Materiál	H [cm ³ (STP)/g·atm]
Polypropylen	0,133
Polyetylene	0,111
Polystyrene	0,049
Polymethylmetakrylát	0,045



Další kritickou výrobní částí je nukleace. Pro docílení dobrých mechanických vlastností je nezbytné dosažení rovnoměrné mikrobuněčné struktury, a tedy tvorby velkého počtu nukleačních zárodků. U semikrystalických materiálů nejsou podmínky tvorby zárodků, v průběhu jejich solidifikace (homogenní nukleace), tak výhodné jako u materiálů amorfních. Existují však možnosti, jak zlepšit jejich nukleační schopnost. Jednou z možností je přidání aditiv (výztuže, plniva), které v základním materiálu vytvářejí heterogenní zárodky a zlepšují tak tvorbu výsledné struktury.

Konečnou výrobní fází procesu mikrobuněčného vstřikování je růst kavit (cel), jež je ukončen za podmínek, kdy je viskozita polymeru vyšší než tlak nezbytný k expanzi. V této části procesu jsou určujícím faktorem podmínky „solidifikace“ produktu. Rychlá „solidifikace“ (intenzivní chlazení) zapříčiní tvorbu velmi malých kavit. Naopak je-li aplikováno pomalejší (méně intenzivní chlazení) mají kavity dostatečný čas k růstu a hrozí zde proto vyšší riziko jejich propojování (koalescence) a aglomeraci. Nicméně i materiálové hledisko je velmi významné. Semi-krystalické materiály jsou dvou-fázové systémy, kde při tvorbě krystalické struktury dochází k uvolňování tepelné energie a uvolnění plynu jako nadouvadlo. Tato skutečnost má negativní efekt na rovnoměrnost mikrobuněčné struktury.

2.4.1 Polypropylen (PP)

Polypropylen patří do skupiny polyolefinů, jež je největší skupinou plastů. Jejich rozšíření zajišťuje široký rozsah vlastností a snadná dostupnost výchozích surovin. Nemodifikovaný PP vykazuje relativně vysokou tvrdost, pevnost v ohybu a dobrou chemickou odolností. Základní rozsah použitelnosti je mezi (0-100)°C krátkodobě je možné však tyto teploty nepatrně překročit. Vyskytuje se mnoho druhů ať už jako homopolymer, kopolymer. V praxi se pak velmi často používají plniva. Běžně se používají skelná vlákna, která velmi výrazně zvyšují mechanické vlastnosti (obr 10).

Obecně se neplněný homo-PP pro mikrobuněčné vstřikování nedoporučuje, z důvodu špatné kvality struktury. Samotný homo-PP je charakteristický nízkými mechanickými vlastnostmi, které s mikrobuněčnou strukturou dále výrazně klesají. I přesto je možné najít některé aplikace u produktů s nízkými nároky na mechanické vlastnosti. Redukce hmotnosti dílu by neměla přesahovat 10-15% z důvodu rychle se zhoršujících mechanických vlastností. [14, 15]





Obrázek 10 Příklady výrobků z polypropylenu [14]

2.4.2 Polyamid (PA)

Polyamidy patří mezi semikrystalické termoplasty. Jsou charakteristické svým řetězcem, kde se střídají amidové skupiny s větším počtem methylenových skupin. Obecně mají vysokou houževnatost, tvrdost a dobrou odolnost proti oděru. Mechanické vlastnosti jsou však závislé na typu polyamidu (PA 6, 66, 610...) viz obr. 11. Čísla charakterizují výchozí monomery. Například PA 66 obsahuje 6 atomů vodíku a 6 atomů uhlíku. Díky svému chemickému složení velmi snadno přijímají vodu. Proto všechny polyamidy vyžadují dodatečné sušení při dostatečné teplotě.

Nedokonalé vysušení může zapříčinit vznik vodní páry při vstřikování a tím může dojít ke vzniku velkých buněk při mikrobuněčném vstřikování. Jinak je však PA pro mikrobuněčné vstřikování velmi vhodný. Ukazuje se, že unifikovaný materiál s mikrobuněčnou strukturou má velikost buněk standardně cca 40 μ m. U neplněného polyamidu jsou však stěny mezi kavitami natolik tenké že může docházet k jejich koalescenci. Lepší je proto používat materiál vyztužený například skelnými vlákny. [14, 15]



Obrázek 11 Příklady výrobků z polyamidu [14]

2.4.3 Polyethylen (PE)

Polyethylen je široce používaný semikrystalický materiál. Vlastnosti jsou značně závislé na molekulové struktuře, která je ovlivněna způsobem výroby. Typem výroby je možné získat mnoho různých typů PE (PE-HD, PE-LD, PE-MD, a další). Je nepolární a tím pádem nenavlhavý plast, velmi dobře odolává nepolárním rozpouštědlům, kyselinám a solím. Pevnostní charakteristiky jsou však nejnižší z běžně používaných termoplastů. Proto se nepoužívá pro konstrukční aplikace. [14, 15]

Polyethylen je však široce používaný materiál v oblasti strukturních pěn. Nejpoužívanější jsou pak PE-HD a PE-LD. Avšak pokud jsou neplněné, vykazují obdobné vlastnosti stejné jako neplněný PP. Je u nich obtížné vytvořit mikrobuněčnou strukturu, proto je nutné používat plniva, která výrazně zlepšují použitelnost pro mikrobuněčné vstřikování.



Obrázek 12 Příklady výrobků z Polyethylenu [14]

2.4.4 Akrylonitril-butadien Styren (ABS)

Materiál vzniká kopolymerací akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Díky akrylonitrilové složce je zvýšena chemická odolnost, butadienová složka pak zvyšuje houževnatost. Taktéž velmi dobře odolává elektrostatickému náboji a díky obsaženému kaučuku výborně tlumí hluk. Je využíván jako konstrukční plast v mnoha průmyslových odvětvích a proto praxi výrobci nabízejí více než 50 typů ABS (viz obr. 13).

Celkově se ABS pro mikrobuněčné vstřikování velmi hodí, jelikož je složen ze tří různých materiálů. Hlavním určujícím faktorem při mikrobuněčném vstřikování je velikost pryžových částic rozptýlených v ABS. [14, 15]



Obrázek 13 Příklady výrobků z ABS [14]

2.4.5 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je amorfni, dokonale průhledný termoplast, který má dobré mechanické vlastnosti, vysokou tvrdost a odolnost proti lomu. Teplotně stabilní až do 135°C. Je však částečně polární a proto je náchylný k navlhavosti. Díky jeho výborným optickým vlastnostem se využívá pro výrobu čoček, bočních a zadních oken u vozidel. Výjimkou není ani použití jako materiálu pro nárazníky, například u vozidel, Cadillac nebo Mercedes.

Jelikož se jedná o amorfni materiál je pro mikrobuněčné vstřikování vhodný. Má schopnost rozpouštět velké množství plynu do volného objemu, při nízké teplotě. Při mikrobuněčném vstřikování polykarbonátu je nutné dbát na odstranění vlhkosti z materiálu. Při nedostatečném vysušení voda chemicky reaguje a snižuje molekulovou hmotnost což má za následek snížení houževnatosti a rázové pevnosti. Dále je nutné dbát na dostatečné vyčištění stroje po vstřikování, jelikož tavenina PC může silně přilnout ke kovu a poté po ochladnutí z důvodu smršťování může docházet k „odtrhání“ kusů kovu ze stroje. [14, 15]





Obrázek 14 Příklady výrobků z polykarbonátu [14]

2.4.6 Polystyren (PS)

Styrenové polymery jsou v celosvětové produkci na třetím místě. Jedná se o amorfnní termoplasty, můžeme je rozdělit do několika podskupin. Standartní (homopolymer styrenu) který je lesklý, průzračný ale křehký. Dalším pak jsou lehčené produkty zpěňované nadouvadlem, používají se jako izolační materiály. Poslední jsou houževnaté plasty s nižší křehkostí, ty však již nejsou průhledné (viz obr. 15). Samotný polystyren je typický svým vysokým leskem a výbornými elektroizolační vlastnosti. Je však použitelný jen do 75°C. Při vystavení UV paprskům dochází k jeho žloutnutí a křehnutí.

Polystyren je obecně jedním z nejpoužívanějších materiálů pro mikrobuněčné vstřikování. Obecně je možné říci, že PS tvoří dobrou mikrobuněčnou strukturu bez ohledu na způsob její tvorby. Avšak při použití plynu dusíku můžeme pozorovat jeho nižší rozpustnost než u oxidu uhličitého. Rychlost difuze je však u obou plynů stejná. [14, 15]



Obrázek 15 Příklady výrobků z polystyrenu [14]



3 Experimentální část

Cílem experimentální části práce byla detekce aplikovatelnosti technologie mikrobuněčného vstřikování pro termoplastické materiály. Aplikovatelnost technologie mikrobuněčného vstřikování byla posuzována pomocí utvářené struktury a jejího vlivu na mechanické vlastnosti dílů.

3.1 Volba materiálu

Z široké škály používaných termoplastických materiálů (viz kap. 2.4) byly pro ověření aplikovatelnosti technologie mikrobuněčného vstřikování vybrány tři zástupci termoplastických materiálů, které se vzájemně liší nadmolekulární strukturou (semikrystalické, amorfní) a obsahem aditiv. Skupinu semikrystalických materiálů zastupuje materiál polypropylen a to kopolymer PP Sabic CX03-81 (Tab. 2). Použitým amorfním materiálem byl ABS Magnum 3616 (Tab. 4.). Pro zjištění vlivu aditiv na tvorbu mikrobuněčné struktury byl opět použit semikrystalický polypropylen, tentokrát vyztužený 30% skelných vláken, jednalo se o materiál PP Sabic G3230A (Tab. 3)

Tabulka 2 Vybrané vlastnosti PP SABIC CX03-81

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Norma
Index toku taveniny, MFI	10	g/10 min	ISO 1133
Doporučená teplota taveniny	210-270	°C	-
Doporučená teplota předehřevu formy	15-60	°C	-
Napětí při přetržení	21	MPa	ISO 527-1/-2
Prodloužení při přetržení	>50	%	ISO 527-1/-2
Ohybový modul, 23°C	1250	MPa	ISO 178
Hustota	905	Kg/m ³	ISO 1183





Tabulka 3 Vybrané vlastnosti PP SABIC G3230 A

POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A			
Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Norma
Index toku taveniny, MFI	11	g/10 min	ISO 1133
Doporučená teplota taveniny	200-260	°C	-
Doporučená teplota předehřevu formy	20-60	°C	-
Napětí při přetržení	93	MPa	ISO 527-1/-2
Prodloužení při přetržení	3	%	ISO 527-1/-2
Ohybový modul, 23°C	6900	MPa	ISO 178
Hustota	1120	Kg/m ³	ISO 1183

Tabulka 4 Vybrané vlastnosti ABS MAGNUM 3616

ABS MAGNUM 3616			
Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Norma
Index toku taveniny, MFI	5,5	g/10 min	ISO 1133
Doporučená teplota taveniny	240-270	°C	-
Doporučená teplota předehřevu formy	40-70	°C	-
Napětí na mezi kluzu	38	MPa	ISO 527-1/-2
Deformace na mezi kluzu	3	%	ISO 527-1/-2
Ohybový modul, 23°C	2100	MPa	ISO 178
Hustota	1050	Kg/m ³	ISO 1183

3.2 Realizace mikrobuněčného vstřikování

Pro mikrobuněčné vstřikování byl použit vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 S (obr. 16), který společně s jednotkou společnosti Trexel SCF systém, umožňuje tvorbu mikrobuněčné struktury. Ověření aplikovatelnosti mikrobuněčného vstřikování bylo provedeno na zkušebních tělesech standardizovaných tvarů ISO 527-2 A1. Důvod volby těchto produktů spočíval především v tvarové jednoduchosti, eliminaci dalších vlivů (změny tloušťky stěny, tlakové ztráty toku taveniny, atd.) jež by mohly také částečně ovlivnit mikrobuněčnou strukturu. U všech použitých materiálů byla nejprve provedena procesní optimalizace, jejímž cílem bylo dosažení co nejlepší mikrobuněčné struktury při maximálním 15 % snížení hmotnosti dílu, což je velmi často prezentovaná hodnota pro





dosažení smysluplného snížení hmotnosti a zachování dobrých mechanických vlastností. Pro zjištění vlivu dotlaku na utvářenou strukturu byl realizován dvě varianty a to varianta s nulovým dotlakem a s varianta s pětisekundovým dotlakem. Optimalizované procesní parametry jsou uvedeny v tabulkách 5-7.



Obrázek 16 Vstřikovací lis Arbug 270 S 400-100

Tabulka 5 Procesní nastavení PP SABIC CX03-81 při vstřikování

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Procesní parametry	PP bez nadouadel	PP s dusíkem – varianta 1	PP s dusíkem – varianta 2
Teplota taveniny	240 °C	240 °C	240°C
Vstřikovaný objem (dávka)	43 Cm ³	33 Cm ³	36 Cm ³
Rychlost vstřikování	60 Cm ³ /s	60 Cm ³ /s	60 Cm ³ /s
Čas dotlaku	15 s	0 s	5 s
Úroveň dotlaku	350 Bar	0 Bar	200 Bar
Zpětný tlak	0 Bar	100 Bar	100 Bar
Uzavírací síla	1000 kN	1000 kN	1000 kN
Čas cyklu	60 s	60 s	60 s
Bod předpnutí na dotlak	17 Cm ³	1 Cm ³	1 Cm ³
Objem dekomprese	0 Cm ³	0 Cm ³	0 Cm ³
Teplota temperace	40 °C	40°C	40°C





Tabulka 6 Procesní nastavení PP SABIC G3230 A při vstřikování

POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A			
Procesní parametry	PP bez nadouvadel	PP s dusíkem – varianta 1	PP s dusíkem – varianta 2
Teplota taveniny	240 °C	240 °C	240°C
Vstřikovaný objem	40 Cm ³	30 Cm ³	33 Cm ³
Rychlost vstřikování	60 Cm ³ /s	60 Cm ³ /s	60 Cm ³ /s
Čas dotlaku	15 s	0 s	5 s
Úroveň dotlaku	350 Bar	0 Bar	300 Bar
Zpětný tlak	0 Bar	100 Bar	100 Bar
Uzavírací síla	1000 kN	1000 kN	1000 kN
Čas cyklu	60 s	60 s	60 s
Bod předpnutí na dotlak	13 Cm ³	1 Cm ³	1 Cm ³
Objem dekomprese	0 Cm ³	0 Cm ³	0 Cm ³
Teplota temperace	40 °C	40°C	40°C

Tabulka 7 Procesní nastavení ABS MAGNUM G3616 při vstřikování

ABS MAGNUM G3616			
Procesní parametry	PP bez nadouvadel	PP s dusíkem – varianta 1	PP s dusíkem – varianta 2
Teplota taveniny	240 °C	240 °C	240°C
Vstřikovaný objem	43 Cm ³	33 Cm ³	36 Cm ³
Rychlost vstřikování	60 Cm ³ /s	60 Cm ³ /s	60 Cm ³ /s
Čas dotlaku	15 s	0 s	5 s
Úroveň dotlaku	350 Bar	0 Bar	200 Bar
Zpětný tlak	0 Bar	100 Bar	100 Bar
Uzavírací síla	1000 kN	1000 kN	1000 kN
Čas cyklu	60 s	60 s	60 s
Bod předpnutí na dotlak	17 Cm ³	1 Cm ³	1 Cm ³
Objem dekomprese	0 Cm ³	0 Cm ³	0 Cm ³
Teplota temperace	40 °C	40°C	40°C





4 Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

Hodnocení aplikovatelnosti technologie mikrobuněčného vstřikování termoplastických materiálů bylo provedeno pomocí vybraných mechanických vlastností (zkouška tahem, ohybem, stanovení tvrdosti a rázové houževnatosti) a pomocí strukturních snímků pořízených z elektronového mikroskopu.

4.1 Stanovení úspory hmotnosti

Stanovení hmotnosti bylo provedeno na vahách AND GF300. Pro eliminaci nepřesnosti měření vzniklého při oddělování vzorků byla stanovována celková hmotnost výrobků. Níže uvedené hmotnosti tedy reprezentují hmotnosti dvou vzorků s vtokovým systémem.

Tabulka 8 Hodnoty hmotností vzorků

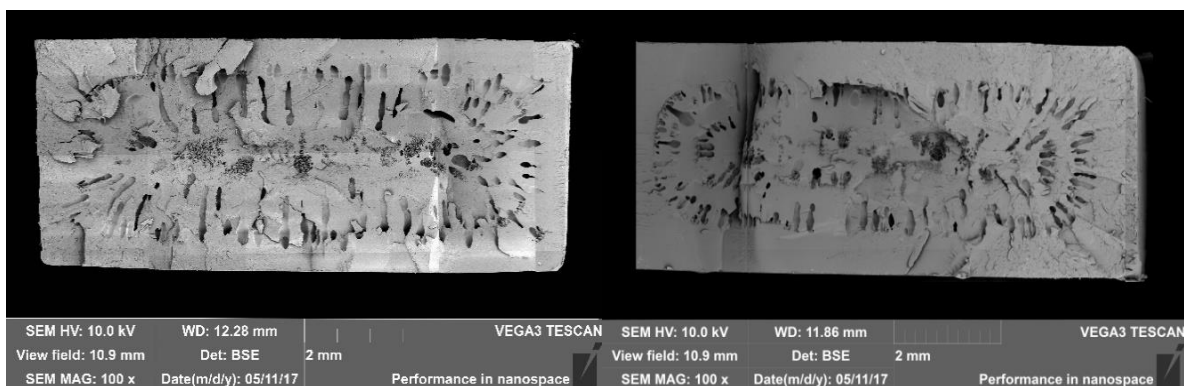
POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Parametr	Hmotnost [g]	Směrodatná odchylka [g]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	24,17	0,02	
S nadouvadlem- varianta 1	22,02	0,04	8,9 %
S nadouvadlem- varianta 2	23,17	0,02	4,1 %
POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A (30% skla)			
Parametr	Hmotnost [g]	Směrodatná odchylka [g]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	30,50	0,08	
S nadouvadlem- varianta 1	27,17	0,06	10,9 %
S nadouvadlem- varianta 2	28,97	0,08	5,0 %
ABS MAGNUM G3616			
Parametr	Hmotnost [g]	Směrodatná odchylka [g]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	29,15	0,04	
S nadouvadlem- varianta 1	26,80	0,17	8.1 %
S nadouvadlem- varianta 2	28,08	0,07	3.7 %

V realizované experimentální produkci, viz tab. 8, bylo docíleno velmi podobného snížení hmotnosti u vzorků vyrobených z čistého polypropylenu (PP) a akryl butadienu (ABS). Nepatrně vyšší snížení hmotnosti bylo docíleno u PP zkušebních tělísek s přidáním 30% skelných vláken.

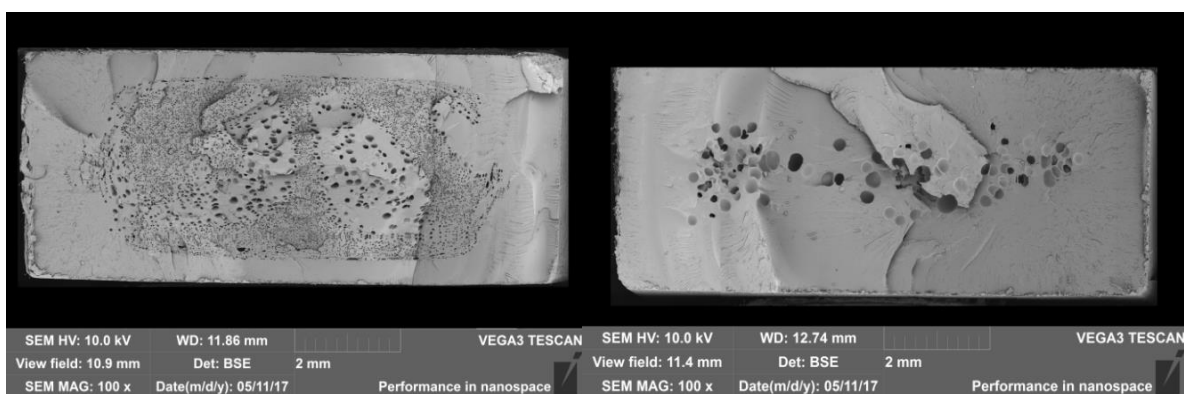


4.2 Mikrobuněčná struktura

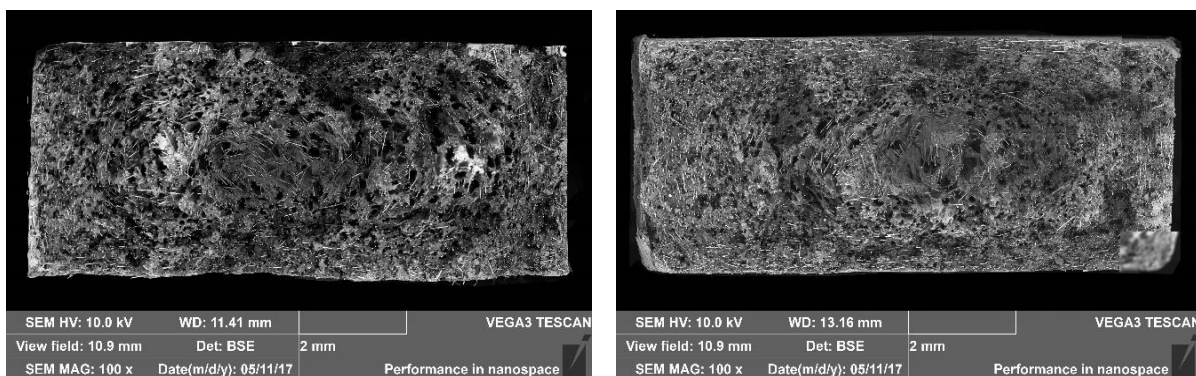
Utvářená mikrobuněčná struktura byla hodnocena pomocí snímků z elektronového mikroskopu, viz obr. 17 až obr. 19.



Obrázek 17 Mikrobuněčná struktura PP SABIC CX03-81 (vlevo - procesní varianta 1, vpravo - procesní varianta 2)



Obrázek 18 Mikrobuněčná struktura PP SABIC G3230 A (30% skla) (vlevo - procesní varianta 1, vpravo - procesní varianta 2)



Obrázek 19 Mikrocelulární struktura ABS MAGNUM G3616 (vlevo - procesní varianta 1, vpravo - procesní varianta 2)

Dle teoretického předpokladu by, díky výhodnějším teplotním podmínkám, měla místa v oblasti jádra produktů vykazovat mnohem vyšší rozměry kavit. Tento teoretický





předpoklad byl zcela potvrzen u použitého amorfního materiálu i semikrystalického materiálu vyztuženého skelnými vlákny. U nevyztuženého semikrystalického materiálu předpoklad nebyl potvrzen. Ve středové oblasti produktů byly detekovány relativně malé kavity, které navíc tvořily aglomerační skupiny (negativní efekt - mechanické vlastnosti). Ze strukturních snímků tohoto materiálu je také evidentní (v další oblasti vzorků) nepravidelná distribuce a propojování jednotlivých kavit (efekt koalescence), které také velmi negativně ovlivňují mechanické vlastnosti dílů. U obou hodnocených lokací (A, B) i obou procesních variant (0s a 5s dotlak) byly evidovány (stejně tak jako u hodnocení hustoty v těchto lokacích) velmi obdobné výsledky. Jsou-li porovnány velikosti kavit a jejich distribuce, jednoznačně nejlepších výsledků bylo dosaženo u PP vyztuženého 30% skelnými vlákny. Utvářená struktura je díky heterogenní nukleaci tvořena velkým počtem malých kavit, které se vyskytují i velmi blízko povrchu dílu (minimální zamrzlá vrstva). Důležitým poznatkem, je tedy skutečnost, že heterogenní nukleace zásadně ovlivňuje utvářenou mikrobuněčnou strukturu. Jsou-li porovnány obě procesní varianty rozdílného dotlaku, dle předpokladu aplikace dotlaku (5s) evokuje tvorbu kavit menších rozměrů, potlačení fáze růstu kavit. Produkty se proto v porovnání s mikrobuněčným vstřikováním bez dotlakové fáze vyznačují menším snížením hmotnosti. Obě hodnocené lokace (A, B) se vyznačují obdobnými charakteristikami. Amorfní materiály jsou, dle výše představeného teoretického rozboru, pro produkci mikrobuněčného vstřikování mnohem vhodnější materiály než materiály semikrystalické. Tuto predikci lze ze strukturních snímků potvrdit (varianta bez dotlaku). Nicméně v porovnání s plněným testovaným materiálem (30% skla) se utvářená struktura vyznačuje menší rovnoměrností distribuce kavit, vyšší šířkou zamrzlé vrstvy. U varianty využívající dotlakové fáze (5s) nebyl dosaženo stejného efektu jako u PP s 30% skelných vláken, nýbrž efektu opačného (malý počet velkých kavit). Příčinu je však pravděpodobně nutné hledat v procesní nestabilitě dávkování (ucpávání trysky), která byla během experimentálního měření této procesní varianty evidována.





4.3 Stanovení mechanických vlastností ze zkoušky v tahu

Za pomoci trhacího zařízení TIRAtest 2300 byly provedeny zkoušky pro zjištění modulu pružnosti v tahu a následně byly stanoveny pevnostní a deformační charakteristiky.

4.3.1 Stanovení modulu pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu byl stanoven v souladu s platnou normou pro zkoušku ČSN ISO 527-1/-2 (rychlost posuvu 1 mm/s). Pro měření byl kromě trhacího zařízení použit průtahoměr EPSILON Tech 3542. Modul pružnosti v tahu je dán jako sečna křivky napětí a poměrného prodloužení v bodech $\varepsilon_1 = 0,05\%$ a $\varepsilon_2 = 0,25\%$ podle rovnice (1)

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

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

σ_2 je tahové napětí pro deformaci $\varepsilon_2 = 0,25\%$ [MPa]

ε_1 je poměrné prodloužení 0,05%

ε_2 je poměrné prodloužení 0,25%

Vyhodnocené výsledky jednotlivých procesních variant a materiálů jsou vzájemně porovnány v tab. 9.

Tabulka 9 Hodnoty modulu pružnosti v tahu

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Parametr	Modul pružnosti v tahu [Mpa]	Směrodatná odchylka [Mpa]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	1579,5	14,9	
S nadouvadlem- varianta 1	1181,0	41,5	25,2%
S nadouvadlem- varianta 2	1271,3	36,6	19,5%
POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A (30% skla)			
Parametr	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [Mpa]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	6820,1	61	
S nadouvadlem- varianta 1	5598,6	49,5	17,9%
S nadouvadlem- varianta 2	5704,9	67,8	16,4%
ABS MAGNUM G3616			
Parametr	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [Mpa]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	2345,8	18,9	
S nadouvadlem- varianta 1	1909,3	25,7	18,6%
S nadouvadlem- varianta 2	2061,4	22,8	12,1%





Z tabulky 9 je patrné, že u všech materiálů a procesních variantách mikrobuněčného vstřikování dochází k výraznému snížení modulu pružnosti, který byl největší u čistého polypropylenu (25,2%). Zde se plně projevil negativní efekt aglomerace a koalescence struktury. Nejnižšího poklesu modulu pružnosti bylo docíleno u materiálu ABS při použití 5s dotlaku. Nicméně je zde nutno podotknout, že se jednalo o variantu s nejnižším snížením hmotnosti dílů (pouhých 3,7%).

4.3.2 Stanovení pevnostních a deformačních charakteristik tahovou zkouškou

Pevnostní a deformační charakteristiky v tahu byly stanoveny v souladu s platnou normou pro zkoušku ČSN ISO 527-1/-2 (rychlost posuvu PP, ABS 50 mm/s a plněný PP 5 mm/s). Kromě trhacího zařízení byl použit průtahoměr MFN A Standart. Vyhodnocené výsledky jednotlivých procesních variant a materiálů jsou vzájemně porovnány v tab. 10 a 11.

Tabulka 10 Hodnoty meze pevnosti v tahu

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Parametr	Mez pevnosti v tahu [Mpa]	Směrodatná odchylka [Mpa]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	24,86	0,25	
S nadouvadlem- varianta 1	17,34	0,21	30,2%
S nadouvadlem- varianta 2	19,20	0,05	22,8%
POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A (30% skla)			
Parametr	Mez pevnosti v tahu [Mpa]	Směrodatná odchylka [Mpa]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	82,35	0,6	
S nadouvadlem- varianta 1	63,19	1,04	23,7%
S nadouvadlem- varianta 2	63,46	0,68	22,9%
ABS MAGNUM G3616			
Parametr	Mez pevnosti v tahu [Mpa]	Směrodatná odchylka [Mpa]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	41,75	0,1	
S nadouvadlem- varianta 1	33,02	0,65	20,9%
S nadouvadlem- varianta 2	35,71	0,38	14,5%





Tabulka 11 Hodnoty poměrného prodloužení

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Parametr	Poměrné prodloužení [%]	Směrodatná odchylka [%]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	3,68	0,12	
S nadouvadlem- varianta 1	3,37	0,13	8,5%
S nadouvadlem- varianta 2	3,42	0,02	6,8%
POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A (30% skla)			
Parametr	Poměrné prodloužení [%]	Směrodatná odchylka [%]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	2,84	0,03	
S nadouvadlem- varianta 1	2,71	0,05	4,6%
S nadouvadlem- varianta 2	2,75	0,05	3,2%
ABS MAGNUM G3616			
Parametr	Poměrné prodloužení [%]	Směrodatná odchylka [%]	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	2,52	0,02	
S nadouvadlem- varianta 1	2,42	0,05	4%
S nadouvadlem- varianta 2	2,48	0,1	1,6%

Z prezentovaných výsledků pevnostních charakteristik, je evidentní výrazný pokles pevnostních charakteristik u všech materiálů a procesních variant. Také zde bylo evidováno nejvyšší snížení u neaditovaného polypropylenu a nejnižší u materiálu ABS. Deformační charakteristiky materiálu ABS a PP vyztuženého 30% skelnými vlákny nevykazovaly u procesní varianty s dotlakem žádné změny. U ostatních procesních variant byl evidován nepatrný pokles deformačních schopností (poměrného prodloužení). Nejvyšší pokles deformačních schopností byl zaznamenán u „čistého“ PP.





4.4 Stanovení modulu pružnosti v ohybu

Stanovení modulu pružnosti v ohybu byly stanoveny v souladu s platnou normou pro zkoušku v ohybu ČSN ISO 178 (rychlost posuvu 2 mm/s). Zkušební vzorky byly použity tělíska o obdélníkovém průřezu (80 x 10 x 4) mm, přičemž byly získány jako střední část víceúčelových zkušebních těles.

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

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

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

ε_1 je poměrné prodloužení 0,05%

ε_2 je poměrné prodloužení 0,25%

Vyhodnocené výsledky jednotlivých procesních variant a materiálů jsou vzájemně porovnány v tab. 12.

Tabulka 12 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Parametr	Modul pružnosti v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	1480	60	
S nadouvadlem- varianta 1	1220	10	17,6%
S nadouvadlem- varianta 2	1240	30	16,2%
POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A (30% skla)			
Parametr	Modul pružnosti v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	6260	140	
S nadouvadlem- varianta 1	5320	70	15,0%
S nadouvadlem- varianta 2	5390	110	13,9%
ABS MAGNUM G3616			
Parametr	Modul pružnosti v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	2190	30	
S nadouvadlem- varianta 1	2040	30	6,8%
S nadouvadlem- varianta 2	2110	70	3,7%

Výsledky modulu pružnosti v ohybu potvrzují výše zjištěné závěry. Nejvyšší pokles vykazoval materiál neplněný polypropylen. Naopak nejnižší pokles amorfní materiál (ABS). Stejně jako u modulu pružnosti v tahu byl pokles vlastností značný.





4.5 Stanovení pevnostních charakteristik ohybovou zkouškou

Pevnostní charakteristiky v ohybu byly stanoveny v souladu s platnou normou pro zkoušku ČSN ISO 178 (rychlost posuvu 2 mm/s). Vyhodnocené výsledky jednotlivých procesních variant a materiálů jsou vzájemně porovnány v tab. 13.

Tabulka 13 Hodnoty meze pevnosti v ohybu

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Parametr	Mez pevnosti v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	40,2	0,2	
S nadouvadlem- varianta 1	29,1	0,2	27,6%
S nadouvadlem- varianta 2	32,2	0,1	19,9%
POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A (30% skla)			
Parametr	Mez pevnosti v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	134,7	2,1	
S nadouvadlem- varianta 1	105,22	1,02	21,9%
S nadouvadlem- varianta 2	109,7	0,5	18,6%
ABS MAGNUM G3616			
Parametr	Mez pevnosti v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	64,3	0,4	
S nadouvadlem- varianta 1	55,7	0,8	13,4%
S nadouvadlem- varianta 2	60,3	0,5	6,2%

Také výsledky meze pevnosti v ohybu potvrzují negativní vliv aglomerace a koalescence kavit neplněného polypropylenu. Pokles pevnostní charakteristiky zde činil téměř 30%. Rovněž u polypropylenu vyztuženého 30% skelnými vlákny je pokles enormní.

4.6 Stanovení vrubové houževnatosti

Při stanovení vrubové houževnatosti bylo použito zkušební zařízení Ceast Resil 5.5 metodou 179-1/1eU. Pro přeražení vzorků byly použity dvě různá kladiva (5 J pro ABS a 0,5 J pro plnění i neplněný PP). Výsledná vrubová houževnatost byla spočtena dle vzorce 3.





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

- Kde: a_{cu} je vrubová houževnatost Charpy zkušebního tělesa [kJ/m²]
 E_c je energie spotřebovaná pro přeražení tělesa
 b je šířka zkušebního tělesa
 h je tloušťka zkušebního tělesa

Hodnoty vrubové houževnatosti spolu s jejím úbytkem oproti „čistému“ materiálu jsou shrnuty v tabulce 14.

Tabulka 14 Hodnoty rázové houževnatosti

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Parametr	Vrubová houževnatost [kJ/m²]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastností
Bez nadouvadla	40,1	2,4	
S nadouvadlem- varianta 1	22,8	3,5	43,1%
S nadouvadlem- varianta 2	25,8	3,5	35,7%
POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A (30% skla)			
Parametr	Vrubová houževnatost [kJ/m²]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastností
Bez nadouvadla	83,8	2,2	
S nadouvadlem- varianta 1	68,8	2,3	17,9%
S nadouvadlem- varianta 2	74,9	4	10,6%
ABS MAGNUM G3616			
Parametr	Vrubová houževnatost [kJ/m²]	Směrodatná odchylka	Pokles vlastností
Bez nadouvadla	145,9	8,4	
S nadouvadlem- varianta 1	132,3	13,9	9,3%
S nadouvadlem- varianta 2	135,9	8,8	6,9%

Z výsledků prezentovaných v tab. 14 je evidentní, že při stanovení rázové houževnatosti došlo ještě k vyššímu poklesu vlastností neplněného polypropylenu než při stanovení ohybových a tahových vlastností. Ostatní výsledky korespondují s výše uvedenými závěry.





4.7 Stanovení tvrdosti

Hodna tvrdosti stanovena metodou Shore (ISO 868:2003), pro měření byl použit hrot typu D. Zatížení při zkoušce zvoleno 50N, přičemž síla od dotyku pevného kontaktu se zkušebním tělesem a odečtením hodnoty působila 15 s.

Tabulka 15 Naměřené hodnoty tvrdosti

POPYPROPOLYNE SABIC CX03-81			
Parametr	Tvrđost Shore	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	57,4	0,5	
S nadouvadlem- varianta 1	56,1	1,9	2,3%
S nadouvadlem- varianta 2	57,2	0,8	0,3%
POPYPROPOLYNE SABIC G3230 A (30% skla)			
Parametr	Tvrđost Shore	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	68,4	0,8	
S nadouvadlem- varianta 1	65,8	1,4	3,8%
S nadouvadlem- varianta 2	67,5	0,6	1,3%
ABS MAGNUM G3616			
Parametr	Tvrđost Shore	Směrodatná odchylka	Pokles vlastnosti
Bez nadouvadla	72,2	1,3	
S nadouvadlem- varianta 1	67,4	1,8	6,6%
S nadouvadlem- varianta 2	68,2	0,4	5,5%

Z tabulky 15 je patrné, že rozdíly v tvrdosti jsou malé. A proto lze konstatovat, že vytvořená mikrobuněčná struktura u testovaných materiálů a procesních variant nezpůsobila výrazný pokles tvrdosti.





5 Závěr

Předkládaná práce představuje analýzu aplikovatelnosti technologie mikrobuněčného vstřikování pro termoplastické materiály. V teoretické části je nejprve podrobně rozebrána problematika mikrobuněčného vstřikování. V další části pak uvedeno základní dělení polymerních materiálů společně s teoretickým rozbohem aplikovatelnosti jednotlivých typů termoplastů.

V experimentální části práce jsou analyzovány zástupci semikrystalických (PP), amorfních (ABS) materiálů a také materiálů plněných (PP s 30% skelných vláken). Ze semikrystalických materiálů byl zvolen pro ověření aplikovatelnosti mikrobuněčného vstřikování nejpoužívanější polymerní materiál a to PP. Tento materiál dle teoretických předpokladů není vhodný pro technologii mikrobuněčného vstřikování. Tyto teoretické předpoklady lze vzhledem k vyhodnocené struktuře (snímky z elektronového mikroskopu) i mechanickým vlastnostem potvrdit. Nejvyšší poklesy mechanických vlastností byl zjištěn u vrubové houževnatosti neplněného polypropylenu, viz tab. 16. Tento materiál se vyznačoval také nejvyšším poklesem ostatních měřených mechanických vlastností (pevnostní charakteristiky) s výjimkou deformačních charakteristik a tvrdosti, kde nebyly zjištěny žádné, nebo minimální změny. Důvodem enormního poklesu mechanických vlastností je možné nalézt v značném aglomeračním a koalescenčním efektu, který by u tohoto materiálu pozorován.

Mnohem lepší struktura (velikosti kavit a jejich distribuce) byla dosažena u PP vyztuženého 30% skelnými vlákny. Utvářená struktura je díky heterogenní nukleaci tvořena velkým počtem malých kavit, které se vyskytují i velmi blízko povrchu dílu (minimální zamrzlá vrstva). Důležitým poznatkem, je tedy skutečnost, že heterogenní nukleace zásadně ovlivňuje utvářenou mikrobuněčnou strukturu. Přesto, že bylo dosaženo mnohem lepší struktury, byl evidován rovněž u tohoto materiálu veliký pokles mechanických vlastností (rázová houževnatost, pevnostní charakteristiky). Nejnižší pokles mechanických vlastností byl zjištěn u materiálu ABS, což potvrzuje teoretický předpoklad a vhodnosti použití amorfních materiálů pro mikrobuněčného vstřikování.





Tabulka 16 Přehled poklesu vlastností

Pokles vlastností oproti „čistému“ materiálu	PP Sabic CX03-81		PP SABIC G3230 A (30% skla)		ABS MAGNUM G316	
	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 1	Varianta 2
Hmotnost	8,9 %	4,1 %	10,9 %	5,0 %	8.1 %	3.7 %
Modul pružnosti	25,2%	19,5%	17,9%	16,4%	18,6%	12,1%
Mez pevnosti v tahu	30,2%	22,8%	23,7%	22,9%	20,9%	14,5%
Poměrné prodloužení	8,5%	6,8%	4,6%	3,2%	4%	1,6%
Mez pevnosti v ohybu	17,6%	16,2%	15,0%	13,9%	6,8%	3,7%
Vrubová houževnatost	43,1%	35,7%	17,9%	10,6%	9,3%	6,9%
Tvrдость	2,3%	0,3%	3,8%	1,3%	6,6%	5,5%

V experimentálním měření byly rovněž použity procesní varianty rozdílného dotlaku. Z výsledků vyplývá, že aplikace dotlaku (5s) evokuje tvorbu kavit menších rozměrů, potlačení fáze růstu kavit. Produkty se proto v porovnání s mikrobuněčným vstřikováním bez dotlakové fáze vyznačují menším snížením hmotnosti a nižším poklesem mechanických vlastností.

Vzhledem k zjištěným závěrům je možné konstatovat, že testovaný neplněný polypropylen (PP Sabic CX03-81) není vhodný pro mikrobuněčný proces vstřikování. Je však nutno podotknout, že použitý PP je pouze jedním z řady materiálů patřící do skupiny polypropylenů (rozvětvené, zesítené, homopolymery, kopolymery, atd.) a není proto možné provést obecné závěry o vhodnosti celé skupiny těchto materiálů. Bylo by vhodné provést další experimentální měření pro tuto skupinu materiálů. Pro mikrobuněčné vstřikování jsou mnohem výhodnější amorfni a plněné materiály. Nicméně i u těchto materiálů bylo zjištěno výrazného poklesu mechanických vlastností.





Použitá literatura

- [1] Fáze vstřikování [online]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [2] Technologie vstřikování strukturálních pěn [online]. Dostupné z:
<https://publi.cz/books/184/04.html>
- [3] MuCell molding technology [online]. Dostupné z: <http://www.trexel.com/en/mucell-injection-molding/>
- [4] Superkritické tekutiny [online]. Dostupné z:
https://is.muni.cz/th/77987/prif_m/superkriticke_kapaliny.pdf
- [5] Fázový diagram [online]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/figure/47932658_fig1_Figure-5-The-phase-diagram-of-a-pure-substance
- [6] Foam injection molding [online]. Dostupné z:
<http://www.moldex3d.com/en/products/solution-addons/mucell>
- [7] Trexel GmbH. MuCell Technische Dokumentation. [Dokument] Wiehl : Trexel GmbH, 2012
- [8] KOLSHORN, U. MuCell Technology [Dokument PDF] Wiehl : Trexel GmbH, 2007.
- [9] LENFELD, P. Technologie vstřikování [online]. Dostupné z:
<https://publi.cz/books/194/04.html>
- [10] Vstřikování termoplastů s napěňováním – úspory díky metodě MuCell [online]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/vstrikovani-termoplastu-s-napenovanim-usporydiky-medode-mucell/c/2416>
- [11] *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [12] PECINA, Pavel a Josef PECINA. *Materiály a technologie - plasty*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2006, 54 s. ISBN 80-210-4100-5.
- [13] Nadmolekulární struktura [online]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01-plasty%20uvod/11-struktura.jpg
- [14] Termoplasty – základní druhy [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [15] DUCHÁČEK V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-617-6

