



# Vliv množství nadouvadla na vlastnosti plastového dílu

## Bakalářská práce

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



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

Jméno a příjmení: **Ing. Vlastimil Hruška**  
Osobní číslo: **S13000263**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Vliv množství nadouvadla na vlastnosti plastového dílu**  
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

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

1. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Výroba plastových vzorků v závislosti na množství nadouvadla.
3. Analýza rozměrové přesnosti a studium mechanického chování dílů.
4. Vyhodnocení experimentálně získaných dat, diskuse výsledků, závěr.



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

[1] OSSWALD, Tim A. a Juan P. HERNÁNDEZ-ORTIZ. *Polymer processing: modeling and simulation*. Munich: Hanser Publisher, 2006. ISBN-13: 978-1-56990-398-8.


[2] Conference proceedings: Blowing agents and roaming processes conference 2001. Rapra Technology Limited, 2001. ISBN: 1-85957-252-9.

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

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

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

## Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Lubošovi Běhálkovi, Ph.D. za vedení celé práce, poskytnutí literatury, cenných rad a zkušeností v dané problematice při zpracování této bakalářské práce. Následně bych rád poděkoval firmě IMG Bohemia s.r.o. za poskytnutí všech interních materiálů a prostoru pro tvorbu této práce.

# **Vliv množství nadouvadla na vlastnosti plastového dílu**

## **Influence of blowing agent to properties of plastic part**

### **Abstrakt:**

Bakalářská práce se zabývá analýzou vlivu množství nadouvadla na vlastnosti polypropylenového dílu z produkce firmy IMG Bohemia s.r.o. V teoretické části jsou charakterizována používaná fyzikální a chemická nadouvadla pro výrobu výstřiků ze strukturálních pěn včetně technologického procesu vstřikování. Praktická část popisuje vybraný plastový díl, výrobní zařízení, základní parametry výroby a podmínky experimentálního měření. Hodnoceny jsou fyzikálně mechanické vlastnosti dílů a jejich rozměrová i tvarová přesnost v závislosti na množství přidávaného nadouvadla.

Klíčová slova: nadouvadlo, polymer, technologie vstřikování

### **Abstract:**

The bachelor thesis analyzes the effect of blowing agent on the properties of the plastic part from the production of IMG Bohemia Ltd. In the theoretical part are characterized used physical and chemical blowing agents for the production of injection molded structural foam injection molding process, including technology. The practical part describes the selected plastic part, production machine, basic parameters of production, conditions and experimental measurements. The physical and mechanical properties of the parts and their dimensional and formal precision are evaluated depending on the amount of added blowing agent.

Key words: blowing agent, polymer, injection moulding technology

# Obsah

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Úvod .....   | 9  |
| 2     | Teoretická část .....                                  | 10 |
| 2.1   | Vstřikování termoplastů .....                          | 10 |
| 2.1.1 | Vstřikovací jednotka .....                             | 11 |
| 2.1.2 | Uzavírací jednotka .....                               | 12 |
| 2.2   | Nadouvadla .....                                       | 13 |
| 2.2.1 | Chemická nadouvadla .....                              | 14 |
| 2.2.2 | Fyzikální nadouvadla .....                             | 16 |
| 2.3   | Vstřikování s nadouvadly .....                         | 18 |
| 2.3.1 | Vstřikování s chemickými nadouvadly .....              | 19 |
| 2.3.2 | Vstřikování s fyzikálními nadouvadly - MuCell .....    | 21 |
| 3     | Experimentální část .....                              | 23 |
| 3.1   | Charakteristika vybraného dílu .....                   | 23 |
| 3.2   | Příprava experimentu - vzorkování .....                | 25 |
| 3.3   | Vzhledové a rozměrové vlastnosti dílu .....            | 28 |
| 3.4   | Stanovení tahových vlastností .....                    | 30 |
| 3.5   | Stanovení ohybových vlastností .....                   | 32 |
| 3.6   | Stanovení hustoty .....                                | 34 |
| 4     | Vyhodnocení výsledků .....                             | 35 |
| 4.1   | Vyhodnocení vzhledových a rozměrových vlastností ..... | 35 |
| 4.2   | Vyhodnocení tahových vlastností .....                  | 36 |
| 4.3   | Vyhodnocení ohybových vlastností .....                 | 39 |
| 4.4   | Vyhodnocení hustoty .....                              | 40 |
| 5     | Závěr .....  | 42 |
|       | Seznam použité literatury .....                        | 45 |
|       | Seznam příloh .....                                    | 47 |

## Seznam použitých zkratek a symbolů:

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| PVC                            | Polyvinylchlorid                                |
| PP                             | Polypropylen                                    |
| PE                             | Polyethylen                                     |
| CBA                            | Chemické nadouvadlo                             |
| FBA                            | Fyzikální nadouvadlo                            |
| CO <sub>2</sub>                | Oxid uhličitý                                   |
| N <sub>2</sub>                 | Dusík   |
| S                              | Koeficient rozpustnosti [mol/m <sup>3</sup> ]   |
| H                              | Henryho konstanta [Pa.m <sup>3</sup> /mol]      |
| p                              | Tlak plynu [Pa]                                 |
| SCF                            | superfluidní stav látky                         |
| MuCell                         | Mikrobuněčné pěnové tvarování                   |
| $\sigma_m$                     | Mez pevnosti v tahu [MPa]                       |
| $\varepsilon_m$                | Poměrné prodloužení na mezi pevnosti [%]        |
| $\varepsilon_{tb}$             | jmenovité poměrné prodloužení při přetržení [%] |
| $\sigma_{1,2}$                 | tahová napětí [MPa]                             |
| $\varepsilon_{1,2}$            | oměrná prodloužení v tahu [%]                   |
| $E_t$                          | Modul pružnosti v tahu [MPa]                    |
| $E_f$                          | Modul pružnosti v ohybu [MPa]                   |
| $\sigma_{f1,2}$                | Ohybová napětí [MPa]                            |
| $\varepsilon_{f1,2}$           | deformace ohybem [%]                            |
| $\sigma_{fM}$                  | Mez pevnosti v ohybu [MPa]                      |
| $\rho$                         | Hustota vzorku [kg/m <sup>3</sup> ]             |
| V                              | Teoretický objem vzorku [m <sup>3</sup> ]       |
| m                              | Hmotnost vzorku [kg]                            |
| ADCA                           | Azodikarbonamid                                 |
| OBSH                           | Benzensulfonyl hydrazid                         |
| TSH                            | p-Toulen sulfonyl hydrazid                      |
| TSS                            | p-Toulen sulfonyl semikarbazid                  |
| DNPT                           | Dinitrosopentamethylentetramid                  |
| 5PT                            | 5 phenyltetrazol                                |
| SBH                            | Borohydrid sodný                                |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | Propan  |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | Butan   |



|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| $\text{CH}_3(\text{CH}_3)\text{CHCH}_3$            | Isobutan                         |
| $\text{C}_5\text{H}_{12}$                          | Pentan                           |
| $\text{CH}_3(\text{CH}_3)\text{CHCH}_2\text{CH}_3$ | Isopentan                        |
| $\text{CHF}_2\text{Cl}$                            | Chlordifluormethan               |
| $\text{CF}_2\text{ClCH}_3$                         | 1-Chloro-1,1-difluoroetan        |
| $\text{CHF}_2\text{CH}_3$                          | 1,1-Difluoroetan                 |
| $\text{CHCl}_2\text{CF}_3$                         | 2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroetan |
| $\text{CFCl}_3$                                    | Trichlorofluorometan             |
| $\text{CF}_2\text{Cl}_2$                           | Dichlordifluorometan             |
| $\text{CH}_3\text{Cl}$                             | Chlormetan                       |
| $\text{CH}_2\text{Cl}_2$                           | Dichlormetan                     |
| $\text{N}_2$                                       | Dusík                            |
| $\text{O}_2$                                       | Kyslík                           |

# 1 Úvod

Vstřikování termoplastů patří k nejrozšířenějším a nejdůležitějším technologiím zpracování plastů. S výrobky zhotovenými touto technologií se lze setkat prakticky každý den. Vstřikování plastů zahrnuje spoustu zpracovatelských postupů, které umožňují vyrábět miniaturní výrobky složitých tvarů, ale také velkorozměrné díly. Výrobky vykazují výborné fyzikální vlastnosti, rozměrovou stálost a většina z nich je zdravotně nezávadných při styku s potravinami. Vstřikovací proces je ve většině případů automatický, čímž vzrůstá produktivita práce. Další předností je téměř plné využití zpracovávaného materiálu, a proto se často vstřikování zařazuje do bezodpadové technologie [1]. Nevýhodou konvenčního vstřikování je limitující tloušťka stěny výrobku, která neumožňuje vyrábět tlustostěnné díly. V praxi je pro výrobu dílů s tloušťkou stěn vyšší než 8 mm použito několika speciálních technologií, jako jsou např. vstřikování sendvičů a vstřikování s nadouvadly.

Při sendvičovém vstřikování se používají stroje se dvěma vstřikovacími jednotkami. Proces lze rozdělit do dvou kroků, kdy při prvním je vstříknuta tavenina tvořící povrch dílu a následuje vstříknutí taveniny tvořící jádro plastového dílu [2]. Touto technologií lze tak vyrábět i tlustostěnné výrobky. Speciální způsob vstřikování s nadouvadly umožňuje vytvořit výrobky s homogenní povrchovou vrstvou a napěněným jádrem a jsou často nazývány strukturální pěny. Tento způsob zpracování termoplastů nám umožňuje vyrobit díly tvrdé, tuhé a přitom lehké. Díky těmto vlastnostem konečných produktů má tato technologie široké spektrum použití.

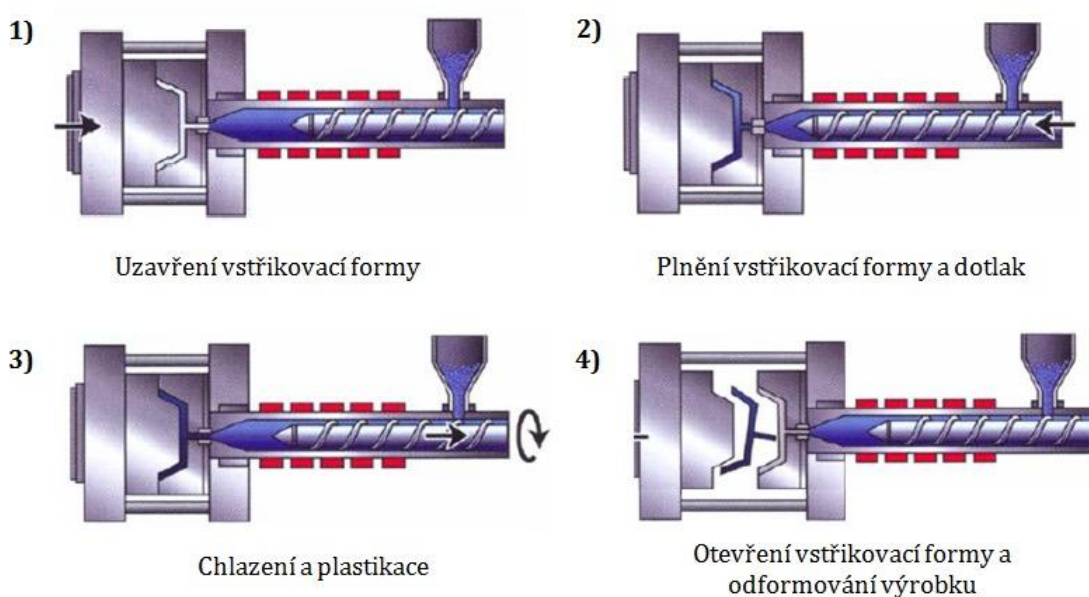
Tato bakalářská práce vznikla ve spolupráci s firmou IMG Bohemia s.r.o. s cílem zhodnotit vlastnosti plastového dílu dle procentuálního zastoupení nadouvadla. V teoretické části se práce zabývá rozбором technologie vstřikování, kde je vysvětlen její princip. Následuje popis druhů používaných nadouvadla a jejich přehledné rozdělení. Poté se práce zabývá přehledným popisem nejvýznamnějších technologií vstřikování s nadouvadly, jsou zde popsány jejich výhody, nevýhody a možnost použití. V praktické části je charakterizován vybraný plastový díl pod obchodním názvem „Stěnový prvek“, který firma IMG BOHEMIA s.r.o. využívá na stavbu jímek a nádrží. Následuje popis stroje, na kterém byl produkt vyráběn, včetně výpisu technologických parametrů použitých při výrobě. Charakteristiky všech použitých materiálů při výrobě vzorků jsou podrobně rozebrány. Zvolený díl je vyráběn v několika šaržích v závislosti na množství nadouvadla. Každý vzorek, který obsahoval jiné množství nadouvadla, je podroben analýze fyzikálních mechanických a vzhledových vlastností.

## 2 Teoretická část

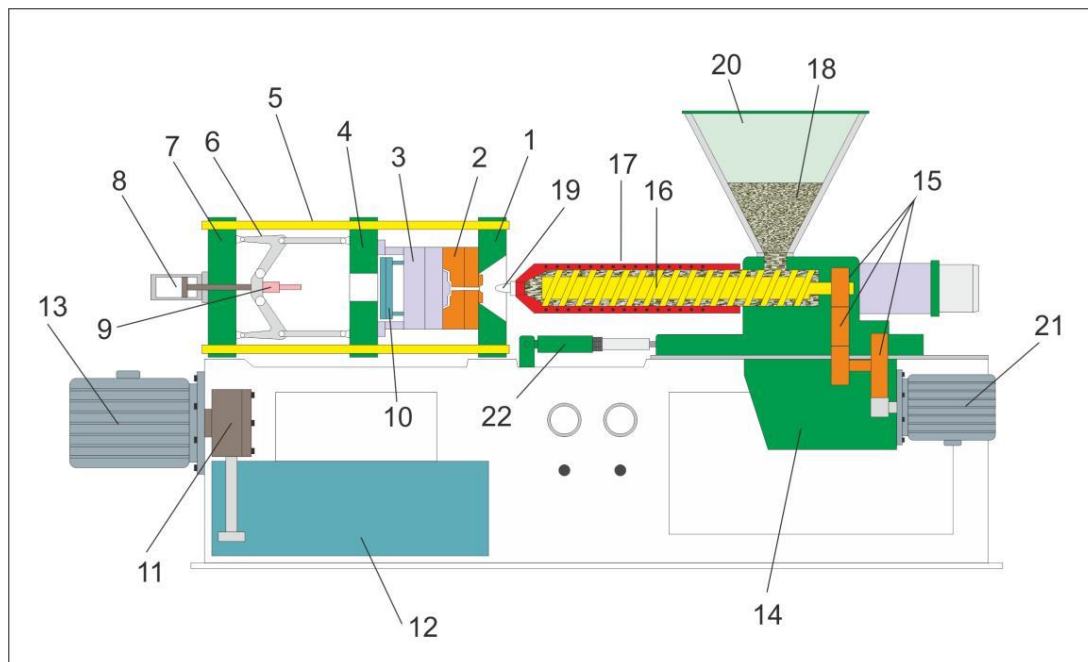
V souladu s řešenou problematikou se teoretická část bakalářské práce zabývá technologií vstřikování, resp. technologií vstřikování strukturních pěn. Charakterizována jsou používaná chemická a fyzikální nadouvadla včetně vysvětlení principů jejich zpracování v procesu vstřikování.

### 2.1 Vstřikování termoplastů

Vstřikování termoplastů je diskontinuální, cyklický způsob tváření, při kterém se přesně určená dávka roztaveného materiálu vstříkne z tavicí (plastifikační komory) do uzavřené dutiny formy velkou rychlostí. Následuje fáze dotlaku (pro snížení smrštění a rozměrových změn dílů) a proces ochlazení, při kterém hmota tuhne (předává teplo formě) a současně je plastifikována nová dávka taveniny. Poslední částí výrobního cyklu je otevření formy a vyjmutí konečného výrobku. Grafické znázornění všech fází výrobního cyklu jsou na obr. 1. Vstřikováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů, reaktoplastů a kaučuků. Produkty zhotovené technologií vstřikováním vykazují velmi dobrou rozměrovou a tvarovou přesnost pro sériovou opakovatelnost procesu. Tvary výrobků mohou být od jednoduchých až po extrémně tvarově složité. Ke vstřikování plastů se používají stroje, které mohou být hydraulické (viz obr. 2), elektrické nebo hybridní. Vstřikovací stroje mají dvě na sobě nezávislé jednotky, vstřikovací a uzavírací jednotku (viz kap. 2.1.1 a kap. 2.1.2), které jsou řízeny mikroprocesorovou jednotkou [2].



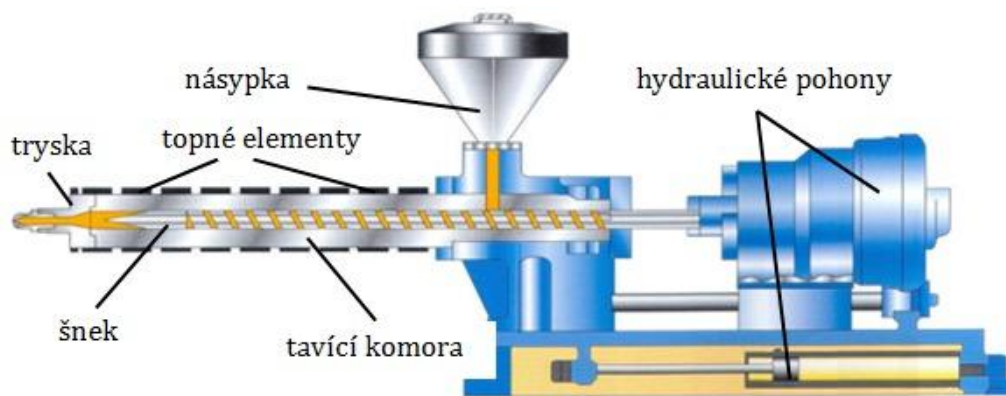
Obr. 1 Vstřikovací cyklus[3]



Obr. 2 Schéma hydraulického vstřikovacího stroje - 1) Pevná deska, 2) Pevná část formy, 3) Pohyblivá část formy, 4) Pohyblivá deska, 5) Vodící sloupy, 6) Uzavírací mechanismus, 7) Zadní deska, 8) Válec uzavíracího mechanismu, 9) Ovládač vyhazovačů, 10) Vyhazovač, 11) Čerpadlo oleje, 12) Zásobník oleje, 13) Elektromotor, 14) Převodovka, 15) Převodová kola, 16) Šnek, 17) Tavicí komora, 18) Směs materiálů, 19) Tryska, 20) Násypka, 21) Elektromotor, 22) Hydraulický válec [4]

### 2.1.1 Vstřikovací jednotka

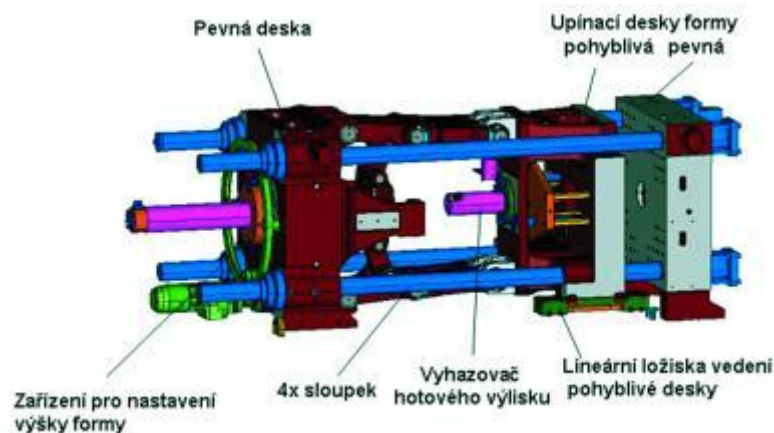
Úkolem vstřikovací jednotky je doprava materiálu před čelo šneku, plastikace, vstřikování a dotlak taveniny plastu. V první fázi probíhá příprava materiálu a následné přesné dávkování plastu a dalších aditiv (např. barviva, UV stabilizátoru, nadouvadla) do násypky vstřikovacího stroje. Dávkování mají na starost dávkovací stanice, do kterých jsou všechny potřebné komponenty přivedeny např. centrálním rozvodem materiálu. Tyto stanice, umístěné nad násypkou vstřikovacího stroje, pracují na principu objemového nebo hmotnostního dávkování. Výstupem z dávkovacích stanic je směs všech komponent, která je nasypána do násypky a odebírána do hlavní části vstřikovací jednotky. Tato jednotka je tvořena tavicí komorou, ve které je šnek, dopravující materiál z násypky do tavicí komory (viz obr. 3). Po obvodu této komory jsou umístěny topná tělesa a zakončena je vyhřívanou tryskou spojující vstřikovací a uzavírací jednotku. Pohon šneku je nejčastěji zajišťován hydraulicky. V komoře se vlivem topných těles na obvodu šneku a za současného působení účinku tření plast taví. Takto vzniklá tavenina se pohybem šneku dostává před jeho čelo, kde se vytváří dávka taveniny pro vstříknutí do dutiny formy (pro dosažení požadovaného objemu).



Obr. 3 Vstřikovací jednotka [5]

### 2.1.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje zajišťuje otevírání a zavírání vstřikovací formy a „držení“ formy v zavřeném stavu během vstřikování dotlaku a chlazení (viz obr. 4). Podobně jako vstřikovací jednotka je tvořena několika samostatnými prvky a mechanismy. Základními součástmi jsou vodící sloupky (u sloupkových konstrukcí strojů), pevná a pohyblivá upínací deska stroje s potřebným upínacím systémem a mechanismus, který je zdrojem síly potřebné pro otevírání a uzavírání formy, a který umožní vytvoření uzamykací síly, která působí proti vstřikovacímu tlaku a drží formu uzavřenou během fáze vstřiku, dotlaku a chlazení. Uzavírací síla je vyvozena mechanicky (dojde k mechanickému zapříčení formy v potřebné poloze), hydraulicky (potřebná síla je vyvozena hydraulickým pístem) nebo kombinací obou systémů. Podle pohonu, který zajišťuje posuvy pohyblivé desky, se uzavírací jednotky dělí na elektrické (zdrojem pohybu je elektromotor) nebo hydraulické (zdrojem pohybu je hydraulický píst). Hydraulický píst může být napojen přímo na pohyblivou upínací desku (hydraulický uzavírací systém), nebo stejně jako u elektromotoru je síla přenášena přes další mechanický systém. Tyto systémy jsou potom nazývány hydraulicko-mechanické nebo elektro-mechanické [5].



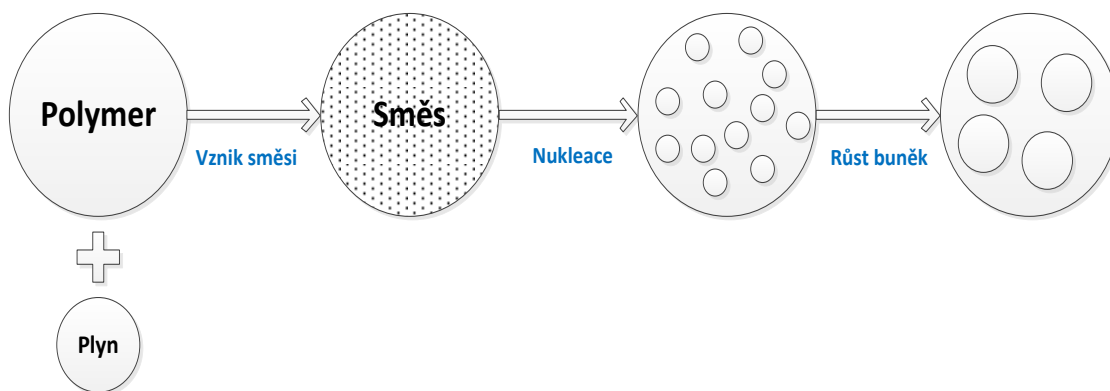
Obr. 4 Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje [6]

Po vstříknutí taveniny do dutiny formy, kterou téměř zcela zaplní, následuje proces dotlaku a chlazení, kdy chladnoucí plast předává teplo formě a tuhne. Způsob a rychlost chlazení výrobku jsou ovlivněny především tvarem vylisku, tloušťkou stěn, teplotou taveniny, vstřikovací rychlostí a teplotou formy. Doba chlazení by měla být tak dlouhá, aby bylo zajištěno, že materiál bude mít odpovídající morfologickou strukturu, a že při vyhazování vylisku z formy nedojde k jeho deformaci. Po této fázi následuje otevření formy a vyhození výrobku a celý proces se dále cyklicky opakuje [2], [5].

## 2.2 Nadouvadla

Nadouvadla jsou materiály, které způsobují napěnění materiálu a vznik strukturální pěny. Princip napěňování polymeru je znázorněn na obr. 5. Napěňená struktura vzniká v několika fázích. Nejprve se v tavicí komoře smísí plyn s taveninou, následuje vznik buněk (nukleace). Takto vzniklá směs je vstříknuta do dutiny vstřikovací formy, která je vyplňována pouze z 80 %. Následně začíná proces růstu buněk (expanze plynu), což zapříčiní zvýšení objemu vstříknuté směsi a celkové vyplnění dutiny formy. Buňky vlivem chlazení taveniny přestanou zvětšovat svůj objem [7].

Jsou rozeznávány dva druhy nadouvadla. Prvním druhem jsou chemická nadouvadla, která se v tavicí komoře rozloží na plyn, který způsobí napěnění materiálu. Druhým typem jsou fyzikální nadouvadla, která jsou přiváděna do tavicí komory rovnou ve formě plynu a napěňují taveninu.

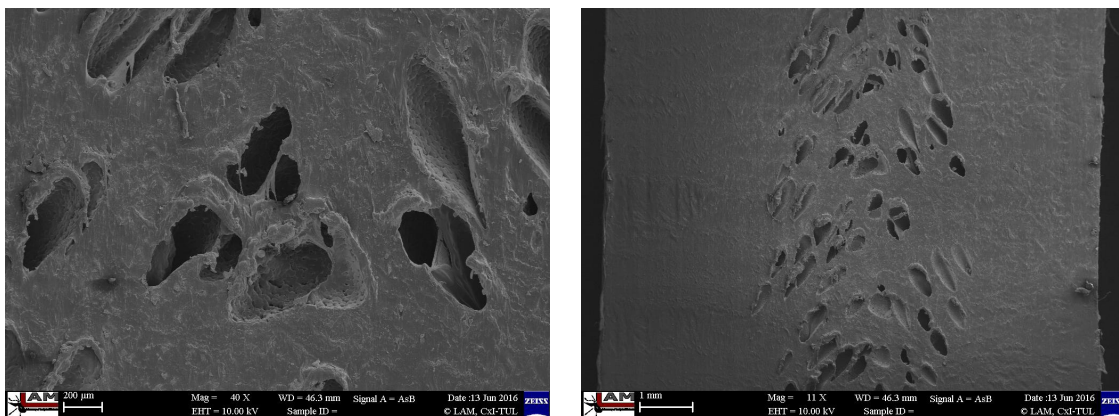


Obr. 5 Vznik strukturní pěny [7]

### 2.2.1 Chemická nadouvadla

Nadouvadla na chemické bázi jsou anorganická aditiva. Jsou nejčastěji ve formě granulí, které se v násypce smísí s polymerem a vlivem chemické reakce v tavicí komoře vytváří plyn. Tento plyn se smísí s taveninou termoplastu a vytváří stabilní napěněnou strukturu v materiálu. Běžně se používají s polyvinylchloridem (PVC), polyethylenem (PE) a polypropylenem (PP).

Chemická nadouvadla (dále jen CBA) jsou ve formě pevné nebo kapalné látky, která je dávkována do tavicí komory společně s polymerem. Nadouvadlo se za působení teploty rozkládá a vytváří páru, která se chová jako fyzikální nadouvadlo. Teplota rozpadu CBA musí být podobná jako teplota tavení příslušného plastu. Tím je zajišťováno, že se CBA nerozloží dříve, než je roztaven termoplast, což by mělo za následek nevytvoření napěněné struktury. Plyn (oxid uhličitý nebo dusík), který je výsledkem rozkladu CBA má na finální produkt několik účinků. Oxid uhličitý, jakožto jeden plyn, který vznikne, je více rozpustný v tavenině a tím pádem je jeho použití snadnější, než je tomu u druhého plynu, dusíku. Ve výsledku to znamená, že při použití  $\text{CO}_2$  je dosaženo nižší hustoty, jemnější struktury jádra výrobku, lepšího povrchu a kratší doby výrobního cyklu. Při použití chemických nadouvadla není dosahováno rovnoměrného rozložení napěněné struktury a velikost dutinek je různá (viz obr. 6).



Obr. 6 Mikrostruktura při použití chemického nadouvadla (SEM)

Pro termoplasty s vyšší viskozitou nebo pro výrobky se složitou strukturou je naopak vhodnější dusík, který lépe zajistí kompletní vyplnění dutiny formy. V porovnání s  $\text{CO}_2$  zabere dusík větší objem při stejné hmotnosti materiálu, a proto je jeho expanze ve formě zdatelně rychlejší a mnohdy i špatně kontrolovatelná [8]. Nejčastěji používaná nadouvadla jsou uvedena v tab. 1.

Dalším faktorem, ovlivňující účinnost a kvalitu napěněné struktury je rozpustnost plynu v polymeru. Tato vlastnost plynu je popsána rovnicí (1):

$$S = H \cdot p, \quad (1)$$

kde  $S$  [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ] udává koeficient rozpustnosti,  $p$  udává tlak plynu [Pa] a  $H$  je Henryho konstanta [ $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$ ]. Pro příklad můžeme uvést, že dusík má v PE koeficient rozpustnosti 2,5 násobně nižší než oxid uhličitý. O rozpustnosti plynů v polymerech detailně pojednávají literatury [9] a [10].

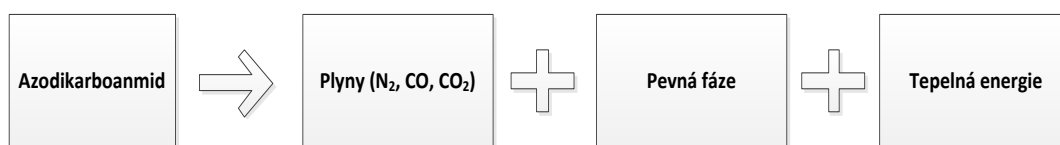
Chemická nadouvadla jsou rozdělována podle typu reakce na exotermická a endotermická (viz obr. 7 a obr. 8). Exotermická nadouvadla generují teplo během jejich rozkladu, kdežto endotermická naopak teplo v průběhu reakce spotřebovávají. Obecně platí, že jakmile se začne exotermické nadouvadlo rozkládat, lze tento proces jen obtížně zastavit. To má za následek rychlejší rozklad v malém teplotním rozmezí. Běžný začátek rozpadu exotermického nadouvadla je od  $205\text{ }^\circ\text{C}$  do  $215\text{ }^\circ\text{C}$ . Endotermická nadouvadla potřebují tepelnou energii k pokračování rozkladu, to znamená, že se rozkládají pomaleji při vyšším teplotním rozsahu [5]. Jsou tedy vhodné ke vstřikování z důvodu dobré regulace teplot za pomoci chlazení. Jejich začátek rozpadu se pohybuje od  $150\text{ }^\circ\text{C}$  do  $180\text{ }^\circ\text{C}$ .



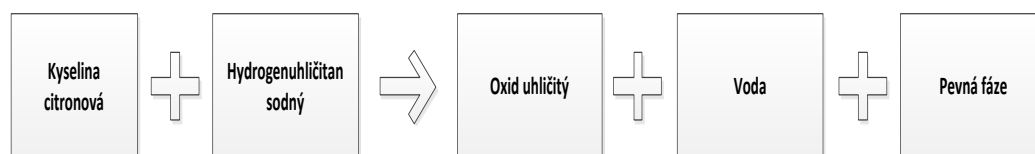
Tab. 1 Běžně používaná chemických nadouvadla [8]

| Zkratka     | Chemický název                 | Druh reakce  | Teplota rozkladu [°C] | Uvolněný plyn |
|-------------|--------------------------------|--------------|-----------------------|---------------|
|             | Kyselina citronová             | Endotermická | 160 - 210             | $CO_2$        |
| <b>ADCA</b> | Azodikarbonamid                | Exotermická  | 205 - 212             | $N_2$         |
| <b>OBSH</b> | Benzensulfonyl hydrazid        | Exotermická  | 158 – 160             | $N_2$         |
| <b>TSH</b>  | p-Toulen sulfonyl hydrazid     | Exotermická  | 110 – 120             | $N_2$         |
| <b>TSS</b>  | p-Toulen sulfonyl semikarbazid | Exotermická  | 228 – 235             | $N_2$         |
| <b>DNPT</b> | Dinitrosopentamethyltetramid   | Exotermická  | 190                   | $N_2$         |
| <b>5PT</b>  | 5 phenyltetrazol               | Exotermická  | 240 – 250             | $N_2$         |
| <b>SBH</b>  | Borohydrid sodný               | Endotermická | *                     | $H_2$         |

\*SBH je aktivován ve vodě



Obr. 7 Exotermický průběh reakce



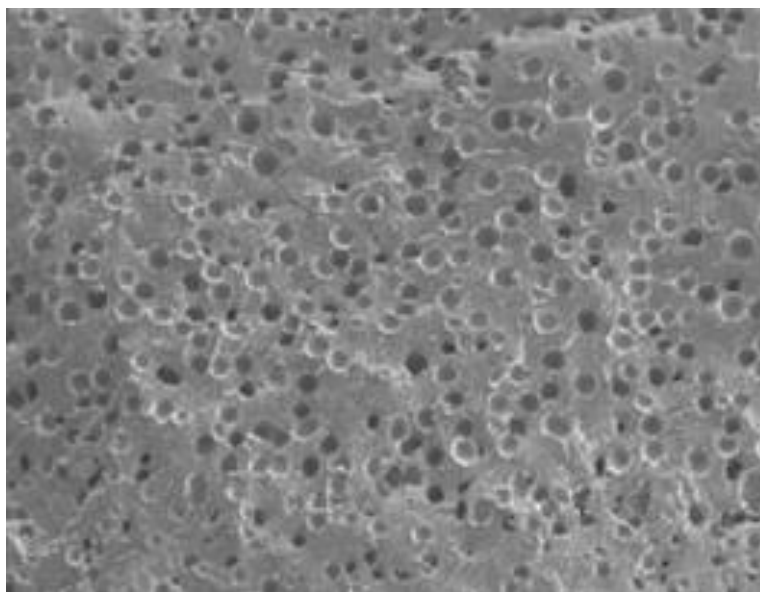
Obr. 8 Endotermický průběh reakce

## 2.2.2 Fyzikální nadouvadla

První zmínka o napěnění polymeru byla v roce 1935 v USA, kdy se poprvé objevila na trhu polystyrenová pěna. Průběh napěňování byl vyvolán metylchloridem nebo butylenem, které byly přidány do polystyrenu. Po ohřátí byla tato směs vystavena atmosférickým podmínkám, rozpouštědlo se začalo odpařovat a polystyren začal nabývat na objemu. Následovala technologie, kdy se do tavicí komory s taveninou začal pod tlakem vstříkovat přivedený plyn (fyzikální nadouvadlo), který napěňoval

strukturu [8]. V průběhu let bylo vyzkoušeno mnoho typů fyzikálních nadouvadel (dále jen FBA). Po zjištění, že některá FBA poškozují životní prostředí, jako byly např. halogen uhlovodíky, byla zpřísněna kontrola jejich použití. V současné době musí FBA, která mohou být pro napěňování struktur použita (viz tab. 2), projít širokou škálou kontrol. Mezi nejčastěji využívané plyny patří oxid uhličitý a dusík.

Principem fyzikálního nadouvání je vlastně vstříkávání se syceným plynem. Plyn v nadkritickém superfluidním stavu (SCF) je přímo dávkován v tavicí komoře do taveniny plastu. Šnek z obou složek vytváří homogenní směs. Při poklesu tlaku, tedy po vstříknutí směsi do dutiny formy, začnou vznikat bublinky plynu, které způsobí napěnění taveniny. Na rozdíl od chemického napěňování se u fyzikálního nadouvání jedná o větší množství rovnoměrně rozložených bublinek (viz obr. 9). Tímto rovnoměrným rozložením je zajištěno vytvoření mnoha malých, stejně velkých a uzavřených dutinek s velikostí pod 100  $\mu\text{m}$  [11].



*Obr. 9 Mikrostruktura polymeru při použití fyzikálního nadouvadla [12]*

Při výběru vhodného plynu pro napěňování musí být dbáno na následující parametry. Prvním důležitým aspektem je bezpečnost. Plyn nesmí být toxický a hořlavý. Dalším velice důležitým parametrem je rozpustnost plynu v polymeru, která je důležitá pro fyzické vypěnění materiálu a umožní použití nižší teploty taveniny v tavicí komoře. V případě, že má FBA špatnou rozpustnost, je třeba dodat vyšší množství energie pro rozpuštění plynu. Toto se obvykle provádí zvýšením tlaku v tavicí komoře, což usnadňuje rozpuštění FBA. Čím je tlak taveniny vyšší, tím se zvyšuje její frikční teplo,

keré má za následek obtížnější kontrolu nad teplotou zpěňování, neboť je třeba taveninu po rozpuštění plynu chladit. Ve výsledku to znamená, že pro FBA s nižší rozpustností v polymeru je dosahováno nižší hustoty výsledné napěněné struktury, než je tomu u dobře rozpustných nadouadel [8].

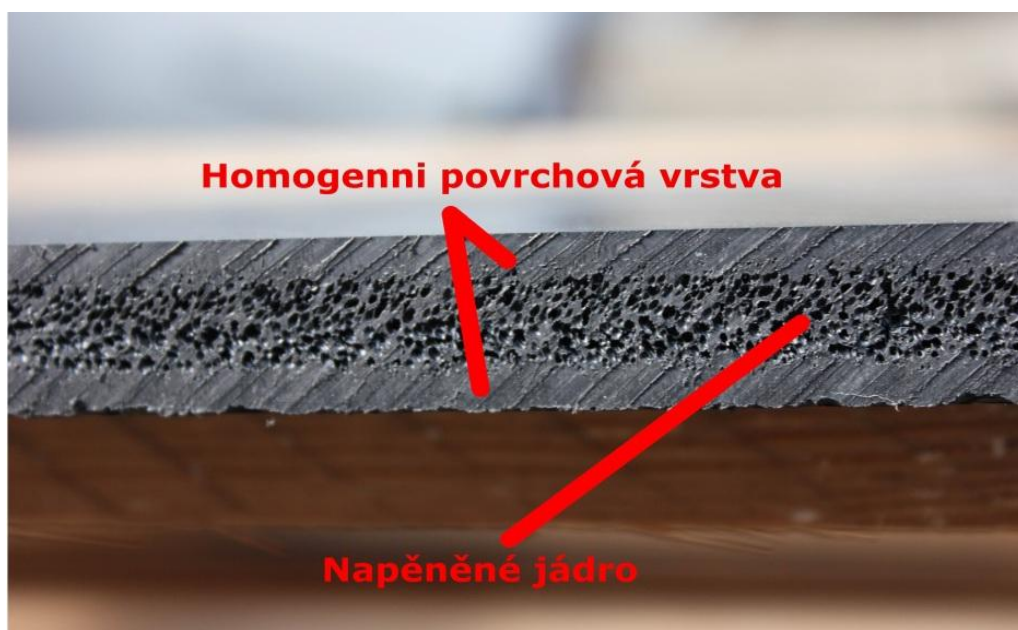
Tab. 2 Běžně používaná fyzikální nadouadla [8]

| Název             | Chemický Vzorec   | Molární hmotnost [g/mol] | Bod varu [°C] | Tlak páry [kPa] | Hustota kapaliny [g/cm <sup>3</sup> ] | Vodivost páry [W/mK] |
|-------------------|---|--------------------------|---------------|-----------------|---------------------------------------|----------------------|
| Propan            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>   | 44,1                     | -42,1         | 409,9           | 0,490                                 | 0,0179               |
| Butan             | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>  | 58,1                     | -0,5          | 243,1           | 0,570                                 | 0,0159               |
| Isobutan          | CH <sub>3</sub> (CH <sub>3</sub> )C<br>HCH <sub>3</sub>                 | 58,1                     | -11,7         | 348,4           | 0,550                                 | 0,0161               |
| Pentan            | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>  | 72,2                     | 36,1          | 68,3            | 0,621                                 | 0,0141               |
| Isopentan         | CH <sub>3</sub> (CH <sub>3</sub> )<br>CHCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> | 72,2                     | 27,9          | 98,1            | 0,615                                 | -                    |
| HCFC-22           | CHF <sub>2</sub> Cl   | 86,5                     | -40,8         | 1043,8          | 1,194                                 | 0,0106               |
| HCFC-142b         | CF <sub>2</sub> ClCH <sub>3</sub>                                       | 100,5                    | -9,2          | 338,9           | 1,110                                 | 0,0108               |
| HFC-152a          | CHF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>  | 66,0                     | -24,7         | 598,5           | 0,899                                 | 0,0136               |
| HCFC-123          | CHCl <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>                                       | 153,0                    | 27,1          | 91,5            | 1,460                                 | 0,0095               |
| CFC-11            | CFCl <sub>3</sub>   | 137,0                    | 23,0          | 105,6           | 1,476                                 | 0,0082               |
| CFC-12            | CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>   | 120,9                    | -29,8         | 651,6           | 1,311                                 | 0,0100               |
| MeCl              | CH <sub>3</sub> Cl  | 50,5                     | -24,2         | 566,5           | 1,098                                 | 0,0106               |
| MeCl <sub>2</sub> | CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>   | 84,9                     | -40,1         | 56,7            | 1,322                                 | 0,0084               |
| Oxid uhličitý     | CO <sub>2</sub>   | 44,0                     | -78,5         | -               | -                                     | -0,0165              |
| Dusík             | N <sub>2</sub>  | 28,0                     | -195,8        | -               | -                                     | -0,0258              |
| Kyslík            | O <sub>2</sub>  | 32,0                     | -183,0        | -               | -                                     | -0,0266              |

## 2.3 Vstřikování s nadouadly

Při vstřikování tlustostěnných výrobků dochází v místě jeho nejširší stěny k deformacím. Z tohoto důvodu se využívá v praxi speciálních způsobů vstřikování strukturálních pěn. Tyto technologické postupy vedou k výrobkům, které jsou tuhé, tvrdé, ale přitom lehké. Plastové díly, vyráběné touto technologií, mají povrchovou vrstvu homogenní a napěněné jádro (viz obr. 10). Tímto je rozšiřována oblast použití technologie vstřikování, protože vstřikované výrobky bez nadouadla mají maximální

doporučovanou tloušťku stěny do 8 mm (v závislosti na typu polymeru), kdežto u strukturálních pěn lze počítat s tloušťkou 10 - 20 mm [4].



*Obr. 10 Řez vstříkovaným výrobkem s chemickým nadouvadlem*

Technologie vstřikování s nadouvadly vede k výrobě plastových dílů s velmi nízkou hustotou, resp. velmi nízkou hmotností, čímž se šetří materiálové náklady. Snížení hustoty se pohybuje v rozmezí od 5 do 35 %. Další výhodou je nižší uzavírací síla, kterou musí vstříkovací stroj vyvinout, což znamená další snížení výrobních nákladů. Poslední zásadní výhodou je snížení doby chlazení výrobku (v případě obou druhů vstřikování s nadouvadly, viz kap. 2.3.1. a 2.3.2.), tím pádem se sníží i doba výrobního cyklu. Vstřikování s nadouvadly se provádí nízkotlakým a vysokotlakým způsobem. Tlak plynu u nízkotlakého způsobu je do cca 3 MPa a u vysokotlakého způsobu je vyšší jak 3 MPa. Nevýhodou vysokotlakého vstřikování jsou vzhledové vady na povrchu a poměrně dlouhý čas pro vytěkání zbytku nadouvadla (24 až 48 hodin) před započítáním doplňkových operací [2]. Nejnovější metodou je technologie MuCell, která používá fyzikálních nadouvadla.

### **2.3.1 Vstřikování s chemickými nadouvadly**

Při tomto způsobu vstřikování se v tavicí komoře roztaví plast a smísí se s chemickým nadouvadlem (během plastikace dochází v důsledku ohřevu taveniny plastu k aktivaci nadouvadla). Tlakem okolo 20 MPa se takto připravená tavenina vstříkuje do dutiny formy. Vstříkovací rychlost by měla být co nejvyšší. Forma je v této

fázi zaplněna z 80 – 90 %. V důsledku expanze nadouvadla uvnitř výrobku dojde k doplnění dílu do 100 % jeho objemu. Nadouvadlo přejímá funkci dotlaku. Tlak ve formě se sníží na jednotky MPa, tím pádem je nutná pouze malá uzavírací síla. Proces pokračuje chlazením, které je v důsledku teplotně – izolačních vlastností vytvořených strukturálních pěn mnohem pomalejší (oproti konvenčnímu vstřikování) a končí vyhozením výrobku. Forma, díky tomu že není tolik namáhána, může být vyrobena např. ze slitin hliníku. Dále musí být forma opatřena odvodu vzduchu. Z důvodu předčasného uvolnění plynu a nerovnoměrného napěňování musí být vtokové kanály krátké a dále by měly být samostatně vytápěny. Samozřejmostí jsou samouzavíratelné trysky [4]. Uvedená technologie s sebou přináší řadu výhod a nevýhod, které jsou uvedeny níže.

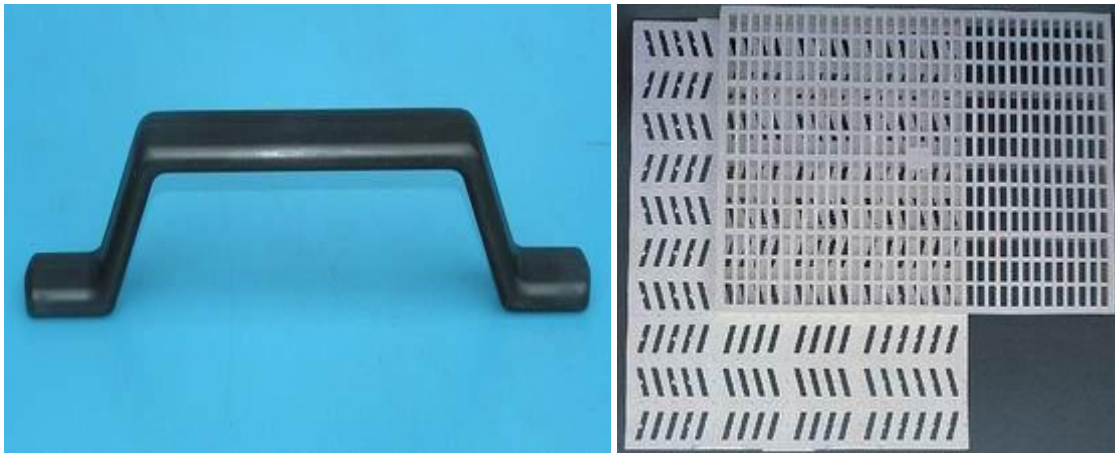
Výhody:

- Vyšší tuhost, nižší hmotnost výrobků
- Nízké vnitřní napětí ve výrobcích
- Dobré akustické vlastnosti
- Nízká deformace dílu
- Vyrobit lze výrobky o hmotnostech 10 a více kilogramů
- Díly jsou bez propadlin
- Možnost výroby tlustostěnných výrobků

Nevýhody:

- Tzn. „stříbření“ na povrchu výrobku
- Povrch není zcela hladký [13]

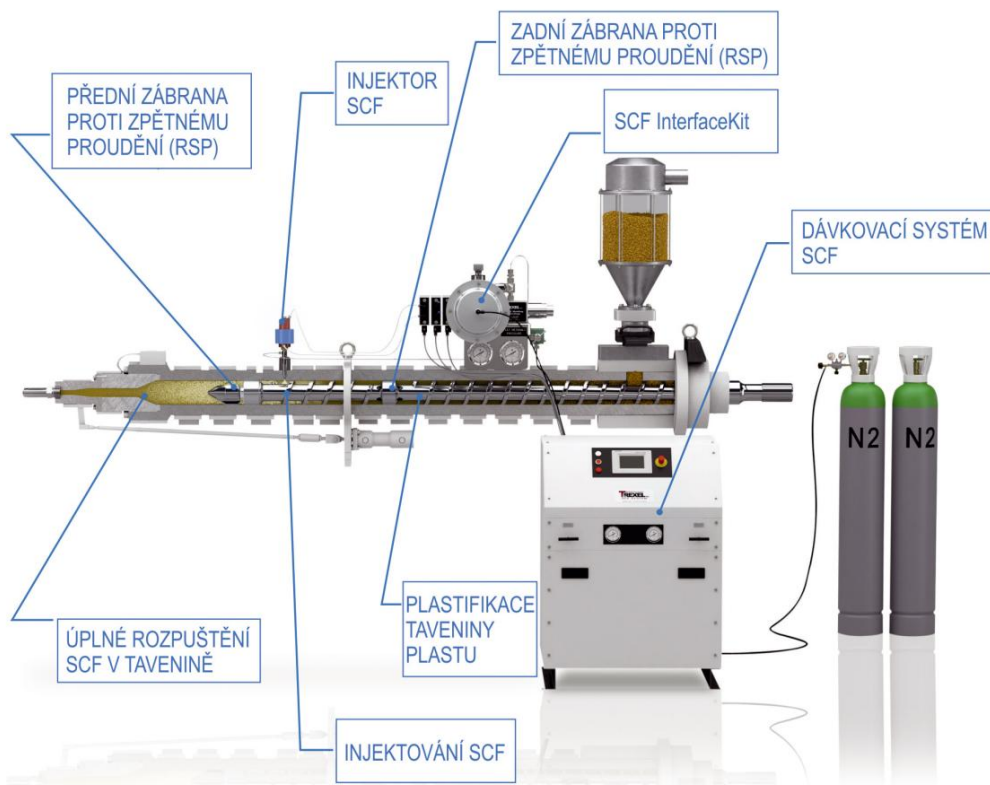
Výrobky zhotovené touto technologií mají široké spektrum využití. Používají se ve stavebnictví, v zemědělství, automobilovém průmyslu atd. (viz obr 11).



*Obr. 11 Výrobky zhotovené vstřikováním pomocí chemického nadouvadla*

### **2.3.2 Vstřikování s fyzikálními nadouvadly - MuCell**

Jak již bylo uvedeno, dalším technologickým způsobem výroby strukturních pěn je použití fyzikálního nadouvadla. Tato technologie je známa pod názvem MuCell. Princip technologie je založen na tom, že plyn resp. tzv. superkritické fluidní medium je dávkován do taveniny plastu nikoliv pomocí nadouvadla, ale speciálním injektorem, který je součástí vstřikovací jednotky (viz obr. 12). Šnek vytváří z obou složek homogenní směs, která je vstříknuta do dutiny formy [11]. Po vstříknutí plastu do dutiny formy a poklesu tlaku dochází k vytvoření lehčené mikrobuněčné struktury s uzavřenými mikrodutinami, které dosahují velikosti 5 – 10  $\mu\text{m}$  a svým tlakem kompenzují smrštění dílu. Množství a velikost mikrodutin jsou ovlivněny viskozitou taveniny, dobou chlazení, vstřikovacím tlakem, množstvím plynu a tloušťkou dílu. Oba plyny používané pro proces jsou levné, nehořlavé, nejedovaté a bez škodlivého vlivu na životní prostředí. Oxid uhličitý dosahuje superkritických podmínek již při teplotě 31  $^{\circ}\text{C}$  a tlaku 7,3 MPa. Superkritickým fluidním mediem je označována látka, která se nachází nad svou kritickou teplotou a svým kritickým tlakem. V tomto stavu nabývá vlastností kapaliny i plynu zároveň. Po fázi plnění a dotlaku následuje fáze chlazení, která je oproti konvenčnímu vstřikování kratší z důvodu menšího objemu plastu. Paradoxně i doba vstřikování a dotlaku je oproti konvenčnímu vstřikování kratší, protože plyn snižuje viskozitu taveniny, podporuje proces plnění a zajišťuje dotlak. Nakonec se forma otevře a díl je vyhozen.



*Obr. 12 Uspořádání vstřikovací jednotky u technologie MuCell [15]*

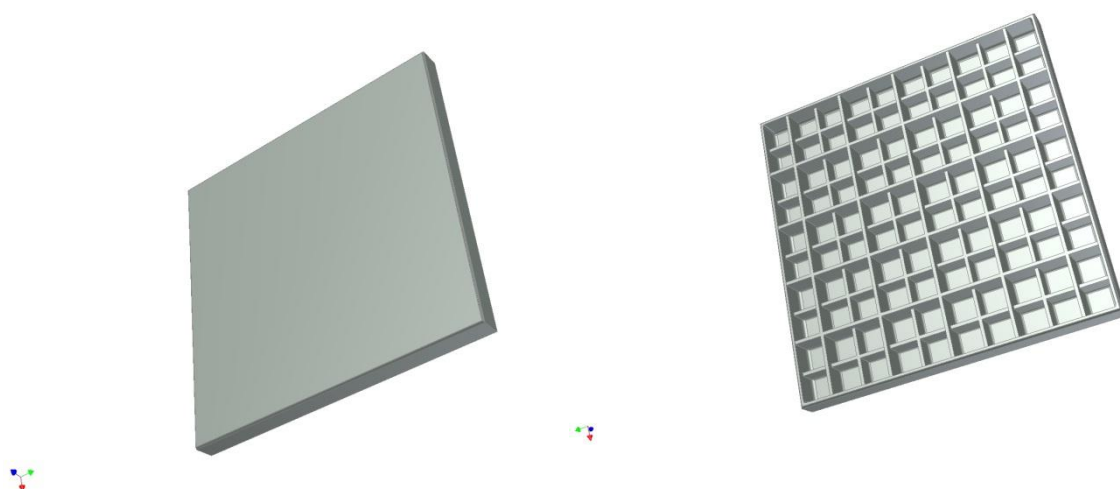
Předností nového postupu jsou výrobky s hmotností nižší o 6 až 30 % a v extrémním případě až o 40 %, s vyšší tuhostí. Minimální dosažitelná tloušťka stěny je 1 mm s tím, že je na jedné součásti možno kombinovat různé tloušťky stěn. Nižší viskozita taveniny umožňuje i snížení vstřikovacího tlaku až o 4 %, uzavírací síly až o 60 %. Výrobní cyklus se zkracuje až o 20 %. Absence vad a deformací výstřiků se připisuje tlaku plynu přejímajícího funkci rovnoměrného dotlaku, který je inherentní tomuto procesu. Po ztuhnutí a zchladnutí má výstřik nepatrná vnitřní napětí, což se příznivě odráží ve vyšší tvarové a rozměrové stabilitě [14].

### 3 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce se zabývá studiem fyzikálních, mechanických, rozměrových a vzhledových vlastností vybraného plastového dílu s lehčenou strukturou. V úvodu je charakterizována konstrukce dílu, použitý materiál, typ nadouvadla a vzorkování ve výrobě. Následně je v souladu se zadáním bakalářské práce popsán způsob hodnocení rozměrových a vzhledových vlastností dílů včetně jejich fyzikálních a mechanických vlastností.

#### 3.1 Charakteristika vybraného dílu

Ve spolupráci s firmou IMG Bohemia s.r.o. byl vybrán díl s obchodím názvem „Stěnový prvek typu MOD 20“ (viz obr. 13). Jedná se o díl, který díky své masivní konstrukci a žebrování, se používá nejčastěji pro stavbu velkorozměrových nádrží. Hmotnost dílu se vzhledem k přidanému množství nadouvadla pohybuje od 19 do 21 kg. Výkres s rozměrovými parametry je uveden v příloze 1.



*Obr. 13 Stěnový prvek MOD 20*

Tento stavební díl je vyráběn na vstřikovacím stroji od firmy Krauss Maffei MX 1600/55000 (viz obr. 13). Vzhledem k velikosti tavicí komory je uzpůsoben pro výrobu velkých plastových dílů až do hmotnosti 25 kg. Uzavírací síla stroje je 16 000 kN, průměr šneku je 205 mm.





Obr. 14 Stroj řady MX Krauss Maffei[16]

Díl je vyráběn z polypropylenu s přídavkem bílého barevného koncentrátu a chemického nadouvadla. Všechny zmíněné komponenty jsou ve formě granulátu. K výrobě byl použit polypropylen typu TIPPEN H543. Jedná se o homopolymer polypropylenu s dobrými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, který je zdravotně nezávadný při styku s pitnou vodou. Základní užité vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3. Spolu s polypropylenovým granulátem bylo smíšeno nadouvadlo pod obchodním názvem PALMAROLE MB BA 20. Jedná se o chemické nadouvadlo používané při výrobě strukturálních pěn vstřikováním termoplastů (nejčastěji PP nebo PE). Reakce, při které se plyn začne uvolňovat, je endotermická a vznikající plyn vytváří jemnou strukturální pěnu. Vlastnosti nadouvadla jsou uvedeny v tab. 4. Poslední komponentou materiálu je barevný koncentrát MAXITHEN HP 18451. Barva je dodávána ve formě granulí, obsah pigmentu je na polyethylenovém nosiči. Základní vlastnosti koncentrátu jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 3 Vlastnosti hlavního materiálu TIPPLEN H543[17]

| Vlastnost   | Hodnota | Jednotka   | Metoda        |
|---|---------|------------|---------------|
| Hmotnostní index toku taveniny (230 °C / 2.16 kg) | 4       | g/10min    | ISO 1133-1    |
| Modul pružnosti v ohybu                           | 1700    | MPa        | ISO 178       |
| Modul pružnosti v tahu                            | 1600    | MPa        | ISO 527/1A/1  |
| Napětí v tahu na mezi kluzu                       | 38      | MPa        | ISO 527/1A/50 |
| Poměrné prodloužení na mezi kluzu                 | 9       | %          | ISO 527/1A/50 |
| Tvrдость dle Rockwella*                           | 101     | R-stupnice | ISO 2039/2    |

Tab. 4 Vlastnosti nadouvadla PALMAROLE MB BA 20[18]

| Vlastnost                            | Hodnota   | Jednotka |
|--------------------------------------|-----------|----------|
| Redukce hmotnosti vstřikovaného dílu | 0,5 - 2   | %        |
| Obsah aktivní složky                 | 70        | %        |
| Teplota rozkladu                     | 145       | °C       |
| Optimální pracovní teplota           | 190 - 230 | °C       |

Tab. 5 Vlastnosti bílého koncentrátu MAXITHEN HP 18451 [19]

| Vlastnost                            | Hodnota | Jednotka |
|--------------------------------------|---------|----------|
| Koncentrace pigmentu (bílá barva)    | 40      | %        |
| Teplotní odolnost                    | 300     | °C       |
| Světlostálost (ISO 877, ISO 105-B01) | 8       | Stupeň   |

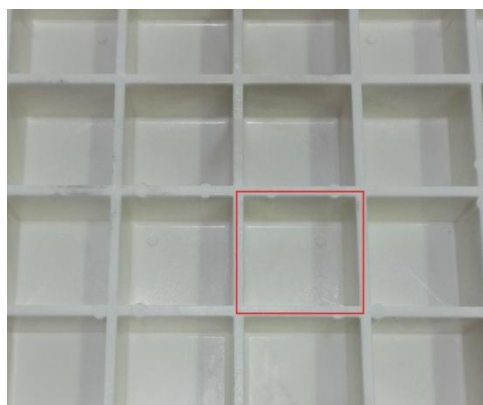
### 3.2 Příprava experimentu - vzorkování

V průběhu experimentu bylo vytvořeno 6 sad vzorků stěnových prvků v závislosti na množství chemického nadouvadla od 0 až 2,5 % (viz tab. 6). Mikroskopická struktura lehčených vzorků je uvedena na obr. 16 až obr. 20. Mikroskopické snímky byly zhotoveny na elektronovém mikroskopu Carl Zeiss Ultra Plus (po pokovení platinou o tloušťce vrstvy 3 mm v přístroji Quorum Q 150 R ES). Technologické parametry vstřikování jsou uvedeny v tab. 7. Po relaxaci zhotovených vzorků za standardních podmínek 23/50 dle ČSN EN ISO 291 následovalo odebrání destiček o rozměrech (100x100x10) mm, což byl maximální možný rozměr rovinné plochy. Příklad místa odběru je znázorněn na obr. 15b. Zhotovení destiček se provádělo na pásové pile BAS 317 W (viz. Obr 15a). Z destiček byla následně pomocí CNC frézky Colfeld obrobena zkušební tělesa pro hodnocení mechanických vlastností materiálu dílu v souladu s mezinárodními standardy.

a)

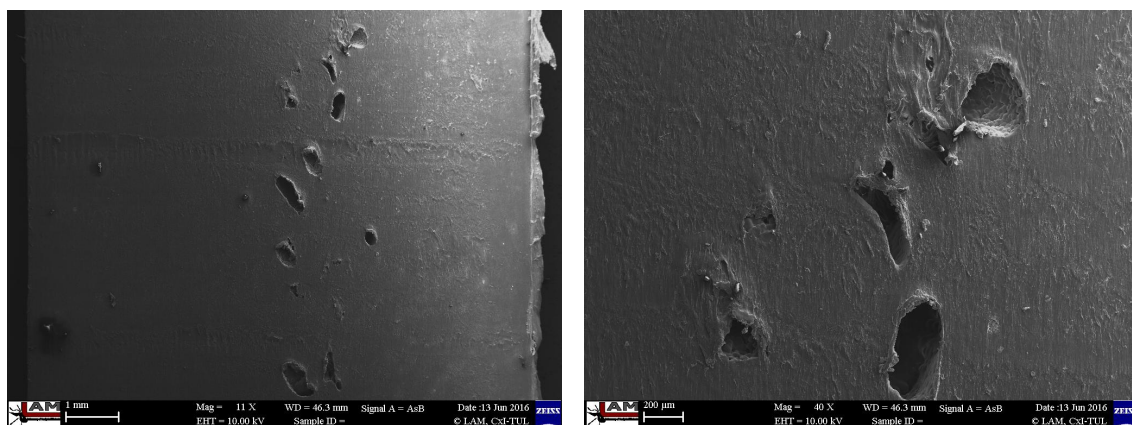


b)

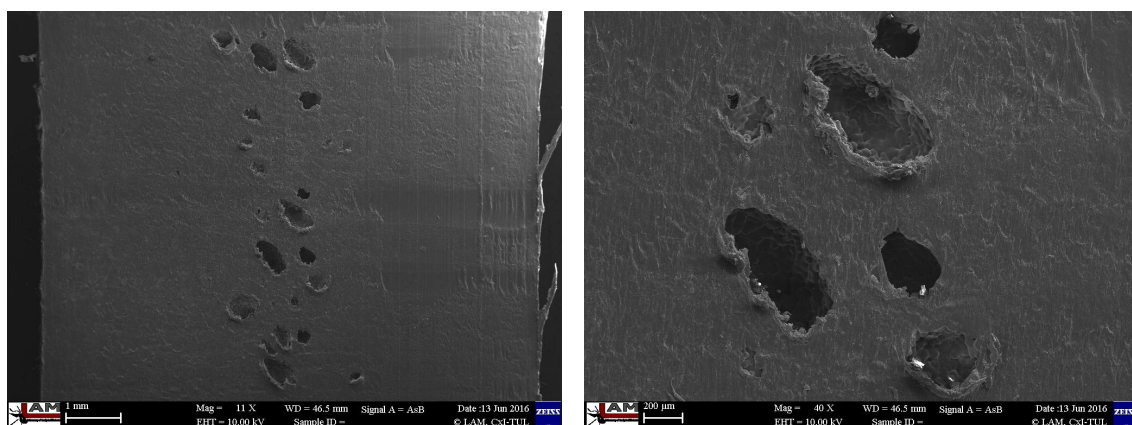


*Obr. 15 Příprava destiček*

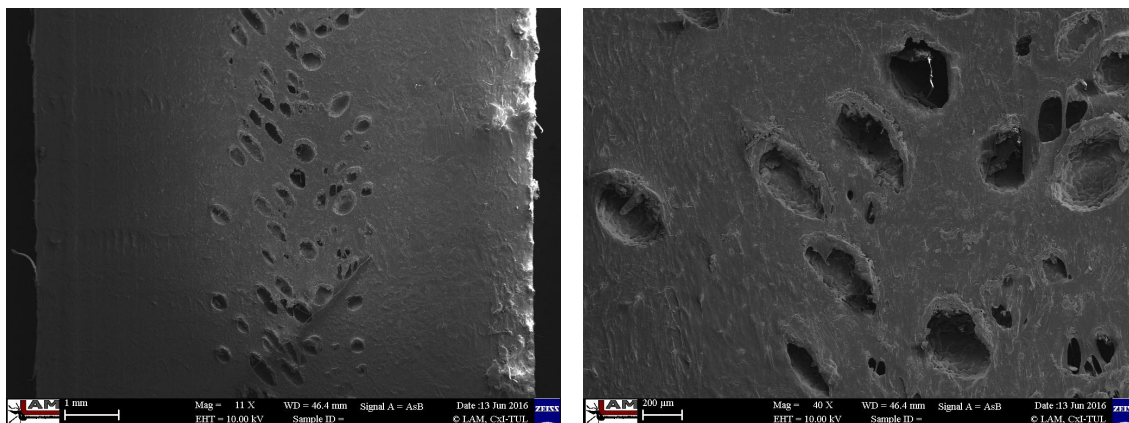
*a) Pila Metabo BAS 317 W [20]; b) příklad místa odběru destičky*



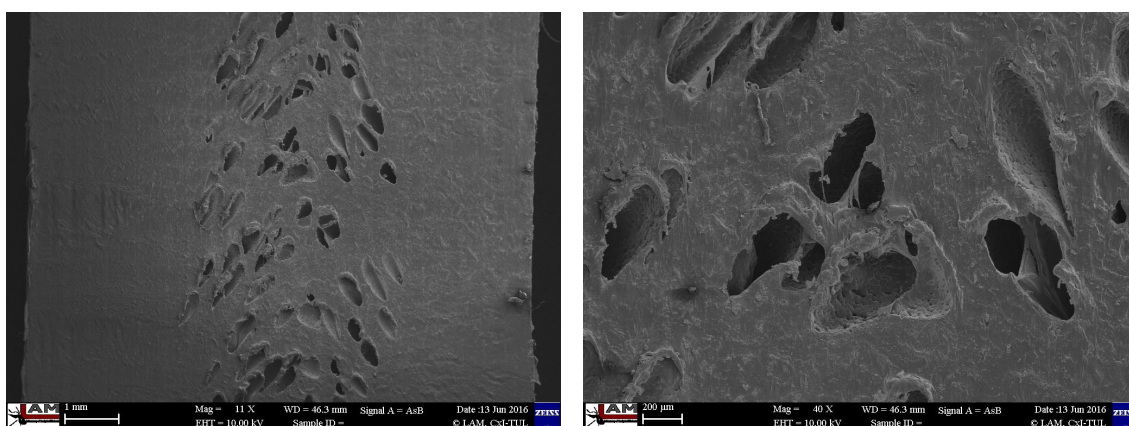
*Obr. 16 Mikroskopické snímky lehčené struktury s množstvím nadouvadla 0,5 % (SEM)*



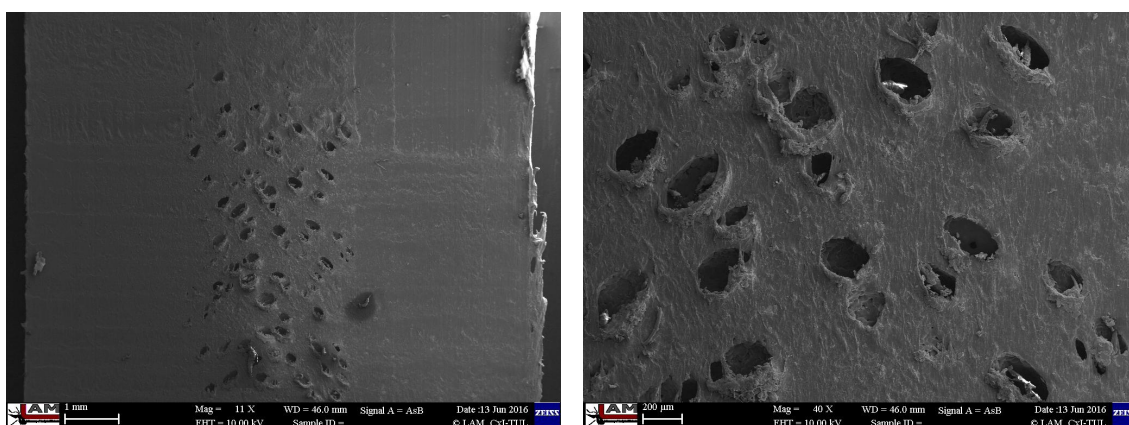
*Obr. 17 Mikroskopické snímky lehčené struktury s množstvím nadouvadla 1 % (SEM)*



*Obr. 18 Mikroskopické snímky lehčené struktury s množstvím nadouvadla 1,5 % (SEM)*



*Obr. 19 Mikroskopické snímky lehčené struktury s množstvím nadouvadla 2 % (SEM)*



*Obr. 20 Mikroskopické snímky lehčené struktury s množstvím nadouvadla 2,5 % (SEM)*

Tab. 6 Rozpis vyrobených vzorků

| Šarže | Obsah komponenty v [%] |            |            |
|-------|------------------------|------------|------------|
|       | Polypropylen           | Bílá barva | Nadouvadlo |
| 1     | 99,0                   | 1          | 0          |
| 2     | 98,5                   | 1          | 0,5        |
| 3     | 98,0                   | 1          | 1,0        |
| 4     | 97,5                   | 1          | 1,5        |
| 5     | 97,0                   | 1          | 2,0        |
| 6     | 96,5                   | 1          | 2,5        |

Tab. 7 Základní parametry vstřikování

| Parametr stroje        | Hodnota | Jednotka |
|------------------------|---------|----------|
| Velikost dávky         | 712     | mm       |
| Doba cyklu             | 300     | s        |
| Teplota taveniny       | 220     | °C       |
| Bod přepnutí na dotlak | 20      | mm       |
| Čas dotlaku            | 3       | s        |
| Doba vstřiku           | 12      | s        |
| Teplota formy          | 35      | °C       |

### 3.3 Vzhledové a rozměrové vlastnosti dílu

Ve firmě IMG Bohemia s.r.o. jsou výrobky předávány jako první jakost výroby na základě vyhovujících kritérií spojených s hodnocením vzhledových vlastností dílů (viz tab. 8), tzn., zda výrobky nevykazují propadliny, zda nedochází k tvorbě tzv. diesel efektu a „žloutnutí“ materiálu a dále na základě jejich rozměrové přesnosti (délka, šířka, výška) a hmotnosti. Rozměrové parametry jsou kontrolovány svinovacím metrem, hmotnost je stanovena na paletovém vozíku s váhou KPZ71-8A s přesností 0,1kg. Výsledky vzhledových a rozměrových vlastností dílů v závislosti na množství nadouvadla jsou přehledně uvedeny v tab. 9 a graficky dokumentovány na obr. 22.



Obr. 21 Měřidla rozměrů a hmotnosti

a) Svinovací metr Komelon [21]; b) Paletový vozík s váhou KPZ71-8A [22]

Tab. 8 Předepsané rozměry a tolerance měřených parametrů stěnového prvku

| Parametr | Hodnota      | Jednotka |
|----------|--------------|----------|
| Hmotnost | 20,0 ± 0,5   | kg       |
| Délka    | 1000,0 ± 3,0 | mm       |
| Šířka    | 1000,0 ± 3,0 | mm       |
| Výška    | 80,0 ± 2,0   | mm       |

Tab. 9 Rozměrové a vzhledové parametry vzorků

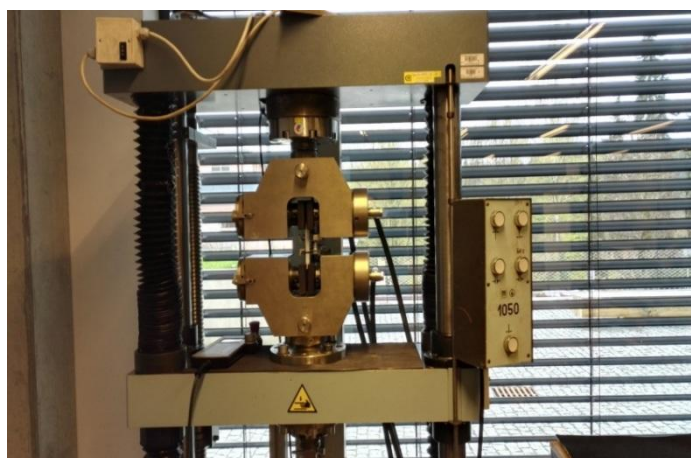
| Šarže | Množství Nadouvadla [%] | Hmotnost [kg] | Délka [mm] | Šířka [mm] | Výška [mm] | Vzhled           | Výsledek |
|-------|-------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------------|----------|
| 1     | 0                       | 20,95         | 995,5      | 998,9      | 76,9       | Propadliny       | NE       |
| 2     | 0,5                     | 20,45         | 997,4      | 1000,1     | 79,6       | Jemné propadliny | NE       |
| 3     | 1                       | 20,29         | 999,7      | 999,4      | 80,2       | Vyhovující       | OK       |
| 4     | 1,5                     | 20,16         | 999,3      | 999,7      | 79,7       | Vyhovující       | OK       |
| 5     | 2                       | 20,09         | 999,8      | 1000,3     | 79,9       | Vyhovující       | OK       |
| 6     | 2,5                     | 20,04         | 999,6      | 999,8      | 79,7       | Vyhovující       | OK       |



*Obr. 22 Propadliny a deformace na stěnovém prvku*

### **3.4 Stanovení tahových vlastností**

Tahová zkouška se používá k vyhodnocení chování zkušebních těles při namáhání tahovou silou a pro stanovení meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a dalších charakteristik, vycházejících ze závislosti napětí v tahu a poměrného prodloužení [23]. Pro vyhodnocení tahových vlastností byla z připravených destiček, odebraných ze stěnového prvku, obrobena zkušební tělesa typu 1BA v souladu s předpisem ČSN ISO 527-2. K obrábění zkušebních těles byla použita CNC frézka Coltsfeld. Pro stanovení meze pevnosti a jmenovitého prodloužení při přetržení (celkové tažnosti) byla zkušební tělesa, v závislosti na obsahu nadouvadla, zatěžována ve směru své hlavní osy až do porušení rychlostí 20 mm/min. Během zkoušky se zaznamenávaly hodnoty působícího zatížení a zvětšené počáteční měřené délky vzorku resp. závislost napětí v tahu na prodloužení. Pro každou šarži, danou množstvím nadouvadla v polymeru, bylo na trhacím zařízení TiraTest 2300 (viz obr. 23) zkoušeno vždy min. 15 zkušebních těles.



*Obr. 23 Zařízení TiraTest 2300*

Snímací hlava byla volena s rozsahem do 100 kN, počáteční měřená délka  $L_0 = 20$  mm a upínací vzdálenost mezi čelistmi  $L = 61$  mm. K měření poměrného prodloužení na mezi pevnosti (zvětšení délky vztažené na počáteční měřenou délku) byl použit průtahoměr typu MFN. Záznamy průměrných hodnot meze pevnosti, poměrného prodloužení na mezi pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení (celkové tažnosti) jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Výsledné hodnoty vzorků při tahové zkoušce

| Šarže | Mez pevnosti v tahu $\sigma_m$ [MPa] | Poměrné prodloužení na mezi pevnosti $\varepsilon_m$ [%] | Celková tažnost $\varepsilon_{tb}$ [%] |
|-------|--------------------------------------|--|--|
| 1     | $32,5 \pm 0,7$                       | $9,2 \pm 0,7$  | $27,8 \pm 9,6$                         |
| 2     | $32,0 \pm 0,8$                       | $8,8 \pm 0,9$  | $15,7 \pm 2,1$                         |
| 3     | $29,3 \pm 0,9$                       | $9,4 \pm 1,5$  | $15,4 \pm 1,5$                         |
| 4     | $28,6 \pm 1,2$                       | $15,6 \pm 6,2$   | $14,5 \pm 1,6$                         |
| 5     | $28,4 \pm 1,7$                       | $11,6 \pm 5,3$   | $11,7 \pm 1,5$                         |
| 6     | $25,7 \pm 1,0$                       | $11,3 \pm 3,8$   | $15,5 \pm 2,2$                         |

Stanovení modulu pružnosti v tahu probíhalo za snížené rychlosti zkoušení 1 mm/min pomocí průtahoměru EPSILON (model 3542-010M-025-ST), viz obr. 24. Výsledná hodnota byla stanovena z hodnot napětí naměřených při daném poměrném prodloužení 0,05 a 0,25 % dle rovnice (2).

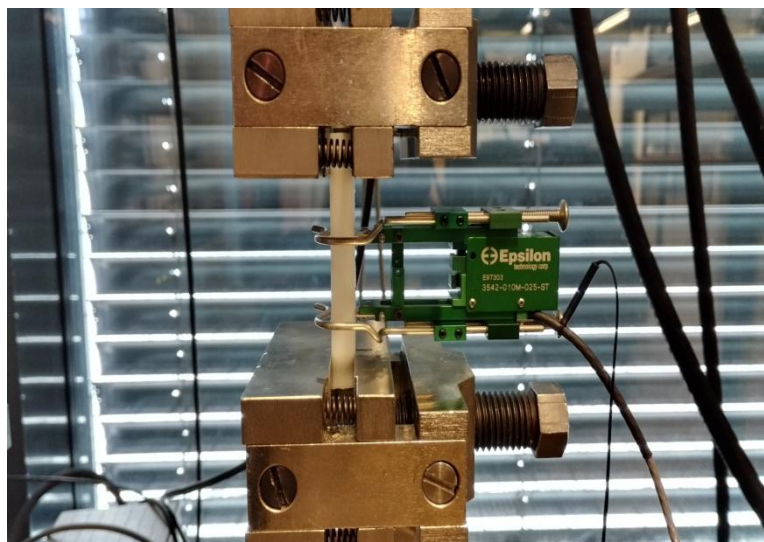
$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot 100 [\%], \quad (2)$$

kde  $\sigma_2$  je tahové napětí [MPa] při deformaci  $\varepsilon_2 = 0,25$  % a  $\sigma_1$  je tahové [MPa] napětí při deformaci  $\varepsilon_2 = 0,05$  %. Výsledné průměrné hodnoty modulu pružnosti jednotlivých šarží jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11 Hodnoty modulu pružnosti v tahu všech šarží

| Šarže | Modul pružnosti v tahu $E_t$ [MPa] |
|-------|------------------------------------|
| 1     | $1376 \pm 39$                      |
| 2     | $1350 \pm 45$                      |
| 3     | $1276 \pm 48$                      |
| 4     | $1092 \pm 59$                      |
| 5     | $1197 \pm 31$                      |
| 6     | $1114 \pm 74$                      |





Obr. 24 Schéma měření tahových vlastností s průtahoměrem EPSILON

### 3.5 Stanovení ohybových vlastností

Ohybová zkouška se používá ke zjišťování chování zkušebních těles při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek (rychlosti a prostředí zkoušení). Podstatou zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přitlačným trnem uprostřed jejich rozpětí [24]. Ohybové vlastnosti plastových vzorků o rozměrech (80 x 15 x 10) mm, byly vyhodnocovány na zkušebním zařízení HOUNSFIELD H10KT, viz obr. 25, metodou ISO 178/N/2, tj. rychlostí zkoušení 2 mm/min. Předpětí bylo nastaveno 30 N. Každý testovaný vzorek, s výše uvedenými rozměry, se symetricky umístil na podpěry s rozpětím 60 mm. Testovalo se 10 vzorků z každé šarže a vyhodnocována byla mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Nejprve se za použití snímací hlavy do 500 N, při rychlost zkoušení 2 mm/min stanovil modul pružnosti z rovnice (3).

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \cdot 100 [\%], \quad (3)$$

kde  $\sigma_{f2}$  je ohybové napětí [MPa] při deformaci  $\varepsilon_{f2} = 0,25 \%$  a  $\sigma_{f1}$  je ohybové napětí [MPa] při deformaci  $\varepsilon_{f1} = 0,05 \%$ . V tab. 12 jsou uvedeny průměrné hodnoty modulu pružnosti včetně směrodatných odchylek.



*Obr. 25 Zařízení HOUNSFIELD H10KT*

*Tab. 12 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu všech šarží*

| <b>Šarže</b> | <b>Modul pružnosti v ohybu <math>E_f</math> [MPa]</b> |
|--------------|---|
| <b>1</b>     | 966 ± 102   |
| <b>2</b>     | 992 ± 189   |
| <b>3</b>     | 1084 ± 77   |
| <b>4</b>     | 1047 ± 115  |
| <b>5</b>     | 1168 ± 78   |
| <b>6</b>     | 922 ± 160   |

Při druhé části zkoušky se měřila výsledná pevnost v ohybu. Opět bylo měřeno 10 vzorků z každé šarže, při shodné rychlosti zkoušení jako v případě modulu pružnosti. Velikost snímací hlavy byla v tomto případě 10 kN, vzdálenost podpěr opět 60 mm. Vzorek byl namáhán ohybovým napětím do hodnoty smluvního průhybu, u něhož docházelo po dosažení meze pevnosti v ohybu k poklesu napětí. Průměrné hodnoty meze pevnosti v ohybu jsou zaznamenáni v tab. 13 spolu se směrodatnými odchylkami.

Tab. 13 Hodnoty pevnosti v ohybu všech šarží

| Šarže | Pevnost v ohybu $\sigma_{fM}$ [MPa] |
|-------|-------------------------------------|
| 1     | 48,2 ± 2,5                          |
| 2     | 50,0 ± 3,1                          |
| 3     | 51,5 ± 2,6                          |
| 4     | 48,2 ± 3,3                          |
| 5     | 51,2 ± 1,9                          |
| 6     | 48,8 ± 2,5                          |

### 3.6 Stanovení hustoty

Pro stanovení hustoty strukturně lehčených vzorků byla použita metoda, při které byly využity hodnoty naměřených hmotností jednotlivých dílů (viz kap. 3.3) a velikost objemu dílu, která vychází z výpočtového modelu. Hustota byla stanovena dle rovnice (4).

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (4)$$

kde  $\rho$  je vypočtená hustota dílu,  $m$  je hmotnost dílu [kg] a  $V$  je teoretický objem dílu [m<sup>3</sup>], zjištěný z 3D dat modelu dílu dodaného výrobcem vstřikovací formy. Výsledky jsou zaznamenány v tab. 14.

Tab. 14 Hodnoty hustoty všech šarží

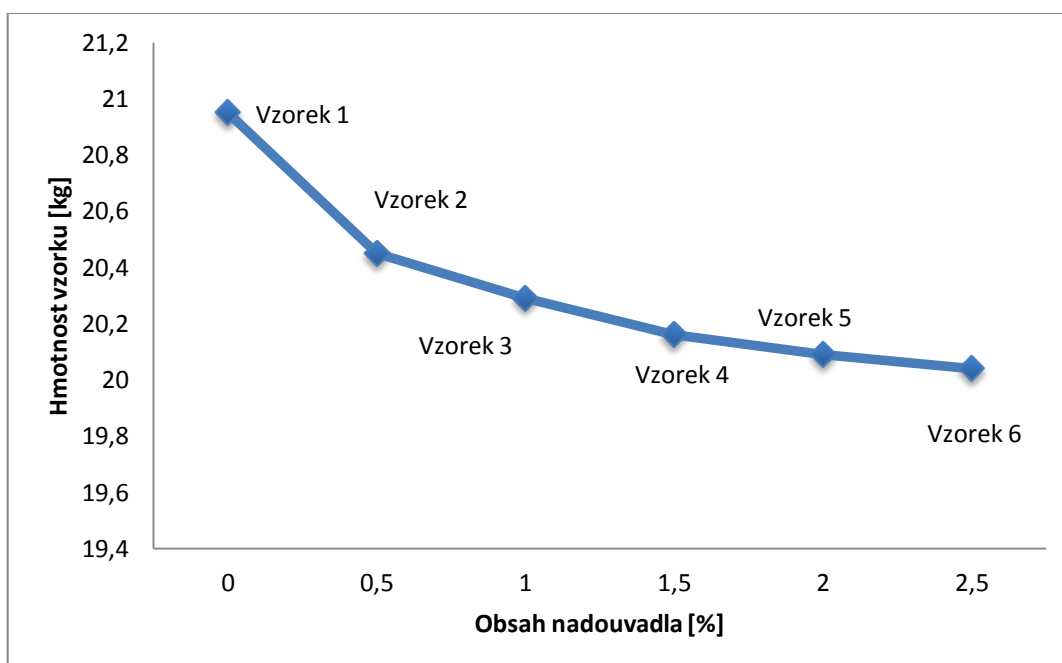
| Šarže | Hmotnost vzorku [kg] | Teoretický objem vzorku [m <sup>3</sup> ] | Hustota vzorku [kg/m <sup>3</sup> ] |
|-------|----------------------|---|-------------------------------------|
| 1     | 20,95                | 277,72 · 10 <sup>-4</sup>                 | 754,4                               |
| 2     | 20,45                |   | 736,4                               |
| 3     | 20,29                |   | 730,6                               |
| 4     | 20,16                |   | 725,9                               |
| 5     | 20,09                |   | 723,4                               |
| 6     | 20,04                |   | 721,6                               |

## 4 Vyhodnocení výsledků

Tato kapitola je zaměřena na vyhodnocení naměřených parametrů všech vzorků, lišících se množstvím přidávaného nadouvadla.

### 4.1 Vyhodnocení vzhledových a rozměrových vlastností

Na základě rozměrových parametrů jednotlivých vzorků zobrazených v tab. 9 v kapitole 3.3 je vidět, že díly s obsahem nadouvadla 0 % a 0,5 % nevyhovují z hlediska vzhledu. Na těchto dvou výrobcích se objevují znatelné propadliny (viz obr. 22), které vytvářejí velice nekvalitní nerovný povrch. Na výstupní kontrole by tyto vzorky nevyhovovaly a byly by následně zrecyklovány. Vzorky č. 3 až 6 vyhovovaly svým vzhledem první jakosti výroby, jejich povrch byl hladký, tvarově a rozměrově přesný. Co se týče hmotnosti, vzorky č. 2 až č. 6 byly v toleranci podnikové normy IMG Bohemia s.r.o., která uvádí minimální hmotnost 19,5 kg a maximální hmotnost 20,5 kg. Jak je vidět z obr. 26 hmotnost s přibývajícím množstvím nadouvadla klesá. Z hlediska rozměrových parametrů nevyhovoval pouze vzorek č. 1, kdy jeho parametry nesplňovaly rozměry deklarované výrobcem (viz tab. 8).



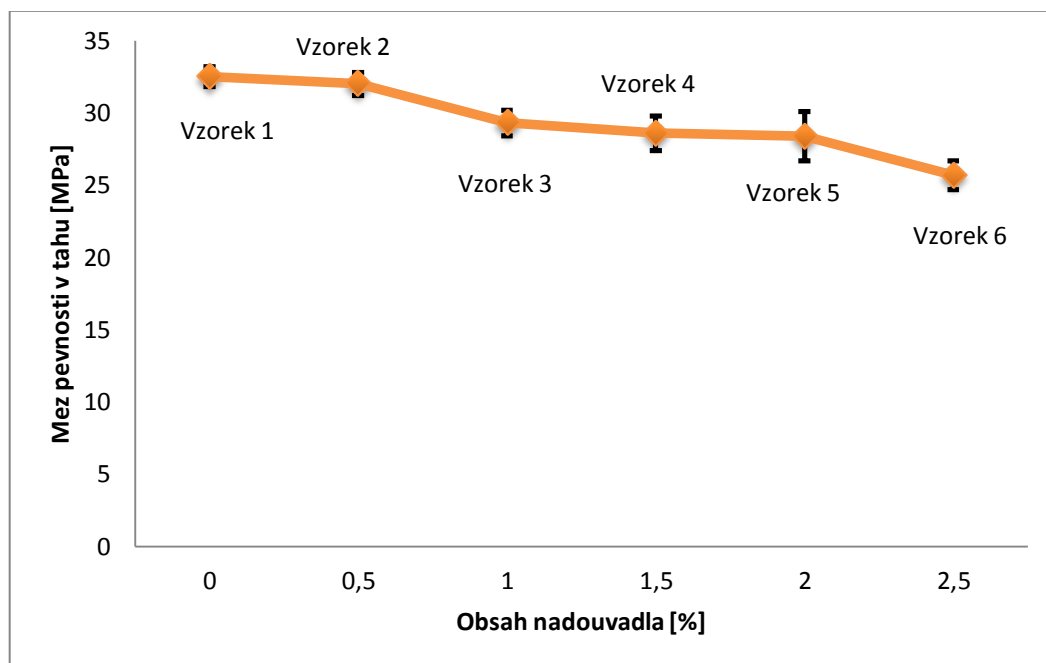
Obr. 26 Grafická závislost hmotnosti dílu na množství nadouvadla

Celková rozměrová a tvarová nestálost vzorků č. 1 a 2 je zapříčiněna velkým množstvím propadlin. Při výstupní kontrole by takto vyrobené díly byly přeřazeny do nestandardů. Vzorky č. 3 až č. 6 by z hlediska vzhledu rozměrů a hmotnosti vyhovovaly první jakosti výroby.

## 4.2 Vyhodnocení tahových vlastností

Tahové vlastnosti vzorků  $\sigma_m, \varepsilon_m, \varepsilon_{tb}, E_t$  byly změřeny a vyhodnoceny dle normy ČSN ISO 527-2. V první fázi zkoušek byla měřena mez pevnosti v tahu, poměrné prodloužení na mezi pevnosti a jmenovité prodloužení při přetržení. Následovalo měření modulu pružnosti v tahu. Výsledné hodnoty tahových vlastností jsou zpracovány v kap. 3.4 a výsledky jsou zobrazeny v tab. 10 a tab. 11.

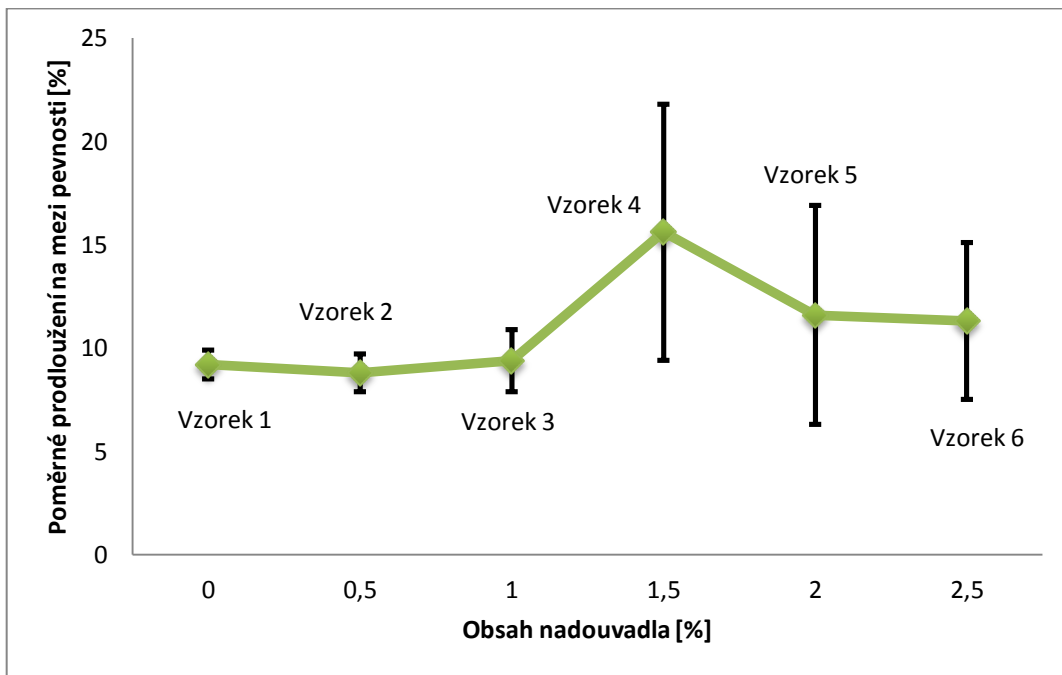
Z naměřených hodnot je patrné, že mez pevnosti v tahu s přibývajícím množstvím nadouvadla (se snižující se hmotností dílů) klesá. Nejvyšší hodnota meze pevnosti  $\sigma_m = 32,5 \text{ MPa}$  odpovídá vzorku č. 1 obsahující 0 % nadouvadla. A vzhledem k poklesu meze pevnosti v tahu se zvyšujícím se podílem nadouvadla byla nejnižší hodnota  $\sigma_m = 25,7 \text{ MPa}$  zjištěna u vzorku č. 6, s obsahem 2,5 % nadouvadla, které způsobilo pokles pevnosti v tahu o 21 %, viz obr. 27.



Obr. 27 Grafická závislost meze pevnosti v tahu na množství nadouvadla

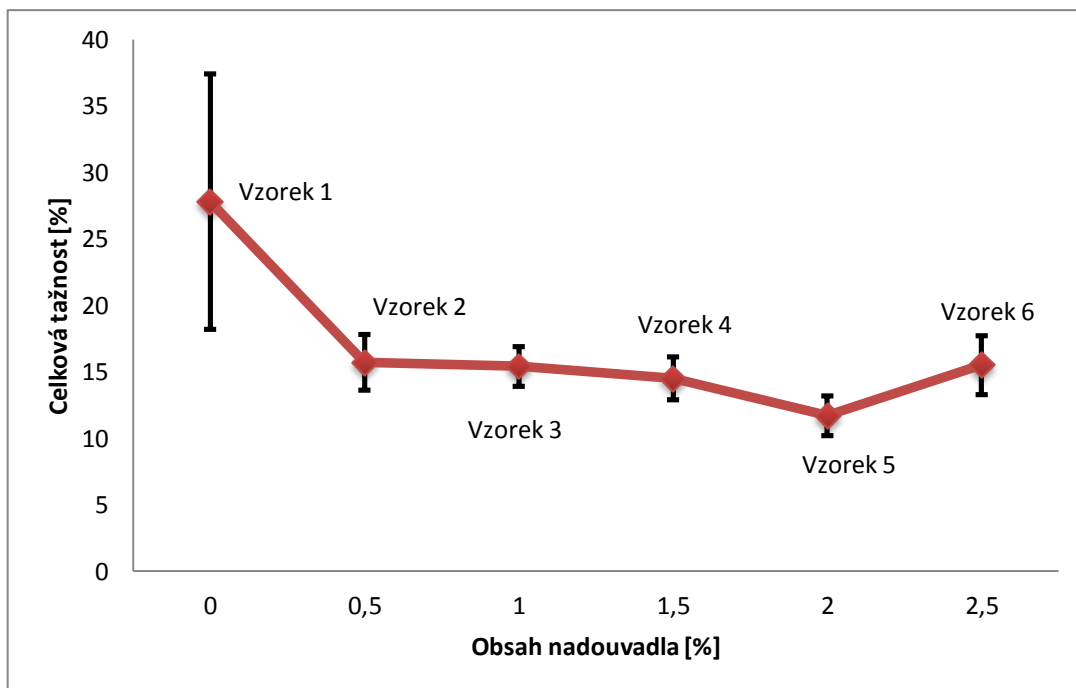
Z naměřených hodnot poměrného prodloužení na mezi pevnosti vzhledem k jejich

rozptylu lze říci, že množství nadouvadla v polypropylenu nemá vliv na hodnotu poměrného prodloužení na mezi pevnosti. U vzorků č. 4 až 6 je rozptyl naměřených hodnot veliký. Toto mohlo být zapříčiněno nerovnoměrným rozložením dutinek lehčené struktury použitého chemického nadouvadla. Nejnižší hodnota poměrného prodloužení  $\varepsilon_m = 8,8 \%$ , byla naměřena na vzorku č. 2 naopak nejvyšší hodnota  $\varepsilon_m = 15,6 \%$  odpovídala vzorku č. 4. Grafické zobrazení lze pozorovat na obr. 28.



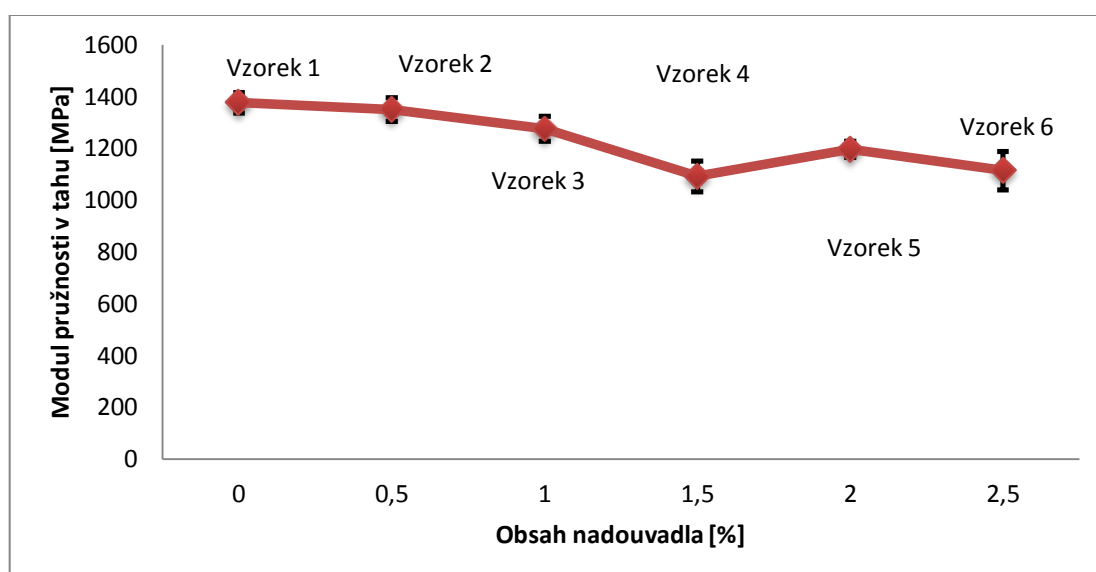
Obr. 28 Grafická závislost poměrného prodloužení na mezi pevnosti na množství nadouvadla

Celková tažnost výstřiků šarže č. 1 je velice nehomogenní, měření hodnoty vykazují značný rozptyl (i při navýšení počtu měřených vzorků), což napovídá tomu, že nadouvadlo má pozitivní vliv na stabilizaci celkové tažnosti. Dochází k eliminaci nestálé vnitřní struktury a snížení vnitřního napětí. Nejnižší průměrná hodnota tažnosti  $\varepsilon_{tb} = 11,7 \%$  byla změřena na vzorku č. 5, který odpovídal 2% příměsi nadouvadla. Nejvyšší dosažená tažnost  $\varepsilon_{tb} = 27,8 \%$  byla změřena na vzorku č. 1, který neobsahoval žádné nadouvadlo. Celková tažnost vlivem množství nadouvadla klesá, kdy příměs nadouvadla způsobila pokles o 45 %. Přehledné zobrazení výsledků celkové tažnosti je na obr. 29.



Obr. 29 Grafická závislost celkové tažnosti na množství nadouvadla

Co se týče vyhodnocení modulu pružnosti v tahu, tak je z obr. 30 patrné, že s přibývajícím množstvím nadouvadla klesá současně modul pružnosti v tahu. U vzorků s 2,5 % obsahem nadouvadla je pokles modulu pružnosti v tahu o 19 %. Nejvyšší hodnota modulu pružnosti  $E_t = 1376 \text{ MPa}$  byla zjištěna u vzorku č. 1, kde není použita příměs chemického nadouvadla. A naopak nejnižší hodnota modulu pružnosti  $E_t = 1092 \text{ MPa}$  byla zjištěna na vzorku č. 4 obsahujícího 1,5 % nadouvadla.



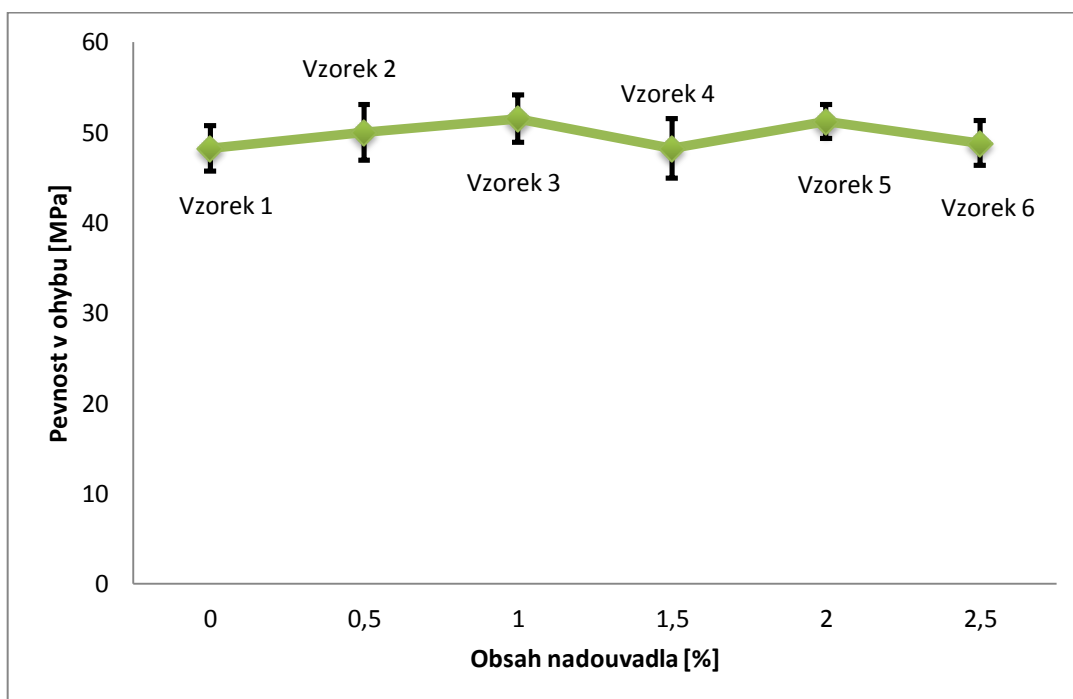
Obr. 30 Grafická závislost modulu pružnosti v tahu na množství nadouvadla

Z hlediska vyhodnocení tahových vlastností je zřejmé, že se vzrůstajícím podílem nadouvadla klesá celková pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu. Celková tažnost vzhledem k rozptylu měřených hodnot nevykazuje výrazných změn.

### 4.3 Vyhodnocení ohybových vlastností

Ohybové vlastnosti jednotlivých vzorků  $E_f$ ,  $\sigma_{fM}$  byly stanoveny a vyhodnoceny v souladu s normou ČSN EN ISO 178. V první části této zkoušky byl měřen modul pružnosti v ohybu, následovalo měření napětí na mezi pevnosti v ohybu. Všechny naměřené hodnoty jsou zpracovány v kap. 3.5 a přehledně sepsány v tab. 12 a tab. 13.

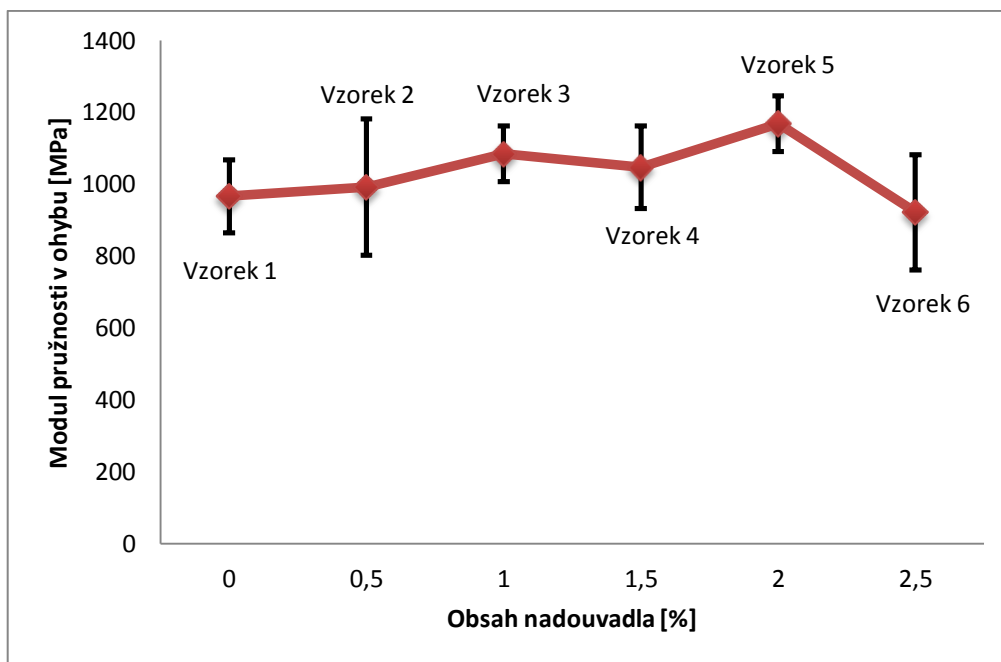
Z naměřených hodnot je patrné, že pevnost v ohybu je u všech vzorků s ohledem na rozptyl měřených hodnot (vyjádřený směrodatnou odchylkou) shodná. Největší pevnost v ohybu  $\sigma_{fM} = 51,5 \text{ MPa}$  byla naměřena na vzorku č. 3, který obsahoval 1% nadouvadla. Naopak nejnižší průměrná pevnost v ohybu s hodnotou  $\sigma_{fM} = 48,2 \text{ MPa}$  byla zjištěna na vzorcích č. 1 a č. 4. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou pevnosti byl 6 %, což znamená, že výsledná pevnost nebyla ovlivněna dodávaným množstvím chemického nadouvadla, jak je vidět z obr. 31.



Obr. 31 Grafická závislost pevnosti v ohybu na množství nadouvadla



Co se týče vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu, kdy jeho grafická závislost na množství nadouvadla ve výstřiku je zobrazena na obr. 32, je patrné, že modul pružnosti v ohybu je jako v případě pevnosti v ohybu s ohledem na rozptyl naměřených hodnot shodný. Hodnoty kolísají v toleranci cca 15 %, a však vzhledem k jejich rozptylu je tato změna v rámci statistické chyby. Nejnižší modul pružnosti byl zjištěn na vzorku č. 6, neobsahující nadouvadlo, kdy průměrná hodnota vyšla  $E_f = 922 \text{ MPa}$ . Nejvyšší hodnota modulu pružnosti byla změřena na vzorku č. 5 (2 % nadouvadla) a to  $E_f = 1168 \text{ MPa}$ .



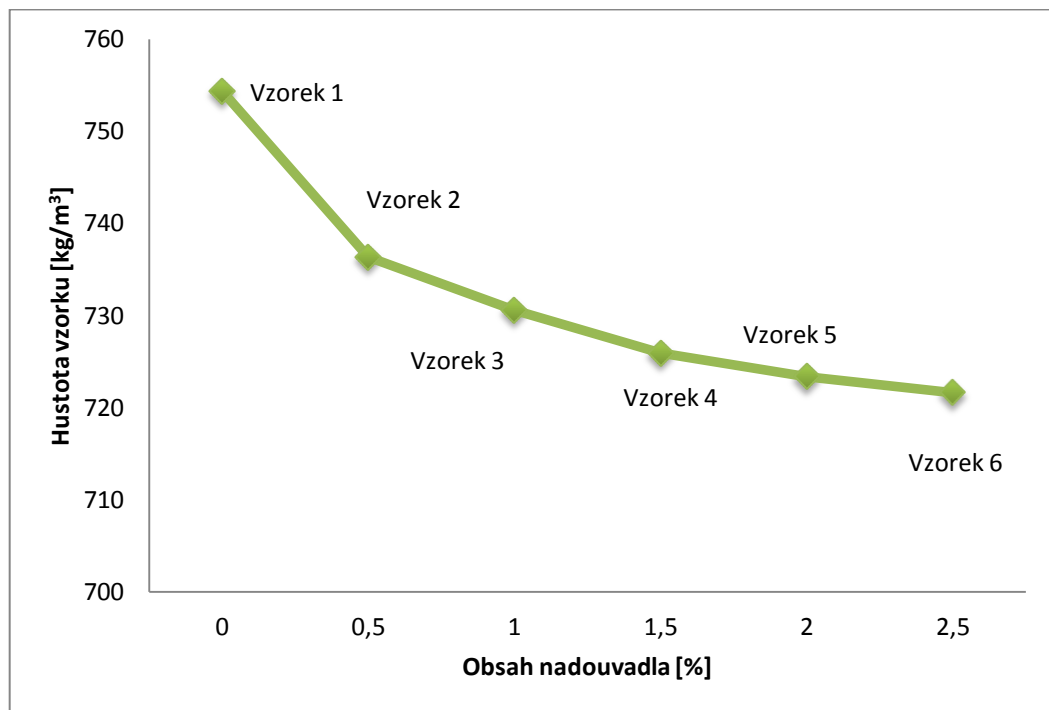
Obr. 32 Grafická závislost modulu pružnosti v ohybu na množství nadouvadla

Výsledné hodnocení ohybových zkoušek přineslo zjištění, že při relativně malé změně množství nadouvadla výrazně neklesají ohybové vlastnosti výrobku, při jeho celkové snižující se hmotnosti. Výrobce dílu tak může deklarovat shodné ohybové parametry dílu bez i s nadouvadlem.

#### 4.4 Vyhodnocení hustoty

Na základě získaného teoretického objemu a hmotnosti jednotlivých vzorků byla zjištěna hustota všech dílů. Naměřené výsledky jsou vedeny v kapitole 3.6, tab. 14. Nejvyšší hustota byla zjištěna u vzorku č. 1, který neobsahoval žádné nadouvadlo. Nejnižší hustota byla zjištěna na vzorku, který obsahoval největší množství nadouvadla a to 2,5 %. Z naměřených hodnot vyplývá, že hustota s množstvím nadouvadla klesá,

viz obr. 33. U dílu obsahující nejvyšší množství nadouvadla (2,5 %) došlo oproti nelehčenému dílu k poklesu hustoty o cca 4,3 %. To znamená, že výrobce lehčených komponent může získat při zvýšeném podílu nadouvadla produkty se sníženou hmotností. Se snižující se vahou výrobků se zlepšuje manipulace, což je zásadní pro odběratele a klesají náklady na nákup hlavního materiálu, což je pro výrobce plastových dílů důležité zjištění.



Obr. 33 Grafická závislost hustoty na množství nadouvadla

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce se v teoretické práci zabývá rozbořem technologie vstřikování s nadouvadly. Je zde podrobně popsán druh používaných nadouvadec s příklady technologií jejich zpracování. V experimentální části byl zvolen stavební díl vyráběný ve firmě IMG Bohemia s.r.o., na kterém se testoval vliv množství nadouvadla na jeho vlastnosti. Analyzovány byly tahové, ohybové, vzhledové a rozměrové vlastnosti dílu při rozdílném obsahu nadouvadla v rozmezí 0 až 2,5 %.

Z naměřených rozměrových parametrů je patrné, že díly stěnového prvku v první jakosti (o tloušťce stěny 10 mm) nelze vyrábět konvenčním vstřikováním bez nadouvadec. U těchto dílů dochází ke vzniku propadlin a tvorbě nekvalitního povrchu. Také z hlediska hmotnosti by nelehčený díl nevyhovoval podnikové normě IMG Bohemia s.r.o. Vzorek s obsahem 0,5 % nadouvadla již svou hmotností vyhovuje předpisům, ale z hlediska rozměrových parametrů tj. délky, šířky a výšky nevyhovuje předepsané rozměrové toleranci. Jeho povrch je bez výrazných propadlin na rozdíl od vzorku vyráběného konvenčním vstřikováním. Ostatní vzorky s příměsí 1 % až 2,5 % nadouvadla vyhovovaly svými rozměry, hmotností i vzhledem podnikové normě IMG Bohemia s.r.o.

Ze získaných hodnot při zkoušce v tahu je patrné, že se vzrůstajícím množstvím nadouvadla klesá mez pevnosti v tahu. Pokud by zákazník požadoval nižší hmotnost výrobku, která je výhodná při manipulaci s díly, musel by počítat se snižující se pevností v tahu při konstrukci velkoobjemových nádrží. Například při množství nadouvadla 2,5 % dochází k poklesu pevnosti o cca 21 %. Dalšími hodnotícími parametry byly poměrné prodloužení na mezi pevnosti, které se prakticky nemění a celková tažnost, která u vzorku bez nadouvadla vykazuje výraznou nehomogenitu. Se vzrůstajícím podílem nadouvadla ve vzorku se tažnost materiálu nemění a dochází ke zmenšení rozptylu měřených hodnot, který přispívá ke stabilitě vlastností dílu.

U zkoušky ohybových vlastností vzorků byla testována pevnost v ohybu, u které lze konstatovat, že se s přidávajícím množstvím nadouvadla nemění a taktéž u modulu pružnosti byly zjištěny opět velice podobné hodnoty jak u vzorku bez nadouvadla tak i u lehčeného vzorku s 2,5 % nadouvadla. Z čehož opět vyplývá, že modul pružnosti se v závislosti na obsahu nadouvadla nemění. Celkově lze pro ohybové vlastnosti konstatovat, že při redukci hmotnosti výrobku zároveň neklesají jeho mechanické vlastnosti v ohybu.

Co se týče hustoty všech dílů, bylo zjištěno, že s přibývajícím množstvím nadouvadla hustota výrobků klesá až o cca 4,3 % v případě množství nadouvadla v materiálu 2,5 %. Pokud bude zákazník požadovat výrobky lehčí, lze toho při použití vyššího podílu nadouvadla velice účinně dosáhnout.

Pokud bychom vztáhli parametr hustoty vzorku např. k získaným hodnotám meze pevnosti v ohybu, získáme měrnou mez pevnost v ohybu, viz tab. 15. Jak je vidět měrná pevnost s přibývajícím množstvím nadouvadla roste. Lze tedy konstatovat, že při zvýšeném podílu nadouvadla lze dosáhnout vyšší měrné meze pevnosti v ohybu než u nelehčeného dílu.

Tab. 15 Měrná mez pevnosti v ohybu

| Šarže | Mez pevnosti v ohybu [MPa] | Hustota [kg/m <sup>3</sup> ] | Měrná mez pevnosti v ohybu [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ] |
|-------|----------------------------|------------------------------|--|
| 1     | 48,2                       | 754,4                        | 63,9 x 10 <sup>3</sup>                                       |
| 2     | 50,0                       | 736,4                        | 67,9 x 10 <sup>3</sup>                                       |
| 3     | 51,5                       | 730,6                        | 70,5 x 10 <sup>3</sup>                                       |
| 4     | 48,2                       | 725,9                        | 66,4 x 10 <sup>3</sup>                                       |
| 5     | 51,2                       | 723,4                        | 70,8 x 10 <sup>3</sup>                                       |
| 6     | 48,8                       | 721,6                        | 67,6 x 10 <sup>3</sup>                                       |

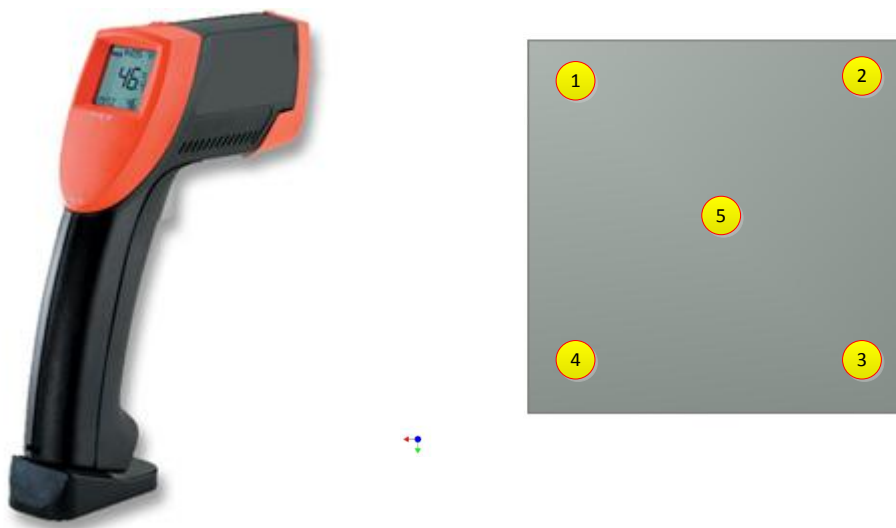
Pokud by zákazník požadoval nižší hmotnost výrobku (tzn. díl s větším množstvím nadouvadla), musel by se upravit i čas vstřikovacího cyklu. Jak je vidět z tab. 16, při zvyšujícím se množstvím nadouvadla klesá výsledná teplota výstřiků po vyjmutí z formy na předem definovaných místech, viz obr. 34.

Tab. 16 Měření teplotního profilu dílu

| Šarže | Teploty v určených místech [°C] |         |         |         |         |
|-------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|       | Místo 1                         | Místo 2 | Místo 3 | Místo 4 | Místo 5 |
| 1     | 54,5                            | 50,9    | 56,4    | 50,7    | 58,5    |
| 2     | 47,4                            | 46,8    | 48,5    | 47,2    | 56,5    |
| 3     | 43,2                            | 43,7    | 42,5    | 41,1    | 52,3    |
| 4     | 41,8                            | 42,1    | 40,9    | 42,4    | 49,8    |
| 5     | 41,3                            | 41,2    | 42,2    | 41,3    | 46,8    |
| 6     | 41,1                            | 41,5    | 42,1    | 40,9    | 46,8    |

Dle interních postupů ve firmě IMG Bohemia s.r.o. by se na základě tab. 16 při přidávání 2,5 % nadouvadla výrobní cyklus snižoval o několik sekund díky poklesu

teploty na zvolených místech. V teoretické části práce bylo řečeno, že si přibývajícím množstvím nadouvadla klesá výrobní cyklus, což bylo potvrzeno i na základě experimentu, který nebyl zahrnut do měření v kap. 3.



*Obr. 34 Měření teplotního profilu dílu*

*a) Digitální teploměr GIM 1840-ST25 [25]; b) Žlutě vyznačená místa pro měření teploty*

Celkově lze tedy konstatovat, že vliv množství nadouvadla je z hlediska rozměrové přesnosti a tvarové rovinnosti dílu zásadní. Při nevyužití nadouvadla v materiálu, nebude u daného tlustostěnného dílu dosaženo kvalitního povrchu. To potvrdilo původní domněnky o tom, že vstřikování strukturálních pěn se využívá hlavně u dílů s vyšší tloušťkou stěny. Pokud bude zákazník požadovat díly s nižší hmotností, musí brát naopak v potaz snižování meze pevnosti v tahu oproti neměnicím se ohybovým vlastnostem. Dále se potvrdila domněnka, že s přibývajícím množstvím nadouvadla se snižuje doba cyklu, což je další důvod, proč se nekonvenční druh vstřikování s nadouvadly velice rozšiřuje v oblastech od automobilového průmyslu po vodohospodářství.

V návaznosti na získané výsledky v experimentální části práce se doporučuje zvolit ideální množství nadouvadla (1 – 1,5%), kdy vlastnosti takto vyrobených dílů jsou z hlediska všech měřených parametrů optimální. Získané poznatky budou dále rozvinuty ve firmě IMG Bohemia s.r.o. a budou sloužit jako podklady pro výpočty navrhovaných nádrží a jímek.

## Seznam použité literatury

- [1] Vstřikování plastů: 7 věcí, které byste o něm měli vědět. *Factory automation* [online]. 2015 [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/vstrikovani-plastu-7-veci-ktere-byste-o-nem-meli-vedet/>
- [2] *Vstřikování plastů* [online]. Liberec: TUL Liberec, [cit. 2016-06-20]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.html](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.html)
- [3] *Vstřikovací cyklus* [online]. [cit. 2016-06-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/images/pics/3.jpg>
- [4] Vstřikování plastu. *14200* [online] [cit. 2016-06-20]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/wp-content/uploads/2014/05/plasty1-7-600x363.jpg>
- [5] *Technologie vstřikování* [online]. 1. TUL Liberec: 2015 [cit. 2016-06-20]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [6] Uzavírací jednotka. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2016-06-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/59/5972.jpg>
- [7] *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. 4. vydání. Carnegie Mellon University. ISBN 9780471440260.
- [8] LEE, S, Chul B PARK a N RAMESH. *Foam extrusion: principles and practice*. Lancaster: Technomic Pub. Co., c2000, xviii, 344 p. Polymeric foams series. ISBN 15-667-6879-9.
- [9] Microcellular Foam Injection Molding Process. *Interchopen* [online]. China: [cit. 2016-06-20]. Dostupné z: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/33650/InTech-Microcellular\\_foam\\_injection\\_molding\\_process.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/33650/InTech-Microcellular_foam_injection_molding_process.pdf)
- [10] *Design of an Apparatus to Measure Gas Solubilities in Polymers* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/16579/1/MQ63123.pdf>
- [11] *Mucell technologie* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/vstrikovani-termoplastu-s-napenovanim-uspory-diky-medode-mucell/c/2416>
- [12] *MuCell structure* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic\\_microcellular\\_foaming#/media/File:First\\_stage\\_microcellular\\_foam.tif](https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_microcellular_foaming#/media/File:First_stage_microcellular_foam.tif)
- [13] CONFERENCE PROCEEDING. *Blowing Agents and Foaming Processes*

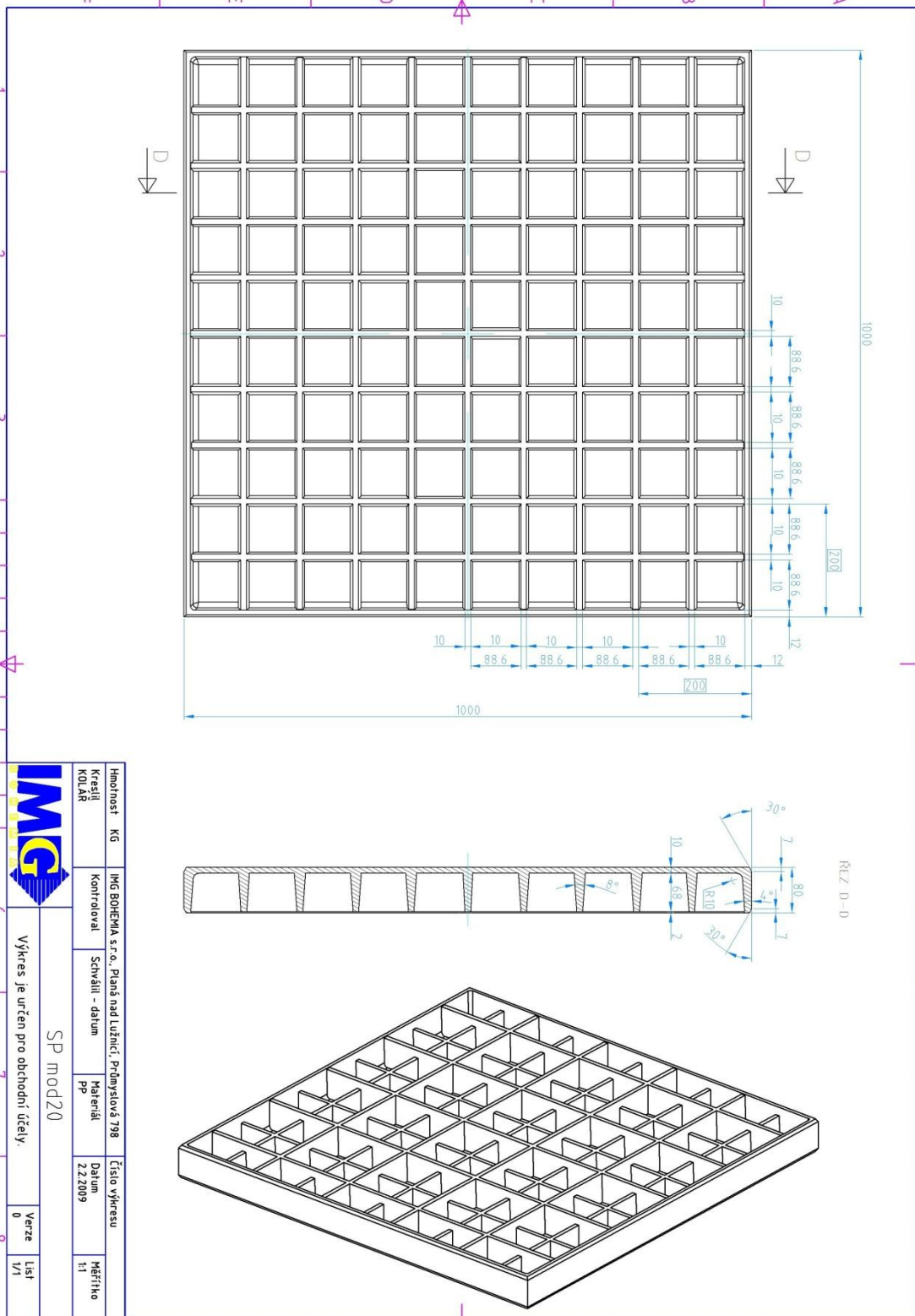
2001. Frankfurt, 2001. ISBN 978-1-85957-252-8.
- [14] Vstřikování plastů procesem MuCell. *Mmspektrum* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vstrikovani-plastu-procesem-mucell.html>
- [15] *Mucell* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: [http://www.plasticportal.cz/image/staticke/Image/2014\\_foto/September\\_2014/MuCell\\_obr1\\_velka\\_pismena.jpg](http://www.plasticportal.cz/image/staticke/Image/2014_foto/September_2014/MuCell_obr1_velka_pismena.jpg)
- [16] *Kubousek vstrikovací stroj* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <http://www.kubousek.cz/divize-kraussmaffei/vstrikovaci-stroje/rada-mx/predstaveni.html>
- [17] Tipplen H543 datasheet. *MOL Petrochemicals* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <https://mol.hu/hu/datasheet/TI>
- [18] Adeka palmarole. *Adeka* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <http://www.adeka-palmarole.com/>
- [19] *Gabriel chemie* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <http://www.gabriel-chemie.com/cz/>
- [20] *Metabo pila* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <http://www.naradisatek.cz/inshop/catalogue/products/pictures/bas317wnb>
- [21] *Komelon svinovací metr* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: [http://www.dobre-ceny.cz/user/shop/orig/1185\(1\).jpg?5408220a](http://www.dobre-ceny.cz/user/shop/orig/1185(1).jpg?5408220a)
- [22] *Paletový vozík zeman servis* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: [http://www.zeman-servis.cz/fotky2305/fotos/\\_vyr\\_268kpz-71-8.jpg](http://www.zeman-servis.cz/fotky2305/fotos/_vyr_268kpz-71-8.jpg)
- [23] ČSN EN ISO 527-1,2 (64 0604). Plasty – Stanovení tahových vlastností.
- [24] ČSN EN ISO 178 (64 0607). Plasty – Stanovení ohybových vlastností.
- [25] *Digitální infra teploměr* [online]. [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: [http://www.pvl.co.uk/user/products/WebImages/Greisinger/Handheld%20Instruments/Temperature/Infrared/GIM1840\\_ST25-XB.jpg](http://www.pvl.co.uk/user/products/WebImages/Greisinger/Handheld%20Instruments/Temperature/Infrared/GIM1840_ST25-XB.jpg)
- [26] Stages of Injection moulding. [online], [cit. 2016-06-20]. Dostupné z: <http://www.design-technology.org/injectionmoulding2.html>
- [27] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999. 203 s. ISBN 80-7080-367-3.
- [28] SOVA, Miloš. *Termoplasty v praxi*. 2. vydání. Verlag Dashöfer, 2006. ISBN 8086229157.
- [29] OPUNEC, Ondřej. *Optimalizace rozměrové stability výrobků z lehčeného LDPE*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/28597>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.


# Seznam příloh

Příloha 1: Výkres stěnového prvku



# Příloha 1: Výkres stěnového prvku



|   |          |          |  |                  |
|---|----------|----------|--|------------------|
|  | Hmotnost | KG       | MG BOHEMIA s.r.o., Plzeň nad Lužnicí, Průmyslová 798 | Číslo výkresu    |
|   | Kreslil  | KOLAŘ    | Kontroloval  | Schválil - datum |
| SP mod20  |          | Materiál | PP   | Datum            |
| Výkres je určen pro obchodní účely.   |          |          | 2.2.2009   | Měřítko          |
| Verze   | 0        | Líst     | 1/1  |                  |