

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



BAKALÁRSKA PRÁCA

Optimalizácia výrobného procesu vstrekovania
plastov

Optimization of the polymers injection production process

AUTOR: Martin Lipták
ŠTUDIJNÝ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství
VEDÚCI PRÁCE: Ing. Jan Skočilas Ph.D.
Ing. Zdeňka Jeníková Ph.D.

PRAHA 2018

Zadanie



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lipták** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **437706**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace výrobního procesu vstřikování plastů

Název bakalářské práce anglicky:

Optimization of the polymers injection production process

Pokyny pro vypracování:

Zpracování plastů vstřikováním taveniny do uzavřené formy je v dnešní době jedním z nejrozšířenějších způsobů výroby produktů zpracovatelského průmyslu. V rámci tématu práce se zaměřte na tyto cíle:

1. Popište výrobní stroje, proces vstřikování plastových dílů v lisech a základní parametry procesu.
2. V literární rešerši se zaměřte na vliv parametrů vstřikování a nastavení lisu na kvalitu a mechanické vlastnosti výrobků.
3. Proveďte kritické zhodnocení informací získaných literární rešerší a doporučte nastavení stroje pro vybraný typ materiálu.
4. Seznamte se s ovládáním a výrobním procesem na laboratorním vstřikovacím lise.

Seznam doporučené literatury:

Zeman L.: Vstřikování plastů, BEN, Technická literatura, 2009.
Baird D.G., Collias D.I.: Polymer Processing, Principle and Design, Wiley, 2014.
Osswald T.A. et. al.: International Plastics Handbook, The Resource for Plastics Engineers Hanser, 2006.
Margolis J.M.: Engineering Plastics Handbook, McGraw-Hill, 2006.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Skočilas, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Skočilas, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto prácu vypracoval samostatne a to výhradne s použitím prameňov a literatúry, uvedených v zozname citovaných zdrojov.

V Prahe dňa 2. 6. 2018

.....

Podpis

Abstrakt

Práca je zameraná na technológiu vstrekovania plastov, proces vstrekovania a vplyv technologických parametrov na kvalitu a mechanické vlastnosti výrobku. Teoretická časť obsahuje úvod do polymérov, popis vstrekovacieho stroja, popis technologického procesu a prehľad základných technologických parametrov.

Praktická časť je zameraná na vyhodnotenie vplyvu vstrekovacieho tlaku a dotlaku na kvalitu a mechanické vlastnosti skúšobných teliesok.

Kľúčové slová: vstrekovanie plastov, polyméry, vstrekovací tlak, dotlak, polypropylén, mechanické vlastnosti.

Abstract

The thesis is focused on a technology of plastic injection moulding, an injection process and an effect of technological parameters on a quality and mechanical properties of the product. Theoretical part includes an introduction to polymers, description of an injection moulding machine, description of the technological process and review of the main technological parameters.

Practical part is focused on an evaluation of the effect of an injection pressure and a packing pressure on the quality and mechanical properties of the test specimens.

Key words: plastic injection moulding, polymers, injection pressure, packing pressure, polypropylene, mechanical properties.

Podakovanie

Rád by som sa poďakoval pánovi doktorovi Janovi Skočilasovi za odborné vedenie pri písaní bakalárskej práce, cenné rady a všetok jeho strávený čas pri tomto projekte. Ďalej by som poďakoval pani doktorke Zdeňke Jeníkovej za jej čas a pomoc pri praktickej časti práce. Ďakujem tiež Tiborovi Tekelovi za možnosť prehliadky firmy a požičanú literatúru.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Polyméry	9
2.1	Príprava syntetických polymérov	9
2.2	Rozdelenie polymérov.....	9
2.2.1	Podľa aplikácie.....	10
2.2.2	Podľa pôsobenia teploty	10
2.2.3	Podľa makromolekulárnej štruktúry	11
2.2.4	Podľa nadmolekulárnej štruktúry	12
2.3	Termodynamické vlastnosti polymérov.....	13
3	Polyolefíny.....	15
3.1	Polyetylén (PE).....	15
3.1.1	Vlastnosti.....	16
3.1.2	Použitie.....	16
3.2	Polypropylén (PP)	17
3.2.1	Vlastnosti.....	18
3.2.2	Použitie.....	18
4	Recyklácia.....	19
5	Vstrekovanie termoplastov.....	21
5.1	Vstrekovací lis.....	21
5.1.1	Vstrekovacia jednotka.....	22
5.1.1.1	Násypka.....	22
5.1.1.2	Skrutka.....	23
5.1.1.3	Spätný uzáver na skrutke	24
5.1.1.4	Tavná komora	24
5.1.1.5	Tryska	25
5.1.2	Uzatváracia jednotka.....	25
5.1.2.1	Vodiace tyče	26
5.1.2.2	Uzatvárací mechanizmus.....	26
5.1.2.3	Upínacie dosky.....	27
5.2	Vstrekovací proces.....	28
5.2.1	Plastifikačná fáza	29

5.2.1.1	Teplota výhrevných pásiem	30
5.2.1.2	Spätný odpor na skrutke.....	30
5.2.1.3	Otáčky skrutky	31
5.2.2	Vstrekovacia fáza	31
5.2.2.1	Vstrekovací tlak a rýchlosť	31
5.2.2.2	Teplota taveniny.....	32
5.2.3	Dotlaková fáza	32
5.2.3.1	Bod prepnutia zo vstrekovacieho tlaku na dotlak.....	32
5.2.3.2	Úroveň dotlaku a doba dotlaku.....	33
5.2.4	Fáza ochladzovania	33
5.2.4.1	Teplota formy.....	33
6	Záver teoretickej časti.....	35
7	Praktická časť.....	36
7.1	Úvod	36
7.2	Vstrekovací stroj	36
7.3	Skúšobné teliesko.....	37
7.4	Popis experimentu.....	37
7.5	Skúška ťahom.....	40
8	Záver praktickej časti	44
9	Zoznam zdrojov	45

1 Úvod

Ludská spoločnosť sa stretáva s makromolekulárnymi látkami od nepamäti. Rozvoj polymérov, ako ich poznáme dnes, však nastal až v polovici 20. storočia. Dnešná produkcia polymérov predstavuje 335 miliónov ton ročne (v roku 2016) a neustále stúpa [1]. Plastové výrobky sú všade okolo nás a ťažko si už vieme predstaviť život bez nich.

Jedným z problémov ešte širšieho a rozmanitejšieho používania plastov je ich ekologický dopad. V prírode sa jedny z najbežnejších polymérov, polyetylén (PE) a polyetylén tereftalát (PET), nerozkladajú takmer vôbec. V súčasnosti sa preto výskum zaoberá taktiež používaním kompozitov plnených odpadovými plastmi, ktoré by mohli nahradiť tradičné kompozity a prispieť k recyklácii týchto materiálov.

Technológia vstrekovania termoplastov prešla od svojich začiatkov až po súčasnosť dlhú a úspešnú cestu. V dnešnej dobe je to jedna z najdôležitejších a najrozšírenejších technológií na spracovanie plastov a kompozitov. Vďaka jej širokému využitiu v rôznych odvetviach priemyslu je aj naďalej veľmi perspektívna. Vývoj nových vstrekovacích materiálov - najmä blendov (zmesí) a modifikácie vstrekovacieho procesu neustále zvyšujú kvalitu výrobkov z polymérnych materiálov.

Nevýhodou technológie vstrekovania je jej finančná náročnosť jednak pri kúpe vstrekovacieho stroja a tiež pri výrobe vstrekovacej formy. Počiatočné investície sú teda veľmi veľké.

V tejto bakalárskej práci sa budem zaoberať optimalizáciou vstrekovacích parametrov (vstrekovací tlak, dotlak) pri výrobe skúšobných teliesok a ich vplyv na mechanické vlastnosti a vzhľad výrobku.

2 Polyméry

Polyméry sú z chemického hľadiska najmä organické látky, prírodného alebo syntetického pôvodu [2]. Vo svojich molekulách obsahujú väčšinou atómy uhlíka, vodíka a kyslíka, často dusíka, chlóru a iných prvkov. Polyméry sú vo forme výrobku prakticky v tuhom stave, ale počas spracovania za zvýšenej teploty a tlaku v podstate vo fáze kvapalnej, čo umožňuje budúcemu výrobku udeliť najrôznejší tvar, na základe použitia [3]. Všetky syntetické polyméry sú tvorené makromolekulami, ktoré vznikajú opakovaným spájaním základnej jednotky – méru, ktorá je odvodená od monoméru. Kopolyméry vznikajú spojovaním dvoch alebo viacerých druhov základných jednotiek [4].

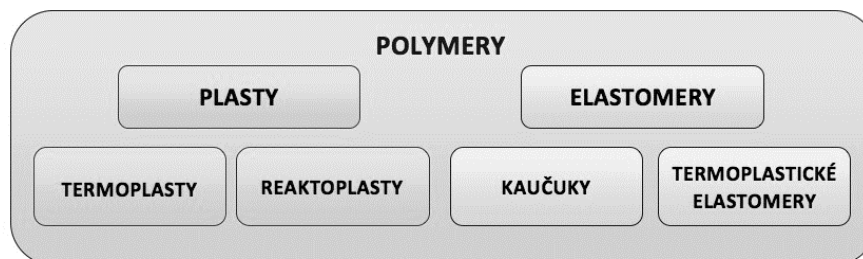
2.1 Príprava syntetických polymérov

Syntetické polyméry sa pripravujú polyreakciami (polymerizácia, polykondenzácia a polyadícia). Sú to chemické reakcie, ktoré sa mnohokrát opakujú a pôvodná nízkomolekulárna látka monomér sa mení na vysokomolekulárnu látku polymér. Po zmiešaní s nevyhnutnými prísadami a prevedení do formy vhodnej k ďalšiemu technologickému spracovaniu (granule, prášok atď.) vzniká z polyméru plast. Pod názvom polymér si predstavujeme chemickú látku, plastom nazývame technický materiál s vhodnými úžitkovými vlastnosťami [5].

2.2 Rozdelenie polymérov

Základnými skupinami polymérov sú termoplasty, reaktoplasty a elastoméry.

- *Plasty* sú polyméry, ktoré sú pôsobením vonkajšieho namáhania deformované prevažne nevratne. Za bežných podmienok sú väčšinou tvrdé a krehké [2]. Pri zvýšenej teplote sa termoplasty stávajú plastickými a je možné ich tvarovať. Reaktoplasty je možné vytvarovať iba raz, potom sa ich štruktúra zosieťuje a opakovanie procesu nie je možné [3].
- *Elastoméry* sú vysoko pružné materiály s nízkou tuhosťou. Je možné deformovať ich malou silou a deformácia je prevažne vratná [3].



Obrázok 1 : Základné rozdelenie polymérov [2]

Plasty môžeme ďalej rozdeľovať podľa rôznych hľadísk.

2.2.1 Podľa aplikácie

- *Široké použite* - polyolefíny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF) [5].
- *Inžinierske aplikácie* - polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylén (POM), polymetylmetakrylát (PMMA), terpolymér ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) živice [5].
- *Špičkové aplikácie* - polysulfón (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI) a ďalšie [5].

2.2.2 Podľa pôsobenia teploty

- *Termoplasty* - sú to polymérne materiály, ktoré pri zahrievaní prechádzajú do plastického stavu vysoko viskózných nenewtonských kvapalín, kde ich je možné pomerne jednoducho tvárniť a spracovávať rôznymi technológiami. Pri zohrievaní nedochádza k zmene chemickej štruktúry, proces mäknutia a následného tuhnutia je možné opakovať teoreticky do nekonečna. Jedná sa iba o fyzikálny proces. K termoplastom patrí polyetylén (PE), polypropylén (PP), polystyrén (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atď. [5].

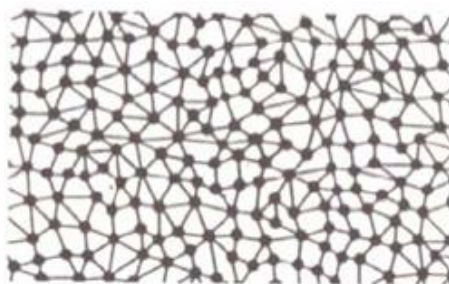


Obrázok 2: Amorfný termoplast [5]



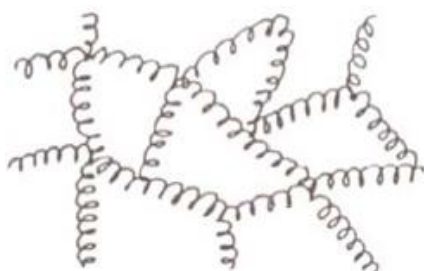
Obrázok 3: Semikryštalický termoplast [5]

- *Reaktoplasty* - polymérne materiály, v minulosti nazývané termosety, ktoré taktiež v prvej fáze zohrievania mäknú a dajú sa tvárniť, oproti termoplastom však len obmedzenú dobu. V priebehu ďalšieho zohrievania dochádza k chemickej reakcii – priestorovému zosieťovaniu štruktúry, k tzv. vytvrdzovaniu. Vytvrdnutie je nevratné a vytvrdnuté plasty sa nedajú roztaviť ani rozpustiť. Ich ďalším zohrievaním dochádza k rozkladu hmoty. Výrobok z reaktoplastu môžeme považovať za jednu veľkú makromolekulu. Patria sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové živice, polyesterové hmoty atď. [5].

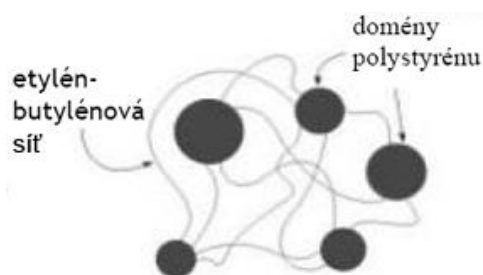


Obrázok 4: Štruktúra reaktoplastu [5]

- *Kaučuky, pryže a termoplastické elastoméry* - v prvej fáze zohrievania mäknú, sú tvárniteľné, avšak iba obmedzenú dobu. Pri ďalšom zohrievaní dochádza k vulkanizácii – priestorovému zosieťovaniu štruktúry. Termoplastické elastoméry na rozdiel od pryží a kaučukov nemenia chemickú štruktúru, pri zohrievaní a chladení prebieha iba fyzikálny dej. Ich výhodou je možnosť vstrekovania na bežných strojoch pre termoplasty a možnosť ich opakovaného spracovania [2] [5].



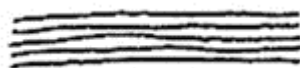
Obrázok 5: Štruktúra elastomeru [5]



Obrázok 6: Štruktúra termoplastického elastomeru [5]

2.2.3 Podľa makromolekulárnej štruktúry

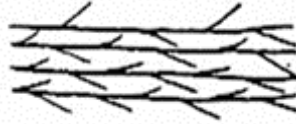
- *Lineárne* – vznikajú radením makromolekúl vedľa seba. Lineárne makromolekuly sa môžu priblížiť bližšie k sebe a vyplniť tak menší priestor. Polyméry tak majú vyššiu hustotu (napríklad vysokohustotný polyetylén HDPE). Tieto polyméry majú vyšší obsah kryštalických podielov. Obvykle sú dobre rozpustné a tavitelné. V tuhom stave sa vyznačujú húževnatosťou a vo forme taveniny dobrou spracovateľnosťou [5].



Obrázok 7: Lineárna štruktúra [5]

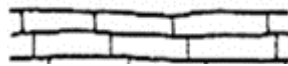
- *Rozvetvené* – na základnom reťazci obsahujú bočné vetvy. Vďaka nim sa makromolekuly na rozdiel od lineárnych makromolekúl nemôžu jedna k druhej

dostatočne priblížiť. Preto sa vyznačujú menšou hustotou (napr. nízko-hustotný polyetylén LDPE). Horšie kryštalizujú a majú nižší stupeň kryštalinity. Rozvetvenosť zhoršuje tekutosť v roztavenom stave. Bočné reťazce majú za následok zhoršenie väčšiny mechanických vlastností [5].

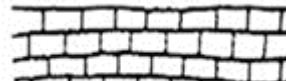


Obrázok 8: Rozvetvená štruktúra [5]

- *Zosieťované* – niekoľko priamych alebo rozvetvených makromolekulárnych reťazcov je prepojených väzbami, vytvárajúc jednu veľkú makromolekulu – priestorovú sieť. Takáto sieť vedie k strate tavitelnosti a rozpustnosti polyméru. Zosieťované polyméry sú tvrdé, tuhé a odolné voči zvýšenej teplote, ale majú nízku odolnosť proti rázovému namáhaniu. Elastoméne kaučukové polyméry majú siete riedke, reaktoplasty naopak husté [5].



Obrázok 9: Riedke zosieťovanie [5]

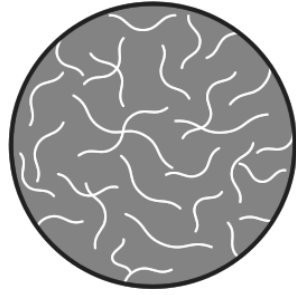


Obrázok 10: Husté zosieťovanie [5]

2.2.4 Podľa nadmolekulárnej štruktúry

Lineárne makromolekuly vytvárajú, na rozdiel od rozvetvených makromolekúl, usporiadanejšiu nadmolekulárnu štruktúru a zosieťované makromolekuly štruktúru neusporiadanú. Termoplasty tak môžu mať amorfnú alebo semikryštalickú nadmolekulárnu štruktúru, reaktoplasty iba amorfnú [5].

- *Amorfná štruktúra* – makromolekuly zaujímajú úplne náhodnú pozíciu. Charakteristické sú tvrdosťou, krehkosťou, vysokou pevnosťou a modulom pružnosti. Vďaka nízkemu indexu lomu (1,4 až 1,6) sú priehľadné alebo priesvitné. Patria sem PS, PMMA, PC a ďalšie. Základným morfológickým útvarom sú globuly veľkosti 10-30 nm, ktoré sú tvorené chaoticky stočenými makromolekulami. Použiteľné sú do teploty skleneného prechodu T_g [5].
- *Kryštalická (semikryštalická) štruktúra* – vykazujú určitý stupeň usporiadania. Označuje sa stupňom kryštalinity. ten sa pohybuje od 40 do 90 % a vyjadruje relatívny pomer usporiadaných oblastí, uložených medzi amorfnými oblasťami. Nikdy nemôžu dosiahnuť 100 %, preto ich označujeme ako semikryštalické. Ich pevnosť a modul pružnosti rastie so stupňom kryštalinity. Sú mliečne zakalené, pretože index lomu je väčší ako u amorfných plastov. Patria sem PE, PP, PA, PTFE, POM a iné. Použiteľné sú do teploty tavenia T_m [5].



Obrázok 11: Amorfná štruktúra [26]



Obrázok 12: Semikryštalická štruktúra [27]

2.3 Termodynamické vlastnosti polymérov

Častice hmoty konajú vo všetkých materiáloch rôzne rotačne vibračné pohyby, ktorých intenzita je úmerná okamžitej teplote. Nazývame ich „mikrobrownov pohyb“. V polyméroch sa takto pohybujú častice reťazcov, ktoré nazývame segmenty [4].

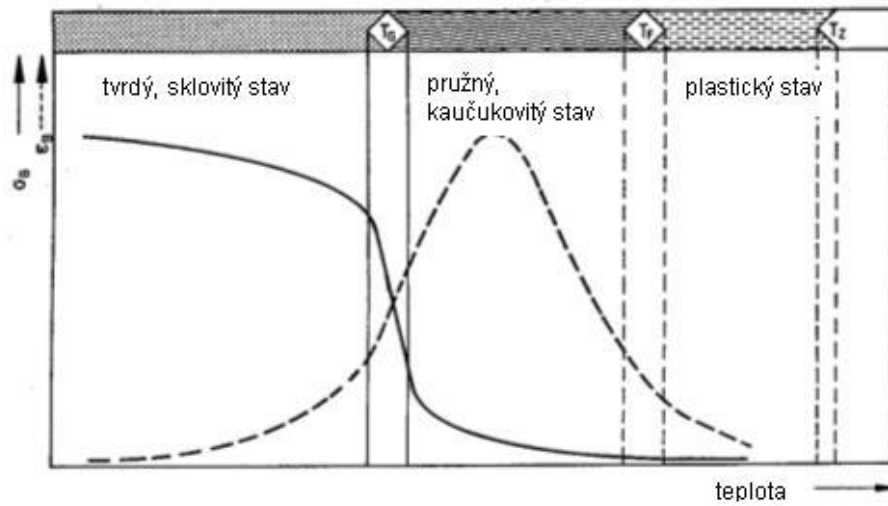
Pri zvyšovaní teploty sa pohyby rozvoľňujú, čo má za následok výraznú zmenu vlastností. V určitej oblasti teplôt prebiehajú tieto zmeny rýchlejšie alebo sa menia skokovo. Takéto oblasti sú nazývané prechodové a existujú v nich prechodové teploty. Pri zvyšovaní teploty dôjde k uvoľneniu pohybu segmentov a zmene z krehkého sklovitého chovania na viskoelastické. Táto teplota sa označuje ako T_g – teplota skleného prechodu [4] [5].

Amorfný polymér je pod teplotou skleného prechodu tvrdý a krehký a má vysoký modul pružnosti. V prechodovej oblasti okolo T_g sa vlastnosti amorfného termoplastu menia skokom – polymér získava kaučukovú pružnosť a jeho modul pružnosti poklesne o približne tri rády [5].

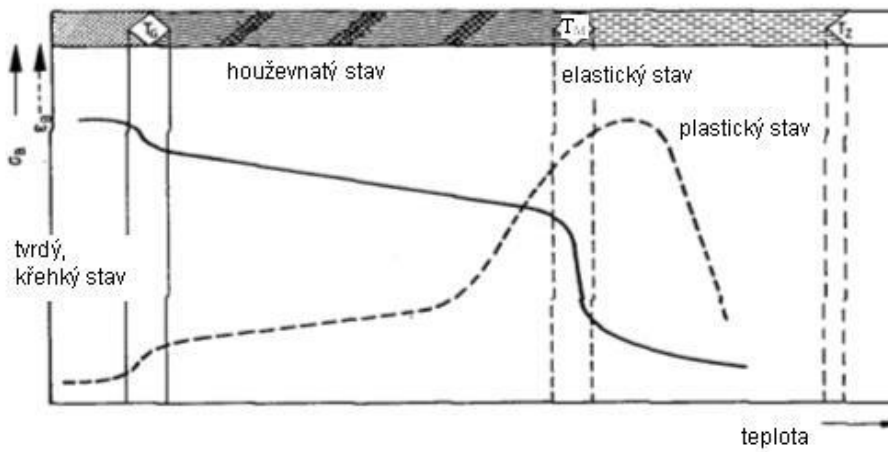
Ďalším zvyšovaním teploty amorfného polyméru rastie amplitúda pohybu segmentov až dôjde k ich pohybu, a najmä pri pôsobení vonkajšej sily, sa celé reťazce pohybujú voči sebe navzájom, dochádza k toku. Teplota tejto zmeny sa nazýva teplota tečenia T_f . Nad touto teplotou sú amorfné polyméry v stave viskóznej taveniny [4].

V kryštalickej fáze nedochádza pri zvyšovaní teploty k uvoľneniu segmentov, pretože na ne pôsobia väčšie sily. K uvoľneniu síl dôjde až pri ďalšom zvýšení, kedy sa kryštalická štruktúra rozpadne priamo na viskóznu tekutinu. Táto teplota sa nazýva teplota topenia kryštalického podielu T_m [4].

Pri ďalšom zvyšovaní teploty sa reťazce rozpadajú, čo vedie k deštrukcii polyméru. Táto teplota sa nazýva T_c – teplota rozkladu polyméru [4].



Obrázok 13: Priebeh deformácie u amorfného polyméru [5]

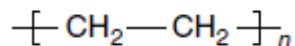


Obrázok 14: Priebeh deformácie u semikryštalického polyméru [5]

3 Polyolefíny

Polyolefíny sú polyméry zložené z uhľovodíkov obsahujúcich jednu dvojitú väzbu so základnou chemickou štruktúrou C_nH_{2n} . Patria k nim polyetylén, polypropylén, polybutylén-1 atď. [6].

3.1 Polyetylén (PE)



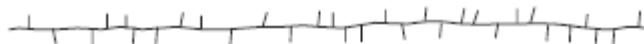
Polyetylén je najrozšírenejší termoplastický materiál zložený z etylénu. Pojmom polyetylén označujeme homopolyméry etylénu a jeho kopolyméry s malým obsahom komonoméru (do 10 %). Jedná sa o semikryštalické termoplasty. Ich štruktúra, molekulová hmotnosť, stupeň kryštalinity a tým pádom ich vlastnosti závisia do značnej miery na spôsobe výroby [6]. Základnými dvoma typmi sú lineárny, vysokohustotný polyetylén (PE-HD) a rozvetvený, nízkohustotný polyetylén (PE-LD). Okrem nich sa môžeme stretnúť s polyetylénom so strednou hustotou (PE-MD), lineárnym polyetylénom s nízkou hustotou (PE-LLD) a polyetylénom s veľmi vysokou molekulovou hmotnosťou (PE-UHMW). Za prakticky celkom lineárny sa dá považovať polymetylén [3]. Porovnanie vlastností polymetylénu a polyetylénu ukazuje tabuľka č.1.



Obrázok 15: Štruktúra PE-HD [6]



Obrázok 16: Štruktúra PE-LD [6]



Obrázok 17: Štruktúra PE-LLD [6]

3.1.1 Vlastnosti

Tabuľka 1: Porovnanie vlastností [3]

Vlastnosť	Polymethylen	Polyethylen	
		lineárny	rozvetvený
Hustota [kg m^{-3}]	980	do 960	do 930
Krystalinita [%]	95	do 93	do 64
Pevnosť v tahu [MPa]	26	do 25	do 10
Tažnosť [%]	10	do 1000	do 1000

Polyetylén sa vyznačuje nízkou hustotou, pevnosťou a tvrdosťou ale výbornou húževnatosťou a odolnosťou proti rázovému namáhaniu. Nepoužíva sa na konštrukčné aplikácie. Má veľmi dobré elektroizolačné a dielektrické vlastnosti a nízku navlhavosť [6]. Vzhľadom k jeho nepolárnosti, za bežných podmienok výborne odoláva polárnym rozpúšťadlám, vode, kyselinám, zásadám a soliam. Všetky typy polyetylénu sú citlivé na UV žiarenie a pre vonkajšie použitie sa stabilizujú pridaním 2-3 % sadzí. Je vysoko horľavý. Za normálnych podmienok je biely a v tenšej vrstve priesvitný. Transparentnosť vzrastá s rozvetvenosťou makromolekúl a ich molekulovou hmotnosťou [3].

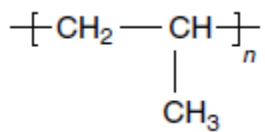
3.1.2 Použitie

PE-LD: Hlavné využitie nachádza v obalovom priemysle. Vyrábajú sa z neho stretch fólie, tašky, vrecia, obalové fólie, ohybné nádoby a fľaše, poľnohospodárske fólie. PE-HD: Kuchynské nádoby, úložné a prepravné kontajnery, kontajnery na odpad, kanistre a nádrže na benzín. Špeciálne druhy aj na vysokotlaké potrubia na pitnú aj odpadovú vodu, prístroje v chemickom priemysle a taktiež v priemysle automobilovom. PE-LLD: Fólie s dobrými optickými vlastnosťami, kanoe a surf-dosky. PE-HD-UHMW: Vďaka jeho výborným klzným vlastnostiam sa používa pre vagóny a žľaby pre abrazívne materiály, skrutkové dopravníky, klzné elementy, ložiská, chirurgické implantáty a povrchové vrstvy na lyžiach [6].

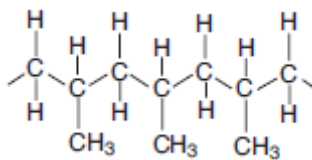


Obrázok 18: Klasifikácia a aplikácie polyetylénu [25]

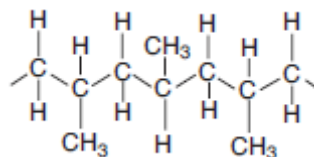
3.2 Polypropylén (PP)



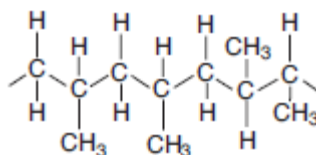
Polypropylén vzniká polymerizáciou propylénu. Tak isto ako polyetylén, polypropylén je semikryštalický termoplastický materiál, avšak preukazuje vyššiu pevnosť a tvrdosť [6]. „Polypropylén“ nie je jeden, ani 100 produktov. Je to paleta materiálov, ktorých vlastnosti závisia značne na indexe izotakticity. Komerčné homopolyméry sú zvyčajne okolo 90-95 % izotaktické. Zbytok tvoria ataktické a syndiotaktické homopolyméry. Čím vyšší index izotakticity, tým vyššia kryštalinita a tým pádom teplota tavenia, tuhosť, tvrdosť a modul pružnosti [7].



Obrázok 19: Izotaktický PP [6]



Obrázok 20: Syndiotaktický PP [6]



Obrázok 21: Ataktický PP [6]

3.2.1 Vlastnosti

Vlastnosťami je polypropylén veľmi podobný PE-HD, avšak má nižšiu hustotu a vyššiu teplotu topenia, čo umožňuje odolávať vyšším teplotám a sterilizácii. Jedná sa o nepolárny plast, a podobne ako PE odoláva polárnym rozpúšťadlám, kyselinám, zásadám a soliam. Táto odolnosť je však vyššia u PP hlavne za pri vyšších teplotách. PP je ale viac náchylný na UV žiarenie a oxidáciu za zvýšených teplôt. Elektroizolačné vlastnosti sú podobné PE-HD. Na rozdiel od PE má lepšiu tvarovú odolnosť pri zvýšenej teplote ale menšiu odolnosť voči mrazu. Je horľavý [2] [7].

3.2.2 Použitie

Vďaka priaznivej cene a dobrej kombinácii vlastností našiel PP uplatnenie od vlákien až po automobilový priemysel. Vyrábajú sa z neho cestovné kufre, skladacie stoličky, zdravotnícke sterilizovateľné náradie, záchodové nádrže, časti umývačiek riadu. Používajú sa na výrobu odhlučnenia v automobiloch, prístrojových dosiek, centrálnych panelov, uchytení predných a zadných svetlometov, nárazníkov, pohárov, obalov na jedlo, prepravných boxov, kufrov na náradie a mnoho iných výrobkov [6] [7].



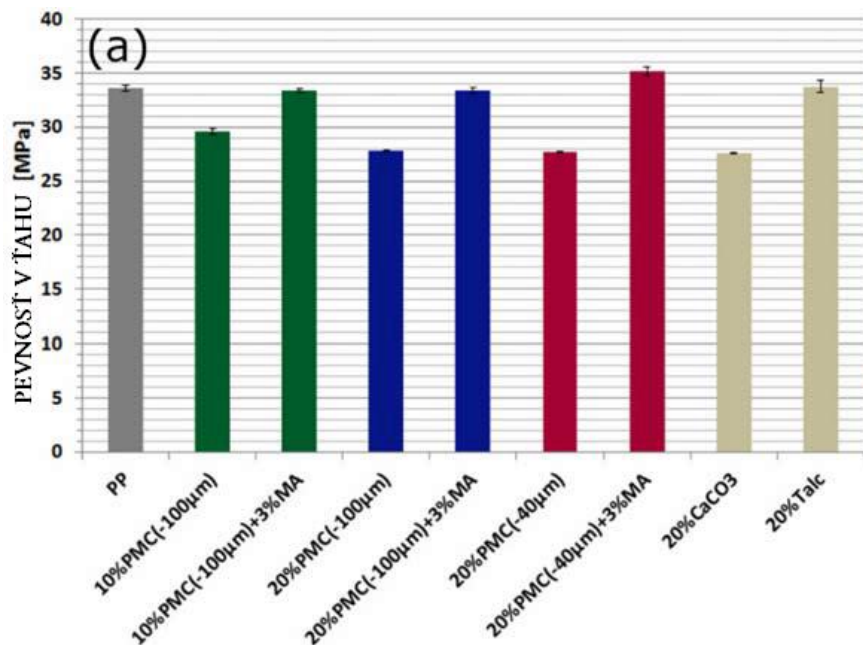
Obrázok 22: Príklady použitia PP [8]

4 Recyklácia

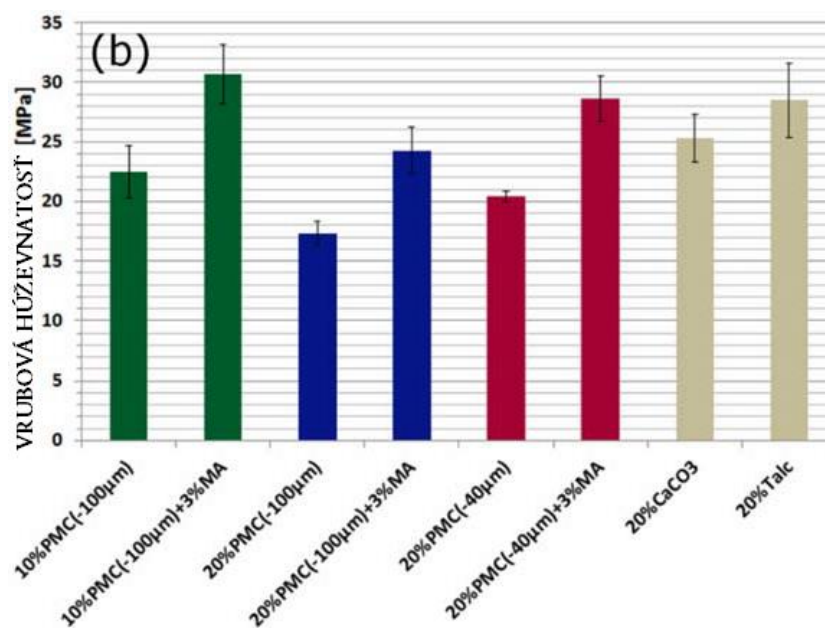
V dnešnej dobe má recyklácia dôležité miesto v našej spoločnosti. Vzhľadom na rastúce množstvo odpadov vyprodukovaných každý rok, vedci a priemysel vynakladajú enormné úsilie na zhodnotenie týchto odpadových materiálov. Z týchto materiálov sú plasty obzvlášť problematické. Zatiaľ čo väčšina z nich je technologicky recyklovateľná (termoplasty), valorizácia materiálu mechanickou recykláciou nie je priamo možná alebo je zložitá pre niektoré iné materiály (reaktoplasty) vzhľadom na ich sieťovú štruktúru. Priama mechanická recyklácia preto nie je pre tieto materiály možná [9].

Fenolické formovacie zlúčeniny (PMC), tiež známe ako bakelit, sú zvláštnym druhom reaktoplastu založeného na fenole a formaldehydovej kondenzácii. Historicky, tieto typy materiálu sa všeobecne používali v elektrických zariadeniach, vybavení domácnosti a v automobilovom priemysle. Ako väčšina reaktoplastov, odpady z fenolických zmesí (PMC) sú environmentálnym problémom. Avšak takéto fenolické plnidlo môže zlepšiť mechanické vlastnosti (ťah, ohyb) matrice a používajú sa ako náhrada tradičných časticových plnív ako je uhličitan vápenatý alebo mastenec [9].

PP je známy semikryštalický polymér a stupeň kryštalinity ovplyvňuje jeho mechanické vlastnosti (ako Youngov modul). Pre čistý PP je kryštalinita 48%. Zdá sa, že množstvo plniva a veľkosť plnív má vplyv na kryštalinitu kompozitov. Bernardeau et al. zistili, že pri malom množstve (10 % hmotn.) plnivo PMC nemení veľmi kryštalinitu PP (s výnimkou PMC < 40 μ m). Pri väčšom podiele plniva, bolo pozorované všeobecné zníženie kryštalinity. Pri PP plnenom minerálmi je pozorovaná vyššia kryštalizačná teplota ako pri PP plnenom PMC. S cieľom zlepšiť prínavosť medzi plnidlom a matricou bol do kompozitu pridaný PP-g-MA (plnivo zvyšujúce zlučiteľnosť) v množstve 3 hm. % [9].



Obrázok 23: Porovnanie pevnosti v ťahu PP plneného PMC, mastencom a uhličitanom vápenatým [9]



Obrázok 24: Porovnanie vrubovej húževnatosti PP plneného PMC, mastencom a uhličitanom vápanatým [9]

Bernardeau et al. zistili, že so zvyšujúcim sa množstvom prídavného plniva sa zvyšuje Youngov modul pružnosti sprevádzaný zníženou pevnosťou v ťahu a vrubovou húževnatosťou. Zníženie vrubovej húževnatosti je pozorované so zvyšujúcim sa podielom plniva a veľkosťou plniva. Prídanie prísady PP-g-MA efektívne zvyšuje prínavosť medzi PP a PMC. To vedie k zvýšeniu pevnosti v ťahu aj vrubovej húževnatosti. Dosiahnuté hodnoty sú podobné alebo lepšie ako pri PP plnenom minerálmi, dokazujúc že PMC môže byť použitý ako spevňujúce plnivo [9].

5 Vstrekovanie termoplastov

Proces vstrekovania predstavuje najdôležitejšiu výrobnú technológiu pre spracovanie termoplastov. Vstrekovanie má niekoľko vlastností, ktoré ho robia veľmi vhodným pre použitie v masovej výrobe, najmä komplikovaných produktov. Tieto vlastnosti sú:

- priama cesta od taveniny až po hotový výrobok,
- žiadna alebo minimálna finálna úprava po vylisovaní,
- možná plná automatizácia procesu,
- dobrá reprodukovateľnosť výroby.

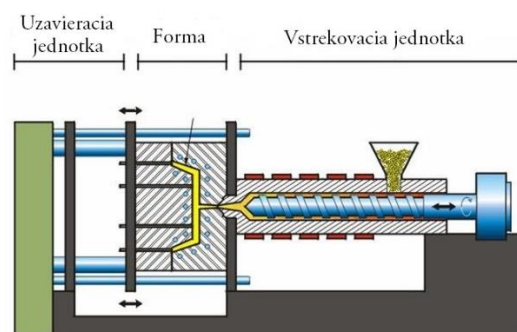
Rozsah výrobkov ktoré môžu byť vyrábané na vstrekovacom lise je od najmenších ozubených kolies až po veľké odpadkové kontajnery. Váha výliskov môže byť rádovo v rozmedzí od 10^{-6} do 10^2 kg [10].

Viac ako tretina všetkých termoplastov je dnes spracovávaná technológiou vstrekovania a viac ako polovica príslušenstva na spracovávanie polymérov je pre práve technológiu. [6] Technológia vstrekovania je založená na vlastnosti termoplastov roztaviť sa pri pôsobení tepla a vstreknutí taveniny do formy, kde pôsobením chladenia stvrdne [7] [11].

Proces sa datuje do roku 1872, kedy bratia Hyattovci patentovali svoj plniaci stroj na vstrekovanie celulózy do foriem. Dnes si pod vstrekovacím strojom predstavujeme najmä vstrekovací stroj na báze vratnej skrutky patentovaný v roku 1956 [6].

5.1 Vstrekovací lis

Vstrekovací lis sa skladá zo vstrekovacej jednotky, uzavieracej jednotky a riadiacej jednotky. Zjednodušená schéma typického vstrekovacieho lisu je na obrázku číslo 24.



Obrázok 25: Schématické znázornenie vstrekovacieho lisu [12]

V dnešnej dobe sú vstrekovacie stroje klasifikované podľa nasledujúceho štandardu:

VÝROBCA T/P

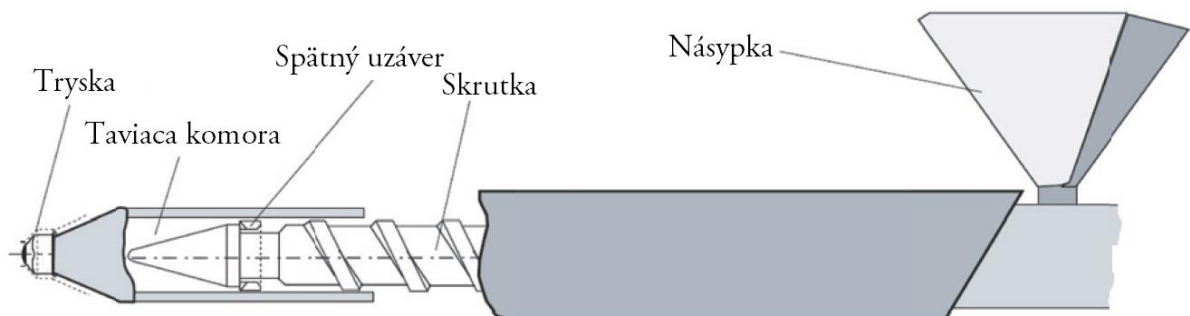
kde T je uzatváracia sila v tonách a P je definované ako:

$$P = \frac{V_{max} P_{max}}{1000}$$

kde V_{max} je maximálna veľkosť dávky v cm^3 a P_{max} je maximálny vstrekovací tlak stroja. Uzatváracia sila sa môže pohybovať od 1 tony v malých strojoch až po 11000 ton v strojoch veľkých [6].

5.1.1 Vstrekovacia jednotka

Hlavnou úlohou vstrekovacej jednotky je premena granulátu polyméru na homogénnu vysoko viskóznou taveninu, zhromažďovanie taveniny, jej následné vstreknutie vysokou rýchlosťou a tlakom do tvarovej dutiny formy a udržiavanie dotlaku behom chladnutia taveniny [6]. V minulosti sa používali piestové vstrekovacie jednotky, dnes sa takmer všade používajú už jednotky skrutkové. Skrutková vstrekovacia jednotka je charakterizovaná priemerom skrutky D (mm), dĺžkou skrutky L (mm), vstrekovacou kapacitou Q_v (cm^3), plastifikačnou kapacitou Q_p (cm^3), maximálnym vstrekovacím tlakom p_{vstr} (MPa), objemovou vstrekovacou rýchlosťou v (cm^3s^{-1}) a informáciou, či je stroj vybavený univerzálnou alebo špeciálnou skrutkou [5].



Obrázok 26: Schéma vstrekovacej jednotky [6]

Hlavné časti vstrekovacej jednotky sú:

- násypka,
- skrutka,
- spätný uzáver na skrutke,
- tavná komora,
- tryska [6].

5.1.1.1 Násypka

Slúži na privádzanie polyméru do vstrekovacej jednotky. Jej konštrukcia umožňuje samovoľný presun granulátu do taviacej komory k dopravníkovej časti skrutky. Dôležité je zabrániť prísunu tepla k násypke, aby nebol spracovávaný materiál tavený už v ústi

násypky. Jej súčasťou môže byť sušička pre odstránenie nežiadúcej vlhkosti z granulátu alebo rôzne miešacie systémy potrebné pre obmedzene sypké materiály ako napr. prášky a prírodné vlákna [13].

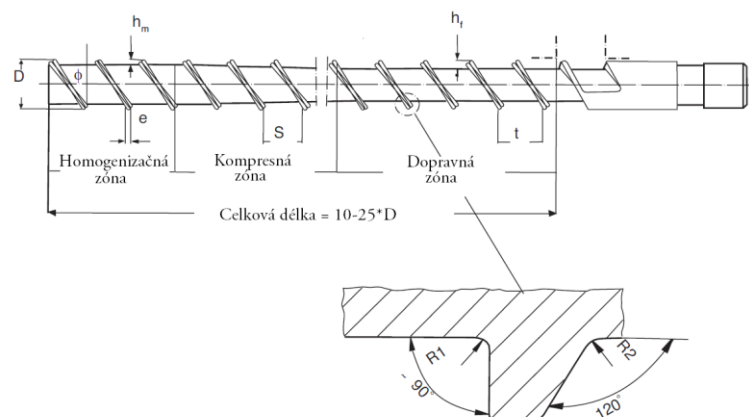
5.1.1.2 Skrutka

Skrutka vykonáva v procese vstrekovania mnoho funkcií. Je to dávkovanie a preprava materiálu, plastifikácia, homogenizácia a následné vstreknutie materiálu do formy. V dnešnej dobe sa už nepoužíva obyčajná skrutka ale skrutka diferenciálna. Je charakterizovaná kompresným pomerom. Ten je definovaný ako pomer objemu skrutkového profilu pre jedno stúpanie závitú pod násypkou k objemu profilu pred tryskou. Zvyčajne je v rozmedzí 1,5 až 4,5. Dosahuje sa väčšinou rozdielnymi priermi jadier skrutiek tj. zmenou hĺbky drážky. Stúpanie závitú sa tak isto mení v závislosti od polohy [5].

Skrutky pre spracovanie termoplastov sa zvyčajne skladajú z troch zón. Zóna pod násypkou sa nazýva *dopravná* a priemer jadra skrutky je tu najmenší. V tejto oblasti sa odoberá materiál z násypky a presúva do časti taviacej komory ohrievanej ohrevnými pásmami. V nasledujúcej časti smerom k špičke stúpanie závitú klesá a jadro skrutky sa zväčšuje. Táto zóna sa nazýva *kompresná* a materiál je v nej intenzívne stláčaný. Posledná zóna sa nazýva *homogenizačná zóna*. V tomto pásme skrutky je materiál premiešavaný a zaisťuje sa rovnomerné rozloženie teploty taveniny pred vstupom do priestoru určeného na zhromaždenie taveniny, z ktorého bude následne vstreknutá do dutiny formy [13].

Jednou z najdôležitejších charakteristík skrutky je jej L/D pomer. Pre rôzne materiály sa používa iný pomer. Pre termoplasty je to zvyčajne 19 až 22:1, najčastejšie 20:1. Kratsie skrutky nezaistia dokonalú teplotnú homogenitu a odvzdušnenie. Dlhšie skrutky môžu viesť k tepelnej degradácii materiálu, zvyknú sa však používať tam, kde je nutné intenzívne premiešanie, napr. pri pridaní aditív. Pre reaktoplasty sa používajú skrutky s pomerom 14:1, pretože zahrievanie materiálu v taviacej komore môže viesť k jeho zosieťovaniu [13].

Veľkosť dávky taveniny pre jeden výrobný zdvih je limitovaná hlavne priemerom skrutky. Rozsah dráhy skrutky by sa mal pohybovať medzi 1 až 4 priermi skrutky. Nedodržanie tohto pravidla môže vyvolať problémy (veľký obsah vzduchových bublín, zle termicky pripravená tavenina) [4].

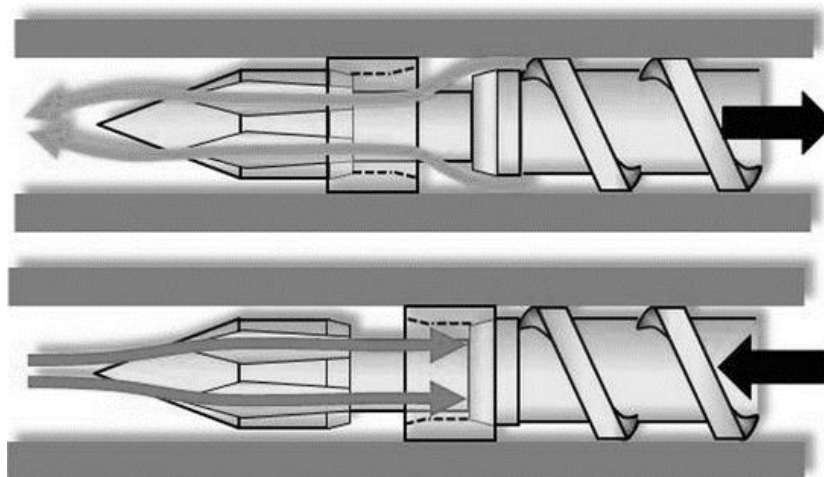


Obrázok 27: Schéma skrutky [6]

5.1.1.3 Spätný uzáver na skrutke

Jeden z najdôležitejších konštrukčných prvkov vstrekovacieho stroja. Umožňuje reprodukovateľnosť objemu taveniny v dávke, čo predstavuje najdôležitejší predpoklad pre výrobu produktu s definovanou akosťou. Najčastejšie používaný uzáver je typu posuvný krúžok – sedlo [4].

Princíp fungovania spätného uzáveru je veľmi jednoduchý. Polymér putuje pri plastifikácii (rotácia skrutky) z násypky, cez tavnú komoru až k špičke skrutky, kde odtlačí posuvný krúžok a tečie pred skrutku. Zastavením rotácie sa dávkovanie ukončí. Vstrekovanie sa uskutočňuje dopredným pohybom skrutky bez rotácie. Pôsobením odporu pri toku taveniny dosadne posuvný krúžok na sedlo a uzavrie priestor skrutky od priestoru pred čelom skrutky [4].



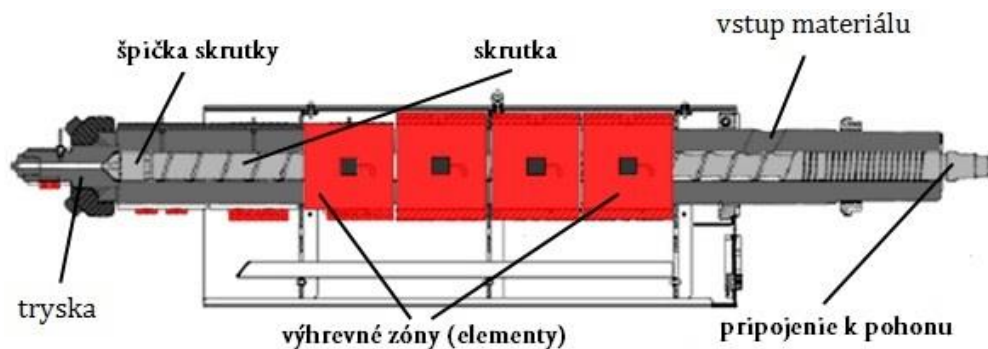
Obrázok 28: Princíp fungovania spätného uzáveru [13]

5.1.1.4 Tavná komora

Tavná komora, inak nazývaná plastifikačný valec, je dutý valec do ktorého prichádza spracovávaný materiál z násypky. Je zakončený tryskou. Povrch komory obklopujú

výhrevné pásy, ktoré sú zvonku izolované. Výhrevné pásy sú väčšinou odporového typu. Sú regulované samostatne a vytvárajú zóny s rôznymi teplotami. Najnižšia teplota sa nastavuje v pásme násypky, aby nedošlo k predčasnému nataveniu granulátu, najvyššia teplota pri tryske. Časť taviacej komory pri tryske sa môže chladit' [5] [13].

Vo vnútri tavnej komory sa nachádza voľne uložená skrutka. Vzdialenosť medzi ich povrchmi je 0,1 až 0,2 mm, takže dutina musí byť obrobená veľmi presne. Vrstva plastu medzi skrutkou a komorou funguje ako mazivo a zabraňuje ich vzájomnému kontaktu, ktorý by mohol viesť k poškodeniu komponentov. Skrutka by preto nemala vykonávať pohyb v komore bez prítomnosti plastu [13].



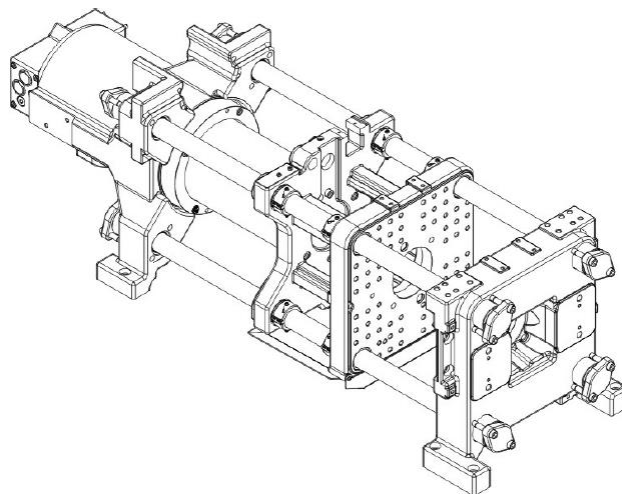
Obrázok 29: Schéma tavnej komory [13]

5.1.1.5 Tryska

Tryska zaisťuje spojenie medzi formou a vstrekovacou jednotkou. Jej hlavnou úlohou je zaistenie presného dosadnutia vstrekovacej jednotky do vtokovej časti formy a ich vycentrovanie. Má vlastnú výhrevnú zónu, aby v nej nedochádzalo k chladnutiu taveniny. Rozlišujeme dva druhy trysiek : otvorené a uzavierateľné trysky. Otvorené trysky majú jednoduchší dizajn, no taveninu nie je možné dávkovať pred čelo skrutky, ak tryska nie je v kontakte s formou. Uzavierateľné trysky zabraňujú vytekaniu taveniny a tá môže byť dávkovaná aj bez kontaktu so vstrekovacou formou [13].

5.1.2 Uzatváracia jednotka

Hlavnou úlohou uzatváraciej jednotky vo vstrekovacom stroji je otváranie a zatváranie vstrekovacej formy, a pevné uzatvorenie formy pri plnení a dotlaku tak, aby sa zabránilo úniku taveniny deliacou rovinou. Jej hlavné súčasti sú: vodiace tyče, pevná a pohyblivá upínacia doska s upínacím systémom, a uzatvárací mechanizmus [13].



Obrázok 30: Uzavieracia jednotka vstrekovacieho lisu [14]

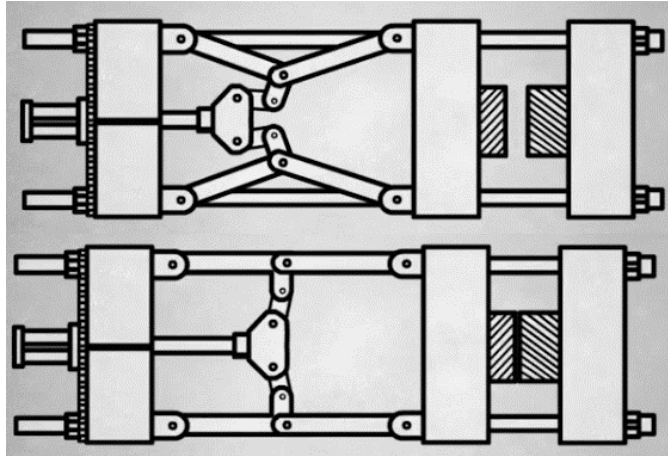
5.1.2.1 Vodiace tyče

Vodiace tyče zabezpečujú rovnobežnosť upínacích dosiek. Vyžaduje sa u nich vysoká tuhosť. Malé stroje používajú dve vodiace tyče, stredné a veľké stroje štyri. Vzďialenosť tyčí nám definuje aký veľký nástroj môže byť do stroja upnutý. Vo všeobecnosti platí, že čím väčšia vzdialenosť tyčí, tým väčšia musí byť ich tuhosť [13].

5.1.2.2 Uzatvárací mechanizmus

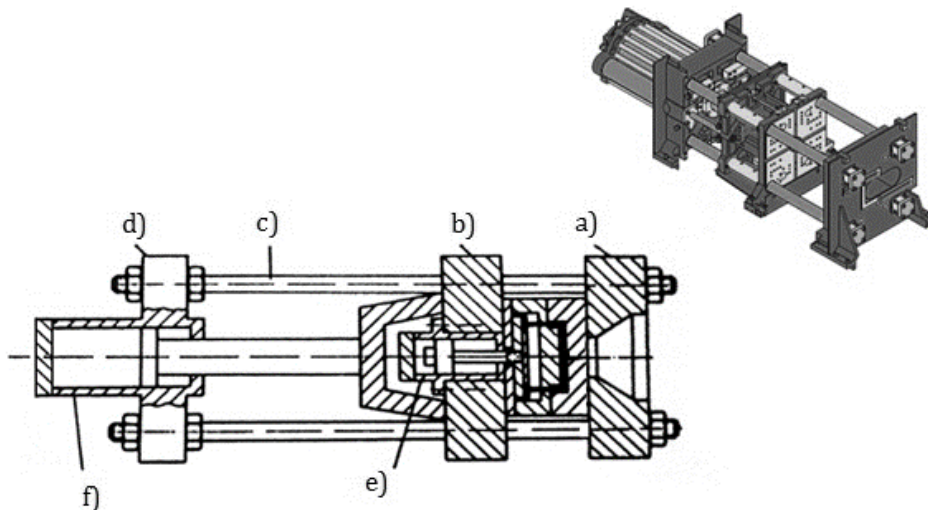
K vyvedeniu uzamykacej sily sú používané rôzne spôsoby. Sila môže byť vyvedená mechanicky (mechanické vzpriechenie formy v potrebnej polohe), hydraulicky (sila vyvedená hydraulickým piestom) alebo kombináciou oboch systémov. Ďalej sa uzatváracie systémy delia na elektrické a hydraulické, v závislosti na type pohonu [13].

Kĺbový mechanizmus sa považuje za jeden z najefektívnejších mechanicky uzatvárateľných systémov. Jeho rýchlosť pohybu je veľmi dobre regulovateľná a spotreba energie nízka. Mechanizmus môže pracovať na elektrickej alebo hydraulickej báze. Systém je rýchly, ale chráni formu pred nabúraním [13].



Obrázok 31: Schéma kĺbového mechanizmu [13]

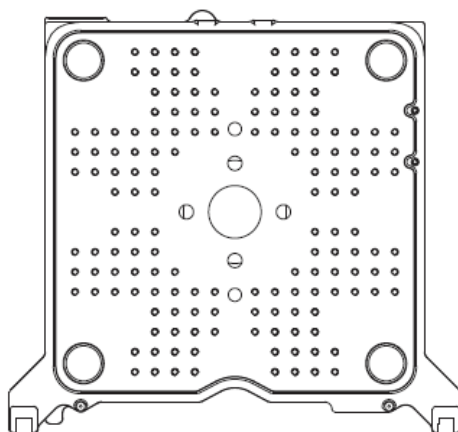
Hydraulické uzatváracie systémy sú tvorené hydraulickým valcom najčastejšie umiestneným v ose systému. Na rozdiel od mechanického systému, je hydraulický systém schopný vyvinúť pracovnú silu v celej dráhe svojho pohybu. Maximálna rýchlosť však nie je taká vysoká ako pri obdobnom mechanickom systéme. Hydraulický systém je jednoduchšie preprogramovateľný pri zmene veľkosti vstrekovacej formy [13].



Obrázok 32: Schéma hydraulického uzatváracieho systému, a) pevná časť formy, b) pohyblivá časť formy, c) vodiace tyče, d) rám stroja, e) hydraulický vyhadzovač, f) hydraulický valec pre ovládanie pohyblivej časti formy [13]

5.1.2.3 Upínacie dosky

Upínacie dosky zabezpečujú pripevnenie vstrekovacej formy k vstrekovaciemu stroju. Delia sa na pevnú a pohyblivú upínaciu dosku. Pevná doska je upevnená k rámu stroja a pohyblivá je pripevnená k posuvnému mechanizmu uzatváraciej jednotky. Cez pevnú dosku prechádza tryska vstrekovacej jednotky. Existuje niekoľko typov uchytení vstrekovacej formy k doskám. Medzi najbežnejšie patrí upnutie upínkami, bajonetovým systémom alebo magneticky [13].



Obrázok 33: Upínacia doska stroja Arburg [14]

5.2 Vstrekovací proces

Vstrekovanie je diskontinuálny proces. Jedná sa o cyklickú výrobu, a preto je prvým predpokladom stabilita procesu. Je nutné zaručiť, aby mal každý vstrekovací cyklus identický priebeh ako predchádzajúci [4].

Vstrekovací cyklus sa dá rozdeliť na štyri hlavné fázy, ktoré ovplyvňujú stav a následne kvalitu výrobku a to:

- Plastifikačná fáza.
- Vstrekovacia fáza.
- Dotlaková fáza.
- Fáza ochladzovania [4].

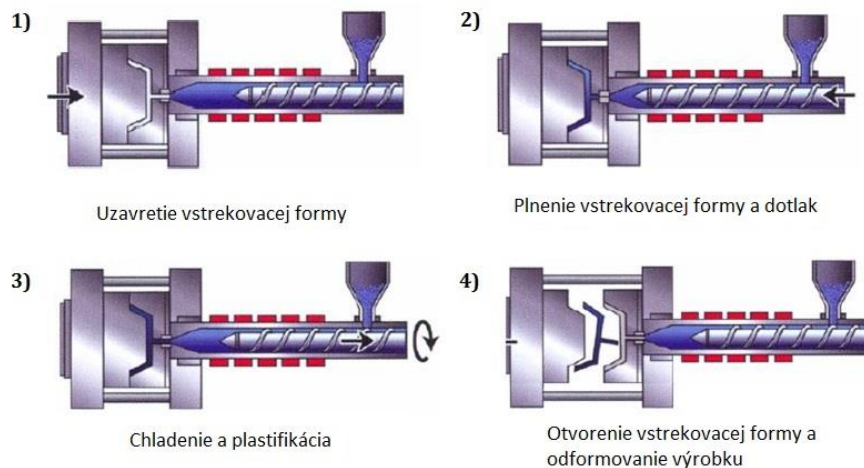
Postup vstrekovania je nasledujúci: granulovaný plast je nasýpaný do násypky, z ktorej je odoberaný pracovnou časťou stroja (skrutkou, piestom), ktorá hmotu prepravuje do taviacej komory, kde sa za súčasného pôsobenia trenia a ohrevu plast topí a vzniká tavenina. Tá je následne vstrekovaná do dutiny formy, ktorú zaplní a perfektne kopíruje tvar formy. Nasleduje dotlaková fáza kvôli zníženiu zmrštenia a rozmerových zmien. Plast predá forme teplo a ochladzovaním stuhne. Forma sa následne otvorí a výlisok je vyhodnený [6] [5].

Vstrekovací cyklus tvorí sled presne špecifikovaných úkonov. Je to neizotermický proces, pri ktorom plast prechádza teplotným cyklom. Je nutné jednoznačne definovať počiatok vstrekovacieho cyklu. Za počiatok sa dá považovať okamžik odpovedajúci impulzu k uzavretiu formy [5].

Cyklus začína prisunutím pohyblivej časti formy k pevnej a uzavretím a uzamknutím formy. Nasleduje vstreknutie polyméru do vtokovej sústavy a tvarovej dutiny formy.

V tejto fáze vykonáva skrutka iba axiálny pohyb a plní funkciu piestu. Po zaplnení formy sa vstrekovací stroj prepne do dotlakovej fázy kvôli vykompenzovaniu materiálového zmrštenia, ku ktorému dochádza vplyvom chladnutia taveniny. Aby sme mohli dotlačovať, musí ostať pred čelom skrutky určité množstvo plastu – vankúš, na ktorý bude skrutka svojim čelom pôsobiť. Tento objem však nemôže byť príliš veľký, aby nedochádzalo k tepelnej degradácii hmoty [5].

Po dotlaku začína plastifikácia novej dávky plastu. Skrutka sa otáča, naberá granulát, taví ho a vtláča do priestoru pred čelom skrutky. Súčasne ustupuje dozadu do počiatkovej polohy. Ohrev plastu behom plastifikácie sa uskutočňuje prevodom tepla zo stien valca, frikčným teplom, ktoré vzniká trením plastu o steny komory a o povrch skrutky a premenou miešacej práce v teplo. Hneď ako je výlisok vychladený, forma sa otvorí a výlisok sa odstráni z formy [5].



Obrázok 34: Popis vstrekovacieho cyklu [13]

5.2.1 Plastifikačná fáza

Pre rovnomerné naplnenie tvarovej dutiny formy je základným predpokladom teplotne a viskózne homogénna dávka taveniny pred skrutkou. Nehomogenita sa prejavuje v zhoršení kvality povrchu výlisoku (studené spoje, tokové čiary) a v zhoršení jeho mechanických vlastností. Vo fáze plastifikácie sa tiež rozhoduje o kryštalinite výlisoku. Vplyvy, ktoré pôsobia na kvalitu taveniny sú:

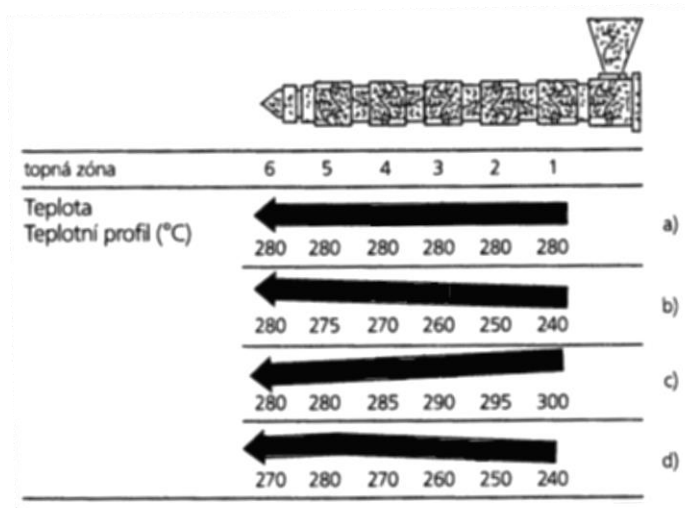
- konštrukcia plastifikačnej skrutky a plastifikačnej (tavnej) komory,
- obsah vlhkosti v granuláte,
- spätný odpor na skrutke,
- obvodová rýchlosť na skrutke [15].

5.2.1.1 Teplota výhrevných pásiem

V plastifikačnej fáze sa používajú rôzne teplotné profily plastifikačného valca. Tie závisia na druhu materiálu, dávke materiálu alebo type trysky. Typické priebehy teplotných profilov sú zobrazené na obrázku. Profil môže byť:

- Horizontálny* – pre vstrekovanie s rýchlym cyklom alebo veľkou dávkou.
- Stúpajúci* – obvyklý pre väčšinu materiálov a bežné vstrekovanie.
- Klesajúci* – výnimočné prípady, napr. PA 66.
- Stúpajúco-klesajúci* – obmedzuje vytekanie taveniny pri použití otvorenej trysky [15].

Pri plnení dutiny formy taveninou je teplota taveniny rozhodujúci faktor ovplyvňujúci orientáciu makromolekúl. Zvyšovaním teploty klesá orientácia makromolekúl, zvyšuje sa pevnosť studených spojov, znižuje vnútorné pnutie a zvyšuje výrobné zmrštenie. Teplota taveniny PP sa typicky pohybuje v rozmedzí 180-300 °C. Teplota výhrevných pásiem sa pohybuje pri PP od 220 do 300 °C [15].



Obrázok 35: Profily teplôt plastifikačného valca [15]

5.2.1.2 Spätný odpor na skrutke

Programovaním spätného tlaku nepriamo programujeme teplotu nadávkovanej taveniny. Ak zmeníme spätný tlak alebo otáčky skrutky, bezprostredne ovplyvníme viskozitu taveniny. Spätný odpor na skrutke sa využíva najmä na:

- Tepelnú homogenizáciu taveniny.
- Mechanickú homogenizáciu taveniny.
- Vytesňovanie vzduchu obsiahnutého v granuláte.
- Vyrovnávanie oxidačného priebehu teploty taveniny [15].

Empiricky sa zistilo, že spätný tlak je potrebné:

- zvýšiť pre zlepšenie homogenity taveniny,
- zvýšiť pri nerovnomernom spätnom chode skrutky,
- znížiť pre predĺženie doby dávkovania [15].

Pre rovnomernú homogenizáciu PP sa obvykle volí tlak do 50 bar [15].

5.2.1.3 Otáčky skrutky

Otáčky skrutky tiež ovplyvňujú proces plastifikácie a úzko súvisia so spätným odporom na skrutke. Kritériom otáčok je obvodová rýchlosť skrutky. Otáčky skrutky sú zvolené optimálne, ak rýchlosť skrutky pohybuje okolo hodnôt 0,05-0,2 m/s. Väčšie obvodové rýchlosti môžu spôsobovať problémy ako:

- tepelnú degradáciu taveniny,
- mechanickú degradáciu vystužujúcich plnív,
- zvýšenie opotrebenia skrutky a povrchu plastifikačného valca [15].

Pri vstrekaní PP tabulky uvádzajú hodnotu až 0,3 m/s [15].

5.2.2 Vstrekovacia fáza

Plnenie tvarovej dutiny formy závisí na jej veľkosti, tvare, teplotnom profile tavných telies a na termodynamickom stave taveniny [4]. Základné technologické parametre, ktoré ju ovplyvňujú sú:

- vstrekovacia rýchlosť,
- vstrekovací tlak,
- teplota taveniny (resp. jej viskozita) [4].

5.2.2.1 Vstrekovací tlak a rýchlosť

Vstrekovací tlak a rýchlosť majú za úlohu objemovo naplniť tvarovú dutinu formy. Ich veľkosť by mala byť taká, aby bolo šmykové namáhanie taveniny a pevnostné namáhanie formy čo najmenšie. Veľkosť vstrekovacieho tlaku musí byť taká, aby vstrekovacia rýchlosť neklesla pod nastavenú hodnotu. Vstrekovacou rýchlosťou sa myslí rýchlosť pohybu skrutky smerom vpred pri plnení formy taveninou. Profil rýchlosti vstrekovania by mal byť taký, aby sa dutina formy plnila rovnomerne [4] [15].

V procese vstrekovania sa nastavuje vždy iba jedna hodnota vstrekovacieho tlaku. Vstrekovaciu rýchlosť môžeme nastaviť ako konštantnú alebo ako rýchlostný profil. Ak vstrekovacia rýchlosť nie je realizovateľná príslušným vstrekovacím tlakom, reálne vstrekovanie prebehne pri rýchlosti nižšej [4].

Vstrekovacia rýchlosť má najväčší vplyv na akosť povrchu výrobku, hlavne na povrchové vady ako tokové čiary a podobne. Príliš pomalá rýchlosť plnenia dutiny má za následok

studený tok a studené spoje (prílišné ochladenie čela taveniny). Príliš vysoká rýchlosť môže viesť k termickému rozkladu taveniny hlavne u tvarovo zložitých dielov [4].

Pre PP sa v tabuľkách udáva hodnota tlaku 500-1200 bar [4].

5.2.2.2 Teplota taveniny

Teplota taveniny sa realizuje nastavením parametrov spomenutých v predchádzajúcej časti práce a to najmä:

- nastavením teplôt výhrevných pásiem,
- spätným odporom na skrutke,
- obvodovou rýchlosťou skrutky,
- doba zotrvania v plastifikačnej komore [4].

60-85 % energie je dodanej trecou prácou – spätný odpor na skrutke a obvodová rýchlosť skrutky. Tolerancia teploty taveniny by sa mala pohybovať pre amorfné termoplasty v rozmedzí 2 až 5 °C a pre čiastočne kryštalické v rozmedzí 4 až 10 °C. Nedodržaním týchto medzí vyvoláme veľké zmeny vo viskozite taveniny. Pre homogenizáciu teploty taveniny môžeme vložiť do trysky vstrekovacej jednotky statické miešače. Tie pôsobia šmykové namáhanie, ktoré majú pozitívny vplyv na teplotnú homogenitu a distribúciu aditív [4].

Zvyšovaním teploty taveniny:

- znižujeme jej viskozitu,
- znižujeme orientačné javy,
- znižujeme tlakové straty v dutine formy,
- znižujeme vplyv studených spojov na akosť povrchu,
- u čiastočne kryštalických materiálov zvyšujeme obsah kryštalického podielu [4].

5.2.3 Dotlaková fáza

Dotlaková fáza nasleduje po fáze plnenia. V priebehu dotlaku sa do formy dodá ešte približne 10% materiálu na vyrovnanie objemového zmrštenia materiálu vyvolaného ochladzovaním. Táto fáza ovplyvňuje hmotnosť výrobku, jeho rozmery, homogenitu a zmrštenie [15].

5.2.3.1 Bod prepnutia zo vstrekovacieho tlaku na dotlak

Bod prepnutia je možný definovať na základe:

- dráhy skrutky resp. objemu vstrekovanej taveniny,
- tlaku v hydraulickom systéme stroja,
- tlaku v dutine formy,
- času [4].

Nesprávny bod prepnutia môže vyvolať rôzne chyby vo vstrekovacom procese. Neskorý bod prepnutia má za následok napríklad vznik pretokov v deliacej rovine formy, preplnenie dutiny formy taveninou a tým pádom zvýšenie hmotnosti výrobku, vyššie pnutie vo výrobku, zvýšenie namáhania formy a iné. Predčasné prepnutie môže vyvolať prepád tlaku, neúplné vyplnenie dutiny formy, vady povrchu výrobku, prepadliny a iné problémy [4].

5.2.3.2 Úroveň dotlaku a doba dotlaku

Na tvarovú a rozmerovú presnosť má dotlaková fáza najväčší vplyv. Definujeme ju úrovňou dotlaku a dobou dotlaku. Úroveň musí byť taká, aby po objemovom naplnení formy dokázala vyrovnáť všetky nerovnosti a prepadliny, zaplniť všetky prierezy formy a odkopírovať požadované tvary. Doba dotlaku má vplyv na konečnú anizotropiu vlastností výrobku. Optimálnu dobu dotlaku je možné určiť vážením. Čas, pri ktorom sa už hmotnosť výrobku viac nezvyšuje je optimálny [4].

Pri PP sa hodnota dotlaku pohybuje v úrovni 50-90 % zo vstrekovacieho tlaku [4].

5.2.4 Fáza ochladzovania

V procese vstrekovania rozoznávame dobu ochladzovania a dobu chladenia. Ochladzovanie je definované ako súčet doby dotlaku a doby chladenia. Chladenie je doba od skončenia doby dotlaku po otvorenie formy. Vo všeobecnosti by mala byť doba chladenia iba tak dlhá, aby pri vyhadzovaní výrobku nedošlo k jeho deformácii, preznačeniu vyhadzovačov alebo pretrhnutiu výrobku [4].

5.2.4.1 Teplota formy

Pri každom výrobnom cykle je do formy dodané teplo, ktoré je postupne odvádzané vedením do formy a upínacích dosiek, sálaním do okolitého prostredia, vyhodným výrobkom a hlavne temperačným systémom formy. Ten sa stará o vytemperovanie formy na pracovnú teplotu a o následné udržanie tejto teploty [4].

Teplotou formy sa rozumie teplota na povrchu tvarovej dutiny formy v čase pred naplnením taveninou. Teplota formy má veľký vplyv na dobu cyklu a kvalitatívne parametre výrobku. Jej teplota by nemala klesnúť pod spodnú hranicu udávanú výrobcom granulátu [4].

Empiricky sa zistilo, že zvyšovaním teploty formy zvyšujeme výrobné zmrštenie, ale na druhej strane znižujeme zmrštenie dodatočné. Vyššia teplota formy je vhodná pre dokonalejšiu reprodukciu povrchu tvarovej dutiny formy (lesk, dezén, matová úprava). Zvyšovaním teploty zvyšujeme tuhosť, povrchovú tvrdosť a odolnosť proti oteru. Nevýhodou je dlhšia doba ochladzovania [4].

Teplota vo forme by mala byť homogénne rozdelená po celej ploche povrchu tvarovej dutiny. Rozdiely teplôt na povrchu môžu spôsobovať rôzne miestne zmrštenia, rozličnú kryštalinitu, deformáciu výrobku a povrchové vady [4].

6 Záver teoretickej časti

Vstrekovanie je najčastejší spôsob výroby mnohých plastových výrobkov, ktoré sa produkujú vo veľkých množstvách. Výhodou vstrekovania plastov do foriem je vysoká rýchlosť výroby, veľká opakovateľnosť, schopnosť použiť rôzne druhy plastových materiálov, nízka cena práce, minimálny odpad a nízka potreba ďalšieho opracovania výrobku po jeho odliatí. Nevýhodou tohto procesu je investícia do nákupu drahého zariadenia a vysoké náklady na výrobu foriem.

V súčasnosti existuje veľké množstvo dostupných materiálov a každoročne pribúdajú stovky ďalších, vznikajúcich miešaním syntetických polymérov už skôr vytvorených, ktoré sa miešajú v rôznych pomeroch v závislosti na požiadavkách na vlastnosti výrobku vo vzťahu k pevnosti, odolnosti na vyššiu teplotu a podobne. Rovnako v úvahu sa berú aj okolnosti spojené s rozličnými parametrami samotného technického procesu vstrekovania. Najčastejšie používané termoplasty sú polyetylén, polypropylén a polystyrén. Z plastov označovaných ako reaktoplasty sú to polyméry epoxidového a fenolického charakteru [16].

Výrobný proces používajúci vstrekovanie plastickej hmoty do formy je jeden z komplexných postupov výroby rôznych plastických produktov, ktorý v zásade pozostáva zo štyroch fáz. Sú to roztavenie plastu, jeho vstrekovanie, vyplnenie formy a chladenie. Konečnú kvalitu výrobku môže ale ovplyvniť viacero ďalších výrobných parametrov, ako sú teplota tavenia plastu, teplota formy, vstrekovací tlak, rýchlosť vstrekovania, doba vstrekovania, tlak plnenia, doba plnenia a teplota chladenia [17]. Tlak v dutine vstrekovacej formy pri vstrekovaní je úzko spätý s kvalitou vstrekovaného výrobku a je hlavným monitorovacím činiteľom kvality [18]. V literatúre sa tiež uvádza, že tlak behom plnenia formy má vplyv na viskozitu predovšetkým v prípadoch vyššej taviacej teploty plastového polyméru a hrúbky stien odlievaného výrobku [19].

7 Praktická časť

7.1 Úvod

Cieľom praktickej časti bolo zistiť vplyv veľkosti vstrekovacieho tlaku a dotlaku na kvalitu a mechanické vlastnosti výlisku. V mojej práci nadviažem na bakalársku prácu Jířího Lukáša, ktorý v praktickej časti jeho práce sledoval vplyv teploty taveniny a teploty formy na kvalitu a mechanické vlastnosti výlisku. Lukáš uvádza, že najvhodnejšie nastavenie pre polypropylén bolo: teplota výhrevných pasiem 230 °C – 230 °C – 220 °C – 215 °C a teplota formy 47,5 °C [20].

Použitý bol materiál od firmy Unipetrol, typ Mosten GB107.

7.2 Vstrekovací stroj

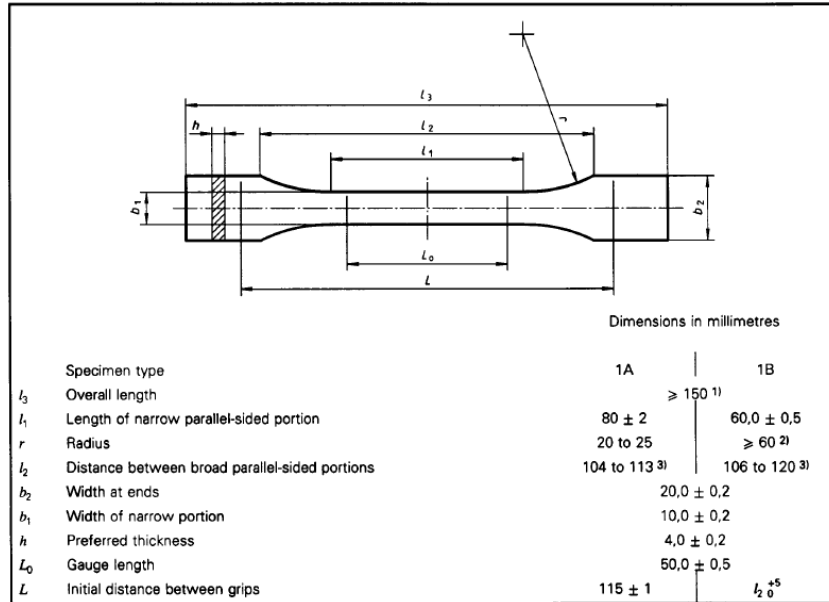
Pri experimente bol použitý vstrekovací stroj Arburg ALLROUNDER 270 C. ALLROUNDER je vstrekovací stroj s horizontálne usporiadanou vstrekovacou jednotkou a uzatváracou silou 400 kN. Maximálny objem vstrekovaného materiálu je 34 cm³. [14]



Obrázok 36: Vstrekovací stroj Arburg ALLROUNDER 270 C. Autor fotografie: Martin Lipták

7.3 Skúšobné teliesko

Skúšobné teliesko bolo vyrobené podľa normy EN ISO 527-2. V mieste pretrhnutia malo šírku $b_1 = 10 \pm 0,2$ mm a hrúbku $h = 4 \pm 0,2$ mm [21].



Obrázok 37: Rozmery skúšobného telieska podľa normy EN ISO 527-2 [21]

7.4 Popis experimentu

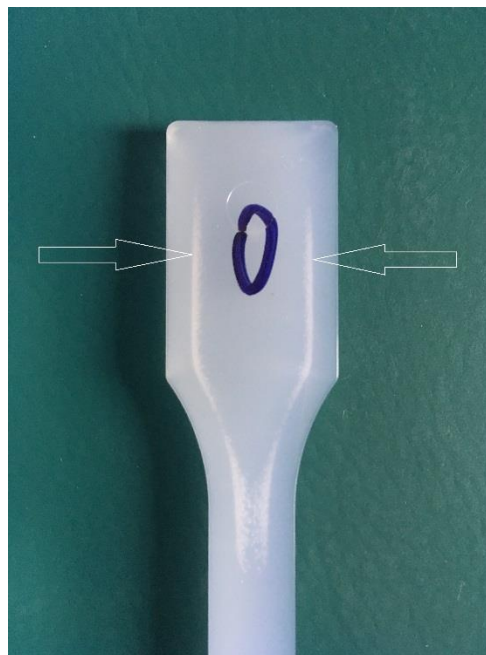
Na začiatku bolo potrebné zapnúť stroj hlavným vypínačom. Následne sme pomocou tlačidiel na ovládacom paneli SELOGICA zapli motor čerpadla a vyhrievanie trysky. Potom sme zapli chladiace zariadenie formy.

Ako prvé bolo potrebné nastaviť teplotu formy a teplotu výhrevných zón. Začali sme teplotou formy 40 °C a teplotami výhrevných zón $220 - 220 - 210 - 205$ °C v smere od trysky k násypke. Vstrekovaciu rýchlosť a vstrekovací tlak sme nastavili na základe predchádzajúcich skúseností s našim strojom na hodnoty 10 cm³/s a 350 bar. Hodnotu dotlaku sme nastavili na 300 bar.

Pri tejto konfigurácii stroja sa nám ale vo výrobku utvárali bubliny, viď obrázok, čo môže byť znak nízkej teploty vstrekovacej formy [15]. Bubliny zvyčajne vznikajú v hrubších častiach výlisku pri rýchlom ochladzovaní. Stred výlisku sa chladí pomalšie a má väčšie zmrštenie. Oddiaľovaním polyméru od seba vznikajú vákuové dutiny [22]. Zvýšením teploty formy na 60 °C bubliny zmizli, čo potvrdilo náš predpoklad.

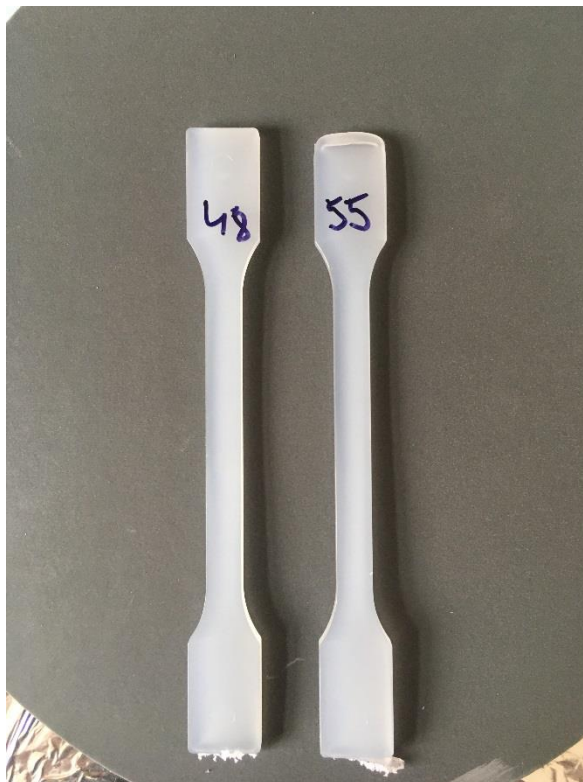


Obrázok 38: Ovládací panel stroja SELOGICA vstrekovacieho stroja Arburg ALLROUNDER 270 C Autor fotografie: Martin Lipták



Obrázok 39: Vzorka číslo 0 obsahujúca vzduchové bubliny (vyznačené šípkami). Autor fotografie: Martin Lipták

Po správnom nastavení teplôt sme pristúpili k výrobe skúšobných teliesok. Začínali sme na hodnote vstrekovacieho tlaku 350 bar a hodnote dotlaku 300 bar. Po vyrobení 10 teliesok sme znížili obe hodnoty o 25 bar. Po každej zmene parametrov sme pre ustálenie procesu vyrobili 10-15 teliesok, ktoré sme následne vyhodili. Pre mechanickú skúšku boli odobrané až nasledujúce telieska. Znižovanie tlaku sme ukončili na hodnote vstrekovacieho tlaku 200 bar a dotlaku 200 bar, pri ktorých už tavenina nedokázala úplne vyplniť vstrekovaciu formu, viď obrázok. Následne bola vyrobená ešte jedna várka skúšobných teliesok pri vstrekovacom tlaku 400 bar a dotlaku 350 bar.



Obrázok 40: Porovnanie kvality teliesok pri vstrekovacom tlaku 250 bar (číslo 48) a 200 bar (číslo 55). Na vzorke číslo 55 sme pozorovali nedokonalé vyplnenie tvarovej dutiny formy. Autor fotografie: Martin Lipták

Tabuľka 2: Parametre vstrekovania jednotlivých vzoriek

Číslo vzorku	Vstrekovací tlak [bar]	Dotlak [bar]
0	350	300
1 - 10	350	300
11 - 20	325	275
21 - 30	300	250
31 - 40	275	225
41 - 50	250	200
51 - 60	200	200
61 - 70	400	350

7.5 Skúška ťahom

Princípom skúšky je statické zaťažovanie skúšobnej vzorky predpísaných tvarov a rozmerov až do pretrhnutia. Vzorka sa upína do čelustí trhacieho stroja tak, aby os vzorky bola rovnaká ako os pôsobiacej sily.

Pri ťahovej skúške zisťujeme medzu pevnosti v ťahu R_m (σ_p), maximálne zaťaženie pred pretrhnutím F a predĺženie pri pretrhnutí.

Na trhaciu skúšku bol použitý stroj Walter + Bai AG, typ ZD 10/90. Zvolili sme rýchlosť polohovania 100 mm/s, ktorú sme po troch vzorkách zmenili na 50 mm/s, keďže ISO 527-1 odporúča pre meranie pevnosti v ťahu a predĺženia rýchlosti 5-50 mm/s.



Obrázok 41: Trhací stroj Walter + Bai AG [23]

Pri trhacej skúške boli vynechané série so vstrekovacím tlakom 325 bar a 275 bar. Výsledné hodnoty maximálneho zaťaženia, pevnosti v ťahu a predĺženia sú zaznamenané v tabuľke. Vzorky sú usporiadané podľa reálneho postupu trhacej skúšky, pri ktorej sme postupovali od najvyššieho vstrekovacieho tlaku po najnižší, s výnimkou vzorku číslo 0, ktorý obsahoval bubliny.

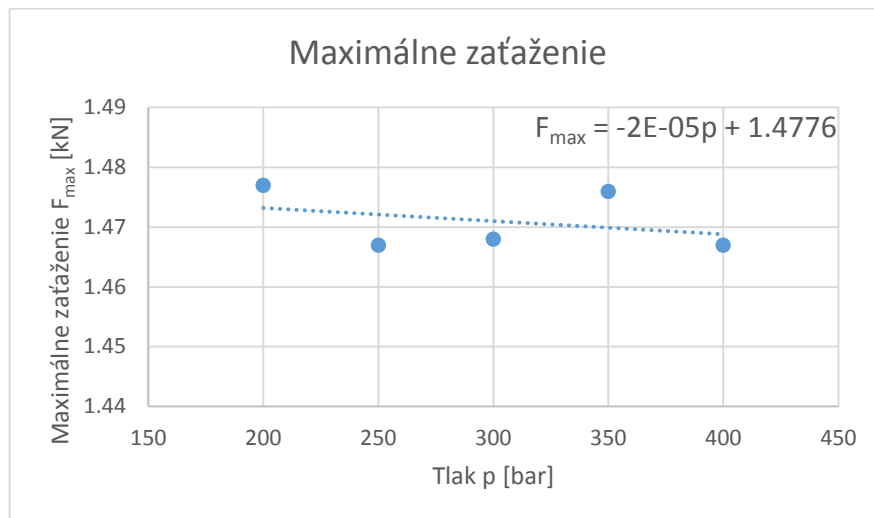
Tabuľka 3: Výsledky ťahovej skúšky

Číslo vzorku	Maximálne zaťaženie [kN]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Predĺženie [mm]
0	1.46	36.56	36.5
61	1.45	36.29	28
62	1.44	36.12	18
63	1.47	36.79	20.4
64	1.47	36.83	19.3
65	1.48	36.99	18.6
66	1.46	36.61	15.6
67	1.47	36.72	17.2

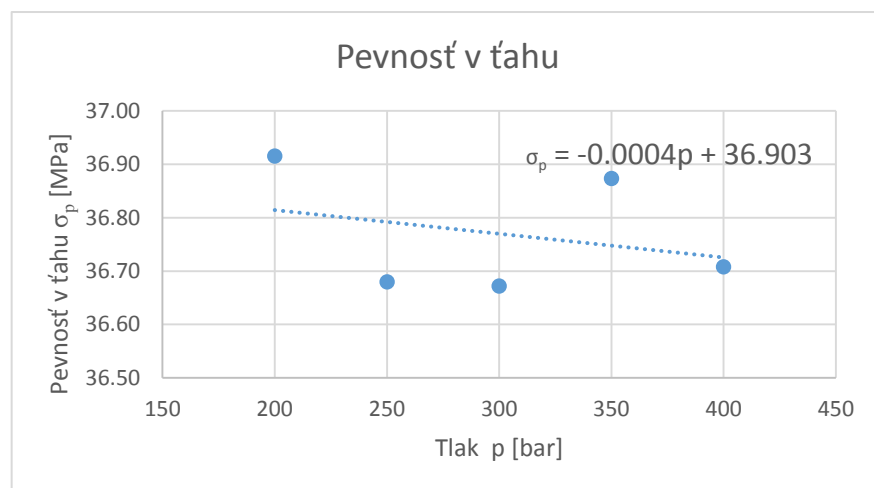
68	1.49	37.23	23.4
69	1.47	36.65	18.5
70	1.47	36.85	21
1	1.5	37.47	35
2	1.47	36.81	16.8
3	1.45	36.32	16.4
4	1.46	36.52	16.2
5	1.49	37.16	17.5
6	1.47	36.72	17.4
7	1.47	36.7	14.6
8	1.48	36.94	19
9	1.48	36.94	14.6
10	1.49	37.16	17.8
21	1.43	35.85	20.8
22	1.44	35.94	19.4
23	1.46	36.38	20
24	1.48	36.98	27.5
25	1.47	36.63	23
26	1.46	36.56	22.2
27	1.49	37.14	18.8
28	1.49	37.32	24.6
29	1.49	37.23	18
30	1.47	36.69	17.2
41	1.44	35.92	20
42	1.45	36.16	17.2
43	1.47	36.72	17.8
44	1.47	36.7	33
45	1.47	36.69	17.5
46	1.47	36.85	19.6
47	1.46	36.6	15.6
48	1.48	37.12	22
49	1.49	37.21	18
50	1.47	36.83	18.7
51	1.46	36.45	29.5
52	1.48	36.92	20
53	1.48	37.01	19
54	1.46	36.45	19
55	1.47	36.76	16.4
56	1.46	36.52	16.6
57	1.49	37.21	22
58	1.48	37.05	16.3
59	1.5	37.43	18.5
60	1.49	37.36	14.9

Tabuľka 4: Priemerné hodnoty jednotlivých sérií

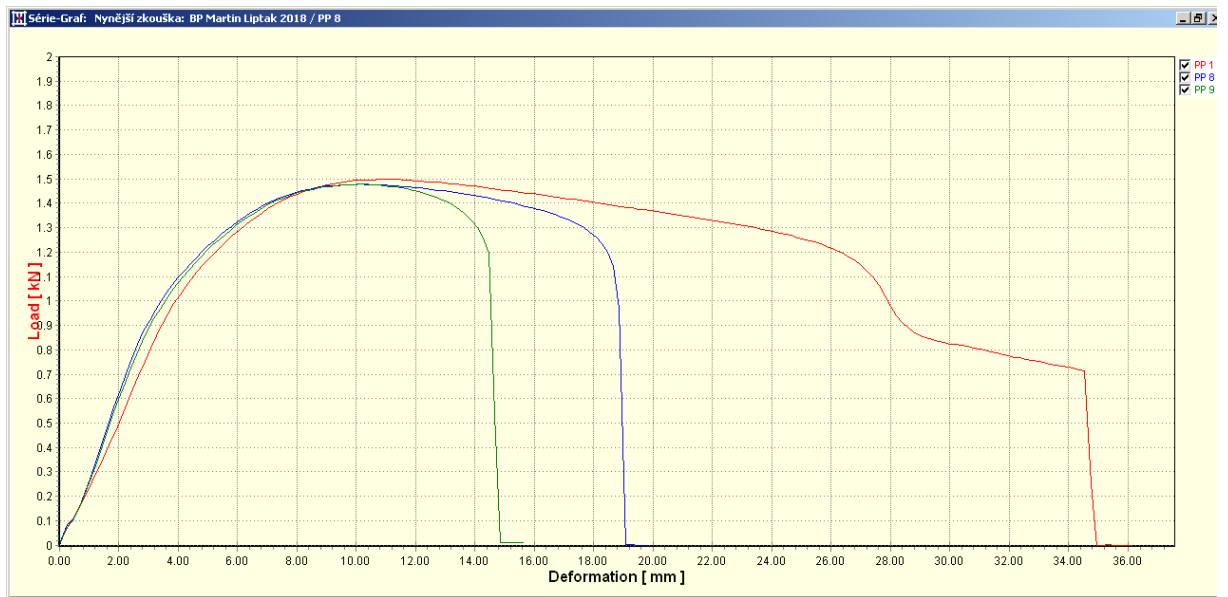
Vstrekovací tlak [bar]	Priemerná pevnosť v ťahu [MPa]	Priemerné maximálne zaťaženie [kN]
400	36.71	1.467
350	36.874	1.476
300	36.672	1.468
250	36.68	1.467
200	36.916	1.477



Obrázok 42: Závislosť maximálneho zaťaženia na vstrekovacom tlaku. Body predstavujú priemerné hodnoty maximálneho zaťaženia každej série.



Obrázok 43: Závislosť pevnosti v ťahu na vstrekovacom tlaku. Body predstavujú priemerné hodnoty pevnosti v ťahu každej série.



Obrázok 44: Ťahový diagram troch vzoriek polypropylénu vyrobených pri vstrekovacom tlaku 350 bar

Ako môžeme pozorovať z tabuľky a grafu, pevnosť v ťahu ostávala konštantná pri všetkých hodnotách vstrekovacieho tlaku. Pozorovali sme, že maximálne zaťaženie sa vyskytovalo pri všetkých vzorkách na hodnote predĺženia cca 10 mm, no predĺženie pri pretrhnutí oscillovalo medzi hodnotami 14-29 mm. Pri hodnote vstrekovacieho tlaku 200 bar však už stroj nedokázal vyplniť tvarovú dutinu formy. Pre polypropylén sú v tabuľkách doporučené vstrekovacie tlaky 500-1200 bar. Naša forma je však veľmi jednoduchého tvaru, preto je možné vstrekať pri nízkych tlakoch, keďže nedochádza k veľkým tlakovým stratám. V dôsledku toho nie je pri tejto konkrétnej forme nutné používať vysoké tlaky. Týmto opatrením je možné ušetriť elektrickú energiu a predĺžiť životnosť vstrekovacieho stroja.

8 Záver praktickej časti

Vstrekovanie plastov je jeden z najpoužívanějších výrobných procesov dnešnej doby. Vo veľkej miere ho ovplyvňujú parametre ako teplota taveniny, teplota formy, vstrekovací tlak, veľkosť dotlaku, rýchlosť vstrekovanie alebo časy jednotlivých úkonov. V experimentálnej časti som sa zamerával na testovanie mechanických a estetických vlastností výlisku. Skúmal som hlavne vplyv veľkosti vstrekovacieho tlaku a dotlaku na pevnosť v ťahu. Z výsledných grafov je možné vidieť, že veľkosť tlaku ani dotlaku nemá rozhodujúci vplyv na pevnosť v ťahu. Pri všetkých testovaných tlakoch vychádzala pevnosť v ťahu na úrovni 36 MPa, čo je dokonca o 1 MPa viac ako uvádza výrobca pre tento typ polypropylénu [24]. Z tohto zistenia vyplýva, že pri tomto konkrétnom stroji a forme nie je nutné používať tlaky uvádzané v tabuľkách (500-1200 bar). Toto opatrenie zníži spotrebu elektrickej energie a predĺži životnosť stroja. Ako hraničný tlak by som ale odporučil hodnotu 250 bar, pretože pri nižších hodnotách dochádzalo k neúplnému vyplneniu tvarovej dutiny formy. Moje odporúčanie na nastavenie stroja je: teplota výhrevných pásiem 220 – 220 – 210 – 205 °C, teplota formy 60°C, veľkosť vstrekovacieho tlaku 250 bar, veľkosť dotlaku 200 bar.

9 Zoznam zdrojov

- [1] *Global plastic production from 1950 to 2016*. Statista [online]. b.r. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
- [2] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 17. verze. Liberec: Publi, 2014 [cit. 2018-04-06]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/eknihy/?book=180-polymery>
- [3] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [4] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 80-7400-026-1.
- [5] *Zpracování plastů* [online]. Liberec, b.r. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm
- [6] OSSWALD, Tim. *International plastics handbook: the resource for plastics engineers*. [4th ed.]. Cincinnati: Hanser, 2006. ISBN 34-462-2905-1.
- [7] CHANDA, Manas a Salil ROY. *Plastics technology handbook*. 4th ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 08-493-7039-6.
- [8] *Uses of polypropylene*. Petroquim [online]. b.r. [cit. 2018-06-02]. Dostupné z: <http://www.petroquim.cl/usos-del-polipropileno/?lang=en>
- [9] BERNARDEAU, Fabien. Valorization of waste thermoset material as a filler in thermoplastic. *Journal of Applied Polymer Science*. 2018, **135**(12), 1-11. ISSN 00218995. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.45849>
- [10] MICHAELI, Walter. *Plastics processing: an introduction*. 1. vydání. Cincinnati: Hanser/Gardner Publications, 1995. ISBN 15-699-0144-9.
- [11] BAIRD, Donald a Dimitris COLLIAS. *Polymer processing: principles and design*. 2. vydání. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014. ISBN 978-0-470-93058-8.
- [12] *A Guide to Injection Moulding*. Preview [online]. b.r. [cit. 2018-06-02]. Dostupné z: <http://www.preview-project.eu/a-guide-to-injection-moulding/blog/>
- [13] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. Verze 19. Liberec: Publi, 2015 [cit. 2018-04-10]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/eknihy/?book=181-stroje-pro-zpracovani-polymernich-materialu>
- [14] *FIREMNÍ LITERATURA (MANUÁL)*, . Návod k obsluze pro stroj č. 229484. Lossburg: ARBURG GmbH + Co KG, 2014.
- [15] *Malý průvodce vstřikováním*. ARBURG spol. s.r.o, Brno, b.r.
- [16] *Injection molding process review*. Engineers Edge [online]. b.r. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: www.engineersedge.com/manufacturing/injection-molding-review.htm

- [17] CHEN, Wen-Chin. A neural network-based approach for dynamic quality prediction in a plastic injection molding process. *Expert Systems with Applications* [online]. 2008, **35**(3), 843-849 [cit. 2018-05-23]. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.07.037. ISSN 09574174. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417407002977>
- [18] TSAI, Kuo-Ming a Jun-Kai LAN. Correlation between runner pressure and cavity pressure within injection mold. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, 79(1-4), 273-284. DOI: 10.1007/s00170-014-6776-5. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-6776-5>
- [19] RUDOLPH, Natalie, F PICH a Tim OSSWALD. Effects of temperature and pressure on viscosity during injection molding. *Annual Technical Conference - ANTEC* [online]. 2011, , 1540-1545 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/289115688_Effects_of_temperature_and_pressure_on_viscosity_during_injection_molding
- [20] LUKÁŠ, Jiří. Parametry procesu vstřikování plastů. Praha, 2017. Bakalárska práca. České vysoké učení technické v Praze.
- [21] *Determination of tensile properties of plastics*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 1996.
- [22] BOZZELLI, John. Injection Molding: How to Get Rid of Bubbles. *Plastics Technology* [online]. 2015 [cit. 2018-06-02]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/columns/injection-molding-how-to-get-rid-of-bubbles>
- [23] *Materials Testing Systems*. Löhningen: Walter + Bai AG, 2010. Dostupné také z: www.walterbai.com/component/option,com_downloadarea/lang,en/
- [24] *Characteristic BP 107*. Unipetrol [online]. b.r. [cit. 2018-06-02]. Dostupné z: http://www.unipetrol.cz/en/OurProducts/PetrochemicalProducts/Polyolefins/Pages/product_details_M.aspx?product=Mosten%20GB%20107
- [25] NIESZ, Krisztián. Challenges of polymer informatics and the driving force. *ChemAxon* [online]. b.r. [cit. 2018-06-02]. Dostupné z: <https://chemaxon.com/news/challenges-of-polymer-informatics-and-the-driving-force>
- [26] *Amorphous Polymers*. RTP Co. [online]. b.r. [cit. 2018-06-02]. Dostupné z: <https://www.rtpcompany.com/products/high-temperature/amorphous-polymers/>
- [27] *Semi-Crystalline Polymers*. RTP Co. [online]. b.r. [cit. 2018-06-02]. Dostupné z: <https://www.rtpcompany.com/products/high-temperature/semi-crystalline-polymers/>