



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ
TECHNIKY

Parametry procesu vstřikování plastů

Process parameters of polymer injection

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHALOR THESIS

AUTOR PRÁCE JIŘÍ LUKÁŠ

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JAN SKOČILAS, Ph.D., Ing. Zdeňka Jeníková,
Ph.D.

SUPERVISOR

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): JIŘÍ LUKÁŠ

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: Teoretický základ strojního inženýrství

Téma bakalářské práce:

Parametry procesu vstřikování plastů

v anglickém jazyce:

Process parameters of polymer injection

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis vstřikovacího procesu a následná výroba zkušebních tělísek.

Cíle diplomové práce:

1. Popis vstřikovacího procesu,
2. Nastavení lisu s ohledem na kvalitu zkušebních tělísek,
3. Vyhodnocení mechanických a vzhledových vlastností zkušebních tělísek.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

.....
V Praze, dne 18. 8. 2017

Abstrakt

Práce se zabývá procesem vstřikování polymerů a jeho následného vlivu na kvalitu a mechanické vlastnosti zkušebních tělísek. Obsahem teoretické části je popis vstřikovacího stroje a samotný proces vstřikování. Důraz je kladen na polypropylen a polyetylen, jakožto materiály vystupující v praktické části.

Praktická část obsahuje vyhodnocení vlivu změny teploty vstřikovací formy a teploty tavící komory na mechanické vlastnosti zkušebních tělísek.

Klíčová slova: polymery, proces vstřikování, vstřikovací stroj, mechanické vlastnosti, polypropylen, polyetylen

Abstract

The thesis deals with the process of polymer injection and its subsequent influence on a quality and mechanical properties of the test specimens. The content of the theoretical part is the description of an injection molding machine and an injection process. The emphasis is placed on the polypropylene and the polyethylene as materials emerging in the practical part. I am focusing on the influence of a mold temperature and a temperature in the melting chamber.

The practical part includes the evaluation of the influence of a mold temperature and a temperature of the melting chamber depending on the mechanical properties of the test specimens.

Keywords: polymers, injection molding, injection molding machine, mechanical properties, polypropylene, polyethylene

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doktorovi Janu Skočilasovi za veškerý čas, který věnoval vedení mé bakalářské práce, za projevenou trpělivost a cenné připomínky. Dále bych rád poděkoval doktorce Zdeňce Jeníkové za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracování praktické části.

Obsah

I.	TEORETICKÁ ČÁST	9
1	Úvod.....	10
2	Rozdělení polymerních materiálů.....	11
2.1	Plasty	11
2.1.1	Termoplasty.....	11
2.1.2	Reaktoplasty.....	12
2.2	Elastomery	13
2.2.1	Kaučuky.....	13
2.2.2	Termoplastické elastomery	13
3	Polyetylen.....	14
3.1	Rozdělení polyetylenů	14
3.2	Charakteristika polyetylenu	14
3.3	Možnosti použití	15
3.4	Polyetylen LITEN MB 61	15
4	Polypropylen	16
4.1	Rozdělení polypropylenů.....	16
4.1.1	Izotaktický PP	16
4.1.2	Syndiotaktický PP	16
4.1.3	Ataktický PP.....	16
4.2	Charakteristika polypropylenu	17
4.3	Použití polypropylenu	17
4.4	Polypropylen Mosten GB 107.....	18
5	Vstřikovací lis	19
5.1	Popis vstřikovacího lisu	19
5.2	Komponenty vstřikovacího stroje.....	21
5.2.1	Uzavírací jednotka	21
5.2.2	Vstřikovací jednotka.....	22
5.2.3	Vstřikovací forma	26
5.2.4	Uzavírací jednotka	28
5.2.5	Rám stroje s hydraulikou	28

5.2.6	Řízení	28
6	Popis vstřikovacího procesu a vliv jednotlivých fází a parametrů na vlastnosti výstřiku	29
6.1	Vstřikovací proces	29
6.2	Vliv jednotlivých fází vstřikovacího procesu na kvalitu výstřiku	30
6.2.1	Plastikace – dávkování	30
6.2.2	Vstřikovací a kompresní fáze – plnění tvarových dutin	31
6.2.3	Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak	31
6.2.4	Dotlaková fáze	32
6.2.5	Fáze chlazení výstřiku ve formě	32
6.3	Nastavení parametrů vstřikování a jejich vliv na kvalitu výstřiku	33
6.3.1	Teplota formy	34
6.3.2	Teplota taveniny - nastavení teploty jednotlivých pásem	38
6.4	Obvyklé závady a způsoby jejich odstranění	40
7	Závěr z teoretické části	41
II.	PRAKTICKÁ ČÁST	42
7.1	Popis zkušebního tělíska	43
7.2	Nastavení stroje	43
7.3	Tahová zkouška	49
7.3.1	Popis tahové zkoušky	49
7.3.2	Naměřená data	50
7.3.3	Vyhodnocení pevnosti v tahu	50
7.3.4	Výpočet modulu pružnosti (PP i PE)	52
7.3.5	Závěr mechanických zkoušek	54
7.4	Pozorování pod mikroskopem	55
7.4.1	Popis mikroskopování	55
7.4.2	Vyhodnocení snímků polypropylenu	56
7.4.3	Závěr z kapitoly	57
7.5	Zjištěné vady výstřiku během vstřikování	57
7.5.1	Bublanky	57
7.5.2	Spáleniny	58
8	Závěr praktické části	58
9	Seznam Zdrojů	59
10	Seznam tabulek	60

11	Seznam obrázků.....	60
----	---------------------	----

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Úvod

Polymerní materiály zaznamenaly ve druhé polovině 20. století do současnosti rapidní vzestup nárůstu produkce, v roce 2012 dosahovala celosvětově produkce 288 mil. tun ročně a 57 mil. tun ročně v Evropě. [1] S polymery se setkáváme každý den, aplikace se vyskytují v dopravním průmyslu, v domácnostech je to drtivá většina kuchyňského vybavení, důležitou roli hrají i v medicíně a samozřejmě dalších odvětvích.

Prudký nárůst produkce je zapříčiněn neustálým pokrokem technologií, plasty jsou velmi vhodným doplňkem moderních komponentů, hovoříme například o aplikacích v automobilovém průmyslu, kde snaha o zhotovení dokonalého elektromobilu dále prohlubuje do budoucnosti využití plastových dílů v obrovském měřítku. Automobilový průmysl je v poslední době pod velkým tlakem na snížení emisí oxidů uhličitých, možným řešením daného problému je snížení hmotnosti vozidla, což motivuje vývojáře v automobilovém průmyslu k nahrazení kovových materiálů plastovými díly.

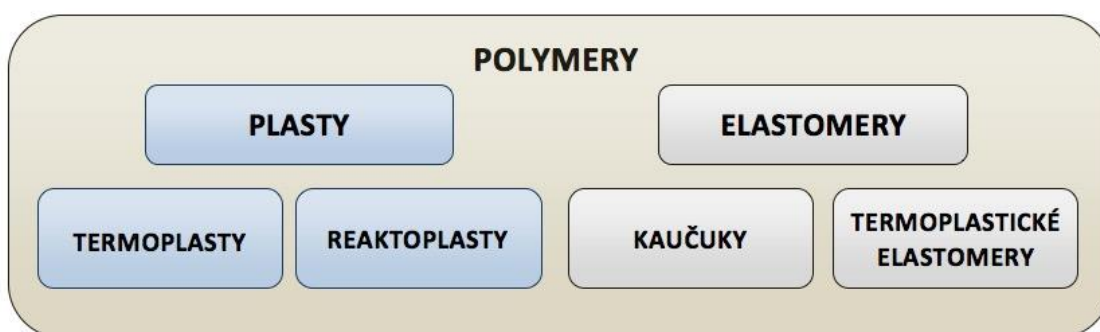
Polymerní materiály prošly obrovským vývojem od objevení polypropylenu a polyetyleny ke zdokonalování polymerních kompozitů používaných v leteckém i automobilovém průmyslu. Současný vývoj se zabývá rozvojem polymerních kompozitů, vývojem inteligentních kompozitů, které mění své vlastnosti na základě vnějšího podnětu a vývojem polymerních nanomateriálů a přírodních biopolymerů.

Cílem této bakalářské práce je návrh ideálních parametrů vstřikovacího lisu (teploty formy a teploty taveniny – ideální nastavení teploty topných zón) pro zhotovení, co nejkvalitnějších zkušebních tělísek z hlediska vizuálního a mechanických vlastností. Použité materiály na zkušební tělíska jsou polypropylen a polyetylen.

2 Rozdělení polymerních materiálů

Polymery jsou substance, v nichž je velké množství monomerů (molekulární jednotky), které jsou propojeny do makromolekulárních řetězců.

Polymery můžeme rozdělit několika způsoby, dle původu, složení, molekulární struktury nebo i dle postavení na trhu. Základními druhy polymerů jsou dle obr. 1. [2]



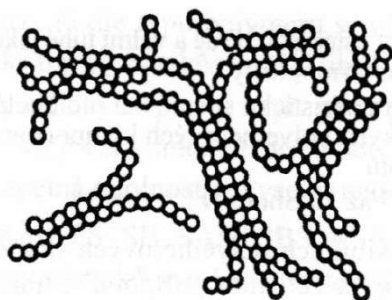
Obr. 1 - základní rozdělení polymerních materiálů [2]

2.1 Plasty

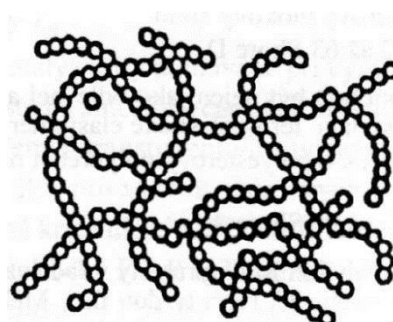
Při namáhání dochází převážně k trvalým (nevratným) deformacím. Dále je dělíme dle chování při zahřívání na termoplasty a reaktoplasty.

2.1.1 Termoplasty

Jsou to materiály, u kterých nedochází k chemické reakci a nemění se u nich chemická struktura. Při zahřívání měknou a přechází do plastického stavu, v tento moment je lze tvarovat. Proces je teoreticky opakovatelný do nekonečna, materiál lze znovu roztavit a tvářet. Zahřívání ovlivňuje pouze fyzikální charakter tělesa. [3]



Obr. 2 - částečně krystalická struktura [3]



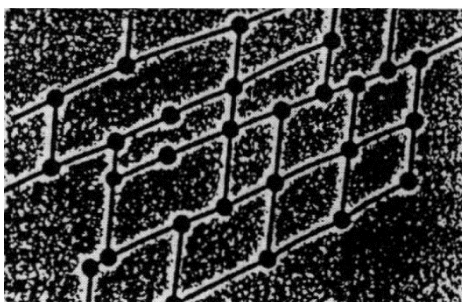
Obr. 3 - amorfní struktura [3]

Na obr. 2 lze vidět pravidelně uspořádanou krystalickou strukturu doplněnou i o nepravidelně uspořádanou amorfnní strukturou. Amorfnní struktura je charakterizována neuspořádanou strukturou. [3]

Typickými zástupci jsou polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC). Využití termoplastů je například jako díly v automobilech, kuchyňské vybavení, plastové láhve, prakticky se s termoplasty setkáváme úplně všude. Jelikož v mé praktické části bakalářské práce figurují termoplasty, konkrétně polypropylen a polyetylen, budu se jimi tedy zabývat podrobněji v dalších kapitolách.

2.1.2 Reaktoplasty

Při zahřívání reaktoplastů, známých i jako termosety, dochází k chemické reakci a zesíťování vnitřní struktury, takzvanému vytvrzování. Jedná se o nevratný proces vytvrzený materiál již nelze znovu tvarovat, ani převést zpět do taveniny. Reaktoplast patří do skupiny amorfnních polymerů. Výhodou je vysoká chemická a teplotní odolnost, vyniká tuhostí a tvrdostí. [2] [3]



Obr. 4 - struktura reaktoplastů [3]

Reaktoplasty mají pevně propojené řetězce vytvořené síťováním, řetězce již nelze rozpojit, strukturu lze pozorovat na obr. 4. [2] [3]

Příkladem reaktoplastů v nevytvrzeném stavu jsou pryskyřice, například fenol-formaldehydová pryskyřice (PF), epoxidová pryskyřice (EP), polyesterová pryskyřice (UP). Přidáním vytvrzovacího prostředku dostáváme širokou škálu výrobků od fenoplastů (tmely, lepidla) k polyuretanům, které mají využití ve výrobě pěnových materiálů, pěny se využívají na matrace, zdravotnické pomůcky, výplně pohovek a další. [2]

2.2 Elastomery

Vznikají vulkanizací kaučuků a dalších přísad, charakterizují je velmi dobré elastické vlastnosti. Teplem se aktivují spoje mezi řetězci. V blízkosti těchto spojů se mohou řetězce pohybovat – elastické vlastnosti. [2] [3]



Obr. 5 - struktura elastomerů [3]

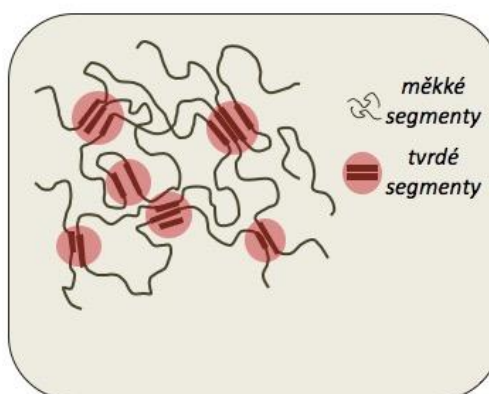
2.2.1 Kaučuky

Kaučuk je v základním stavu nepružný a tuhý, za tepla lepivý. Vulkanizací za pomoci nejčastěji síry, lze převést na elastomer neboli pryž. Rozlišujeme kaučuky přírodní a syntetické. [2] [3]

Oblasti využití jsou například při výrobě technických pryží, pneumatik, ve zdravotnickém zboží nebo pro výrobu golfových míčku. [2]

2.2.2 Termoplastické elastomery

Propojují fyzikální vlastnosti elastomerů (ohebnost, elasticitu) a zpracovatelské vlastnosti termoplastů (recyklovatelné, lehčí zpracovatelnost). Obsahují tvrdé a měkké elastické segmenty, které musí mít oddělené fáze. Tvrdá fáze je tvořena amorfním nebo semikrystalickým termoplastem. Měkká fáze je tvořena elastomerem. Kombinují se zde elastické vlastnosti elastomeru s vlastnostmi termoplastu. [4]



Obr. 6 - struktura termoplastického elastomeru [4]

Aplikacemi termoplastických elastomerů jsou například hadice nebo podrážky u obuvi, stále se rozšiřuje využití u izolací drátů nebo membrán čerpadel, nevýhodou je omezená použitelnost při vyšších teplotách. [4]

3 Polyetylen

3.1 Rozdělení polyetylenů

Polyetylen rozlišujeme (dle tvaru makromolekul) do dvou základních typů, prvním je lineární, vysoko-hustotní polyetylen (PE-HD) a druhým je rozvětvený nízko-hustotní polyetylen (PE-LD), dalšími typy jsou například středně-hustotní polyetylen (PE-MD), zesíťovaný polyetylen (PE-X) nebo polyetylen s maximální molekulovou hmotností (PE-UHMW). [3] [5]

Polyethylen	Zkratka	Stupeň krystalinity [%]	Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
Vysokohustotní polyethylen	PE-HD	65 ÷ 90	0,940÷0,960	130÷135	700÷1400	18 ÷ 35
Nízkohustotní polyethylen	PE-LD	50 ÷ 70	0,914÷0,928	105÷115	200÷500	8 ÷ 23

Obr. 7 - dva základní typy polyetylenů [5]

3.2 Charakteristika polyetylenů

Polyetylen je dielektrický, má vysokou odolnost vůči kyselinám, zásadám, solím a vodě. Nepoužívá se pro konstrukční díly, protože má nejnižší pevnostní charakteristiky ze všech termoplastů. Vykazuje vynikající odolnost proti rázovému namáhání, nevýhodou polyetylenů je značný kríp (tečení polymeru za studena). Je vysoce hořlavý a velmi citlivý na působení UV záření, musí se stabilizovat přidáním 2-3% sazí. [3] [5]

3.3 Možnosti použití



Obr. 8 - aplikace polyetylenu [5]

Polyetylen nalezneme v drtivé většině obalových materiálů. Používá se pro spotřební i technické výrobky, fólie, pytle, tašky, potrubí pro rozvody vody a plynu, pro nádržky na tekutinu pro odstřikovače nebo pro brzdovou kapalinu a další. [3] [5]

3.4 Polyetylen LITEN MB 61

Pro vstřikování polyetylenu při mém výzkumu byl použit polyetylen vedený u společnosti Unipetrol pod kódem LITEN MB 61, který je dle výrobce určen pro výrobu přepravek, věder, uzávěrů pro netlakové aplikace, technické díly a další výrobky vyžadující dobrou tuhost a rázovou houževnatost. [6]

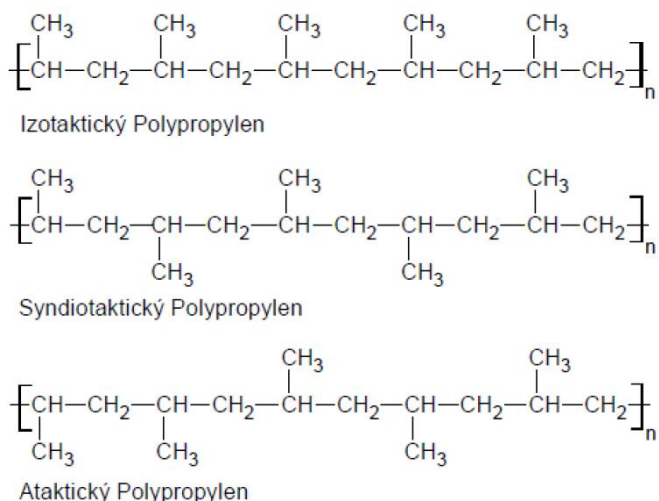
HUSTOTA	Kg/m ³	960
NAPĚTÍ NA MEZI KLUZU	MPa	24
TAŽNOST NA MEZI KLUZU	%	9
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY 23°	kJ/m ²	7
TEPLOTA MĚKNUTÍ DLE VICATA	°C	125
OHYBOVÝ MODUL	Mpa	1050
TVRDOTA SHORE D	-	58

Tabulka 1 - vlastnosti polyetylenu LITEN MB 61 [6]

4 Polypropylen

4.1 Rozdělení polypropylenů

U polypropylenů jsou monomerní jednotky nesymetrické, a proto mohou být v makromolekule uspořádány různým způsobem. Z hlediska uspořádání rozlišujeme tři druhy polypropylenů, izotaktický PP (iPP), ataktický PP (aPP) a nakonec syndiotaktický PP (sPP). [7]



Obr. 9 - Konfigurace polypropylenů [7]

4.1.1 Izotaktický PP

Jak lze pozorovat na obr. 9 jeho methylové skupiny jsou situované pouze na jedné straně uhlíkového řetězce a vytvářejí šroubovicový tvar makromolekuly. Vyznačuje se nerozpustností a vysokou mezí pevnosti. [7]

4.1.2 Syndiotaktický PP

Methylové skupiny se pravidelně střídají na obou stranách řetězce, to zapříčiňuje zlepšené elastické vlastnosti, zlepšuje to odolnost oproti UV záření a zvyšuje se odolnost proti přetržení. [7]

4.1.3 Ataktický PP

Methylové skupiny se nahodile střídají podél hlavního řetězce, kvůli tomuto jevu má ataktický polypropylen zcela amorfni strukturu. Ovlivňuje to řadu faktorů, je dobře rozpustný v řadě rozpouštědel, je lepidlo a má nízkou molekulovou hmotnost. Z tohoto důvodu ho není možno využít na konstrukční díly. [7]

4.2 Charakteristika polypropylenu

Polypropylen je částečně krystalický polymer se stupněm krystalinity 60-70%, je nepolární, má lepší odolnost vůči rozpouštědlům než polyetylen. Jedná se o odolnější materiál než polyetylen, má vyšší pevnost, tuhost a tvrdost. Kopolymerací s ethenem nebo modifikací polypropylenu s polyetylenem nebo ethylen-propylenovým kaučukem lze zásadně zlepšit mechanické vlastnosti. [5] [7] [8]

Polypropylen	Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Mez pevnosti [MPa]	Rozpustnost v uhlovodících při 23 °C
Izotaktický (čistý)	0,905 + 0,920	176	vysoká	nerozpustný
Syndiotaktický	0,890 + 0,910	135	střední	středně rozpustný
Ataktický (kašovitý stav)	0,850 + 0,900	nemá	velmi nízká	snadno rozpustný

Obr. 10 - vlastnosti polypropylenu dle uspořádání methylových skupin [5]

4.3 Použití polypropylenu

Z polypropylenu se vyrábějí fólie, misky, obalové materiály, kuchyňské přístroje a mnoho dalších výrobků. Modifikovaný polypropylen (kopolymerace, modifikace přísadami nebo jinými polymery) nalézá uplatnění například v automobilovém průmyslu na součásti strojů a přístrojů (spoilery, reflektory, vrtule ventilátorů, nárazníky). Díky odolnosti vůči sterilizačním teplotám nalézá uplatnění i ve zdravotnictví. [5]



Obr. 11 - možnosti použití polypropylenu [5]

4.4 Polypropylen Mosten GB 107

Pro vstřikování polypropylenu byl použit konkrétně polypropylen Mosten GB 107 od společnosti Unipetrol. Je vhodný pro vstřikování kompaundů – smíchání základního polymeru (polypropylen Mosten GB 107) s aditivou. Například polypropylen plněný skleněnými vlákny. [9]

MODUL PRUŽNOSTI V TAHU	MPa	1550
OHYBOVÝ MODUL	MPa	1600
NAPĚTÍ NA MEZI KLUZU	MPa	35
CELKOVÁ TAŽNOST	%	100
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY 23°	kJ/m ²	4
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY -20°	kJ/m ²	0
TEPLOTA MĚKNUTÍ DLE VICATA	°C	55

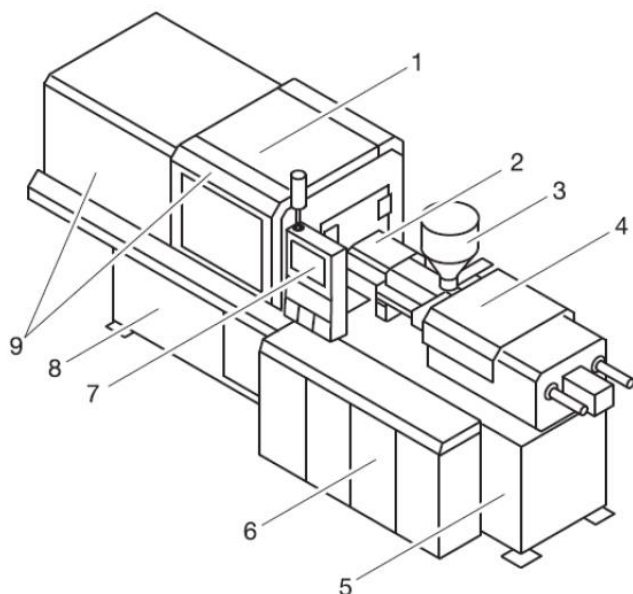
Tabulka 2 – vlastnosti polypropylenu Mosten GB 107 [9]

5 Vstřikovací lis

5.1 Popis vstřikovacího lisu

Pro výrobu vzorků bude použit vstřikovací lis ALLROUNDER 270C, který je součástí vybavení laboratoří FS ČVUT v Praze.

Vstřikovací lis



1. uzavírací jednotka
2. plastikační válec
3. násypka materiálu
4. vstřikovací jednotka
5. rám stroje vstřikovací jednotka
6. rozvaděč
7. obslužný panel s plochou obrazovkou a klávesnicí
8. rám stroje uzavírající jednotka
9. bezpečnostní zařízení

Obr. 12 - popis vstřikovacího lisu ALLROUNDER 270 C od společnosti ARBURG [10]

Vstřikovací stroje jsou určeny pro sériovou výrobu a vícesměnný provoz, stroje mají obrovskou pořizovací cenu, při nízkých nákladech na výrobu.

Na obrázku 12 vidíme schéma vstřikovacího lisu ALLROUNDER 270 C. Jedná se o stroj s horizontálně uspořádanou vstřikovací jednotkou. Vstřikovací forma se skládá ze dvou polorovin, pevná je upevněna na pevné desce a pohyblivá je umístěna na pohyblivé desce. Umístěna je v uzavírací jednotce. [10]

Vstřikuje se přes pevnou polorovinu formy a vstřikovací jednotka je umístěna horizontálně, přidáním nástavců a vybavení lze vstřikovat i vertikálně do dělicí roviny. Na obrázku 12 pod číslem 4. [10]

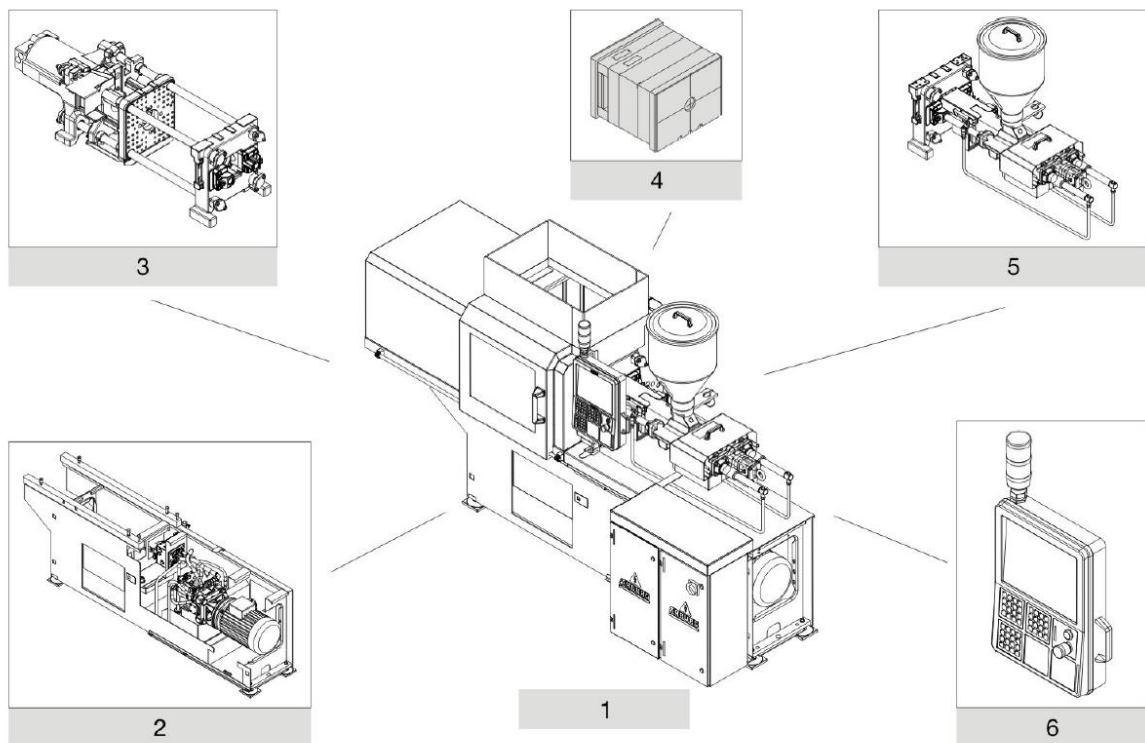
Vše je z bezpečnostního hlediska chráněno bezpečnostním zařízením (9), které je řízeno elektronicky. Vstřikovací proces se nezahájí, dokud nebude bezpečnostní zařízení ve správné poloze. [10]

Po dokončení procesu padá hotový díl do přepravky umístěné pod strojem a začíná nová sekvence vstřikování.



Obr. 13 - fotka stroje pořízená při vstřikování, autor fotografie: Jiří Lukáš

5.2 Komponenty vstřikovacího stroje



Obr. 14 - komponenty vstřikovacího stroje [10]

Na obrázku 14. vidíme vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 270 C a jeho hlavní části.

1. vstřikovací stroj
2. rám stroje/hydraulika
3. uzavírací jednotka
4. vstřikovací forma
5. vstřikovací jednotka
6. řízení

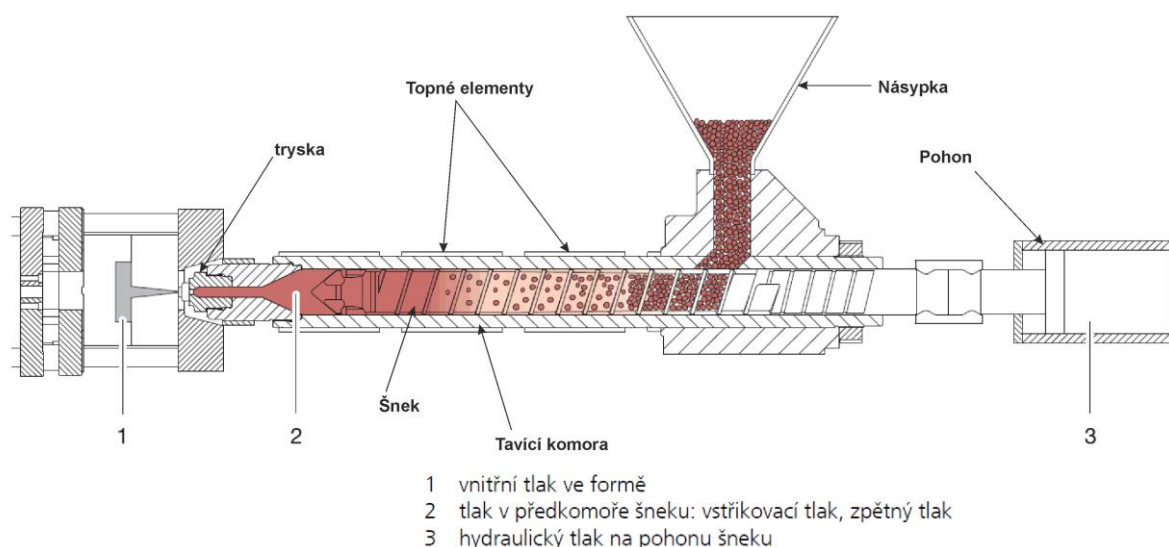
5.2.1 Uzavírací jednotka

Slouží k upnutí vstřikovací formy, obsahuje upínací desky. Je hydraulicky ovládána a vyvodí sílu až 40 tun. [10]

5.2.2 Vstřikovací jednotka

Slouží pro roztavení a vstřikování natavené hmoty. Skládá se z válce, šneku, trysky, topných pásů, násypky granulátů a hydraulických nebo servoelektrických pohonů. Jednotlivé části jsou zobrazeny na obrázku 15. [10] [12]

Vstřikovací jednotka se šnekem (pístem)



Obr. 15 - vstřikovací jednotka se šnekem (pístem) [10]

Vstupní částí vstřikovací jednotky je násypka, na násypku navazuje tavící komora, která je obklopena topnými pásy, konec vstřikovací jednotky je zakončen tryskou, která těsně doléhá na pevnou část formy. V tavící komoře se nachází šnek, který má charakteristickou geometrii, problematice šneků se věnuji v odstavci níže. Přibližně 60% tepelné energie je do plastu přeneseno třením mezi granulátem a stěnou. Plasty nejsou dobrými vodiči tepla, proto je šnek konstruován s ohledem na to, aby množství polymeru mezi bočními stěnami šneku a stěnami tavící komory nebylo příliš velké. Pro výkon vstřikovací jednotky je zásadní vstřikovací kapacita a plastikační kapacita. [12]

5.2.2.1 Vstřikovací kapacita

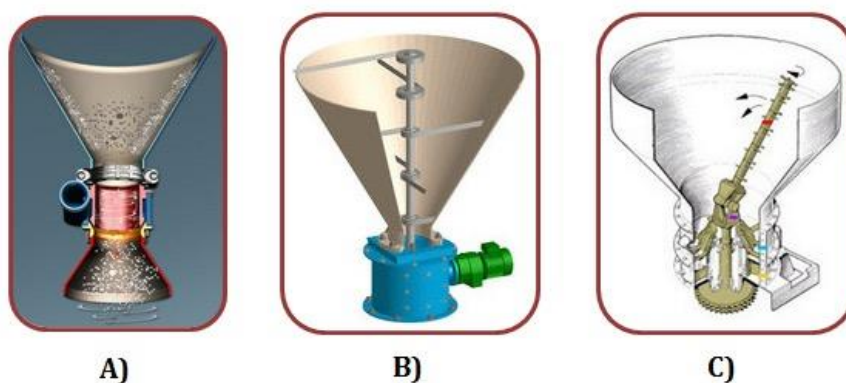
Představuje maximální možné množství, které je na stroji možno vystříknout během jednoho pracovního cyklu z tavící komory. Do objemu vylisku je nutné započítat i objem vtokové soustavy a materiálového polštáře. Nejčastěji je udávána v cm^3 . [12]

5.2.2.2 Plastikační kapacita

Jedná se o maximální možné množství, které je stroj schopen za jednotku času převést do plastického stavu. Udává se nejčastěji v kilogramech za hodinu. Používá se pro hrubý předběžný výpočet doby potřebné pro plastikaci daného množství materiálu. [12]

5.2.2.3 Násypka

Násypka nesmí obsahovat ostré hrany, aby se granulát mohl samovolně za působení gravitace a tíhy přesouvat do tavicí komory. Důležité je zabránit přestupu tepla do násypky, aby se dodávaný materiál netavil ještě před vstupem do tavicí komory. Násypka může být vybavena i střásacími systémy nebo konvojery, které se starají o kontinuální přísun omezeně sypkých materiálů, což jsou například přírodní vlákna nebo prášky. [12]



Obr. 16 - možnosti modifikace násypek [12]

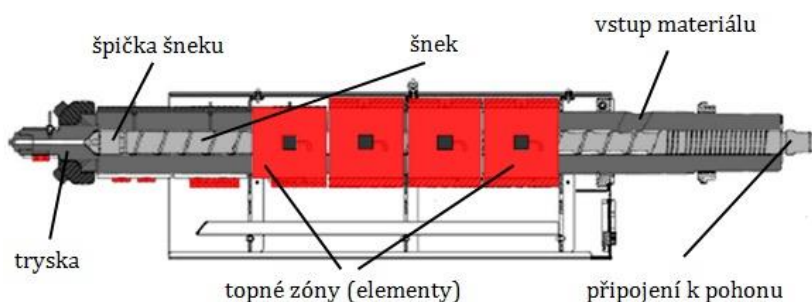
Na obr. 16 můžeme vidět na prvním snímku (A) násypku se střásacím mechanismem, na druhém a třetím obrázku (B), (C) jsou vidět rotační konvojery. [12]

5.2.2.4 Tavicí komora

Tavicí komora je jednoduše dutý kovový válec, který má na konci trysku. Uvnitř tavicí komory je veden šnek, povrch tavicí komory je obklopen topnými tělesy a vše uzavírá vnější izolace. [12]

U tavicí komory je velmi dbáno na přesnou úpravu vnitřního povrchu, šnek totiž koná zároveň posuvný a rotační pohyb a mezera mezi povrchem šnekovnice a plochou vnitřní dutiny je 0,1 až 0,2 mm, proto musí být vnitřní povrch tavicí komory obroben s vysokou přesností. Pro taveninu je zásadní hladký povrch pro zachování plynulého

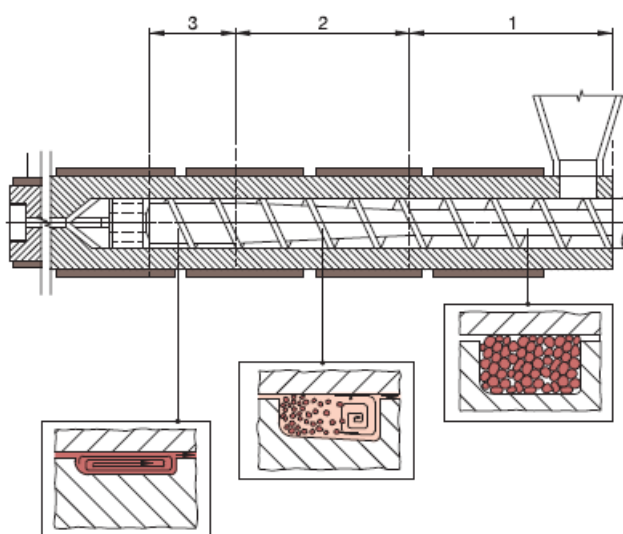
toku taveniny, nesmí docházet k hromadění materiálu a následné jeho degradaci. Šnek i dutina mají vysokou tvrdost, proto by měl být pohyb bez přítomnosti taveniny minimální, aby nedošlo k poškození. [12]



Obr. 17 - tavící komora [12]

5.2.2.5 Šnek

Jedná se o pracovní člen, který zajišťuje v procesu vstřikování několik funkcí. Šroubovice šneku na jeho povrchu je proměnná, na různých místech má jinou hloubku a odlišné stoupání. Klasický šnek pro vstřikování termoplastů se skládá z tří odlišných zón. První zóna se nazývá dopravní nebo vstupní, zde je hloubka závitů šroubovice šneku největší, funkcí této části je doprava granulátu do tavící komory. Plynule přecházíme do kompresní zóny, zde se granulát stlačuje a hloubka i stoupání šroubovice se postupně zmenšuje. Třetí a poslední zóna se nazývá homogenizační (plastikační), zajišťuje intenzivní promíchání a prohnětení materiálu, aby byla teplota v tavenině před vstříknutím rovnoměrně rozložena. Délka zón je individuální a odvíjí se od určitého polymeru. Schéma zón je znázorněno na obrázku 18. [3] [10] [12]



- 1 vstupní zóna
- 2 kompresní zóna

Obr. 18 - schéma jednotlivých zón a stavu vloženého polymeru [10]

Pro vstřikování termoplastů zaujímá dopravní zóna přibližně 60% délky šneku, kompresní 20% délky šneku a homogenizační také 20% délky šneku. Výška závitů je v homogenizační a dopravní zóně konstantní. Nejvyšší závit je v dopravní zóně (4 až 14 mm), postupně se v kompresní zóně snižuje a to až do výšky závitů v homogenizační zóně. Důležitým faktorem je kompresní poměr, který udává rozdíl ve výšce závitů mezi dopravní a kompresní zónou, bývá v rozmezí 2 až 3:1. Mezi nejdůležitější faktory patří jednoznačně poměr mezi délkou a průměrem šneku (L/D). Termoplasty mají tento poměr v rozmezí 19 až 22:1, při větším poměru než 24:1 může docházet k tepelné degradaci materiálu, vlivem dlouhého působení tření. Kratší šneci nedokážou zajistit dostatečnou teplotní homogenitu materiálu. [12]

Standardní šnek pro zpracování termoplastů



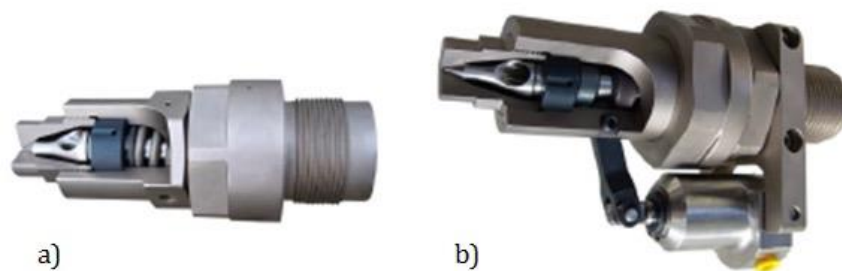
Typická délka (L/D)	20:1
Kompresní poměr	2:1
Materiály	Široké použití pro amorfní a semikrystalické materiály

Obr. 19 - schéma standardního šneku pro zpracování termoplastů [12]

5.2.2.6 Tryska

Spojení mezi vstřikovací jednotkou a vstřikovací formou je zajištěno právě tryskou. Posuvným mechanismem vstřikovací jednotky je vyvolána přitlačná síla, která brání únikům taveniny na rozhraní mezi tryskou a vtokovou vložkou formy. Vstřikovací tryska je opatřena zaoblením, tryska musí mít menší rádius než je rádius na dosedací ploše vtokové vložky vstřikovací formy. Nejpoužívanější zaoblení mají rádius 10, 15, 20 a 35 mm. Uvnitř trysky se nachází kanál, který se směrem ke špičce trysky rozšiřuje. Tryska musí zajišťovat plynulý průchod taveniny směrem do vstřikovací formy, nesmí vznikat tlakové ztráty. Tryska by měla mít minimální délku s ohledem na její pevnost, musí odolat tlaku taveniny a tlaku vyvolaného přitlakem trysky na vtokovou vložku formy. [12]

Rozlišujeme základní dva typy trysek a to otevřené nebo uzavíratelné. Otevřené trysky mají jednodušší konstrukci a je vhodné je použít vždy, pokud to proces umožňuje. Uzavíratelné trysky zabraňují vytékání taveniny, výhodou je možnost dávkování vstřikovací jednotky, aniž by byla v kontaktu se vstřikovací formou. Na obrázku 19 můžeme vidět konstrukční řešení uzavíratelných trysek. [12]



Obr. 20 - a) řešení pomocí pružiny b) řešení pomocí hydraulického zařízení [12]

5.2.3 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma je jednou z nejdůležitějších částí vstřikovacího stroje, představuje velmi nákladnou investici. Požadavky jsou kladeny především na přesné rozměry výrobku. Vstřikovací forma musí odolávat vysokým tlakům, musí umožnit snadné vyjmutí hotového výrobku a musí pracovat v automatickém režimu. [13] [14]



Obr. 21 - snímek vstřikovací formy, autor fotografie: Jiří Lukáš

Podle typu vstřikovacího stroje rozlišujeme vstřikovací formy se vstřikováním do osy nebo se vstřikováním do dělicí roviny. Dle počtu tvarových dutin rozlišujeme formy jednonásobné a vícenásobné. Mimo tohle zmíněné dělení existuje další řada faktorů, podle kterých lze vstřikovací formy rozdělit. [13] [14]

Podle uspořádání vtoku:

- dvoudeskové jednoduché,
- třideskové s odtrhovacím vtokem,
- s horkým vtokem (u bezezbytkového vstřikování),
- s izolovanými vtokovými kanály,
- s vyhřívanými vtokovými kanály.

Podle konstrukce:

- jednoduché,
- čelistové,
- s výsuvnými jádry.

Podle zpracování materiálu:

- pro termoplasty,
- pro reaktoplasty,
- pro elastomery. [13]

Důležitou částí napojenou na vstřikovací formu je vtoková soustava. Vtoková soustava je tvořena jedním nebo více kanály, sestává se z vtokového kanálu, rozváděcího kanálu a ústí vtoku. Úkolem vtokové soustavy je rovnoměrné naplnění dutiny formy, snadné odtržení od výstřiku a snadné vyhození vtokového zbytku. [13]

Při konstrukci vtokové soustavy jsou zásadními následující faktory:

- počet tvarových dutin,
- rozmístění tvarových dutin,
- volba typu systému (studený nebo horký rozvod – bez vtokového zbytku),
- snadné vyjímání výstřiku z formy,

- omezení vtokové soustavy na minimum,
- snadné opracování a začištění výstřiku. [13]

5.2.4 Uzavírací jednotka

V uzavírací jednotce je upnuta forma. Dále zde dochází k těmto akcím:

- přisunu formy,
- vystavení uzavírací síly a uzamykání uzavírací jednotky,
- vystavení přidržovací síly,
- otevírání a zavírání formy,
- vyformování vylisku. [10]

Uzavírací síla:

Je to síla, která stlačuje dvě části vstřikovací formy k sobě.

Přidržovací síla:

Jedná se o sumu sil, které působí na sloupy uzavírací jednotky při výrobě vylisku. [10]

5.2.5 Rám stroje s hydraulikou

V rámu stroje je uložena uzavírací a vstřikovací jednotka.

5.2.6 Řízení

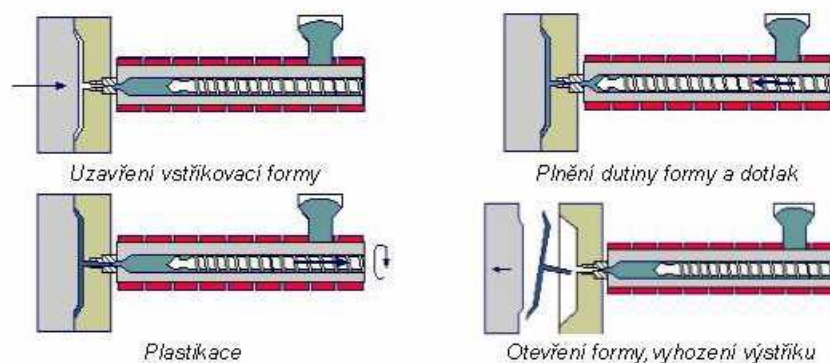
Řídící jednotka se stará o celkový chod vstřikování, jako jsou nastavení teplot, časů a tlaků. Společnost ARBURG využívá software SELOGICA, která zajišťuje hospodárny chod a vysokou kvalitu vstřikovaných dílců. [10]

6 Popis vstřikovacího procesu a vliv jednotlivých fází a parametrů na vlastnosti výstřiku

6.1 Vstřikovací proces

Vstřikovací proces není kontinuální a lze jej rozdělit na několik fází a úseků. Kvalita výrobku je ovlivněna druhem plastu, konstrukcí formy, volbou stroje a technologickými parametry. Lze jej rozdělit do devíti úseků, fází. [15]

1. Uzavírání formy a vyvolání uzavírací síly.
2. Příjezd vstřikovací jednotky k formě a vyvolání přítlaču.
3. Vstřikovací, plnicí a kompresní fáze.
4. Přepnutí tlaku vstřikovacího na dotlak.
5. Dotlaková fáze.
6. Fáze chlazení výstřiku.
7. Odjezd vstřikovací jednotky od formy
8. Otevření formy.
9. Vyhození nebo vyjmutí výstřiku z formy.



Obr. 22 - zjednodušený popis vstřikovacího cyklu [15]

Cyklus je zahájen uzavřením vstřikovací formy, následuje přisunutí tavicí komory a dosednutí trysky na vtokovou vložku vstřikovací formy. Potom, co dojde k propojení tavicí komory a vstřikovací formy dochází vlivem axiálního pohybu šneku k přesunutí taveniny z tavicí komory do vtokového systému a tvarové dutiny vstřikovací formy. Pohyb šneku je řízen dle nastaveného rychlostního profilu. Vlivem chlazení taveniny dochází ke smrštění výstřiku, a proto dále navazuje fáze dotlaku, která zabraňuje případným propadlinám. Dotlakem můžeme působit až do zatuhnutí vtokového systému, pak již výrobek pouze chladne na teplotu, při které je hotový

výrobek možné vyjmout nebo automaticky vyhodit z formy. Současně během chladnutí šnek plastikuje novou dávku taveniny pro další vstřikovací cyklus. Přesun granulátu z násypky probíhá za pomoci gravitační síly, granulát je poté pomocí rotačního pohybu šneku a působením topných těles doléhajících na tavící komoru převeden do stavu viskózní taveniny. Ve formě viskózní taveniny je materiál dopraven před čelo šneku, hromadí se tavenina vyvolává zpětný tlak, který odsouvá šnek směrem k zadní pozici. Pokud se nachází před čelem šneku dostatečné množství taveniny, tak dochází k dekompresi, což zahrnuje odjetí šneku bez jeho rotace zpět od taveniny, snižuje se tlakové namáhání taveniny před samotným vstříknutím do formy. Poslední fází je otevření vstřikovací formy a odformování výrobku hydraulickým, mechanickým nebo pneumatickým systémem, vstřikovací proces je ukončen. [11] [15]

Po dokončení všech fází se výrobní cyklus opakuje. S ohledem na systém vstřikovacího stroje lze daný výrobní cyklus různě modifikovat, například varianta kdy nedochází k příjezdu a odjezdu vstřikovací jednotky. [11] [15]

6.2 Vliv jednotlivých fází vstřikovacího procesu na kvalitu výstřiku

6.2.1 Plastikace – dávkování

Parametry, které ovlivňují plastikaci jsou:

- teplota taveniny,
- otáčky šneku (ovlivňují teplotu taveniny),
- zpětný odpor taveniny. [3]

Vliv technologických parametrů na výstřik:

- teplota taveniny zásadně ovlivňuje orientaci makromolekul při plnění dutiny formy taveninou,
- s narůstající teplotou klesá orientace makromolekul a výstřik se stává z hlediska vlastností izotropnější, snižuje se vnitřní pnutí a zvyšuje se pevnost studených spojů. V důsledku vyšší teploty roste i výrobní smrštění. [3]

6.2.2 Vstřikovací a kompresní fáze – plnění tvarových dutin

Parametry ovlivňující plnění formy:

- rychlost vstřikování tedy rychlostní profil vstřikování,
- vstřikovací tlak (vstřikovací tlak musí realizovat požadovanou rychlost vstřikování),
- teplota formy,
- teplota taveniny,
- viskozita taveniny,
- přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak. [3]

Vliv technologických parametrů na výstřik:

- tepelné vlastnosti značně ovlivňují (zmenšují) odpor taveniny při přesunu, což ovlivňuje orientaci makromolekul, zejména v povrchové vrstvě,
- povrchové vady typu vrásnění nebo tokové čáry jsou způsobeny především nevhodnou vstřikovací rychlostí ovlivněnou také teplotou taveniny a formy, z tohoto důvodu je nutná optimalizace vstřikovací rychlosti a teploty taveniny, aby smykové napětí v tavenině bylo co nejmenší - obecně platí, že je vhodná vyšší teplota taveniny a pomalejší rychlost vstřikování,
- pro kompletní naplnění vstřikovací dutiny formy taveninou je důležitá správná kombinace vstřikovací rychlosti a tlaku, dutina by měla být vždy kompletně naplněna ještě před započítáním působení dotlaku. [3]

6.2.3 Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak

Rozlišujeme tři způsoby přepnutí:

- časové přepnutí (nastává po dosažení určitého času od začátku plnění),
- dráhové přepnutí (zvolíme určitý bod na dráze šneku, kde se bude tlak přepínat),

- tlakové přepnutí (po dosažení určité hodnoty tlaku), tlak lze měřit na třech místech (v hydraulickém systému vstřikovacího stroje, v dutině formy, v kanálu horkého rozvodu). [3] [11]

Z hlediska kvality výrobku je dle sestupného pořadí nejideálnější volit přepnutí podle tlaku v dutině formy, v horkém rozvodu, v hydraulickém systému vstřikovacího stroje a nakonec přepnutí dle dráhy. Časové přepnutí je vhodné využít pouze jako záložní variantu při nepřepnutí dle tlaku nebo dráhy. Přepnutí musí proběhnout tak, aby tlaková křivka v závislosti na čase měla hladký průběh. [3] [11]

6.2.4 Dotlaková fáze

Parametry ovlivňující dotlakovou fázi jsou:

- tlaková úroveň dotlaku, neboli tlakový průběh,
- teplota formy,
- rychlost dotlaku,
- teplota taveniny.

Vliv technologických parametrů na výstřik:

- dotlak a jeho doba mají nejvýraznější vliv na rozměry výstřiku, jeho tvar a hmotnost,
- ovlivňuje anizotropii smrštění a samotné smrštění,
- ovlivňuje výskyt lunkrů, což jsou uzavřené duté prostory uvnitř výstřiku a na povrchu výskyt a odstranění propadlin,
- má vliv na orientaci makromolekul a tím i na obsah vnitřního pnutí,
- spolu s konstrukcí formy (tuhost) a volbou uzavírací síly může mít vliv na tvorbu přetoků v oblasti dělicí roviny vstřikovací formy. [3] [11]

6.2.5 Fáze chlazení výstřiku ve formě

U vstřikování polymerů je zásadní rozlišit dva podobné, avšak rozdílné pojmy, a to chlazení a ochlazování. Ochlazování zahrnuje dobu chlazení, ochlazování začíná od objemového naplnění dutiny formy po vyhození výstřiku z formy, zatímco chlazení začíná po skončení působení dotlaku. [3] [11]

Parametry ovlivňující fázi chlazení jsou:

- doba chlazení,
- teplota formy,
- teplota vyhazování výstřiku z formy.

Vliv technologických parametrů na výstřik:

- platí, že při delším ochlazování výstřiku, tedy vyšší teplotě formy je u částečně krystalických polymerů obsah krystalického podílu větší a tím i větší velikost sférolitů,
- s rostoucím obsahem krystalického podílu roste pevnost, tuhost a smrštění, klesá dodatečné smrštění, tažnost a houževnatost,
- u amorfních plastů má teplota formy vliv na povrchový lesk výstřiku – s rostoucí teplotou formy vzrůstá lesk výstřiku,
- u částečně krystalických materiálů se lesk s rostoucí teplotou formy nemění nebo lehce klesá. [3] [11]

Shrnutí vlivu fází vstřikovacího cyklu na výstřik:

- plnění – povrchové vlastnosti, orientace makromolekul,
- komprese – vzhled výstřiku, při překročení maximálního tlaku dochází k poškození formy, přetokům, otřepům,
- dotlak – rozměry, hmotnost, vnitřní pnutí, při nízkém tlaku propadliny, lunkry,
- chlazení – ovlivňuje podíl krystalinity a rozměry. [3]

6.3 Nastavení parametrů vstřikování a jejich vliv na kvalitu výstřiku

Je třeba si uvědomit, že souvislost mezi vstřikovacími parametry a vlastnostmi výstřiků není přenosná na jiné vstřikovací stroje, což znamená, že vliv zvyšování taveniny o 20 °C nemusí vyvolat na dvou různých strojích stejný nárůst krystalinity. Je to způsobeno například opotřebením šneku, zpětného uzávěru, hydraulických prvků atd.

Při přenosu výroby z jednoho vstřikovacího stroje na druhý je dobré brát v potaz doporučená rozmezí udaná výrobcem, například rozmezí vhodné pro vstřikování plastu se pohybuje od 180 do 220 °C, rychlost vstřikování je střední a vstřikovací tlak je vhodné volit nižší. Informace typu pro tento druh plastu použijte danou teplotu a přesný vstřikovací tlak jsou irrelevantní. [11]

Parametry ovlivňující kvalitu výstřiku jsou teplota formy, teplota taveniny, rychlost a tlak vstřikování, teplota horkého rozvodu, velikost dávky, dekomprese před a po plastikaci, zpětný odpor na šneku, otáčky šneku, doba plastikace, doba vstřiku, bod přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak, polštář (objem taveniny, který zbyde před čelem šneku v plastikační komoře po skončení dotlakové fáze). [3]

Vzhledem k praktické části, kde sem operoval pouze s těmito parametry, se detailněji zaměřím pouze na vliv teploty formy a teploty taveniny, které se vyskytují ve všech fázích procesu vstřikování jako důležité parametry ovlivňující vlastnosti výlisku.

6.3.1 Teplota formy

Tepelné procesy probíhající ve vstřikovací formě mají velmi složitý mechanismus. Po každém vstříknutém dílu je do vstřikovací formy dodáno určité množství tepla, z tohoto důvodu musí probíhat nepřetržitá kontrola a regulace teploty. Regulace teploty je realizována temperačním systémem formy, určité množství tepla je odvedeno i sáláním, vedením a vyhozením hotového dílu. Hlavním úkolem temperačního systému formy je vytemperovat a udržet požadovanou nastavenou teplotu. [3] [11]

Popsaný mechanismus je definován jediným parametrem, tím je teplota stěny formy, čímž rozumíme teplotu povrchu formy před naplněním vstřikovací dutiny polymerní taveninou. Přívodem taveniny do vstřikovací formy roste teplota formy a nastává čas pro aktivaci regulačního systému, který vrací hodnotu teploty na původní hodnotu. Nepřetržitá výroba vyžaduje nepřetržitou regulaci teploty. [3] [11]

Teplota stěny formy zásadně ovlivňuje mechanické i vizuální vlastnosti výstřiku. Při vstřikování je důležité se řídit minimálním doporučeným nastavením teploty formy pro daný typ a druh polymeru. Nižší než je doporučená minimální hodnota by již nemělo docházet ke zpracování polymeru. [3] [11]

Zvyšováním teploty formy dochází k/e:

- zvyšování výrobního smrštění,
- snižování dodatečného smrštění,
- lepší reprodukci povrchu tvarové dutiny formy (lesk, dezén, matová úprava),
- zvyšování délky zatečení taveniny v tokovém kanálu – v dutině formy,
- zvýšení krystalinity a má za následek vznik rovnoměrnější vnitřní struktury (u semikrystalických materiálů),
- zmenšení dokrystalizace a dosmrštění,
- zvýšení odolnosti proti tepelné deformaci,
- zvýšení tvrdosti, tuhosti, odolnosti proti otěru
- zlepšení kluzných vlastností,
- zlepšení rozměrové stability,
- snížení vnitřního pnutí,
- snížení orientačních jevů,
- snížení odporu proti toku taveniny,
- prodloužení doby ochlazování (prodloužení cca 2% na 1°C). [3]

Velmi důležitým faktorem je i homogenita rozdělení této teploty celé ploše povrchu tvarové dutiny a tvarových prvků formy. Následkem špatné konstrukce temperačního systému formy (malé průměry temperačních kanálů, špatné rozmístění temperačních kanálů ve formě), špatná údržba a s tím související neprůchodnost temperačních kanálů má za následek teplotní rozdíly na povrchu tvarové dutiny. Teplotní rozdíly mohou způsobovat rozdílné smrštění na určitých místech, rozdílnou krystalinitu, s tím spojené zhoršené mechanické vlastnosti materiálu a také různý obsah vnitřního pnutí. [3]

6.3.1.1 Smrštění

Jedná se o objemovou změnu výstřiku, která vzniká v důsledku chlazení. Lze posuzovat dle dvou měřítek, můžeme výstřik hodnotit z hlediska celku, což znamená porovnání, o kolik se zmenšil hotový výrobek vůči velikosti dutiny vstříkovací formy, nebo můžeme vyhodnotit lokální smrštění na určitých místech hotového výstřiku, kde dochází ke vzniku propadlin nebo vnitřních dutin (lunkrů). [11]

Pro výpočet smrštění se využívá velmi jednoduchého vzorce:

$$S = \frac{X_f - X_v}{X_f} 100 [\%] \quad (1)$$

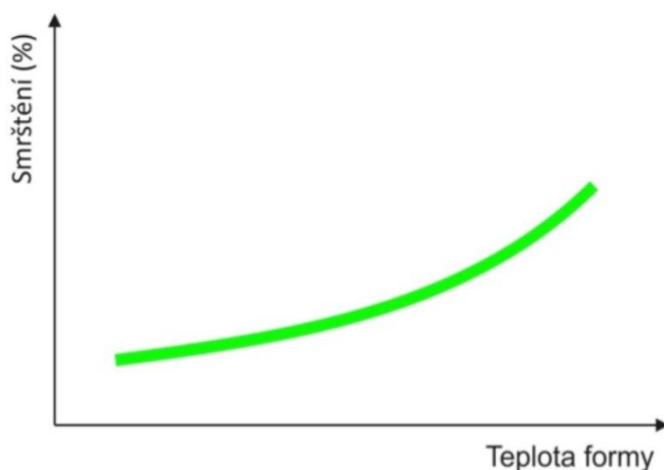
kde X_f je rozměr v dutině formy při 23°C [mm],

X_v je rozměr výrobku při 23°C [mm].

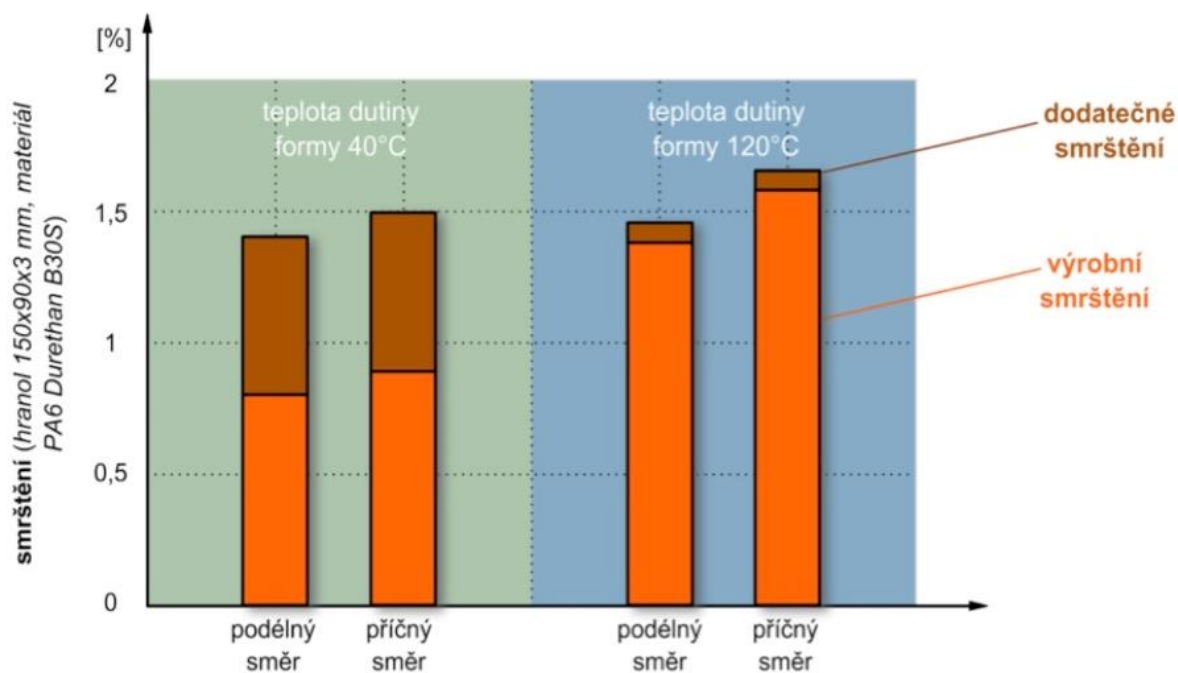
Smrštění, které se měří po 24 hodinách od vstříknutí, se nazývá výrobní smrštění. Smrštění, které probíhá po této době, se nazývá dodatečné smrštění. [11]

Vliv teploty formy:

Při nižší teplotě formy vzniká menší výrobní smrštění, ale naopak je vyšší dodatečné smrštění.



Obr. 23 - vliv teploty formy na smrštění [11]



Obr. 24 - podíl vlivu teploty formy na smrštění a dosmrštění [11]

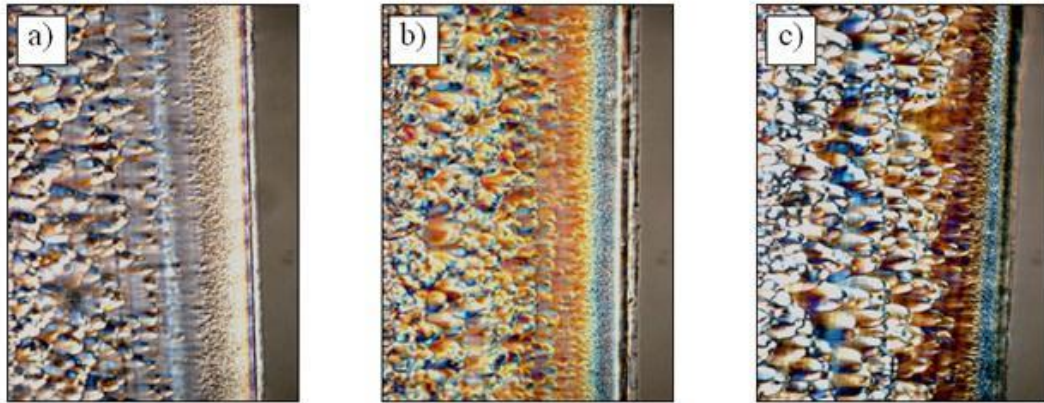
Vliv teploty taveniny:

Nelze přesně popsat vliv teploty taveniny, jelikož její nárůst vede k nárůstu hodnoty smrštění, ale zároveň teplota taveniny zapřičiňuje nárůst tlaku, který způsobuje zmenšení hodnoty smrštění. [11]

6.3.1.2 Krystalizace

Krystalizace je děj, který probíhá během tuhnutí taveniny pod teplotou tání polymerů. Po vyhození výstřiku z formy dochází k pozvolné dodatečné krystalizaci, při níž dochází k nárůstu krystalického podílu a hustoty.

Krystalizace závisí na teplotě formy a na rychlosti tuhnutí výstřiku. U teplejších forem dochází k lepší krystalizaci, což můžeme pozorovat na nárůstu velikosti a počtu sférolitů uvnitř jádra stěny, pod jemně krystalickým povrchem vznikají směrově orientované drobné sférolity. Na obrázku 25 můžeme pozorovat sférolity, což jsou „barevná kulovitá tělíška“, nabývají velikostí od 10^{-3} mm až po 1-2 mm. [11] [17]



Charakteristické rozdíly ve struktuře semikrystalického výstřiku (PE) na jeho povrchu a v jádře, v závislosti na teplotě temperace (chlazení)

a) $T_{tm} = 20^{\circ}\text{C}$, b) $T_{tm} = 40^{\circ}\text{C}$, c) $T_{tm} = 80^{\circ}\text{C}$

Obr. 25 - rozdílné teploty temperace formy, a) teplota formy 20°C , b) teplota formy 40°C , c) teplota formy 80°C [11]

„Vyšší krystalinita u stejného polymeru způsobuje vyšší hustotu, vyšší modul pružnosti, vyšší pevnost a mez kluzu, vyšší tvarovou stálost za tepla, nižší tažnost, nižší rázovou a vrubovou houževnatost a nižší navlhavost.“ [11]

6.3.2 Teplota taveniny - nastavení teploty jednotlivých pásem

V procesu vstřikování jsou znatelné rozdíly v podélném a příčném směru v závislosti na dráze od počátku, může se jednat o rozdíly až 30°C . [11]

Parametry ovlivňující teplotu taveniny jsou:

- nastavení teplot jednotlivých pásem,
- zpětný odpor na šneku,
- obvodová rychlost na šneku,
- doba setrvání taveniny v tavicí komoře,
- třecí teplo vzniklé průchodem taveniny rozvodným systémem formy a tvarovými prvky v dutině,
- teplota stěny formy. [3]

Zvyšující se teplota taveniny vede k/e:

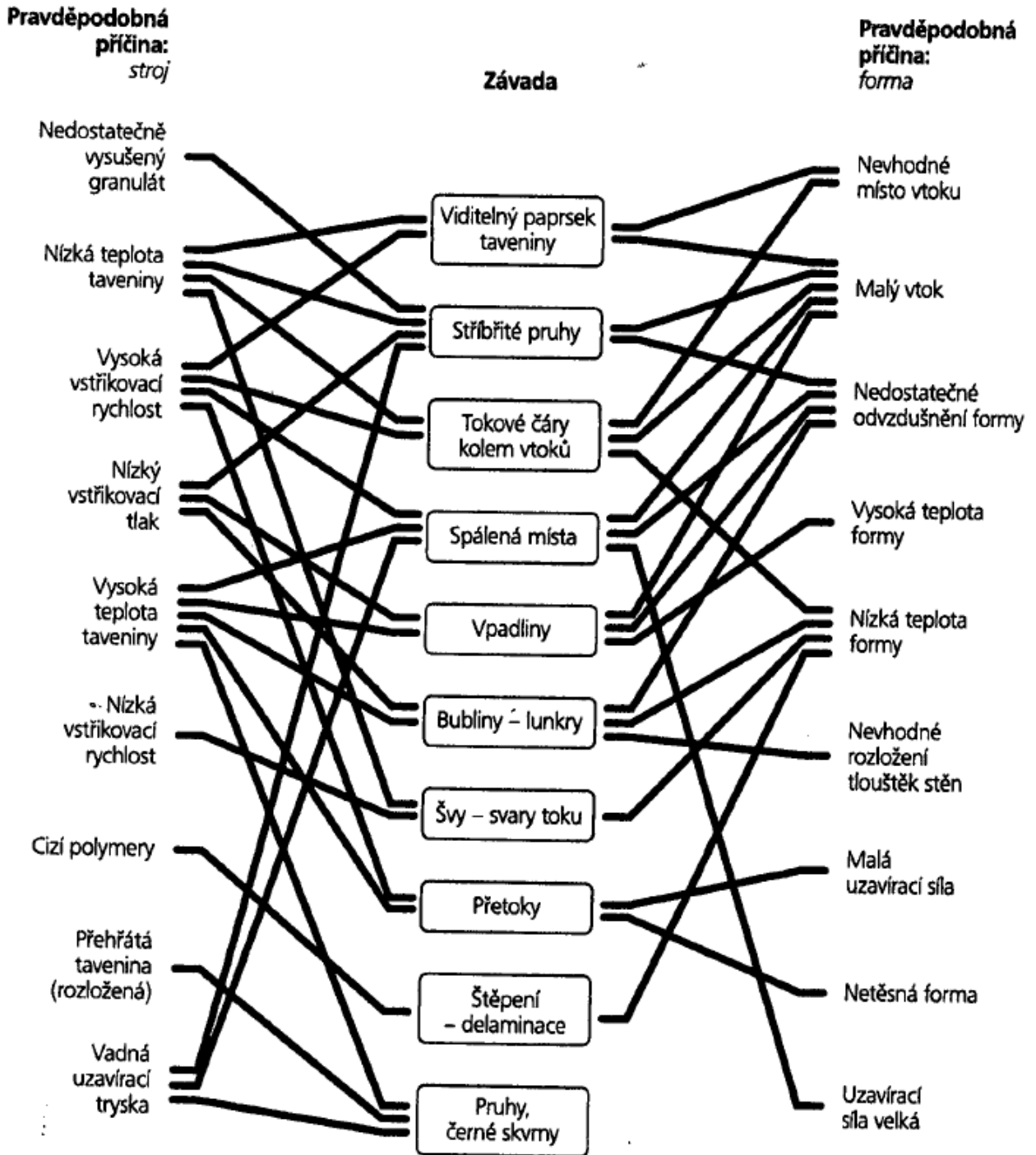
- snížení její viskozity,

- snížení orientačních jevů,
- zmenšení tlakových ztrát v dutině formy,
- snížení vlivu studených spojů na mechanické a kvalitativní vlastnosti výstřiku,
- zvýšení obsahu krystalického podílu,
- zvýšení teplotní zátěžení taveniny, což při delším setrvání taveniny v komoře může vést k tepelnému rozkladu taveniny,
- zmenšení smykového namáhání ve fázi plnění,
- nevýraznému zvýšení doby ochlazování. [3]

Průběh teplot na jednotlivých pásmech je dán výrobkem a materiálem, pravidlem je, že nejnižší teplota je u násypky a nejvyšší u trysky. Tolerance pro částečně krystalické termoplasty je 4 až 10°C. [10]

6.4 Obvyklé závady a způsoby jejich odstranění

Na obrázku 26. můžeme vidět možné druhy závad, odstranění závad může být konstrukčního charakteru, například nedokonalá konstrukce formy nebo může být špatně nastaven určitý parametr, například vstřikovací rychlost, tlak nebo teplota. [16]



Obr. 26 - závady při vstřikování termoplastů [16]

7 Závěr z teoretické části

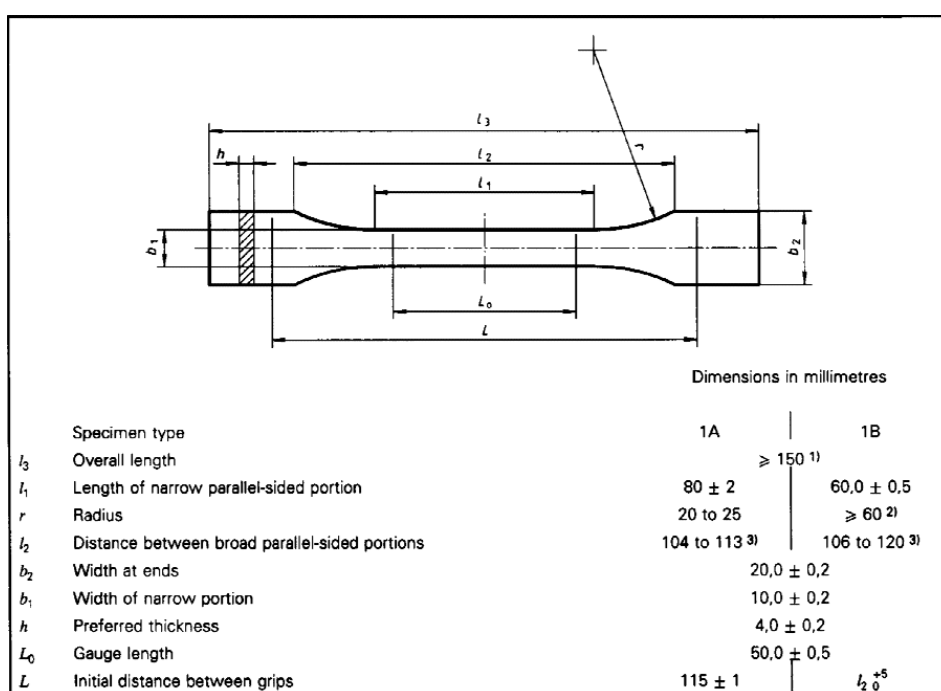
V první části práce jsem se zaměřil na základní rozdělení polymerů, jejich vlastnosti a dělení. Důraz byl kladen na polypropylen a polyetylen, jelikož jsou to polymery (termoplasty), které jsou zásadní pro praktickou část mé práce. Dále jsem obecně popsal vstřikovací lis a samotný vstřikovací proces a jeho vliv na kvalitu a vlastnosti vyrobených výstřiků. Zaměřil jsem se na vliv teploty formy a vliv teploty v tavící komoře, jsou to dva základní a jediné parametry, které jsem nastavoval v praktické části.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7.1 Popis zkušebního tělíska

Byly vyrobeny vzorky zkušebních tělísek pro tahovou zkoušku na vstřikovacím lisu ALLROUNDER 270C. Posléze byla tělíska podrobena tahové zkoušce a dále byla tělíska testována pod mikroskopem.

V místě přetržení zkušebního tělíska je výška vzorku $h=4 \pm 0,2$ mm a šířka $b_1=10 \pm 0,2$ mm. Testované vzorky mají dle normy EN ISO 527-2 délku $L_0=115$ mm, tato délka je použita ve výpočtu pro získání modulu pružnosti. Zkoumaný materiál je polypropylen a částečně i polyetylen (použit pouze při výpočtu modulu pružnosti).



Obr. 27 - rozměry v milimetrech dle normy EN ISO 527-2 [18]

7.2 Nastavení stroje

Při vstřikování byly měněny pouze hodnoty teplot, a to teplota vstřikovací formy a teplota jednotlivých topných pásem tavící komory (v mém případě 4 topné zóny). Vzhledem ke špatnému odvodu tepla ze vstřikovací formy nebylo možno zajistit konstantní teplotu vstřikovací formy, což bylo pravděpodobně způsobeno závadou v regulačním systému vstřikovací formy. Měření probíhala dle přiložené tabulky 3 a 4.

Zóna 1 je nejbližší trysce vstřikovací jednotky, zóna 4 je nejbližší vstupu materiálu do vstřikovací jednotky.

Tabulka 3 - první série měření

Vzorek	zóna	Teplota [°C]	Teplota formy [°C]
PE	1	275	40
	2	275	
	3	265	
	4	260	
Číslo 0 - 10	1	275	40
	2	275	
	3	265	
	4	260	
Číslo 11-12	1	275	60
	2	275	
	3	265	
	4	260	
Číslo 13 -14	1	275	40
	2	275	
	3	265	
	4	260	
Číslo 15 -16	1	275	50
	2	275	
	3	265	
	4	260	
Číslo 17 -18	1	275	48
	2	275	
	3	265	
	4	260	
Číslo 18 -19	1	250	45,6
	2	250	
	3	240	
	4	235	

Tabulka 4 - druhá série měření

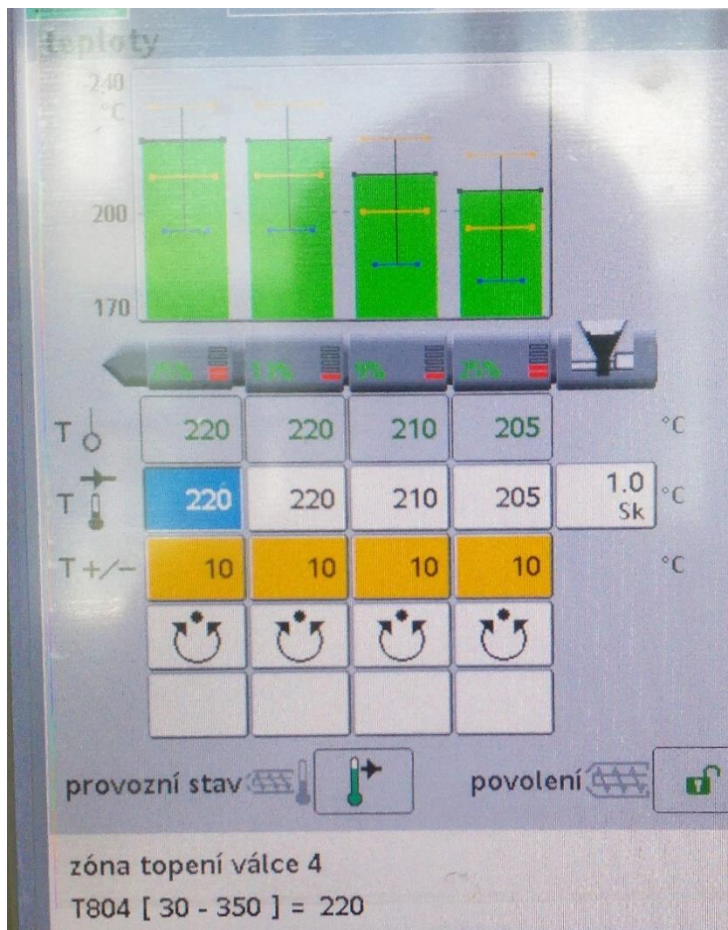
Vzorek	zóna	Teplota [°C]	Teplota formy [°C]
Číslo 22 -25	1	220	44,8
	2	220	
	3	210	
	4	205	
Číslo 26 -27	1	230	47,5
	2	230	
	3	220	
	4	215	
Číslo 28 -30	1	230	48,1
	2	230	
	3	220	
	4	215	
Číslo 31 -33	1	240	51,3
	2	240	
	3	230	
	4	225	
Číslo 34 -35	1	240	51,5
	2	240	
	3	230	
	4	225	
Číslo 36 -37	1	250	53,9
	2	250	
	3	240	
	4	235	
Číslo 38 -39	1	250	54,4
	2	250	
	3	240	
	4	235	

Číslo 20 -21	1	240	47
	2	240	
	3	230	
	4	225	
B1 –B3	1	220	40
	2	220	
	3	210	
	4	205	

Číslo 40 -42	1	260	56,6
	2	260	
	3	250	
	4	245	
Číslo 43 -44	1	260	57
	2	260	
	3	250	
	4	245	
Číslo 45 -46	1	270	59,1
	2	270	
	3	260	
	4	255	
Číslo 47 -49	1	270	59,6
	2	270	
	3	260	
	4	255	

Při první sérii měření jsem postupoval od nejvyšších teplot v tavící komoře směrem k nejnižším - dle tabulky číslo 3. Data použitá pro mechanická vyhodnocení jsou pouze z tabulky 4, při druhé sérii měření jsem s ohledem na nedostatečnou regulaci formy a nemožnost udržení stálé teploty formy postupoval od nejnižších doporučených teplot zón směrem k nejvyšším. Toto opatření zaručuje určitou možnost vyhodnocení relevantních závěrů z naměřených dat, jelikož oba parametry, jak teplota formy, tak teplota zón v tavící komoře mají vzestupný, tedy stejný charakter. Pro analýzu vlivu teploty formy a teploty zón v tavící komoře byl použit polypropylen Mosten GB 107. Polyetylen byl vyroben pouze pro zjištění jeho meze pevnosti a pro výpočet modulu pružnosti. Nastavená hodnota na chladícím zařízení byla 40°C.

Teploty jednotlivých zón v tavící komoře se nastavují na displeji řídicí jednotky stroje, dle obrázku 28. Teplota formy se nastavuje na displeji (regulačního) chladícího zařízení formy, viz obrázek 29.



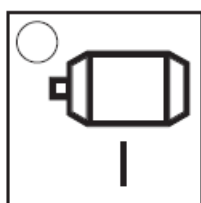
Obr. 28 - nastavení teplot v zóně válce (tavíci komory), autor fotografie Jiří Lukáš



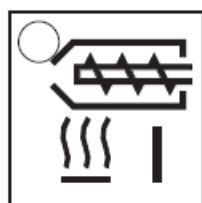
Obr. 29 - chladicí zařízení Piovan, autor fotografie Jiří Lukáš

Označení PE v tabulce 3 znamená, že se jedná o polyetylen, který byl vystříknut na začátku měření, kdy ve stroji byl granulát polyetylen (LITEN MB 61). Celkem než došlo k vyčištění stroje, od předchozího granulátu k novému granulátu, tak jsme vyrobili 30 tělísek. Tělíska byla značena Centropenem.

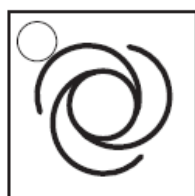
Před samotným vstřikováním bylo zapotřebí zapnout stroj hlavním vypínačem, zmáčknout spouštěcí tlačítko, spustit chladicí zařízení a vložit přístupovou kartu do řídicího panelu, která nám umožňuje změnu parametrů. Po zpřístupnění systému SEOLOGICA bylo zapotřebí zapnout následující klávesy:



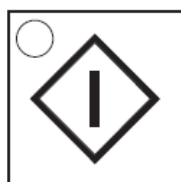
Klávesa zapíná a vypíná motor čerpadla.



Klávesa zapíná a vypíná topení válce stroje.

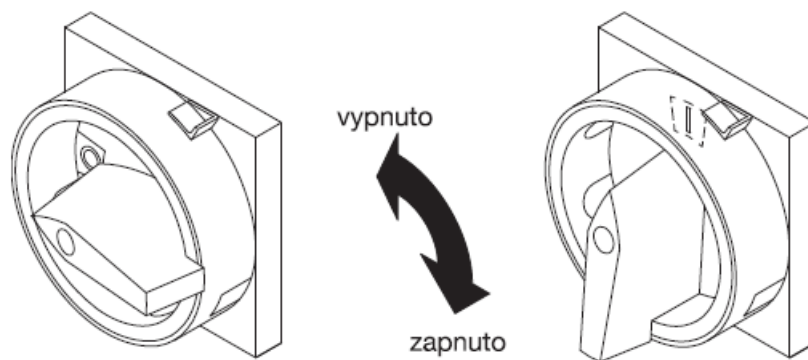


Tato klávesa přepíná mezi ručním a automatickým provozem stroje.

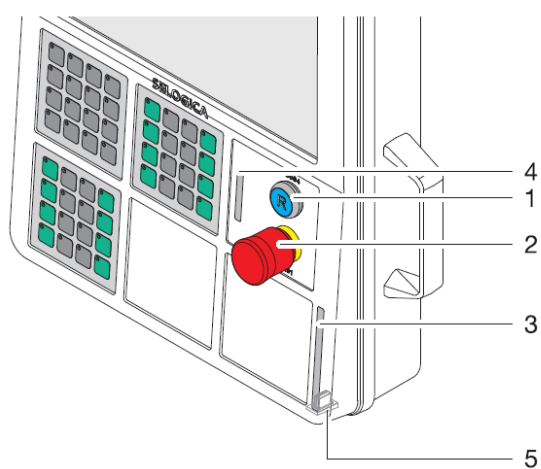


Klávesa start spouští novou výrobní sekvenci v automatickém provozu. Každý automatický program se spouští touto klávesou.

Obr. 30 - klávesy nutné ke spuštění procesu vstřikování, pokud u tlačítka svítí led dioda v levém horním rohu, tak je akce spuštěna [10]



Obr. 31 - hlavní vypínač [10]



- 1 spouštěcí tlačítko řízení
- 2 tlačítko nouzového vypnutí
- 3 čtecí zařízení transpordérových karet (oprávnění uživatele)
- 4 čtečka pro compact flash (medium pro ukládání)
- 5 rozhraní USB pro klávesnici počítače

Obr. 32 - řídicí panel, stroj v prostorách ČVUT FS nedisponuje rozhraním USB [10]



Obr. 33 - nastavení stroje, autor fotografie Jiří Lukáš

Nastartování stroje k prvnímu zhotovenému tělísku zabere celkem 30 minut. Mezi vystříknutím tělísek a mechanickými zkouškami uběhlo 14 dní.

7.3 Tahová zkouška

7.3.1 Popis tahové zkoušky

Jde o nejrozšířenější a nejpoužívanější metodu mechanické zkoušky. Princip spočívá v přetržení zkušebního tělísku a následného vyhodnocení napěťových a deformačních charakteristik.

Zjištěné parametry:

- R_m [MPa] – mez pevnosti v tahu
- F [N] – maximální zatížení před přetrhnutím

Pro tahovou zkoušku byl použit stroj od společnosti Walter + Bai AG, typ ZD 10/90. Byla zvolena konstantní rychlost polohování $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 34 - stroj pro zkoušku tahem, autor fotografie Jiří Lukáš

7.3.2 Naměřená data

Vzorek č.	Max. zatížení (kN)	Pevnost v tahu (MPa)
22	1,4	35,09
23	1,39	34,67
24	1,39	34,63
25	1,39	34,76
26	1,38	34,56
27	1,38	34,43
28	1,38	34,56
29	1,38	34,43
31	1,38	34,43
32	1,38	34,61
33	1,38	34,6
34	1,37	34,36
35	1,37	34,21
36	1,36	34,11
37	1,37	34,27
38	1,37	34,36
39	1,36	34,05
40	1,38	34,38
41	1,38	34,43
42	1,37	34,14
44	1,38	34,47
45	1,36	34,05
46	1,37	34,32
47	1,36	33,89
48	1,37	34,18
49	1,37	34,23
53	1,09	27,22
54	1,08	27,02
55	1,04	25,88
56	1,07	26,86
57	1,07	26,84
58	1,07	26,68

Tabulka 5 - naměřená data z tahové zkoušky

Polypropylen jsou vzorky 22 – 49. Polyetylen vzorky 53 – 58, vzorky PE byly získány pro výpočet modulu pružnosti. Vyhodnocuji pouze druhou sérii nastavení dle tabulky 4.

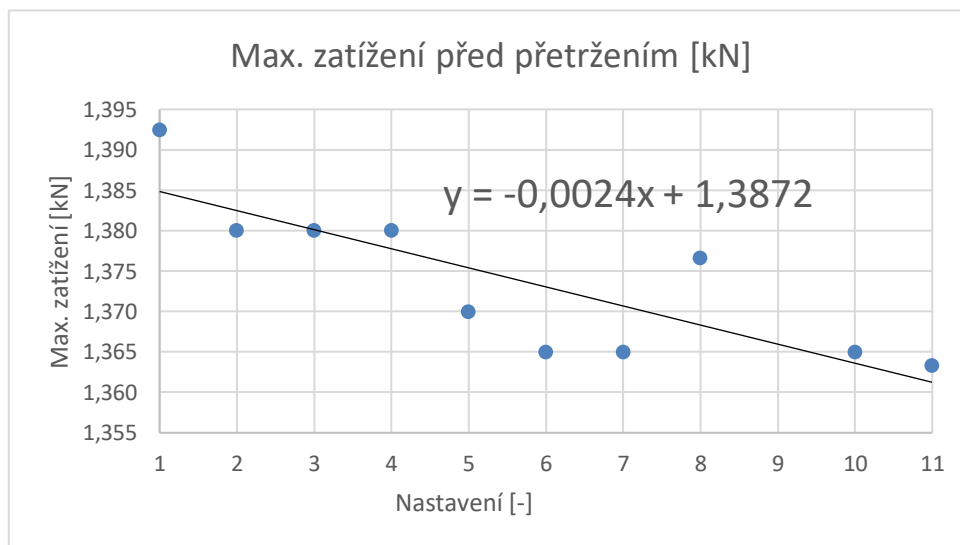
7.3.3 Vyhodnocení pevnosti v tahu

Z tabulky 4 můžeme vidět, že bylo zvoleno 11 možností nastavení různých teplot, hodnoty pro těchto 11 možností jsem dle výsledků z tabulky 5 zprůměroval,

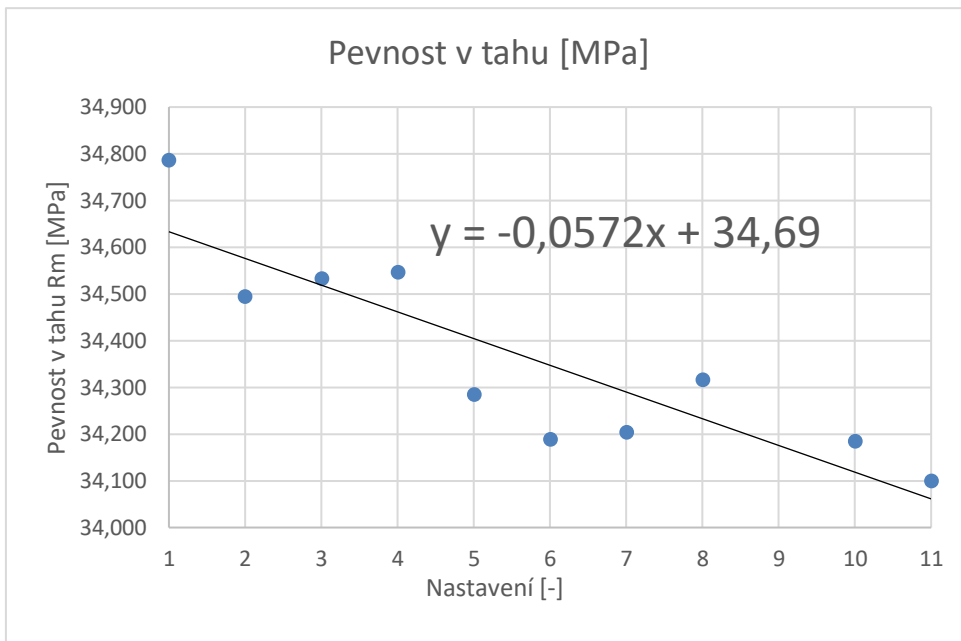
odstranil chybové body a zaznamenal do grafů. Od nastavení 9 jsem měl k dispozici pouze jediný vzorek (nešlo udržet teplotu formy - rychlý přechod na jiný teplotu), takže tento bod byl zanedbán, jak můžeme vidět na obr. 35 a 36.

	Max. zatížení před přetržením [kN]	Pevnost v tahu [MPa]
Nastavení 1	1,393	34,788
Nastavení 2 + ΔT 10°C	1,380	34,560
Nastavení 3	1,380	34,495
Nastavení 4 + ΔT 10°C	1,380	34,547
Nastavení 5	1,370	34,285
Nastavení 6 + ΔT 10°C	1,365	34,190
Nastavení 7	1,365	34,205
Nastavení 8 + ΔT 10°C	1,377	34,317
Nastavení 9	1,380	34,470
Nastavení 10 + ΔT 10°C	1,365	34,185
Nastavení 11	1,363	34,100

Tabulka 6 - zprůměrované hodnoty (2-3 vzorky od každého nastavení), od nastavení 9 pouze 1 vzorek)



Obr. 35 - maximální zatížení před přetržením – polypropylen



Obr. 36 - pevnost v tahu - polypropylen

7.3.4 Výpočet modulu pružnosti (PP i PE)

Modul pružnosti v tahu E geometricky odpovídá v grafu směrnici přímkové části diagramu.

Dle Hookeova zákona platí $R = E \cdot \epsilon_t$ [MPa].

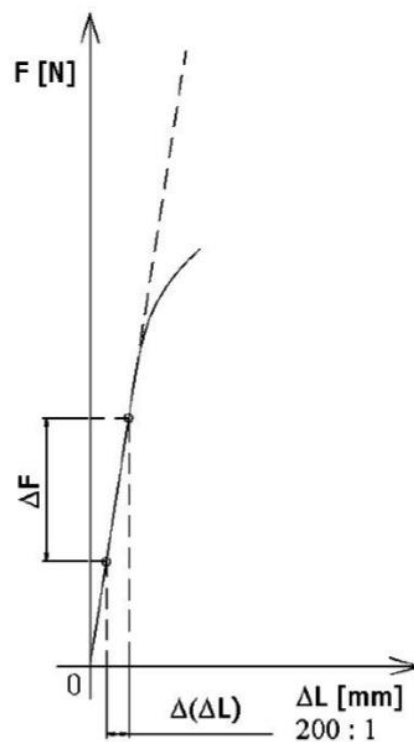
Použitý vztah pro výpočet:

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

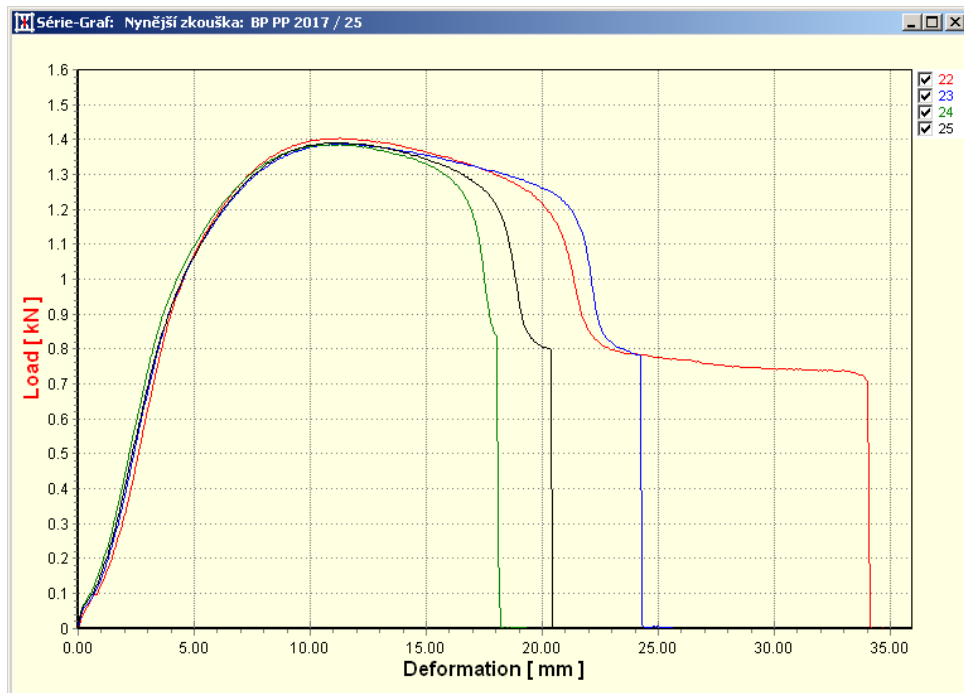
Pro naše zkušební tělísko platí: $S_0 = 40 \text{ mm}$,

$L_0 = 115 \text{ mm}$

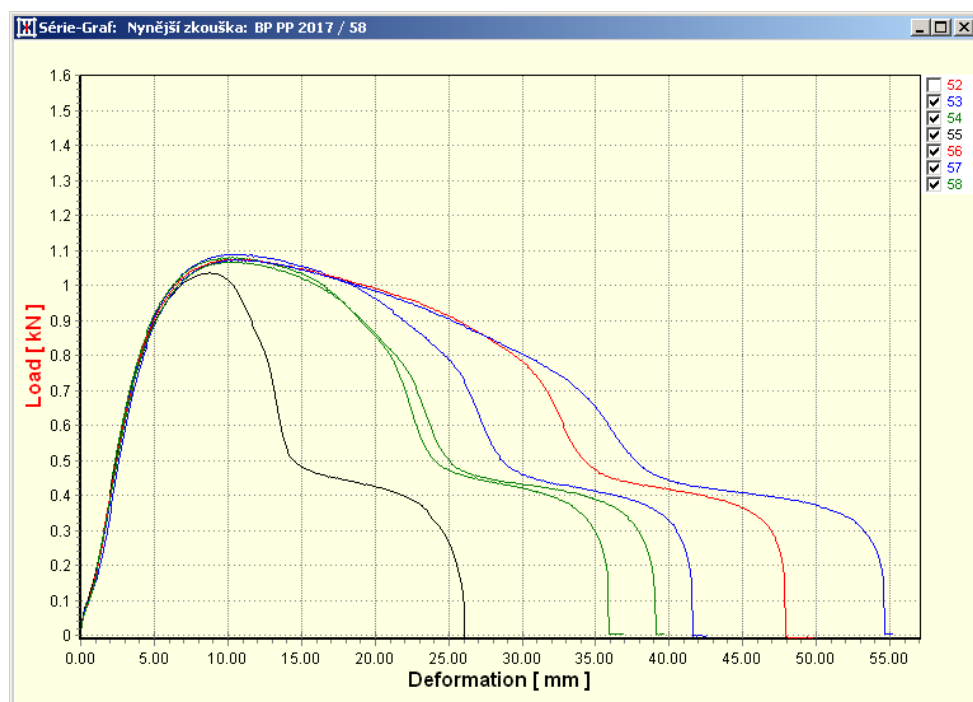
Obr. 37 - tahový diagram – výpočet modulu pružnosti E stejný postup aplikují na vlastní tahové diagramy [19]



Další hodnoty jsou odečteny z diagramů tahových zkoušek. Odečtení a výpočet byl aplikován na zkušební tělíska z tabulky 5. Pro polyetylen bylo provedeno jedno odečtení, jelikož průběhy jsou téměř totožné. Pro polypropylen jsem vybral 10 průběhů, hodnoty zaznamenal do tabulky 7 a vypočetl průměrnou hodnotu a směrodatnou odchylku.



Obr. 39 - tahové diagramy polypropylenu, autor snímku Jiří Lukáš



Obr. 38 - tahové diagramy polyetylenu, autor snímku Jiří Lukáš

Vzorový výpočet pro PE:

$$E = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} [MPa] = \frac{\frac{305}{40}}{\frac{1,25}{115}} = 701,5 \text{ MPa} \quad (3)$$

Vzorový výpočet pro PP:

$$E = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} [MPa] = \frac{\frac{600}{40}}{\frac{1,8}{115}} = 958,3 \text{ MPa} \quad (4)$$

	ΔF [N]	ΔL [mm]	S [mm ²]	L0 [mm]	E [MPa]
vzorek č. 22	600	1,80	40	115	958,3
vzorek č. 23	615	1,85	40	115	955,7
vzorek č. 24	615	1,90	40	115	930,6
vzorek č. 25	620	1,85	40	115	963,5
vzorek č. 31	610	1,90	40	115	923,0
vzorek č. 32	610	1,85	40	115	948,0
vzorek č. 33	605	1,80	40	115	966,3
vzorek č. 34	590	1,75	40	115	969,3
vzorek č. 35	615	1,80	40	115	982,3
vzorek č. 36	645	2,00	40	115	927,2

Tabulka 7 - výpočet modulu pružnosti E pro polypropylen

Dle tabulek se Youngův modul pružnosti pohybuje pro LDPE 0,1-0,4 GPa, HDPE 0,8 GPa, pro polypropylen máme přesnou hodnotu 1550 MPa z produktového listu UNIPETROLU.

7.3.5 Závěr mechanických zkoušek

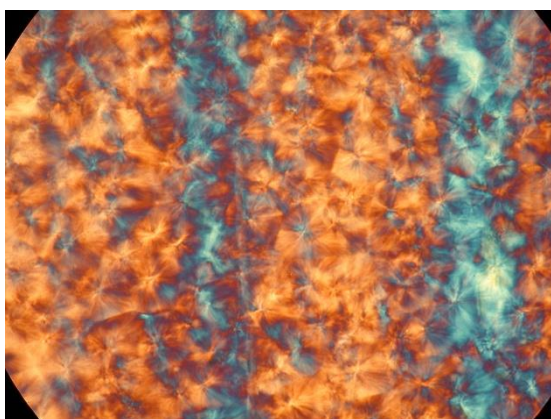
Na výše zmíněných grafech lze pozorovat klesající tendence mechanických vlastností polypropylenů v závislosti na stoupající teplotě. Tento jev si vysvětlují, tak že jsme se dostali hned prvním nastavením na ideální teploty, další zvyšování teplot dle možných hypotéz vedlo k teplotnímu rozkladu materiálu. Vlivem vyšší teploty se mohly narušit i síly mezi molekulami, rozbor těchto hypotéz je velmi složitý a náročný proces, který vyžaduje další měření a specifické analýzy.

Při výpočtu modulu pružnosti jsem dospěl k závěru, že se jedná o vysoce hustotní polyetylen (HDPE) s modulem pružnosti 701,5 MPa. Modul pružnosti u polypropylenu je $E = (952,4 \pm 18,8)$ MPa. Hodnota je značně nižší než tabulková hodnota, což je způsobeno i tím, že jsme na měření nepoužili průtahoměr a standardně se modul pružnosti E vyhodnocuje za použití jiných metod.

7.4 Pozorování pod mikroskopem

7.4.1 Popis mikroskopování

Pro hodnocení struktury polypropylenu a polyetyleny byl využit mikroskop Nikon Eclipse 600ME. Před samotným procesem bylo nutné připravit velmi tenké fólie materiálu o tloušťce cca 10 μ m, fólie byly odebrány z přetržené části vzorku, který je orientovaný blíž vtoku do formy. Fólie byly připraveny na klasické mikrotomové žiletce.

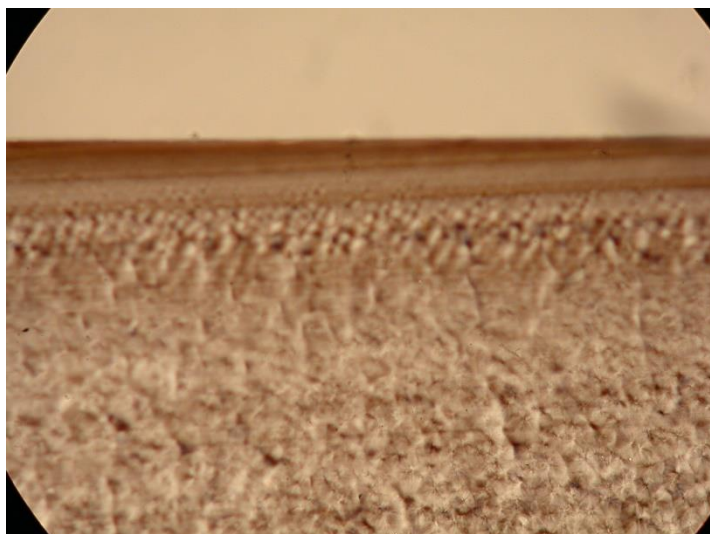


Obr. 41 - vnitřní struktura polypropylenu - lze pozorovat sférolity - monokrystalické útvary, autor fotografie Jiří Lukáš

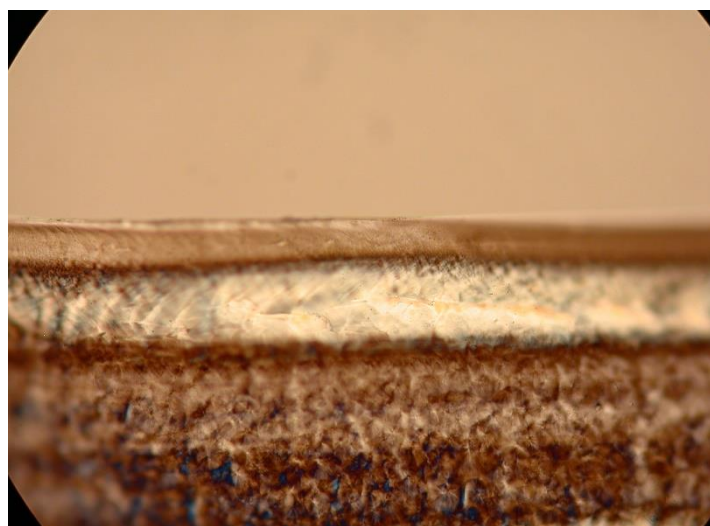


Obr. 40 - mikroskop Eclipse 600ME, autor fotografie Jiří Lukáš

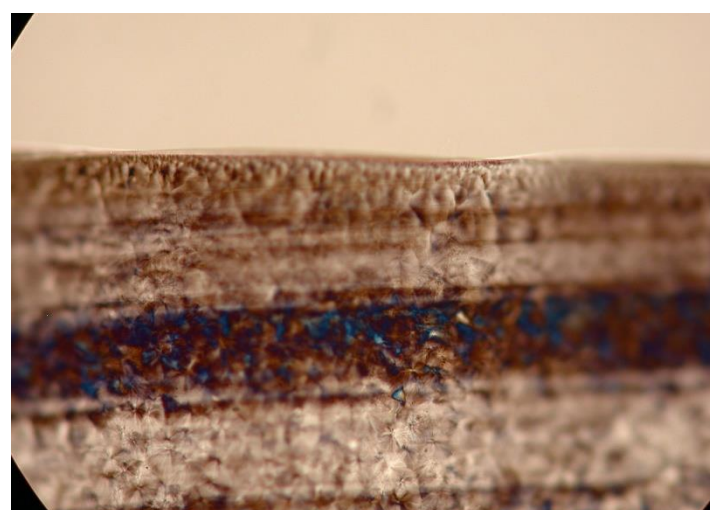
7.4.2 Vyhodnocení snímků polypropylenu



Obr. 42 vzorek 23 - nastavení 1 - šířka povrchové vrstvy 0,029 mm, zvětšení 50x, autor fotografie Jiří Lukáš



Obr. 43 vzorek 31 - nastavení 4 - šířka povrchové vrstvy 0,0232 mm, zvětšení 50x, autor fotografie Jiří Lukáš



Obr. 44 vzorek 49 - nastavení 11 - šířka povrchové vrstvy 0,01 mm, zvětšení 20x, autor fotografie Jiří Lukáš

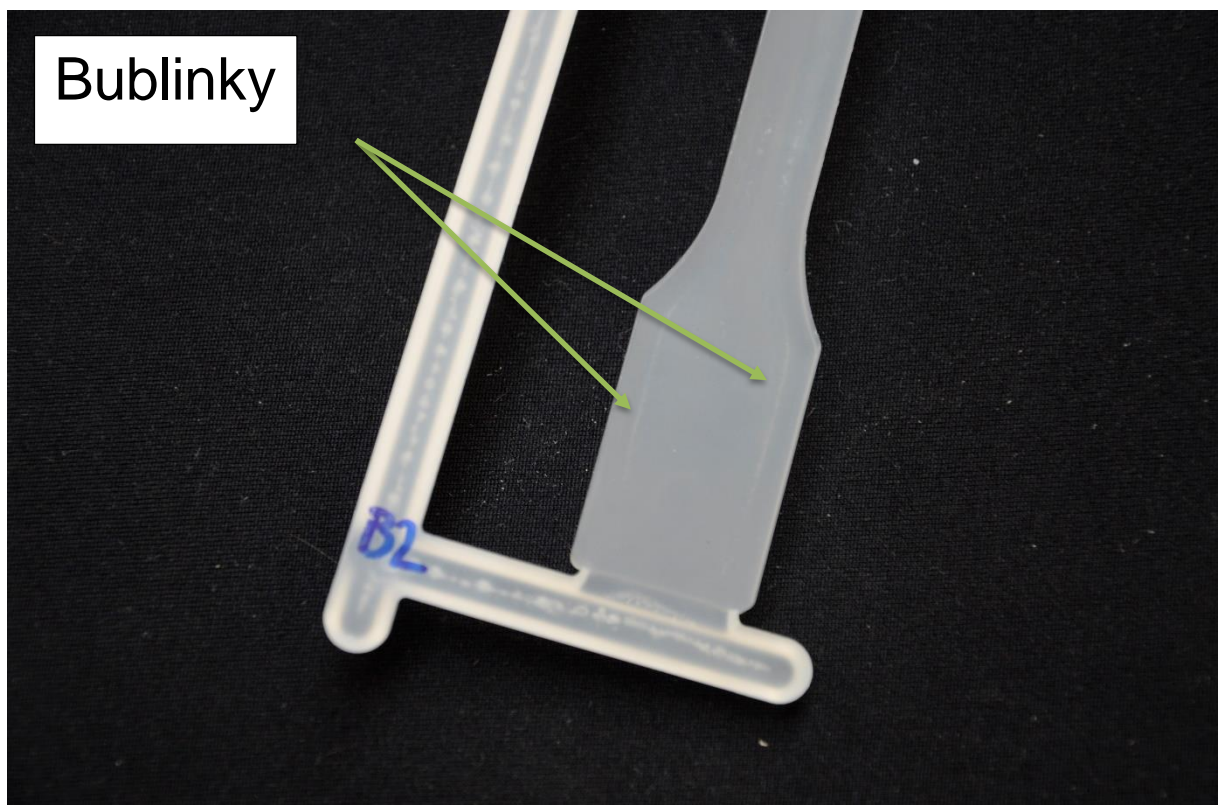
7.4.3 Závěr z kapitoly

Na obrázku 42 – 44 lze pozorovat s rostoucí teplotou formy a taveniny klesající tloušťku povrchové vrstvy. U částečně krystalických polymerů lze konstatovat, že s klesající tloušťkou povrchové vrstvy se snižuje vrubová houževnatost, odolnost materiálu vůči křehkému lomu a tažnost.

7.5 Zjištěné vady výstřiku během vstřikování

7.5.1 Bublinky

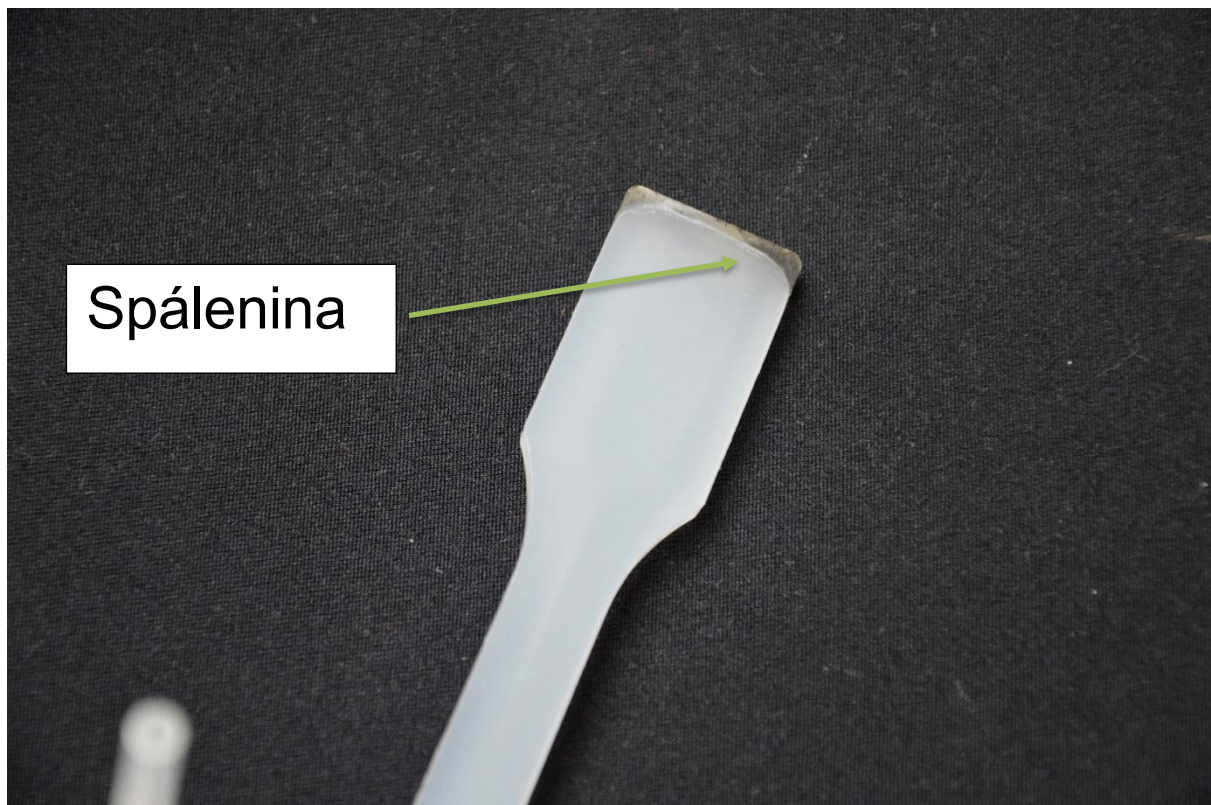
Viditelné bublinky bylo možno pozorovat za nejnižších teplot, tedy teplota formy 40°C, zóny (220, 220, 210, 205°C) - vzorky v tab. 3 označené B1 –B3. Bublinky bylo možné pozorovat i u nastavení 1 - zóny: 220°C, 220°C, 210°C, 205°C a teplota formy 44,8°C.



Obr. 45 - viditelné bublinky ve výstřiku polypropylenu, autor fotografie Jiří Lukáš

7.5.2 Spáleniny

Byly viditelné od nastavení 10, tedy teplota formy byla 59,1°C, zóny (270, 270, 260, 255°C).



Obr. 46 - viditelné spáleniny výstřiku polypropylenu, autor fotografie Jiří Lukáš

8 Závěr praktické části

Na vstřikovacím lisu jsem vyrobil více než 150 tělísek, vybral jsem referenční a z toho jsem ty uvedené v tabulce 5 otestoval na mechanické vlastnosti. Celé měření bylo ovlivněno špatným regulačním systémem formy, který nedokázal udržet konstantní teplotu, což komplikovalo vyrobení tělísek za určitých nastavených podmínek, teplota formy kontinuálně rostla. Nejvhodnějším možným nastavením z hlediska mechanických a vzhledových vlastností pro vstřikování polypropylenu se jeví nastavení 2 – zóny: 230°C, 230°C, 220°C, 215°C a teplota formy 47,5°C, jelikož při nastavení 1 - zóny: 220°C, 220°C, 210°C, 205°C a teplotě formy 44,8°C docházelo k tvorbě bublinek a za dalšího nárůstu teplot docházelo k teplotní degradaci materiálu, tedy ke snižování meze pevnosti.

9 Seznam Zdrojů

- [1] Podstata, význam a historie polymerů. *Publi* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/01.html>
- [2] Rozdělení a charakteristika polymerů. *Publi* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [3] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Praha: BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [4] Termoplastické elastomery. *Publi* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/23.html>
- [5] Termoplasty – základní druhy. *Publi* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [6] UNIPETROL. *Materiálové listy UNIPETROL - LITEN MB 73*. 2015. Dostupné také z: <http://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Stranky/default.aspx>
- [7] VĚRA, Navrátilová. *Vliv zpracovatelských parametru na vlastnosti PP plněného dlouhým skleněným vláknem*. Zlín, 2013. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta. Vedoucí práce RNDr. Marta Sližová, CSc.
- [8] G. KARIAN, Harutun a Marcel DEKKER. *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites*. 2nd Edition. Michigan: RheTech, 2009. ISBN 0-8247-4064-5.
- [9] UNIPETROL. *Materiálové listy UNIPETROL - MOSTEN GB 107*. 2015. Dostupné také z: http://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Technical%20datasheet/Technical%20datasheet%20Mosten_GB%20107_cz.pdf
- [10] Firemní literatura (manuál): *Návod k obsluze pro stroj č. 229484*. ARBURG spol. s.r.o., Postfach, 2011.
- [11] Technologie vstřikování plastů. *Publi* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [12] Vstřikovací jednotka. *Publi* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/03.html>
- [13] ŠPIČÁK, Pavel. *Technologie výroby součástí z plastu* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/18418>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ladislav Žák.
- [14] Vstřikovací forma. *Publi* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/02.html>

[15] Vstřikování plastů. *Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm

[16] Firemní literatura (katalog): *Malý průvodce vstřikováním*, ARBURG spol. s.r.o, Brno

[17] ŠTĚPÁN, Sýkora. *Vliv struktury na mikrotvrdot polymerů*. Praha, 2014. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Elena Čižmárová, PhD.

[18] *ISO 527-1: Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles*. 1993.

[19] *Statické zkoušky: Zkouška tahem* [online]. In: . Plzeň, s. 13 [cit. 2017-08-18]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 - vlastnosti polyetyleny LITEN MB 61 [6]	15
Tabulka 2 – vlastnosti polypropylenu Mosten GB 107 [9].....	18
Tabulka 3 - první série měření.....	43
Tabulka 4 - druhá série měření	44
Tabulka 5 - naměřená data z tahové zkoušky	50
Tabulka 6 - zprůměrované hodnoty (2-3 vzorky od každého nastavení), od nastavení 9 pouze 1 vzorek)	51
Tabulka 7 - výpočet modulu pružnosti E pro polypropylen	54

11 Seznam obrázků

Obr. 1 - základní rozdělení polymerních materiálů [2]	11
Obr. 2 - částečně krystalická struktura [3]	11
Obr. 3 - amorfnní struktura [3]	11
Obr. 4 - struktura reaktoplastů [3].....	12
Obr. 5 - struktura elastomerů [3].....	13
Obr. 6 - struktura termoplastického elastomeru [4].....	13
Obr. 7 - dva základní typy polyetylenů [5].....	14
Obr. 8 - aplikace polyetyleny [5]	15
Obr. 9 - Konfigurace polypropylenu [7].....	16
Obr. 10 - vlastnosti polypropylenu dle uspořádání methylových skupin [5]	17
Obr. 11 - možnosti použití polypropylenu [5]	17
Obr. 12 - popis vstřikovacího lisu ALLROUNDER 270 C od společnosti ARBURG [10]	19
Obr. 13 - fotka stroje pořízená při vstřikování.....	20
Obr. 14 - komponenty vstřikovacího stroje [10]	21
Obr. 15 - vstřikovací jednotka se šnekem (pístem) [10].....	22

Obr. 16 - možnosti modifikace násypek [12].....	23
Obr. 17 - tavící komora [12].....	24
Obr. 18 - schéma jednotlivých zón a stavu vloženého polymeru [10].....	24
Obr. 19 - schéma standardního šneku pro zpracování termoplastů [12]	25
Obr. 20 - a) řešení pomocí pružiny b) řešení pomocí hydraulického zařízení [12]	26
Obr. 21 - snímek vstřikovací formy	26
Obr. 22 - zjednodušený popis vstřikovacího cyklu [15].....	29
Obr. 23 - vliv teploty formy na smrštění [11].....	36
Obr. 24 - podíl vlivu teploty formy na smrštění a dosmrštění [11].....	37
Obr. 25 - rozdílné teploty temperace formy, a) teplota formy 20°C, b) teplota formy 40°C, c) teplota formy 80°C [11].....	38
Obr. 26 - závady při vstřikování termoplastů [16]	40
Obr. 27 - rozměry v milimetrech dle normy EN ISO 527-2 [18]	43
Obr. 28 - nastavení teplot v zóně válce (tavící komory)	46
Obr. 29 - chladící zařízení Piovan	46
Obr. 30 - klávesy nutné ke spuštění procesu vstřikování, pokud u tlačítka svítí led dioda v levém horním rohu, tak je akce spuštěna [10]	47
Obr. 31 - hlavní vypínač [10]	48
Obr. 32 - řídicí panel, stroj v prostorách ČVUT FS nedisponuje rozhraním USB [10]	48
Obr. 33 - nastavení stroje	48
Obr. 34 - stroj pro zkoušku tahem	49
Obr. 35 - maximální zatížení před přetržením - polypropylen.....	51
Obr. 36 - pevnost v tahu - polypropylen.....	52
Obr. 37 - tahový diagram – výpočet modulu pružnosti E, stejný postup aplikuji na vlastní tahové diagramy [19].....	52
Obr. 38 - tahové diagramy polyetylenu.....	53
Obr. 39 - tahové diagramy polypropylenu.....	53
Obr. 40 - vnitřní struktura polypropylenu - lze pozorovat sférolity - monokrystalické útvary.....	55
Obr. 41 - mikroskop Eclipse 600ME	55
Obr. 42 vzorek 23 - nastavení 1 - šířka povrchové vrstvy 0,029 mm, zvětšení 50x...56	
Obr. 43 vzorek 31 - nastavení 4 - šířka povrchové vrstvy 0,0232 mm, zvětšení 50x...56	
Obr. 44 vzorek 49 - nastavení 11 - šířka povrchové vrstvy 0,01 mm, zvětšení 20x...56	
Obr. 45 - viditelné bublinky ve výstřiku polypropylenu	57
Obr. 46 - viditelné spáleniny výstřiku polypropylenu.....	58