

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

**Vstřikování plastů vyztužených skleněnými vlákny  
a jejich použití v automobilovém průmyslu**

Diplomová práce



**Bc. Dominik MAREŠ**

Praha 2019

## **ANOTAČNÍ LIST:**

Autor:	Bc. Dominik MAREŠ		
Název DP:	Vstřikování plastů vyztužených skleněnými vlákny a jejich použití v automobilovém průmyslu		
Rok:	2019		
Studijní program:	Strojní inženýrství		
Obor studia:	Výrobní a materiálové inženýrství		
Ústav:	Ústav strojírenské technologie		
Vedoucí DP:	Ing. Stefan Krebs		
Konzultant:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.		
Bibliografické údaje:	počet stran		86
	počet obrázků		61
	počet tabulek		15

### **Klíčová slova:**

vstřikování plastů, polyamidy vyztužené skleněnými vlákny, procesní parametry, up-scaling, zkušební plán, procesní stabilita, bezrozměrné charakteristiky

### **Anotace:**

Tato diplomová práce se zabývá plasty vyztuženými skleněnými vlákny, které se běžně používají v automobilovém průmyslu. Tento typ materiálů není snadné zpracovat, protože proces bývá často nestabilní, zejména fáze plastifikace. Jedním z bodů této práce je tak zvaná metoda up-scaling, jenž lze aplikovat na vstřikovací jednotky a dosáhnout tak větší produktivity.

Praktická část práce se zabývá hledáním relevantních procesních parametrů a problematikou zpracování polyamidu se skelnými vlákni v laboratoři. Identifikované parametry jsou použity k formulaci hypotéz, experimentů a plánu zkoušek s cílem zlepšit stabilitu procesu plastifikace. V laboratoři byla vyráběna zkušební tělesa a stabilita procesu se významně zlepšena úpravou několika procesních proměnných.

**ANNOTATION:**

Author:	Bc. Dominik MAREŠ		
Title:	Injection moulding fibre – reinforced plastics and their applications in the automotive industry		
Year:	2019		
Study program:	Mechanical engineering		
Field of study:	Manufacturing and Material Engineering		
Department:	Department of Manufacturing Technology		
Superior:	Ing. Stefan Krebs		
Consultant:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.		
Bibliographic data:	number of pages:	86	
	number of images:	61	
	number of tables:	15	

**Keywords:**

injection moulding, polyamide glass fibre reinforced, process parameters, up-scaling, test plan, process stability, dimensionless characteristic

**Abstract:**

This diploma thesis deals with glass fibre reinforced plastics, which are commonly used in the automotive industry. This type of materials is not easy to handle because the process is often unstable, especially phase of plasticization. One of the points of this work is the so-called up-scaling method that can be applied to the injection unit to increase productivity.

The practical part of the thesis deals with the search for relevant process parameters and the problems of processing of glass fibre polyamide in the laboratory. The identified parameters are used to formulate hypotheses, experiments and test plans to improve process stability of plasticization. Test specimens were manufactured in the laboratory and process stability was significantly improved by adjusting several process variables.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MAREŠ, Dominik. Vstřikování plastů vyztužených skleněnými vlákny a jejich použití v automobilovém průmyslu. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.

Vedoucí práce Ing. Stefan Krebs

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: *Vstřikování plastů vyztužených skleněnými vlákny a jejich použití v automobilovém průmyslu* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Stefana Krebse s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Bc. Dominik Mareš

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Stefanu Krebsovi za věcné připomínky a rady, za nezbytnou korekturu a za poskytnutý čas během řešení této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za čas strávený při zkouškách v laboratoři a také děkuji doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D. za jeho připomínky a rady. Mimo jiné bych moc rád poděkoval svým rodičům, mé ženě Elišce a všem ostatním, kteří mě podporovali po celou dobu studia na vysoké škole.

## Obsah

Seznam zkratk a symbolů .....	9
Úvod .....	10
Teoretická část .....	11
1. Vstřikovací lis a vstřikovací cyklus .....	11
1.1. Vstřikovací lis.....	11
1.2. Vstřikovací cyklus.....	12
2. Termoplasty vyztužené skleněnými vlákny .....	15
2.1. Termoplasty .....	15
2.2. Plniva .....	16
2.3. Polyamidy.....	16
2.3.1. Termodynamické vlastnosti – Přechodové teploty.....	20
2.3.2. Index toku taveniny a viskozita taveniny .....	22
3. Zpracování polyamidu se skelnými vlákny (PA-GF) .....	24
4. Technologické podmínky pro stabilitu procesu .....	26
4.1. Sušení termoplastů .....	26
4.2. Plastifikace .....	28
4.2.1. Otáčky šneku.....	29
4.2.2. Teplota taveniny .....	30
4.2.3. Zpětný odpor na šneku .....	30
4.2.4. Polštář .....	31
4.2.5. Tryska .....	32
4.3. Vstřikování .....	34
4.3.1. Vstřikovací síly a tlaky .....	34
4.3.2. Zpětný uzávěr na šneku .....	36
4.4. Forma.....	38
5. Rešerše dostupných metod pro Up-scaling .....	40
Praktická část .....	46
6. Daný příklad.....	46
6.1. Výrobní podmínky v laboratoři Fakulty strojní .....	46
6.2. Výrobní podmínky v průmyslovém měřítku .....	49
7. Nestabilita procesu zpracování PA-GF .....	51
7.1. Popis problematiky zpracování PA-GF.....	51
7.2. Úvahy k plastifikaci PA-GF .....	52
7.2.1. Násypka .....	52
7.2.2. Dopravní zóna .....	54
7.2.3. Základní úvahy o tavení granulátu třením .....	55
7.2.4. Kompresní zóna.....	56
7.2.5. Homogenizační zóna.....	58
7.2.6. Tryska .....	59
7.3. Hledání relevantních procesních parametrů PA-GF v laboratoři.....	60
8. Formulace hypotéz a experimentů.....	62
8.1. Hypotéza 1: Násypka – Nedostatečné doplňování granulátu .....	62

8.2.	Hypotéza 2: Hloubka dopravní zóny – velikost granulátu.....	63
8.3.	Hypotéza 3: Rychlost plastifikace.....	66
8.4.	Hypotéza 4: Zpětný odpor .....	67
8.5.	Hypotéza 5: Teplota pod násypkou .....	68
8.6.	Hypotéza 6: Zpětný uzávěr šneku .....	68
8.7.	Hypotéza 7: Ucpaná tryska .....	69
9.	Zkoušky.....	69
9.1.	Kritéria pro stanovení stability plastifikace .....	69
9.2.	Zkušební plán .....	69
9.3.	Provádění zkoušek .....	71
9.3.1.	Sušení granulátu Grilon TSG – 30/4 .....	71
9.3.2.	První část zkoušek s PA-GF30 .....	73
9.3.3.	Zkoušky s PP.....	75
9.3.4.	Druhá část zkoušek s PA-GF50.....	76
9.4.	Výsledky první části zkoušek .....	79
9.5.	Výsledky druhé části zkoušek .....	81
	Závěr .....	82
	Použitá literatura .....	83
	Seznam obrázků.....	85
	Seznam tabulek .....	86



## Seznam zkratk a symbolů

$\frac{d(u)}{d(y)}$	gradient růstu rychlosti	PMMA	polymethyl-methakrylát
Al	hliník	POM	polyoxymethylen
BP	bod přepnutí	Pos.	pozice
$C_{pk}$	statistická hodnota reprodukovatelnosti	$\rho_p$	zpětný odpor
D	průměr šneku	PP	polypropylen
F	síla	PS	polystyren
GF	skleněná vlákna	$\rho_v$	vstřikovací tlak
H; h	hloubka šneku	PVC	polyvinylchlorid
ITT	index toku taveniny	r	poloměr
L	délka šneku	s.r.o.	společnost s ručením omezeným
$l_d$	dávka	T	teplota
$l_p$	polštář	$T_0$	Teplota pod násypkou
Mg	hoříčik	$T_f$	teplota viskózního toku
$n; n_s$	otáčky šneku	TF	teplota formy
Obr.	obrázek	$T_g$	teplota skelného přechodu
PA 11	polyamid 11	$T_m$	teplotou tání
PA 12	polyamid 12	TT	teplota taveniny
PA 66	polyamid 66	UV	ultra fialové záření
PA	polyamid	$v_r$	vstřikovací rychlost
PA6	polyamid 6	$v_s; u$	obvodová rychlost šneku
PA-GF	polyamid se skelnými vlákny	$x; x_0$	velké a malé měrné proměnné
PC	polykarbonát	Zn	zinek
$p_d$	nízký dotlak	$\psi$	měřítka procesní odezvy
PE	polyethylen	$\eta$	dynamická viskozita
PET	polyethylentereftalát	$\tau$	tečné napětí

## Úvod

Plastové výrobky se staly nedílnou součástí našeho každodenního života. Využívají se denně buď přímo, nebo nepřímo. Jejich výroba se může zdát na první pohled snadná – roztaví se granulát a vstříkne se do formy. Nicméně při pozornějším zkoumání se zjistí, že se jedná o velmi komplexní proces, který vyžaduje nastavení celé řady procesních parametrů pro zajištění správného chodu stroje.

Důvodem vzniku této diplomové práce je problematická výroba zkušebních vzorků na školním vstřikovacím stroji Arburg při použití materiálu polyamid se skelnými vlákny. Hlavním cílem této práce tedy je pokusit se optimalizovat proces plastifikace. Pro optimalizaci plastifikace je rozhodující správné nastavení procesních parametrů. Tato práce se zaměří na analýzu těchto parametrů, ale současně se věnuje problematice udržení stabilního procesu výroby.

Nedílnou součástí této práce je vytvořit hypotézy, které by byly vodítkem k vysvětlení důvodů vzniku nestabilního procesu školního vstřikovacího stroje. Na základě hypotéz je třeba navrhnout experimenty, které by bylo možné aplikovat při výrobě zkušebních tělísek. Z výsledků provedených zkoušek se posoudí stabilita plastifikace a celého výrobního procesu.

Kromě optimalizace, se bude část práce věnovat řešerši plastů vyztužených skleněnými vlákny a jejich použití v automobilovém průmyslu.

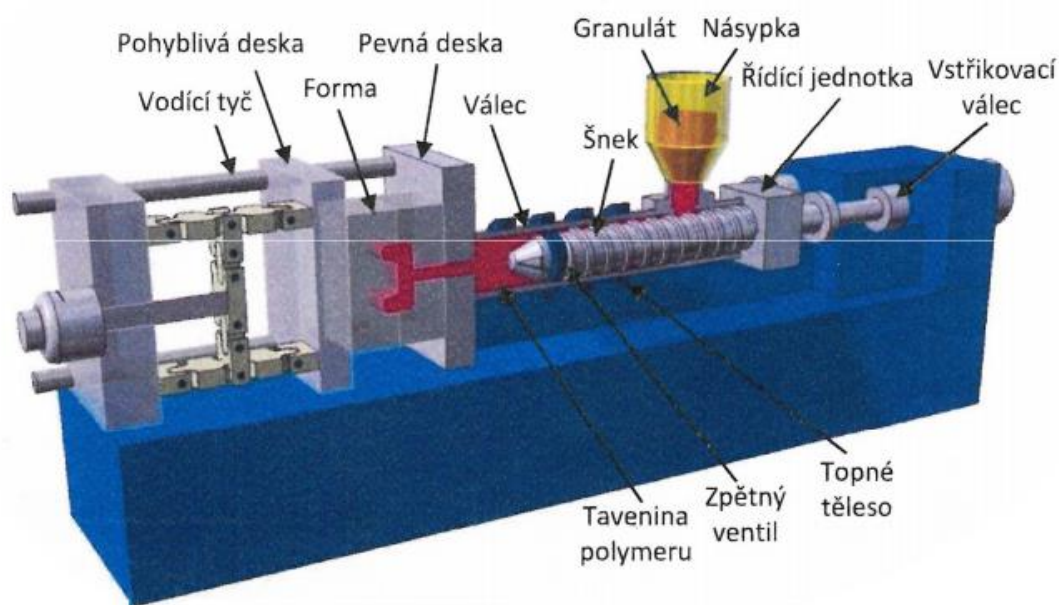
Jedním z důležitých bodů této práce je řešerše tak zvané metody up-scaling. Úkolem je analyzovat dostupné metody up-scaling, aby je bylo možné aplikovat na vstřikovací stroje a docílit tím zvětšení objemu výroby.

## TEORETICKÁ ČÁST

### 1. Vstřikovací lis a vstřikovací cyklus

#### 1.1. Vstřikovací lis

Vstřikovací lis je tvářecí stroj pro zpracování plastů metodou vstřikování roztaveného termoplastu do formy. Jedná se o termodynamický cyklický proces. Materiál se dodává v granulátové formě nejčastěji čirý, nebo barevný. Barevného materiálu se dosáhne přidáním granulového barviva do směsi. Směs granulí se nasype do násypky, kde dochází v mnoha případech k sušení při teplotě až 150°C. Násypka ústí ve válcové komoře, ve které se otáčí šnek. Tento šnek nabírá granulát a přesouvá jej do plastifikační jednotky. V důsledku otáčení šneku dochází k promísení materiálu a také ke vzniku tlaku, což má za následek zvýšení teploty. Ve válci je umístěno topení, které zahřeje granulát na požadovanou teplotu vstřiku, jenž bývá v rozmezí od 150 °C do 400 °C. Když je materiál nahřátý a je nahromaděno požadované množství, vstříkne se do dutiny formy při tlaku až 250 MPa. Forma je zároveň nástrojem a je nutné ji ochlazovat, aby vstříknutá tavenina rychle zchladla. Konstrukční řešení vstřikovacího lisu zachycuje Obr. 1 [1].



Obr. 1: Konstrukční řešení vstřikovacího stroje [1]

Předpokladem kvalitní výroby je stabilita procesu, kterou je třeba zajistit identickým průběhem každého následujícího vstřikovacího cyklu, jako byl cyklus předchozí.

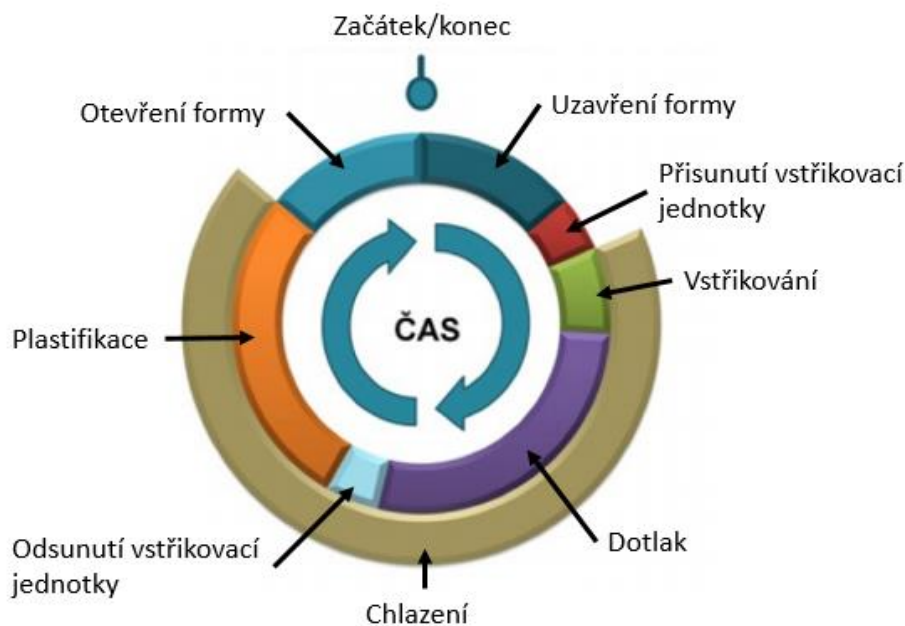
Bezprostředně po vyhození výrobku z formy, lze jeho kvalitu určit jedině měřením hmotnosti vystříknuté dávky. Z toho vyplývá, že ukazatelem stability procesu plastifikace jsou do jisté míry naměřené hodnoty hmotnosti [2].

### **Periferní zařízení**

Technologie vstřikování vyžaduje kromě samotného vstřikovacího lisu ještě další zařízení, která jsou nutná pro danou technologii. Záleží na individuálních požadavcích každého výstřiku. Mezi periferní zařízení patří například: stroje pro sušení granulátu, temperační zařízení, dávkovač aditiv, dopravníky, roboty, manipulátory, mlýny a kontrolní zařízení. Předpokladem výroby s danou jakostí je správná volba periferního zařízení. Pokud je stanoven požadovaný přehřev formy na určitou teplotu, je třeba zvolit temperační zařízení s dostatečným výkonem [2].

### **1.2. Vstřikovací cyklus**

Vstřikovací cyklus dělíme z pravidla do pěti fází, každá fáze má určitý vliv na kvalitu výrobku. Základní předpoklady pro výrobu výstřiku jsou popsány v následujících odstavcích. Obecně lze říci, že u výstřiků se předpokládají co možná nejlepší izotropní vlastnosti. Technologické vlastnosti výstřiku ovlivňují parametry, jako jsou například materiál výstřiku, tvar formy a její materiál, plastifikace, plnění, přechod z fáze tlaku na fázi dotlaku, samotný dotlak a také ochlazování formy. Na Obr. 2 je znázorněno přibližné časové rozhraní jednotlivých činností, probíhajících během celého vstřikovacího cyklu. Největší časový podíl na celém cyklu zaujímá zhruba ze dvou třetin fáze chlazení, což je dáno z technologickými důvody. Zkrácení doby chlazení způsobí nedostatečné ztuhnutí výstřiku a při jeho vyhození z formy ven, může dojít k jeho poškození. Více v kapitole Ochlazovací fáze [2].



Obr. 2: Časové rozdělení vstřikovacího cyklu [3]

### Plastikační fáze

Optimální naplnění dutiny formy zajistí viskozitní a teplotní stejnorodost taveniny nahromaděné před čelem šneku. Teplota taveniny má významný vliv na uspořádání makromolekul v dutině formy. Čím vyšší je teplota, tím větší smrštění výstřiku vznikne, ale zároveň je nižší uspořádání makromolekul, vlastnosti výstřiku jsou izotropnější, vnitřní pnutí se sníží a zvýší se pevnost studených spojů. Mezi další parametry, které ovlivňují plastifikaci patří otáčky šneku a zpětný odpor taveniny [2] [4].

### Vstřikovací fáze

Při plnění dutiny je třeba zajistit teplotně homogenní taveninu, ideální teplotu formy, správnou viskozitu taveniny a také to, aby se čelo toku taveniny pohybovalo konstantně v každém místě průřezu dutiny. Dále je třeba dodržet rychlost plnění tak, aby spolu s teplotou taveniny nezpůsobovala na povrchu výstřiku smyková napětí. Čím je vstřikovací rychlost pomalejší, tím rychleji probíhá ochlazování čela taveniny v dutině formy, což podporuje růst orientace a anizotropní vlastnosti v některých místech výstřiku [2].

### **Přechodová fáze mezi tlakem a dotlakem**

Mezi další parametry, které ovlivňují vstřikovací fázi patří přechod mezi fází tlaku a dotlaku. Tento přechod musí proběhnout plynuje bez projevení tlakové odezvy. To znamená, že se nesmí projevit tlakový propad ani výrazné zvýšení tlaku. Dutina formy by tedy měla být správně naplněna ještě předtím, než začne působit dotlak. Tím dosáhneme co možná největších izotropních vlastností a snížíme tak vnitřní pnutí [2] [4].

### **Dotlaková fáze**

Tato fáze slouží ke korekci smrštění a deformací, k dokonalejšímu zkopírování povrchu tvarové dutiny formy. Dále se dotlaková fáze využívá k odstranění propadlin, trhlin a lunkrů. Pokud je dotlak příliš intenzivní, zvyšuje se pnutí uvnitř výstřiku a proces je tak neekonomický a neefektivní, protože se čerpadlo zbytečně udržuje v chodu. Dotlak se musí zvolit tak, aby se dosáhlo požadovaných rozměrů, hmotnosti a tvaru výstřiku. Dotlakovou fázi lze kontrolovat metodou tak zvaného polštáře, která spočívá v tom, že po výstřiku zůstane před čelem šneku určité množství taveniny a pokud se množství taveniny pohybuje v průběhu výroby v daném tolerančním rozmezí, znamená to, že vstřikovací proces je stabilní a je možné ho bez problému reprodukovat [2].

### **Ochlazovací fáze**

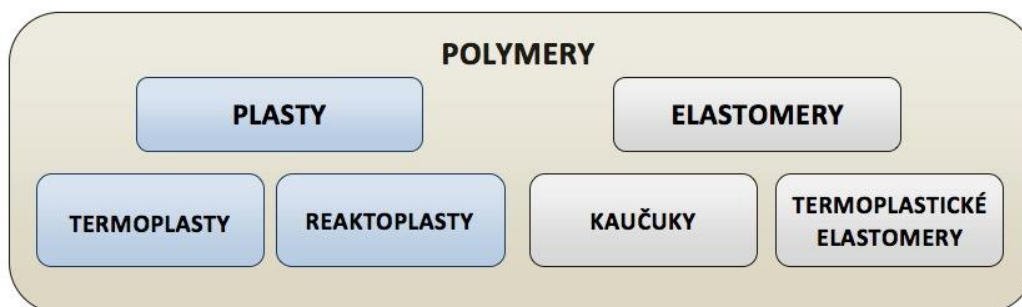
Ochlazování výstřiku začíná momentem naplnění dutiny taveninou a končí při vyhození výstřiku z formy ven, k čemuž dochází po zmrazení vtokového ústí. Pojem chlazení zařazujeme do ochlazovací fáze a uskutečňuje se v momentě skončení dotlakové fáze. Hlavními parametry v ochlazovací fázi jsou teplota formy a doba ochlazování. Čas, po který ochlazujeme, musí zaručit dostatečnou tuhost výstřiku, tak aby byl bez deformací, nebo aby při vyhození výstřiku z formy ven nedošlo k vytvoření vady. Rychlost ochlazování definuje relaxační jevy, které bezprostředně rozhodují o několika faktorech výstřiku například: rozložení orientace, jakostní stupeň, vnitřní pnutí a krystalická struktura. Čím pomaleji ochlazování trvá, tím větší je smrštění a obsah krystalického podílu. Vyšší teplota formy pozitivně ovlivňuje povrchový lesk a kvalitu povrchu výstřiku. Správná optimalizace ochlazování značně ovlivňuje ekonomii výroby. Z ekonomického hlediska,

by měla být doba ochlazování co nejkratší, ale z hlediska kvality výstřiku by měla být co možná nejdelší [2].

## 2. Termoplasty vyztužené skleněnými vlákny

### 2.1. Termoplasty

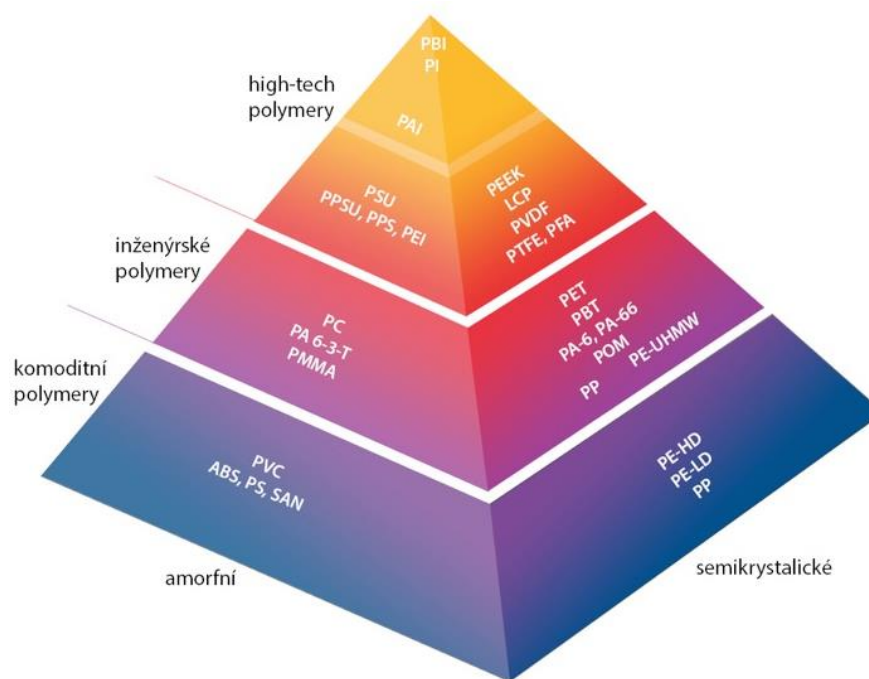
Termoplasty zauímají ze skupiny polymerních materiálů největší podíl. Termoplasty jsou charakteristické chemickým složením, které má vliv na navlhavost, polaritu, stárnutí, chemickou odolnost, hustotu, pevnost, houževnatost a na další vlastnosti. Na Obr. 3 je vidět přehledné rozdělení polymerů [5].



Obr. 3: Rozdělení polymerů [5]

Termoplastické materiály při zahřátí měknou a je možné je v tomto plastickém stavu tvářet. Při překročení teploty tání vzniká tavenina a při zpětném ochlazení pod tento bod, přejde tavenina zpět do pevného stavu. Ohřátím termoplastického materiálu nevznikne chemická reakce, ani se nezmění chemická struktura, změní se však fyzikální charakter. Tento proces ohřátí a ochlazení je vratný a teoreticky jej lze opakovat bez omezení [5].

Termoplasty mají amorfni, nebo semikrystalickou strukturu. Je možné je rozdělit na komoditní (standartní), inženýrské (konstrukční) a high-tech (speciální) polymery. Mezi amorfni termoplasty patří například polyvinylchlorid (PVC), polymethyl-methakrylát (PMMA), polystyren (PS), polykarbonát (PC) a další. Do skupiny semikrystalických termoplastů patří například polyamid 6 (PA6), polyethylen (PE), polypropylen (PP), polyethylentereftalát (PET), polyoxymethylen (POM) a řada dalších. Přehled základních termoplastů a jejich rozdělení je zobrazeno na Obr. 4 [5].



Obr. 4: Rozdělení základních termoplastů [5]

## 2.2. Plniva

Do termoplastů lze přidávat velké množství aditiv s dominantním zastoupením plniva mezi které patří například skelná vlákna, karbonová vlákna, kevlarová vlákna, balotina, další plniva a jejich kombinace. Dále je možné přidávat do termoplastů aditiva na zvýšení tepelné a rázové odolnosti, mazadla, aditiva na zvýšení odolnosti proti UV záření a aditiva na zvýšení různých mechanických vlastností [2].

## 2.3. Polyamidy

Termoplastů je velké množství druhů a jejich využití je velmi široké, ale v této diplomové práci se budu dále věnovat hlavně polyamidům vyztuženými skleněnými vlákny.

Polyamidy patří do skupiny částečně krystalických termoplastů a jsou označované zkratkou PA. Podíl krystalických látek je v rozsahu 20 až 40 %. Jedná se o neprůhledné polymery, ale v případě potlačení krystalinity jsou transparentní [2]. Jsou charakterizovány dobrými hodnotami těchto vlastností: tuhost, pevnost, výrazná mez kluzu, rázová a vrubová houževnatost. Při nízkých teplotách pod bodem mrazu roste hodnota modulu pružnosti a pevnosti. Polyamidy jsou náchylné na creep a relaxaci napětí. Významnými



vlastnostmi jsou velmi dobrá odolnost proti otěru, tedy nízký sklon k opotřebení, a nízký koeficient tření [6].

Polyamidy jsou chemicky odolné vůči klasickým rozpouštědlům, olejům a tukům. To ale neplatí při kontaktu s koncentrovanou kyselinou a silnou zásadou. Rovněž nejsou odolné vůči glykolům a příliš horké vodě. Dále pak mají malou odolnost proti UV záření, které způsobuje u bílého materiálu žloutnutí. Polyamidy mají dobrou stálost rozměrů při zatížení. Provozní teplota použití se pohybuje od -40 do +80 °C, krátkodobě je možné použití až do 125 °C. Teplota tavení se uvádí okolo 300 °C [6] [7].

V případě polyamidů s vysokým obsahem plniv, je možné nahradit tímto kompozitem materiály, jako jsou například hliník (Al), zinek (Zn) nebo hořčík (Mg) [8].

Přidáním skelných vláken do polyamidu jako plniva, se výrazně zvýší tyto vlastnosti: tuhost, mechanická pevnost, tvrdost, houževnatost a mez tečení. Další užitečné vlastnosti tohoto kompozitu jsou například zvýšená únavová pevnost, relativně dobrá rozměrová stabilita, velmi dobré mechanické tlumení a nízká měrná hmotnost. Přidáním skelných vláken zvýšíme tepelnou odolnost materiálu až do teploty 130 °C. Polyamidy se skelnými vlákny jsou díky svým vlastnostem ideální pro technické použití a řadí se mezi nejdůležitější technické materiály. Nevýhodou skelných vláken je, že vykazují určité abrazivní účinky. Proto není vhodné používat tento kompozit na aplikace, ve kterých dochází ke kluznému tření, protože by se materiál vydřel [8] [9].

Polyamidy spadající do skupiny částečně krystalických polymerů a mají z této skupiny největší afinitu k vodě. Mají polární povahu, což způsobuje vysokou navlhavost [5]. Krystalický podíl má vliv na rychlost sorpce vody do polyamidů a platí, že s rostoucím podílem krystalické složky je difúze vody pomalejší. Navlhavost a nasákavost se řídí podle čísla označení daného polyamidu, které určuje podíl nepolárních metylénových skupin. Platí zde, že s rostoucím číslem klesá navlhavost a nasákavost. Jako příklad tohoto jevu je níže uvedena Tabulka 1 vybraných polymerů [2].

*Tabulka 1: Navlhavost a nasákavost vybraných polyamidů [2]*

Polyamid	Navlhavost na vzduchu – T = 20 °C, relativní vlhkost = 65 %	Nasákavost ve vodě – T = 20 °C
PA 6	3 až 3,5 %	9 až 11 %

PA 66	2,8 až 3,2 %	7,5 až 9 %
PA 11	cca 1 %	cca 2,5 %
PA 12	cca 0,75 %	cca 2,3 %

V některých materiálových listech se uvádí fyzikálně-mechanické hodnoty v suchém stavu a ve stavu po kondicionaci, příklad je vidět v následující Tabulka 2. Při použití určitého druhu polyamidu na konkrétní aplikaci, je nezbytné brát ohled na suchý a kondicionovaný stav materiálu, neboť je rozdílný [2].

*Tabulka 2: Fyzikálně-mechanické vlastnosti PA 6 a PA 66 v suchém stavu a po kondicionaci [2]*

Vlastnost	Jednotky	PA 6		PA 66	
		Suchý stav	Kondicionovaný stav	Suchý stav	Kondicionovaný stav
Modul pružnosti	MPa	2800	1200	3200	1300
Napětí v tahu	MPa	65	40	85	55
Prodloužení	%	4	20	4,5	20
Vrubová houževnatost	kJ*m <sup>2</sup>	15	20	60	200

Na následujících obrázcích jsou znázorněny příklady dílů a součástí používaných v automobilového průmyslu. Tyto díly jsou vyrobeny z polyamidů vyztuženými skleněnými vlákny. Jako příklad uvedu alespoň některé z nich: olejové vany, různé kryty, moduly a pouzdra, pedály, potrubí, rukojeť dveří, zrcátka a mnoho dalších komponent.



*Obr. 5: Vzduchový a olejový sací modul [10]*



*Obr. 6: olejová vana [10]*



Obr. 7: Kryt olejového filtru [10]



Obr. 8: Olejový senzor [10]



Obr. 9: Rukojeť dveří [10]



Obr. 10: Podpěra momentové tyče [10]



Obr. 11: Sací potrubí [10]



Obr. 12: Pouzdro termostatu [10]



Obr. 13: Přenosový nosník [10]

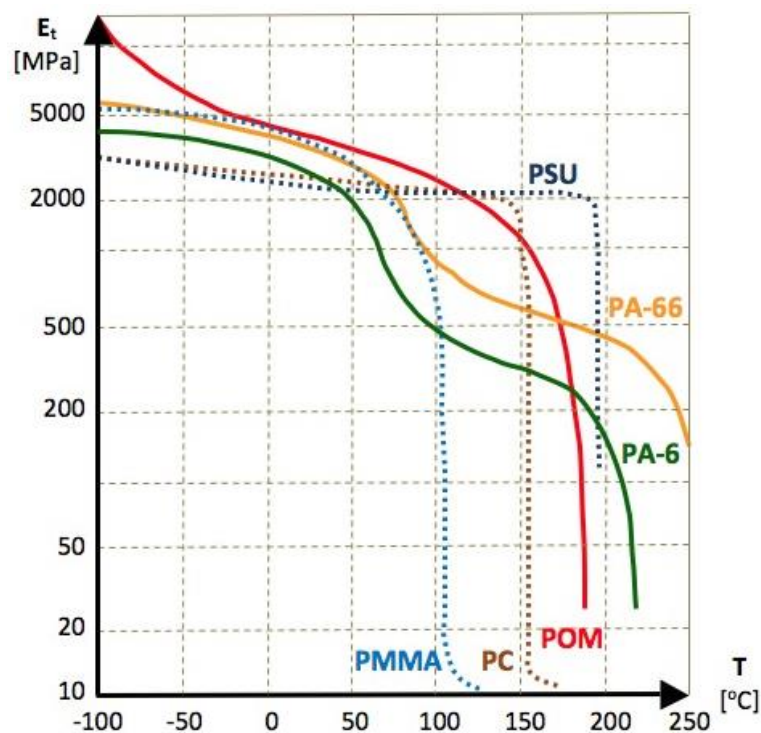


Obr. 14: Potrubí chladící vody [10]

### 2.3.1. Termodynamické vlastnosti – Přechodové teploty

Termoplastické materiály se mohou vyskytovat ve čtyřech fyzikálních stavech, které jsou závislé na teplotě. V určité oblasti teplot se stavy mění velmi rychle, nebo dokonce skokově. Změny modulu pružnosti v závislosti na teplotě jsou pro vybrané termoplasty zobrazeny na Obr. 15 [5].

K amorfním termoplastům řadíme tyto fyzikální stavy: sklovitý, kaučukovitý a kapalný, respektive plastický stav. Kaučukový stav v podstatě odpovídá tavenině, kterou můžeme lehce deformovat. Je to přechodový stav na rozmezí mezi sklovitým a kapalným stavem. Pro semikrystalické termoplasty je významný krystalický stav, který se značí pravidelným uspořádáním makromolekul. Semikrystalické termoplasty jsou charakteristické teplotou tání  $T_m$  a pro neuspořádané amorfní termoplasty je charakteristická teplota skelného přechodu  $T_g$  a teplota viskózního toku  $T_f$  [2].



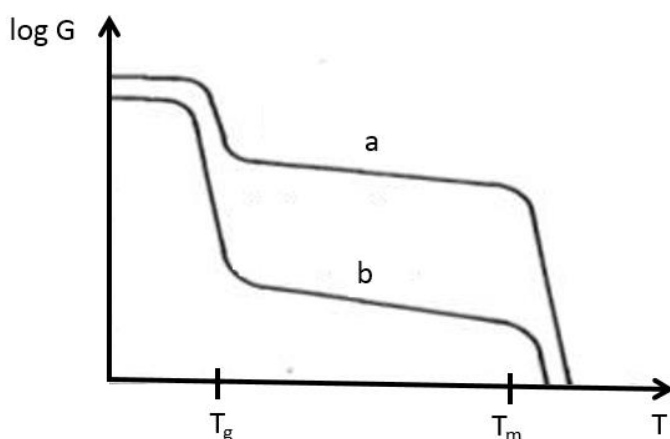
Obr. 15: Závislost modulu pružnosti na teplotě pro vybrané termoplasty; amorfní: PMMA, PC, PSU; semikrystalické: POM, PA-6, PA-66 [5]

Teplota tání  $T_m$  u semikrystalických termoplastů, udává přechod mezi pevným a plastickým stavem (taveninou). Považuje se tedy za hraniční teplotu použitelnosti v případě, že výrobek není mechanicky namáhaný [5]. Jedná se o oblast, ve které se rozpadá krystalická struktura termoplastu. Nad teplotou  $T_m$  se vyskytuje oblast, jenž je určena

Vstřikování plastů vyztužených skleněnými vlákny a jejich použití v automobilovém průmyslu

ke zpracování semikrystalických termoplastů pomocí technologií vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním a tak podobně. Hodnota teploty tání je závislá na velikosti makromolekul a také na velikosti sil, které mezi sebou působí [5]. Probíhá zde náhlá změna stavu, jejíž rychlost se zvyšuje se zvyšujícím obsahem krystalického podílu a naopak [11].

Termoplasty s vysokým obsahem krystalického podílu nevykazují téměř žádný kaučukovitý stav, proběhne u nich v podstatě okamžitě přechod z pevného do kapalného stavu. Pro čistě krystalické polymery platí, že moment pro vyhození výstřiku z formy je pod teplotou tání  $T_m$ . Pokud krystalický materiál obsahuje zároveň částečně amorfní podíl, platí pro takový termoplast, že vyhození z formy je nad teplotou skelného přechodu  $T_g$  [2]. Semikrystalické termoplasty si udržují dobré technické vlastnosti v rozmezí přechodových teplot  $T_g$  a  $T_m$ , což je způsobeno velkými mezimolekulárními silami v krystalitech, respektive krystalickým podílem v termoplastu. Rozdíl v rychlosti změny fyzikálního stavu pro termoplasty s nízkým a vysokým podílem krystalinity je zobrazen na Obr. 16, který zároveň zobrazuje vliv závislosti modulu pružnosti na teplotě [11].

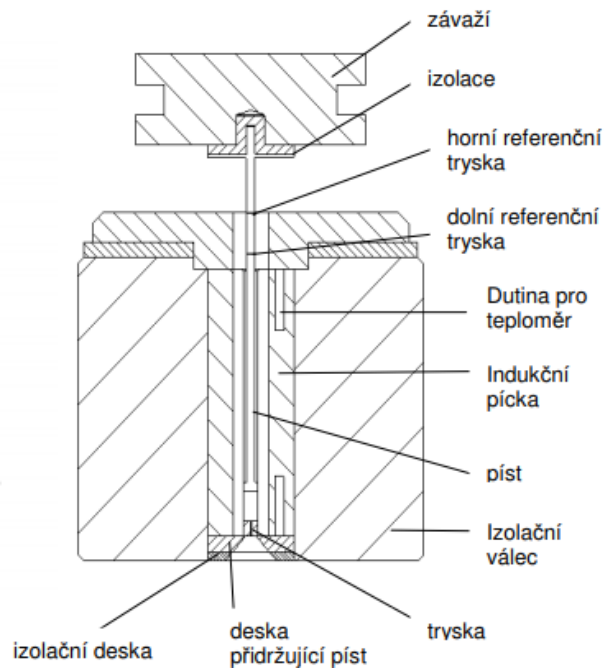


Obr. 16: Vliv stupně krystalinity na modul pružnosti ve smyku v závislosti na teplotě:  
a) vysoký stupeň krystalinity, b) nízký stupeň krystalinity [11]

U semikrystalického materiálu se mimo jiné určuje zpracovatelská teplota, což je hodnota, při které se dosahuje tak zvané malé viskozity a materiál lze tvářet. Tato teplota je dána vztahem  $T_m + 70\text{ °C}$  [2].

### 2.3.2. Index toku taveniny a viskozita taveniny

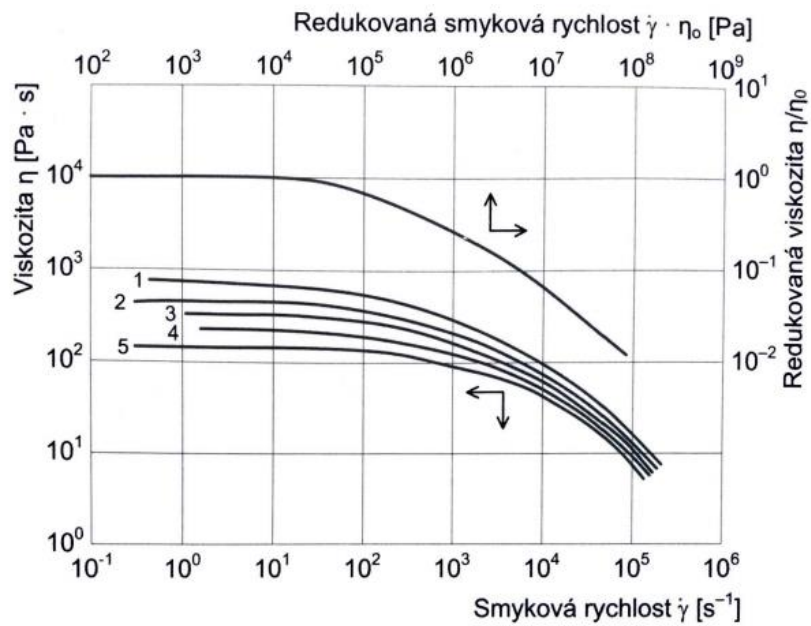
Termoplastické taveniny popisuje mimo viskozity také index toku taveniny značený ITT, jenž má vliv na míru tekutosti taveniny. Tekutost závisí na délce makromolekul a v praxi se určuje buď vědecky, nebo technologicky. Vědecky se tekutost určuje pomocí střední molární hmotnosti a technologicky pomocí indexu toku taveniny [5]. Tato charakteristika se určuje pomocí kapilárního viskozimetru, jehož schéma je vidět na Obr. 17. Index toku taveniny odpovídá hmotnosti nebo objemu materiálu, který proteče normovanou tryskou během 10 minut při určitém zatížení a teplotě. Jedná se o ukazatel kvality, viskozity a molekulové hmotnosti termoplastu. Vypovídá o tokových vlastnostech plněných a neplněných termoplastů. S rostoucí hodnotou indexu toku taveniny klesá viskozita a molekulová hmotnost polymeru a obráceně [2] [12].



Obr. 17: Schéma přístroje na měření indexu toku taveniny [12]

Viskozita taveniny je základní vlastnost termoplastických materiálů, která má zásadní vliv na odpor taveniny proti tečení. S vyšší viskozitou je odpor proti tečení větší a tavenina hůře teče. Toto pravidlo platí i v opačném případě. Na Obr. 18 jsou jako příklad zobrazeny viskózní křivky PA 6, které se obdrží měřením viskozity.

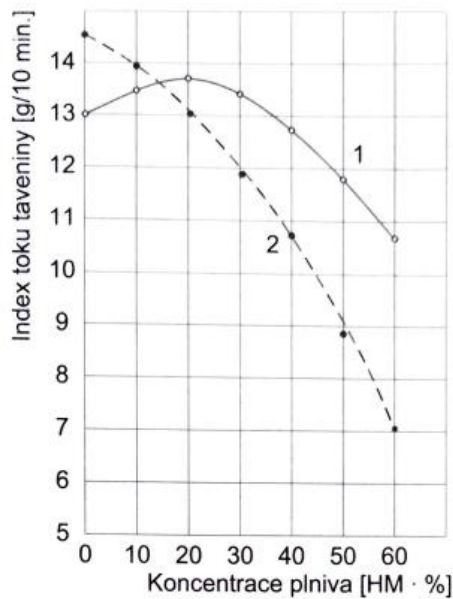
Na Obr. 19 je znázorněn vliv obsahu plniva mikromletého vápence obsaženého v materiálu PP v závislosti na indexu toku taveniny – ITT [2].



$T = 1 - 230\text{ }^{\circ}\text{C}, 2 - 240\text{ }^{\circ}\text{C}, 3 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}, 4 - 265\text{ }^{\circ}\text{C}, 5 - 280\text{ }^{\circ}\text{C}$

Horní křivka vyjadřuje závislost redukované viskozity  $\eta/\eta_0$  na redukované smykové rychlosti  $\dot{\gamma} \cdot \eta_0$  a platí pro všechny uvedené  $T$ .

Obr. 18: Viskózní křivky materiálu PA 6 pro vybrané teploty od 230 °C do 280 °C [2]



Závislost hmotnostního (1) a objemového (2) indexu toku taveniny PP plněného mikromletým vápencem ( $\text{CaCO}_3$ ) na jeho obsahu – měřeno při zatížení  $N = 49,03\text{ [N]}$  a teplotě  $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$   
ITT [g/10 min.] 49,03/230

$$\text{ITT [cm}^3\text{/10 min.]} \text{ objemový} = \frac{\text{ITT [g/10 min.]} \text{ hmotnostní}}{\text{specifická hmotnost vstříkovaného materiálu [g/cm}^3\text{]}}$$

hmotnostní ITT – pro neplněné materiály

objemový ITT – pro kompozity

Čím je ITT vyšší, tím je i tekutost vstříkovaného materiálu vyšší.

Obr. 19: Vliv koncentrace plniva na index toku taveniny [2]

### 3. Zpracování polyamidu se skelnými vlákny (PA-GF)

Vstřikování polyamidů je velmi komplexní proces, protože tento materiál vykazuje některé nepříjemné vlastnosti, které zhoršují jeho zpracování. Zásadní je jeho navlhavost, kvůli které se musí materiál před použitím sušit. Další vlastností je nízký koeficient tření, který v plastifikační jednotce způsobuje odvalování granulátu a nedochází tak k ideálnímu natavení materiálu [2].

#### Poznámky k sušení polyamidů

- Polyamidy jsou velmi náchylné na navlhnutí, jsou středně až silně navlhavé. Rovnovážný obsah vody v polyamidech je více než 2 %.
- Přítomnost vody v granulátu má značný vliv na vlastnosti výstřiků, jako je například: nízká tuhost a pevnost, rozměrové a tvarové vady, vyšší houževnatost.
- Proces kondicionace napomáhá k získání požadovaných vlastností a v jeho důsledku se zvýší hmotnost výstřiku zhruba o 3 %.
- Delší doba sušení než přibližně 8 hodin na suchém vzduchu způsobuje snížení tekutosti materiálu, žloutnutí nebo změnu odstínu granulátu.
- Maximální přípustná hodnota vlhkosti PA při vstřikování je 0,2 %. Většina výrobců dodává polyamid v hermeticky uzavřených obalech s vlhkostí menší než 0,1 %.
- Podmínkou sušení polyamidů je suchý vzduch.
- Pro PA 6 a PA 66 se obvykle předepisuje teplota sušení 80 °C po dobu 4 až 8 hodin.
- Navlhání polyamidů je vratný proces, což znamená, že po vysušení a vystříknutí, dochází k opětovnému navlhání výrobku [2].

#### Poznámky ke vstřikování polyamidů

- Krystalinita závisí na nastavení technologických těchto parametrů: teplota taveniny, teplota formy, vstřikovací tlak a dotlak.
- Maximální doba výdrže na teplotě taveniny je maximálně 20 minut.
- Obvodová rychlost šneku by měla být maximálně 120 mm/s, při vyšších rychlostech by totiž mohlo dojít k degradaci skelných vláken.



- Vstřikovací rychlost se nastavuje co možná největší, aby se dosáhlo dobré jakosti povrchu.
- Předpokladem kvalitního povrchu a optimálního procesu jsou nízké hodnoty zpětného odporu a vysoké rychlosti vstřikování.
- U polyamidů s vysokým obsahem plniv je třeba dodržet tyto podmínky: průřez ústí vtoku je minimálně 0,8krát tloušťka stěny a velikost rozvodových kanálů je 1,4krát maximální tloušťka stěny. Tyto podmínky snižují stupeň degradace skelných vláken.
- Eliminace délky skelných vláken dosáhneme nastavením plochého teplotního profilu v topných zónách, včetně oblasti pod násypkou, ve které by měla být vysoká teplota. Toto opatření snižuje namáhání šneku na krut, zabrání snížení mechanických vlastností a redukuje potenciální abrazi mezi taveninou a komorou, případně mezi taveninou a šnekem.
- Je vhodné vyhnout se dlouhým tryskám, ve kterých by mohlo bez výkonného topení docházet k zamrznutí taveniny.
- Při krátkodobém přerušení výroby je třeba snížit teplotu tání alespoň o 30 °C.
- Deformace polyamidů s vláknitými plnivými je dána anizotropií smrštění. Vodorovné a kolmé smrštění je dáno orientací vláken, jenž vznikne při plnění formy. Smrštění ve vodorovném směru je malé a v kolmém směru velké. Vzniklé napětí je možné snížit pomocí kondicionace.
- Doporučuje se zachovat stejnou tloušťku stěny v celém výstřiku [2].

### **Kondicionace**

Kondicionace je výrobní proces využívající difúzní mechanismus vody. Aplikuje se na výstřiky v suchém stavu, tedy ve stavu po vyhození z formy, kdy jsou výstřiky křehké. Jedním z cílů tohoto procesu je získání specifických vlastností výstřiků, kterých v suchém stavu nedosahují. Dalším cílem je vyrovnání obsahu vlhkosti tak, aby její hodnota odpovídala rovnovážnému stavu nasycení. Během kondicionace se zvyšuje podíl krystalizace, čímž se zvýší hustota výstřiku. Tento proces se provádí převážně v teplé vodě o teplotě nejčastěji 40 °C, nebo 80 °C. Obecně platí, že s vyšší teplotou je proces kratší [2].

V důsledku difúze vody do výrobků, dochází u polymerů ke změně tvaru a rozměru a v případě termoplastického materiálu způsobí obsah vody změnu mechanických vlastností například tuhost, pevnost, houževnatost. Absorpce vody není v celém výstřiku rovnoměrná, protože záleží na rozmístění aditiv ve výstřiku a v případě vláknitých aditiv záleží na jejich orientaci. Rovnoměrnost rozložení absorpce záleží na tloušťce stěny, obsahu krystalické fáze a na geometrii a struktuře výstřiku. Kondicionace v podstatě kompenzuje vady vzniklé smrštěním a dosmrštěním, ovšem změny v rozměru jsou anizotropní, záleží na směru vláken. V kolmém směru jsou změny výrazné a v podélném směru jsou téměř zanedbatelné. Obecně můžeme říci, že s rostoucím obsahem plniv, je míra navlhavosti materiálu menší [2].

#### **4. Technologické podmínky pro stabilitu procesu**

Kvalitní termoplastický výstřik se určuje podle stavu, ve kterém se nachází zhruba 24 hodin po vyhození z formy a po relaxaci. Stav výstřiku popisují následující vlastnosti:

- stupeň makromolekul a jejich orientace, orientace vyztužujícího plniva
- různé druhy vnitřního pnutí (velikost a rozložení)
- obsah krystalické fáze u semikrystalických termoplastů a velikost a rozložení sférolitů [2].

V následujících kapitolách jsou podrobně rozepsány parametry, jenž mají zásadní vliv na zpracování polyamidu a na stabilní proces.

##### **4.1. Sušení termoplastů**

Problematická vlastnost většiny termoplastů je schopnost přijímat, nebo uvolňovat nízkomolekulární látky. Jedná se o vratný proces probíhající difúzním mechanismem. V případě přítomnosti materiálu na vzduchu mluvíme o navlhavosti a v případě přítomnosti materiálu ve vodě mluvíme o nasákavosti. Velmi důležitým parametrem při vstřikování termoplastů je obsah vlhkosti v granulátu. Přítomnost vody v granulátu způsobuje výrobku řadu problémů například: snížení mechanických vlastností, povrchové vady, degradace materiálu, přítomnost bublin, změnu hmotnosti a objemu, vyšší tekutost a další.

Před započítím výroby provádíme sušení granulátu na potřebnou hodnotu vlhkosti, což je předpokladem pro dosažení požadovaných vlastností a jakosti výrobku [2].

Ve specifických případech je určitá míra vlhkosti žádoucí, neboť zvýší některé vlastnosti materiálu například houževnatost. Zvyšování vlhkosti se provádí po vystříknutí procesem tak zvané kondicionace. Tímto procesem dosáhneme rovnovážného stavu výstřiku vzhledem k teplotě a vlhkosti okolí. Kondicionace trvá řádově desítky hodin, ale je možné ji urychlit použitím klimatizačních komor, zvýšením teploty a relativní vlhkosti prostředí [2].

Granulát je možné dodávat ve vysušeném stavu, který lze rovnou použít pro výrobu. Nicméně po otevření obalu, nesmí přímý kontakt granulátu s okolím trvat příliš dlouho, jinak by došlo k jeho navlhnutí a bylo by třeba jej vysušit před dalším použitím. Sušení granulátu je založeno na principu sušení vzduchem [2].

Parametry ovlivňující sušení:

- Teplota sušení udávána výrobcem se musí během procesu sušení vyskytovat na povrchu granulátu, nikoliv na regulátoru. Obecně můžeme říci, že s vyšší teplotou dochází ke snadnějšímu uvolňování molekul vody z polymerního řetězce.
- Rosný bod je teplota, při níž je vzduch maximálně nasycen vodními parami – je to v podstatě míra vlhkosti vzduchu. Se zvyšujícím se rosným bodem, roste i vlhkost vzduchu neboli s rostoucí teplotou vzduchu, roste jeho schopnost nasycení vodní párou. Voda kondenzuje, pokud teplota klesne pod teplotu rosného bodu. Sušením granulátu docílíme snížení rosného bodu v rozsahu od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Platí, že čím je teplota rosného bodu nižší, tím vyšší je spotřeba energie. Navíc nízký rosný bod zvyšuje zátěž polymeru.
- Doba sušení se počítá okamžikem, kdy se granulát ohřeje na pracovní sušící teplotu. Doba musí být dostatečná, aby se voda z granulí dostala na povrch odkud ji absorbuje suchý ohřátý vzduch. Granulát je nutné ohřát na příslušnou sušící teplotu.
- Průtok vzduchu má dvě funkce: odvádí absorbovanou vlhkost granulátu mimo násypku a přivádí teplo ze sušárny do zásobníku. [2]

Sušárny se obvykle dělí do pěti skupin:

- Sušárny s nenucenou cirkulací ohřátého vzduchu
- Sušárny s vynucenou cirkulací ohřátého vzduchu
- Sušárny s vynucenou cirkulací suchého ohřátého vzduchu
- Sušárny podtlakové
- Sušárny tlakovzdušné [2]

#### 4.2. Plastifikace

V plastikační jednotce dochází k přípravě taveniny, která by měla být v ideálním případě homogenní a bez vzduchových bublin. Taveninu připravuje šnek, který je charakterizován dvěma parametry: poměrem délky k průměru a kompresním poměrem. Hodnota poměru délky k průměru se pohybuje zhruba od 1:18 až 1:23. Kompresní poměr označuje vztah mezi objemem jednoho závitu šneku na špičce ku jednomu závitů v místě násypky a jeho obvyklá hodnota je od 1:1,8 až 1:2,4 nejčastěji však 1:2. Pokud do granulátu přidáme plnivo např. skleněná vlákna, grafitová vlákna a tak dále, musí být šnek a komora odolná proti abrazi. V dnešní době jsou nejrozšířenější tak zvané univerzální šneky, které jsou schopné zpracovat téměř všechny druhy granulátu. Mezi speciální druhy patří například šnek s dvojitým chodem, který urychluje plastikaci, nebo šnek bez zpětného uzávěru na výrobu obalů [2].

Další nezbytný parametr je maximální přípustná kapacita. Tento parametr se určuje pro každou formu zvlášť a závisí na průměru šneku. Platí, že čím je větší maximální přípustná kapacita, tím menší je vstřikovací tlak před čelem šneku. Pro určení maximální přípustné kapacity se berou v úvahu tyto kritéria:

- Jedna zpracovaná dávka odpovídá velikosti zhruba 1–3 (4) krát průměr šneku. Menší či větší množství může při vstřikování způsobit problémy kvůli přítomnosti vzduchových bublin v tavenině
- Dávka o velikosti do 1krát průměr šneku je určena pro dekomprese a pro polštář
- Doba setrvání v plastikační komoře a objem taveniny v horkém rozvodu, by neměly překročit čas daný výrobcem, neboť může dojít k teplotnímu rozkladu vstřikovaného materiálu

- Plastikační komora je definovaná dobou cyklu, velikostí dávky a maximálním časem setrvání taveniny na teplotě zpracování [2].

#### 4.2.1. Otáčky šneku

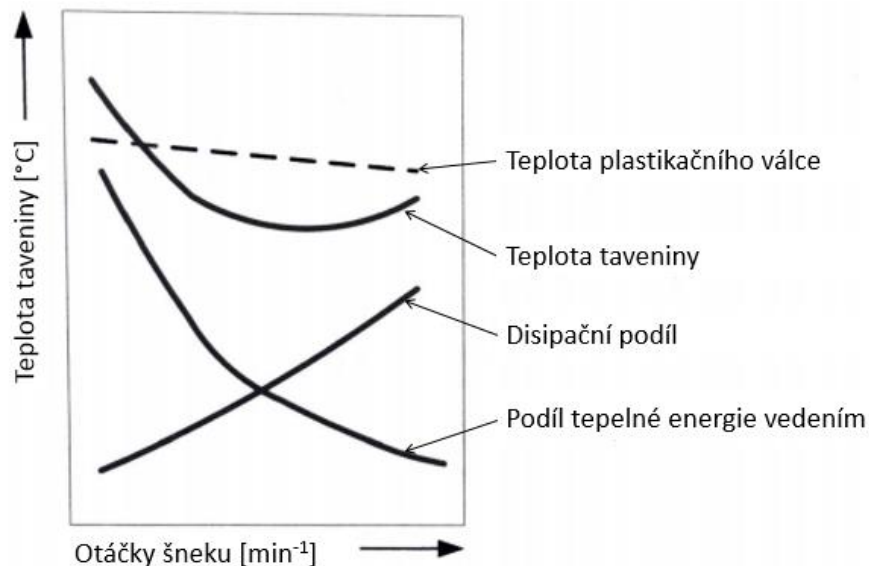
Otáčky šneku ovlivňují rychlost, se kterou se vstřikovaná dávka vytváří. Mají přímý vliv na plastikační proces a jejich kritériem je obvodová rychlost šneku. Rovnice 1 je vyjádřením vztahu pro výpočet otáček šneku

Rovnice 1

$$n_s = \frac{v_s}{\pi * D} * 60 \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

kde  $n_s$  jsou otáčky šneku uváděné v jednotkách otáček za minutu,  $v_s$  je obvodová rychlost šneku v milimetrech za sekundu a  $D$  je průměr šneku uvedený v milimetrech [2].

Z Obr. 20 je možné vyčíst průběh teploty v závislosti na počtu otáček šneku a také průběh disipační energie. Vyšší otáčky mají za následek zvýšení disipační energie, čímž dochází k vyrovnání teploty v dávce [2].



Obr. 20: Závislost mezi otáčkami šneku a teplotou taveniny [2]

Příliš vysoké otáčky šneku mají za následek například: tepelnou degradaci taveniny, degradaci aditiv a větší opotřebení povrchu plastikačního válce a šneku. Je tedy třeba dbát na to, aby se počet otáček šneku nacházel v přípustném rozmezí obvodové rychlosti šneku,

kteřé je od 50 až 300 mm\*s<sup>-1</sup>. Použití maximálních rychlostí je omezeno v případě použití aditiv, která mohou být citlivá na vysokou rychlost či na velký zpětný odpor [2].

#### **4.2.2. Teplota taveniny**

Teplota má obecně důležitou roli z pohledu procesních parametrů na teplotu hydraulického oleje, teplotu nástroje a teplotu taveniny, jenž je z hlediska plastifikace zásadní. Teplota taveniny má vliv na viskozitu a specifický objem, ale i na další termodynamické vlastnosti [13]. Řídí se pomocí topných pásů, které jsou umístěny okolo plastikační komory, jejich počet se liší podle typu vstřikovacího lisu viz Obr. 1: Konstrukční řešení vstřikovacího stroje [1].

S klesající teplotou roste viskozita, která způsobuje horší zpracovatelské vlastnosti, což má za následek nutnost zvýšení provozního tlaku a s tím související namáhání materiálu, vyšší vnitřní pnutí a další problémy. Vyšší hodnota viskozity může způsobit neúplné plnění dutiny formy, nebo vznik propadlin kvůli nedostatečně dlouhému dotlaku. Výhodou nízké teploty taveniny je, že se při chlazení odvádí menší množství tepla, což má za následek značné zkrácení výrobního cyklu. Zvýšení teploty taveniny způsobí zlepšení tekutosti, což má vliv na snížení velikosti smrštění výstřiku [13].

Obecně lze říci, že z praktických důvodů je účelné pracovat s konstantní teplotou, protože zvýšení, respektive snížení teploty na topných pásích trvá relativně dlouho. Výhodnější je pro rychlou optimalizaci změnit jiný procesní parametr například zpětný odpor na šneku, nebo rychlost otáček šneku [2].

#### **4.2.3. Zpětný odpor na šneku**

Zpětný odpor na šneku je v podstatě systémový tlak. V důsledku otáčení šneku vzniká tření, což způsobuje zpětný odpor. Jedná se o tlak, respektive protitlak, působící v opačném směru pohybu šneku. Velikost tření závisí na typu použitého granulátu. Tento parametr lze během plastifikace regulovat škrcením odtoku oleje z hydraulického válce. Je-li zpětný odpor nastaven na vyšší hodnotu, než kterou je tření schopno dosáhnout, šnek se neposunuje zpět. Je tedy třeba nastavit nižší hodnotu zpětného odporu. Jeho velikost je možné nastavit v různých místech dráhy tak, aby byla do taveniny přivedena příslušná energie neboli

teplota. Nižší tlak lze kompenzovat zvýšením teploty na topných tělesech, ale není to tak výhodné jako zvýšení zpětného odporu na šneku, protože vedení tepla je relativně zdoluhavý proces. Pokud začínáme výrobu, měli bychom začít s nastavením nízkých hodnot zpětného odporu, neboť záleží na viskozitě taveniny [2].

Vysoká hodnota zpětného odporu má tyto negativní vlastnosti:

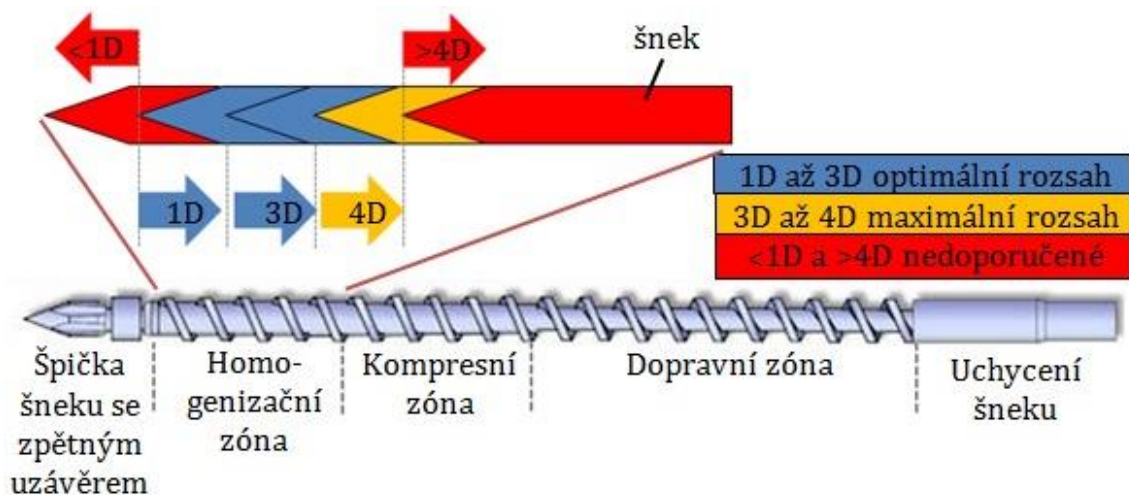
- Prodloužení dávkování a pokles plastikačního výkonu.
- U materiálů s vláknitými plnivými dochází ke snížení efektivity a zkrácení těchto aditiv (degradace).
- U tepelně citlivých materiálů dochází ke zkrácení k degradaci a snížení času výdrže na pracovní teplotě.

Využití zpětného odporu:

- Tepelná homogenizace taveniny znamená, že teplota taveniny před čelem šneku má v každém místě dávky stejnou hodnotu.
- Mechanická homogenizace taveniny je zrovnoměnění aditiv (plniva) v tavenině.
- Vytěsnění vzduchu z nataveného granulátu ven do násypky.
- Vyrovnání průběhu teploty, při které tavenina oxiduje [2].

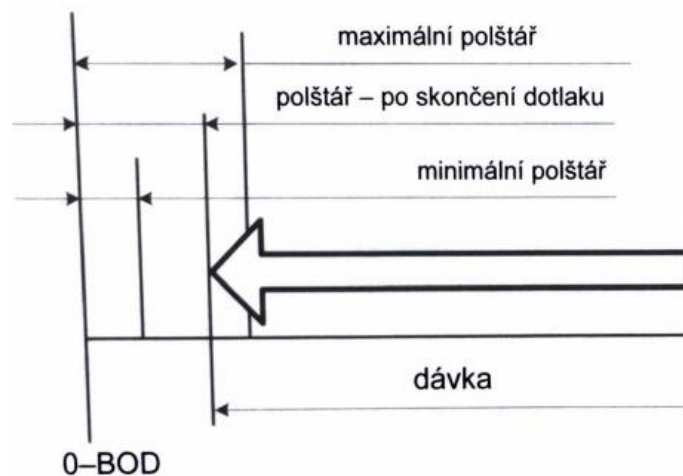
#### **4.2.4. Polštář**

Pojem polštář je označení pro objem taveniny, který se v rámci jednoho cyklu nespotřebuje, ale zbyde po fázi dotlaku před čelem šneku. Jedná se o kontrolní parametr, kterým lze vyhodnocovat reprodukovatelnost výroby – zda se dutina formy správně plní během každého cyklu. Pokud se šnek v každém cyklu posune o stejnou vzdálenost, můžeme říci, že proces je stabilní. Hodnota polštáře se odvíjí z několika důležitých parametrů, jedná se o viskozitu taveniny, plnění formy, velikost dotlakové fáze a funkčnost zpětného uzávěru na šneku. Z praxe víme, že jmenovitá velikost polštáře odpovídá zhruba 5 až 10 % velikosti vstřikované dávky. Na následujícím Obr. 21 je názorně zobrazeno rozdělení šneku a optimální rozsah velikosti polštáře [2].



Obr. 21: Rozdělení šneku a schéma optimální velikost dávky taveniny pro zpracování [13]

Princip kontroly polštáře spočívá ve stanovení tolerančních polí, díky kterým poznáme nedostříklé nebo přestříklé díly. Na Obr. 22 je tento princip schematicky znázorněn. Některé řídicí systémy jsou schopné velikost polštáře regulovat automaticky [2].



Obr. 22: Princip kontroly polštáře [2]

#### 4.2.5. Tryska

Tryska je nepostradatelnou součástí vstřikovacího stroje a má několik funkcí. Jednou z nich je propojení plastikační jednotky s formou což je rozebráno dále v 4.4 Forma a zobrazeno na Obr. 29. Účelem je, aby vstřikovací jednotka přesně dosedla na vtokovou vložku formy a byly v jedné ose. Jakmile tryska dosedne na vstřikovací vložku formy vyvodí



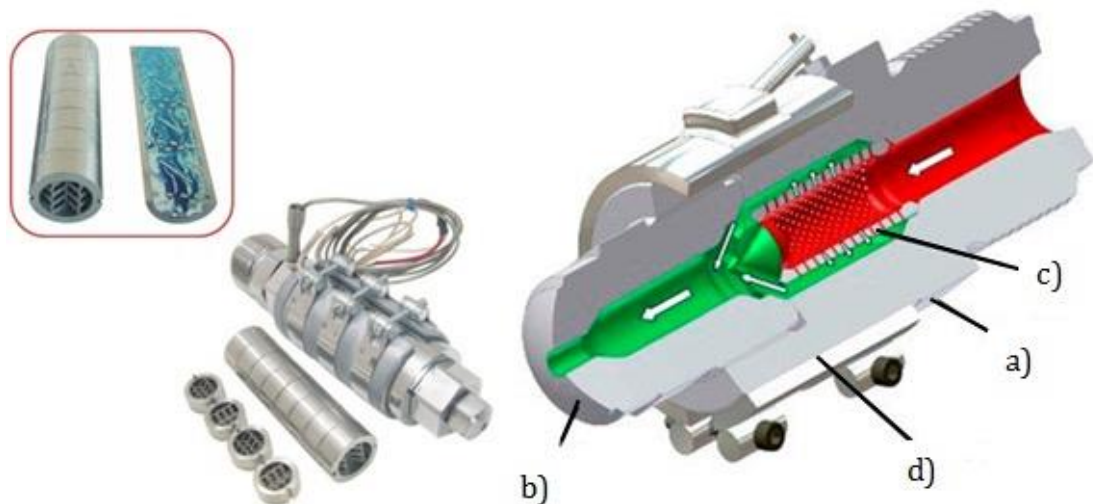
se přitlačná síla od vstřikovací jednotky. Přitlačná síla zabraňuje případnému úniku taveniny z tohoto rozhraní [13].

Špička trysky stejně jako dosedací plocha vtokové vložky je opatřena rádiusem. Rádus na trysce musí být menší než na dosedací ploše, aby se zabránilo vytékání taveniny v rozhraní. Mezi nejčastěji používané rádiusy patří 10, 15, 20 a 35 mm. V případě, že se používá tryska přímo na vstřikování v místě dělicí roviny, potom jsou rádiusy nežádoucí, protože by tryska působila jako klín. Místo toho se použije rovinná dosedací plocha [13].

Tryska má v sobě kanál, jenž musí splňovat podmínku plynulého toku taveniny a zamezit výrazným tlakovým ztrátám. Kanál je konstruován tak, že se směrem ke špičce rozšiřuje. Ideální délka trysky by měla být, pokud možno co nejkratší. Musí být ovšem pevnostně odolná jak na přitlak trysky na formu, tak i na intenzitu dotlaku taveniny. Tryska je k tavící komoře uchycena šrouby, nebo je konstrukčně řešena závitem, kterým se tryska zašroubuje do komory plastikační jednotky [13].

Tryska je vybavena vlastní topnou zónou, tak aby bylo možné kontrolovat a regulovat oblast trysky samostatně a předcházet případnému chladnutí taveniny v trysce. Ideální konstrukční řešení trysky je takové, že tepelný senzor je zaveden až do taveniny [13].

Tryska obsahuje v některých případech filtr, který má za úkol zabránit výskytu nečistot ve výstřiku a ochránit trysku před poškozením. Přítomnost nečistot je nejčastěji způsobena velkým obsahem regenerátu v granulátu tvořeným rozemletými zbytky vtokových soustav a zmetky. Pokud dojde k zanesení filtru trysky, klesne tlak taveniny, který je kontrolován tlakovým senzorem. V takovém případě je nutné filtr vyměnit za nový, nebo vyčistit. Konstrukční provedení umístění filtru musí být jednoduché, aby šel snadno a rychle vyměnit. Tryska může mimo jiné obsahovat vlastní mixážní element, který dodatečně promíchá protékající taveninu. Tato konstrukční řešení jsou vidět na Obr. 23 [13].



Obr. 23: Konstrukční provedení trysky s mixážními elementy (vlevo) a s přídavným filtrem (vpravo); a) tělo trysky, b) špička trysky, c) síto filtru, d) odporový topný pás [13].

Trysky se vyrábí ve dvou variantách a sice otevřené, nebo uzavřené. Otevřené trysky jsou konstrukčně jednodušší a využívají se častěji než uzavřené trysky. Uzavřené trysky jsou tvořeny buď tryskami s pružinou, nebo uzavírací jehlou. Pružina tlačí na pohyblivý člen trysky a jehla je aktivována buď mechanicky, nebo hydraulicky, v obou případech dojde k uzavření trysky [13].

### 4.3. Vstřikování

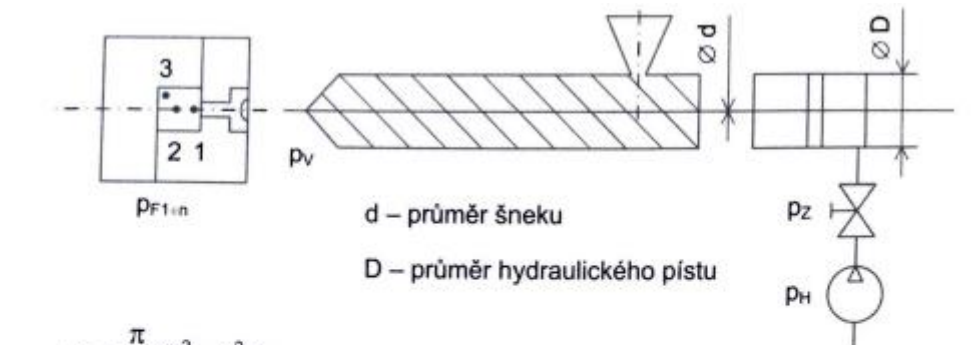
#### 4.3.1. Vstřikovací síly a tlaky

Pro vstřikovací stroj je v podstatě důležitější pravidelná údržba a čištění než konstrukční provedení, aby mohl optimálně pracovat. Nicméně správný výběr stroje s optimální silou a kapacitou plastifikační jednotky je také důležitý. Uzavírací síla garantuje, aby forma byla sevřena v dělicí rovině a vytvořila reakci na vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost. Na Obr. 24 je uveden vztah mezi jednotlivými typy tlaků, které jsou popsány níže:

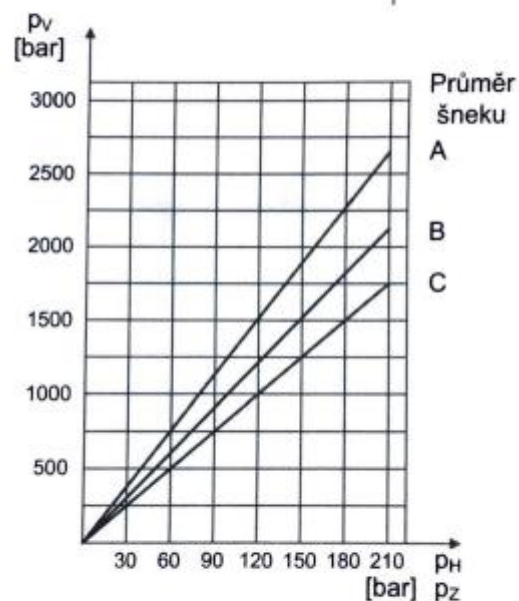
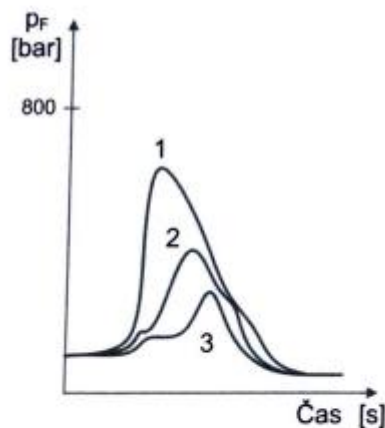
- Systémový tlak je tlak hydraulického systému a jeho hodnota se pohybuje okolo 140 až 270 barů.
- Tlak před čelem šneku je tlak potřebný na překonání odporů při vstřikování taveniny do dutiny, vznikající v tavenině před čelem šneku. Jeho hodnota se odvíjí od systémového tlaku a určí se pomocí průměrů šneku a pístu vstřikovacího válce.

Při nižším tlaku se sníží i vstřikovací rychlost a je třeba upravit poměr vstřikovací tlak – vstřikovací rychlost. Jedná se např. o hodnoty až 2800 barů i více.

- Tlak v dutině formy je tlak, který není konstantní v celé formě, na začátku ústí je větší a dále od něj se snižuje. Je závislý na složitosti, členitosti, délce kanálů, rozvodném systému formy a tak dále. Tento tlak dosahuje hodnot zhruba 200 až 900 barů [2].



$$p_v = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) p_H$$



$$\frac{D^2}{d^2} \cdot p_{\text{dotlak}} \leq p_{F \max} \leq \frac{\text{uzavírací síla vstřikovacího stroje}}{\text{průmětná plocha zdvihu do dělicí roviny formy}}$$

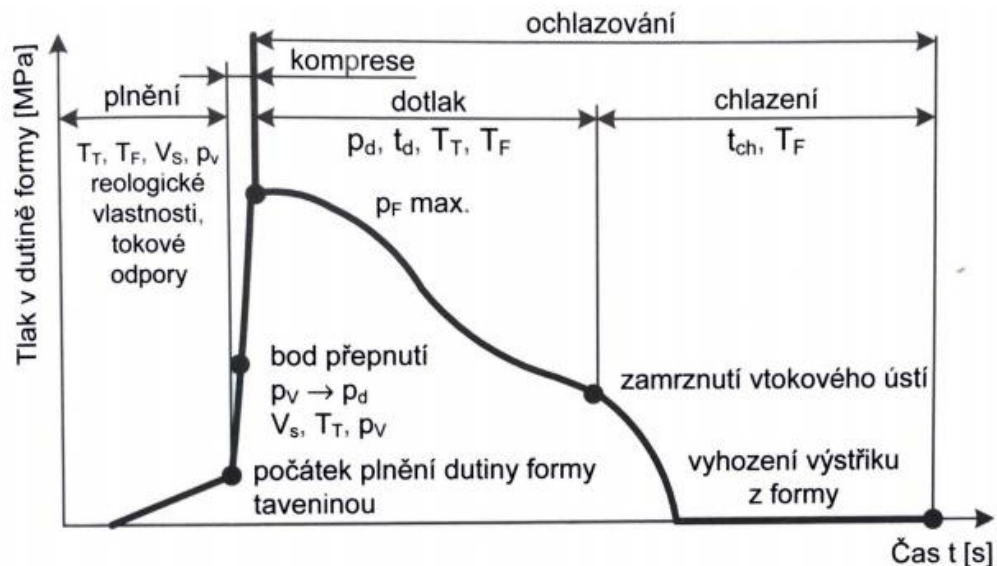
průměr šneku: A = 40 mm,  $p_v = 2678$  bar, B = 45 mm,  $p_v = 2116$  bar, C = 50 mm,  $p_v = 1714$  bar

$p_H$  – systémový hydraulický tlak,  $p_z$  – zpětný odpor,  $p_v$  – vstřikovací tlak,  $p_F$  – tlak v dutině formy

Obr. 24: Vztah mezi jednotlivými tlaky při vstřikování [2]

Maximální možný tlak v dutině formy určuje potřebnou uzavírací sílu vstřikovacího stroje. Tento tlak relativně přesně určí simulační programy. Dále lze tlak určit na základě délky toku taveniny, pomocí tloušťky stěny, nebo na základě typu granulátu a jeho

tekutosti. Obecně platí, že s rostoucí tloušťkou stěny se hodnota tlaku snižuje. V neposlední řadě můžeme tlak určit jako poměr síly působící na plochu. Na následujícím Obr. 25 je znázorněn průběh tlaku ve formě v závislosti na čase cyklu, mimo jiné jsou zde přehledně znázorněny fáze vstřikovacího cyklu [2].



*Vliv fází vstřikovacího cyklu:*

- plnění: *povrchové vlastnosti (vzhled), orientace*
- komprese: *dokonalost tvaru, při překročení  $p_{Fmax}$  – otřepy, přetoky, poškození formy*
- dotlak: *hmotnost, rozměry, vnitřní pnutí, při nízkém  $p_d$  – propadliny, lunkry*
- chlazení: *rozměry, krystalinitaa z ní odvozené vlastnosti*

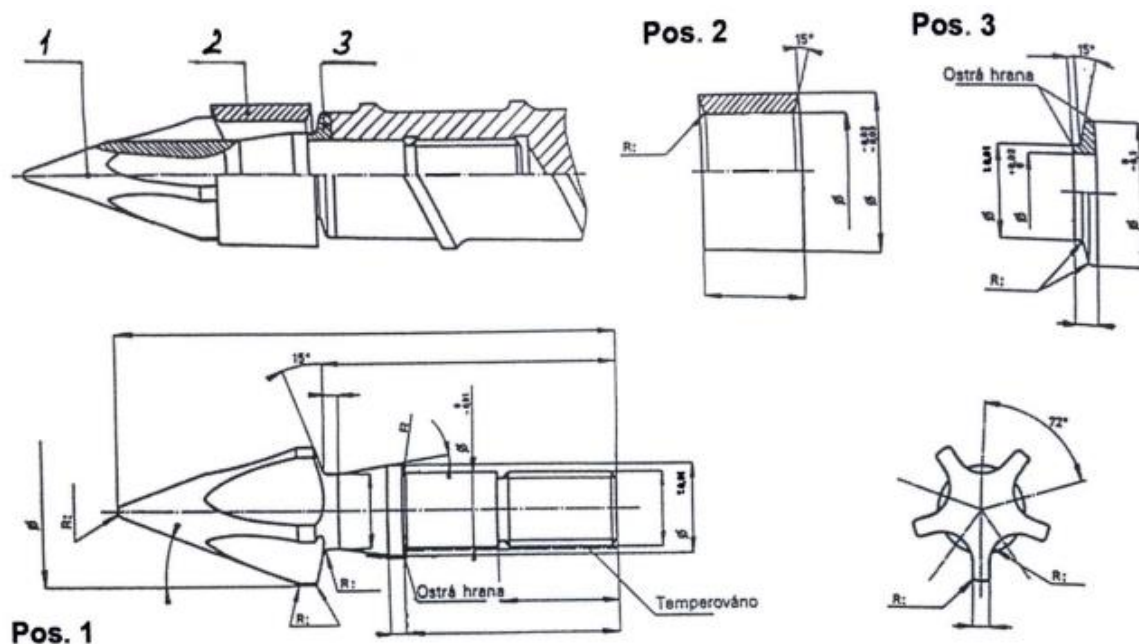
Obr. 25: Průběh tlaku ve formě a jednotlivé fáze cyklu [2]

#### 4.3.2. Zpětný uzávěr na šneku

Podstatnou funkcí plastifikační jednotky je, aby v každém cyklu dopravila do dutiny formy stejné množství taveniny, což je předpokladem stabilního procesu na výrobu výstřiků se stanovenou jakostí. Reprodukovatelnost parametrů výroby se kontroluje u prvních vystříknutých vzorků statistickou hodnotou  $C_{pk}$ , která se používá zejména v automobilovém průmyslu. Z hodnoty parametru  $C_{pk}$  vyplývá způsobilost celého procesu. K reprodukovatelnosti výroby je určen zpětný uzávěr na šneku, který lze považovat za jedno z nejdůležitějších konstrukčních zařízení vstřikovacího stroje. Pokud tento uzávěr

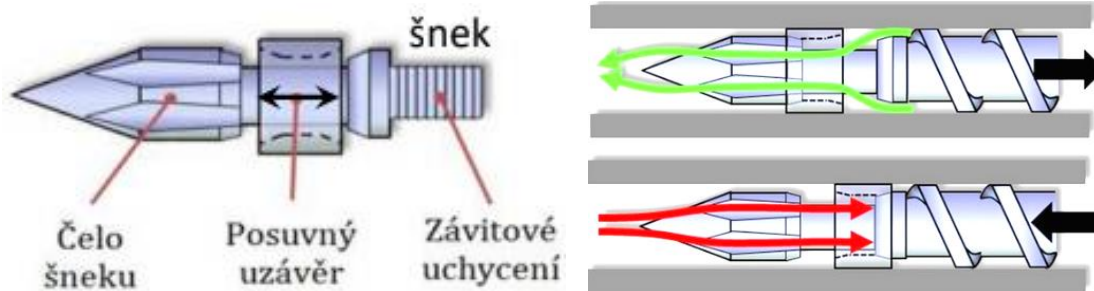
nefunguje správně, je v podstatě nemožné optimalizovat vstřikovací proces anebo dosáhnout požadované jakosti výrobku [2].

Na Obr. 26 je znázorněna jedna z mnoha konstrukčních řešení zpětného uzávěru, obvykle se používají posuvné kroužky. Posuvný kroužek – Pos. 2 se pohybuje mezi špičkou šneku – Pos. 1 a sedlem uzávěru – Pos. 3 [2].



Obr. 26: Zpětný uzávěr vstřikovacího stroje;  
Pos. 1 – špička šneku, Pos. 2 – posuvný kroužek, Pos. 3 – sedlo uzávěru [2]

V plastikační fázi se granulát taví a prostupuje šnekem směrem ke špičce díky rotaci šneku. Přitom odtlačí posuvný kroužek, aby se tavenina mohla hromadit před čelem šneku. Ve fázi vstřikování taveniny do dutiny formy, dochází k dopřednému pohybu šneku bez rotace. Odpor při toku taveniny způsobí, že se posuvný kroužek zarazí o sedlo uzávěru, čímž je uzavřen prostor, kde se nachází vstřikovaná tavenina, schématické znázornění je vidět na Obr. 27 [1] [2].

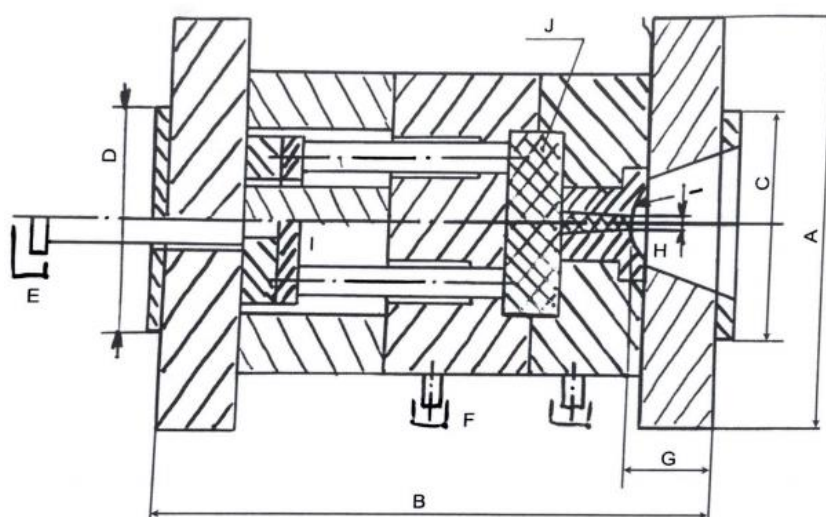


Obr. 27: Princip funkce zpětného uzávěru [13]

Pokud posuvný kroužek spolu se sedlem správně těsní, je zaručená reprodukovatelnost výroby a možnost optimalizace. V případě netěsnosti dosedacích ploch je možné, že tavenina pronikne zpět do prostoru šneku a do formy bude vstříknuta různě velká dávka taveniny. Pokud nastane takovýto problém, je třeba ihned vyměnit jak posuvný kroužek, tak i sedlo uzávěru [2].

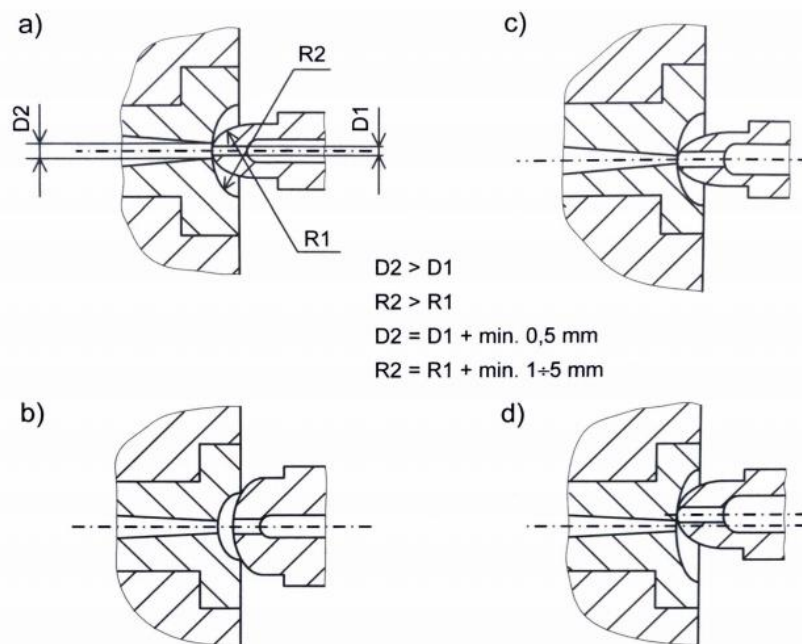
#### 4.4. Forma

Před započítím vstřikování do nové formy, nebo do formy, která se používala na jiném stroji, je důležité ověřit kompatibilitu mezi formou a vstřikovacím strojem. Důležité rozměry pro uchycení formy na vstřikovací stroj jsou na Obr. 28 a dále v textu jsou jednotlivé části formy A až J popsány [2].



Obr. 28: Rozměry formy potřebné při upínání na vstřikovací stroj [2]

- A. Upínací systém – obvodové rozměry formy, rozteč otvorů pro sloupy uzávěru a způsob fixace na upínací desky vstřikovacího stroje.
- B. Výška formy – volí se vzhledem k rozměrům výstřiku ve směru vyhazování. Na plochý výstřik stačí menší otevření, na hluboký výstřik je třeba velké otevření.
- C. Středící kroužek – upínací a středící otvor umístěný na pevné části formy. Slouží k upevnění a vystředění os formy a trysky.
- D. Středící kroužek – sjednocení os formy a vstřikovacího stroje.
- E. Spojení mezi vyhazovacím systémem formy a vstřikovacím systémem stroje.
- F. Výstup a vstup média – médium slouží k ohřev nebo chlazení formy, podle účelu se používá například kapalina, vzduch, olej, elektrická energie a další.
- G. Hloubka zapuštění trysky vstřikovacího.
- H. Kontaktní uzel mezi vtokovou vložkou a tryskou – na Obr. 29 je ukázáno jaké komplikace mohou při dosedu trysky nastat. Správná varianta spojení je na Obr. 29a, kde průměr výstupního kanálku trysky je menší než průměr vstupního kanálku formy. V ideálním případě se používá kulový dotyk, kdy se osa trysky vycentruje na osu formy. Druhý případ je použití čelního dotyku, který není tak výhodný jako dotyk kulových ploch. V každém případě je třeba zaručit styčné plochy bez vrypů a drážek, proti případnému uniknutí taveniny. Ostatní varianty spojení jsou špatné a nepředpokládá se u nich cyklická výroba. Na Obr. 29b jsou chybně zvoleny radiusy, takže na sebe styčné plochy nedosedají. Na Obr. 29c jsou špatně zvoleny vstupní a výstupní radiusy. Obr. 29d zobrazuje nesouosost formy a vstřikovací trysky, která je způsobená špatným seřizením stroje.



Obr. 29: Problematika dosedací geometrie trysky a formy [2]

- I. Rozpěrky – tuhost je důležitá obzvláště v blízkosti osy formy, protože v těchto místech dochází obvykle k největšímu tlaku od taveniny při plnění dutiny. Je dobré v těchto místech umístit rozpěrky, které při správném uchycení a zakotvení zabrání prohýbání desek a vzniku přetoků v dělicí rovině. Rozpěrky jsou standardně rozmístěny po obvodu formy.
- J. Objem dutiny, vtokové rozvody a plastifikační jednotka vstřikovací formy [2].

Z důvodu nestejnorození vstřikovacích forem, nelze stanovit obecný předpis, kterým by se řídily. Navíc zde působí lidský faktor v podobě seřizovače s technickým přístupem k nastavení strojních parametrů. Přesto je bezpodmínečně nutné snažit se na prvním místě o bezpečný provoz formy [2].

## 5. Rešerše dostupných metod pro Up-scaling

Vzhledem k referenčnímu stroji s určitou geometrií je cílem metod up-scaling definovat geometrii a provozní podmínky cíleného stroje odlišné velikosti, tak aby se zpracovávaný materiál vystavil stejným podmínkám, jako v referenčním stroji, čímž se získají produkty se stejnými vlastnostmi [14].



Up-scaling je proces definující geometrii anebo provozní podmínky stroje, který kopíruje pracovní podmínky jiného zařízení. Daný stroj zpracovává stejný materiál, je stejného typu, ale odlišné velikosti. Jedná se o velmi praktický postup. V případě vstřikování umožňuje proces up-scaling konstrukci velkých strojů, díky využití výsledků provedených studií v laboratorním měřítku. Na laboratorních zařízeních se zkoumají příslušné fyzikální, chemické, reologické a jiné jevy, které vznikají během provozu. Pravidla metod up-scaling mohou být také použita k extrapolaci výrobních strojů na laboratorní přístroje, díky čemuž je možné dosáhnout nižších nákladů, než kdyby se výrobní podmínky zkoumaly v průmyslovém měřítku. Následně musí být opět použita pravidla pro zvětšení, aby bylo možné aplikovat řešení nalezené během laboratorního zkoumání. Pravidla metody up-scaling se začala rozvíjet v druhé polovině 20. století [14].

Většina metod pro určení vzájemného vztahu používá analytický popis procesů tak zvané velké a malé primární proměnné mezi které patří: průměr šneku –  $D$ , hloubka šneku –  $H$ , délka šneku –  $L$  a otáčky šneku –  $N$ . Jako příklad lze uvést Rovnici 2, která popisuje vztah z hlediska exponentu poměru reference a průměru cílového šneku:

*Rovnice 2*

$$x = x_0 * d^\psi \quad (2)$$

kde  $x$  a  $x_0$  jsou velké a malé měřítkové proměnné,  $d$  je poměr průměru a  $\psi$  je měřítko pro danou procesní odezvu. Pro každý hlavní procesní parametr byly odvozeny vztahy typu Rovnice 2 [14].

Vzhledem k tomu, že vstřikování je složitý proces, který zahrnuje několik fází a proměnných, lze výše uvedený typ korelace uplatnit pouze za těchto podmínek:

- 1) jedno kritérium se zachová konstantní například rychlost šneku, nebo zpětný odpor;
- 2) část procesu se analyzuje;
- 3) předpokládá se zachování konstantních geometrických znaků například: poměr  $L/D$ , nebo  $L/H$  [14].

Pro metody up-scaling platí v současné době tyto pravidla:

- Je možné řešit pouze jedno kritérium, nebo pouze jednu procesní fázi například vybraný poměr, nebo bezrozměrné číslo, ovšem pokud jsou změněny dvě a více

charakteristik procesu, musí se použít jiná pravidla a musí být aplikována individuálně, což však může vést k protichůdným výsledkům.

- Je třeba vzít v úvahu pouze několik geometrických prvků, nebo provozních proměnných (D, H, L a N). Pokud však má být zkonstruován například větší šnek na základě dostupných údajů malého šneku, je třeba použít více geometrických prvků. Musí se definovat například úhel šroubovice, kompresní poměr, délka každé geometrické zóny a tak dále. Obvodová rychlost šneku však musí být zachována:  $u = \text{konstantní}$ .
- Pravidla procesu jsou založena na zjednodušených matematických vztazích, které mají omezenou kvantitativní prediktivní schopnost a nezachycují celkové chování stroje [14].

Složitější metody up-scaling jsou potřebné v případě, že se současně zvažuje několik změn procesních kritérií. Vzhledem k tomu, že jsou často v rozporu, určuje se, zda je konečný stupeň dostatečný.

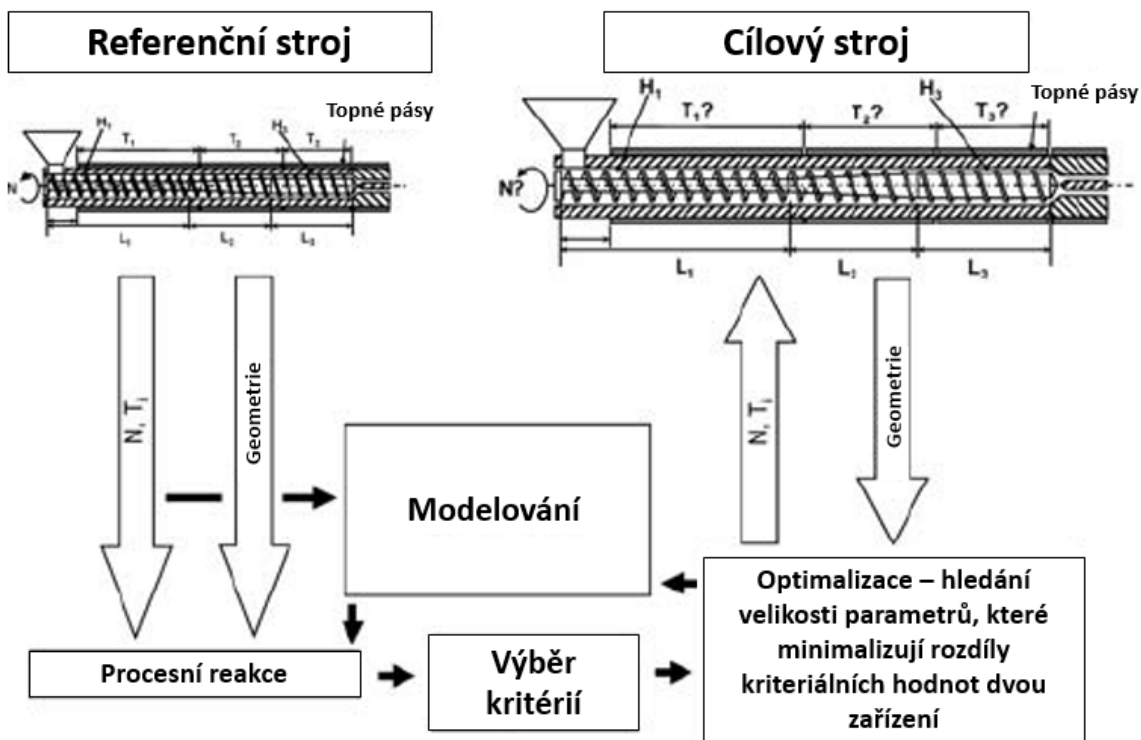
Up-scaling se považuje za problematiku optimalizace, který má za cíl definovat geometrii a provozní podmínky cílového stroje. Zároveň minimalizuje rozdíly mezi hodnotami vybraných parametrů a procesní odezvy referenčního a cílového stroje [14].

### **Optimalizace metody up-scaling**

Jak bylo popsáno výše, up-scaling spočívá v extrapolaci vlastností referenčního vstřikovacího stroje na jiný cílový stroj stejného druhu. Cílový vstřikovací stroj zpracovává stejný materiál, ale má různé rozměry [14].

V praxi známe geometrii a podmínky zpracování materiálu na referenčním stroji. Úkolem je definovat buď provozní podmínky cílového stroje, pokud existuje, nebo geometrii a zároveň provozní podmínky, pokud má být stroj navržený, nebo zakoupený. Důležité je definovat geometrii a provozní podmínky takovým způsobem, že si oba stroje budou co možná nejpodobnější [14].

Úkolem je určit geometrické anebo provozní podmínky cílového stroje, které minimalizují rozdíly ve výkonu vzhledem k referenčnímu stroji pro danou situaci zpracování. Řešení tohoto problému je popsáno v následujícím Obr. 30:



Obr. 30: Optimalizace up-scaling metody aplikované na provozní podmínky;  
 $N$  = otáčky šneku,  $T_i$  = teplota jednotlivých topných pásů [14]

Postup optimalizace při zvětšování:

- 1) Použije se běžný model vstřikování k určení odezvy referenčního stroje v souladu s provozními podmínkami.
- 2) Analyzují se výsledky a definují se nejdůležitější parametry pro up-scaling.
- 3) Rozdělí se dostupné informace o cílovém stroji podle geometrie – poměr průměru šroubu a délky, obvodová rychlost, teplota a další.
- 4) Proveďte se up-scaling při současné minimalizaci rozdílů ve výkonnosti obou strojů, které jsou charakterizovány kritérii optimalizace vybranými v kroku 2 [14].

Algoritmus vyhledá řešení a výsledky slouží jako vstupní data pro podprogram hodnocení kritérií. Data se dále porovnávají s ekvivalenty referenčního stroje a poté se hodnotí kvalita každého výstřiku. Současně se proces opakuje, dokud není dosaženo požadovaného kritéria [14].

### **Kritéria metod up-scaling**

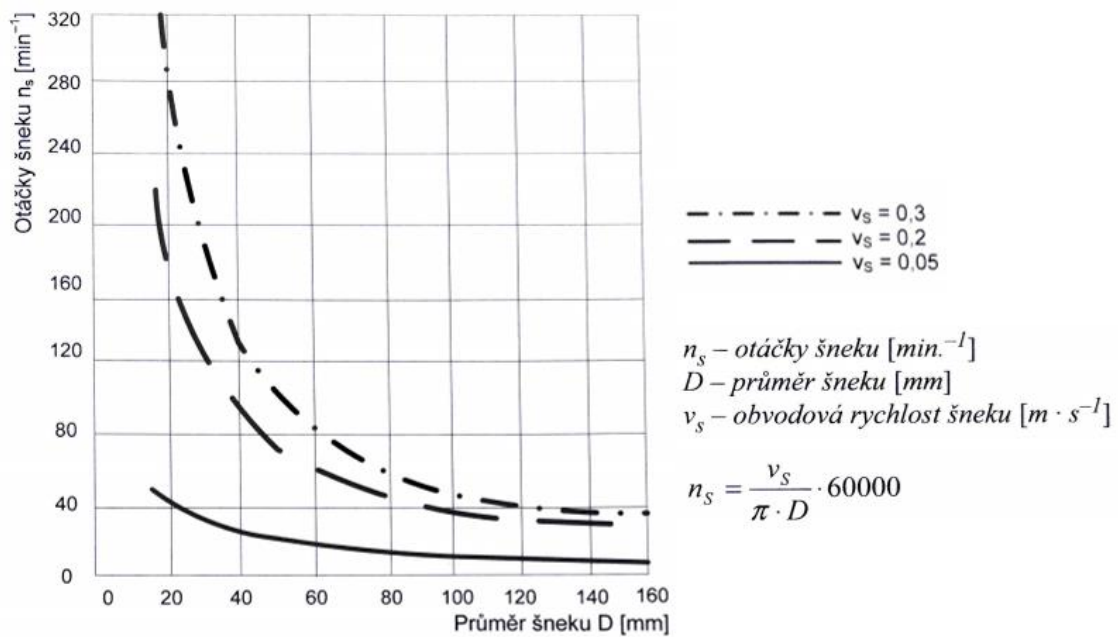
Úspěšné provedení procesu up-scaling závisí na přesném výběru kritérií, která mají být pro daný proces použita. Kritéria se vybírají podle účelu, pro který je metoda up-scaling určena, obecně platí, že má smysl vybrat nejrelevantnější kritéria. Mezi účely zvětšování patří například navrhování nových zařízení s vyšším výkonem, reprodukce laboratorních podmínek do průmyslových měřítek anebo naopak. Kritéria je možné vybrat z těchto tří skupin:

- kritéria přímo související s výkonem stroje;
- specifické aspekty vstřikování;
- bezrozměrná čísla (například: Reynoldsovo číslo, Brinkmanovo číslo a Graetzovo číslo) [14] [15].

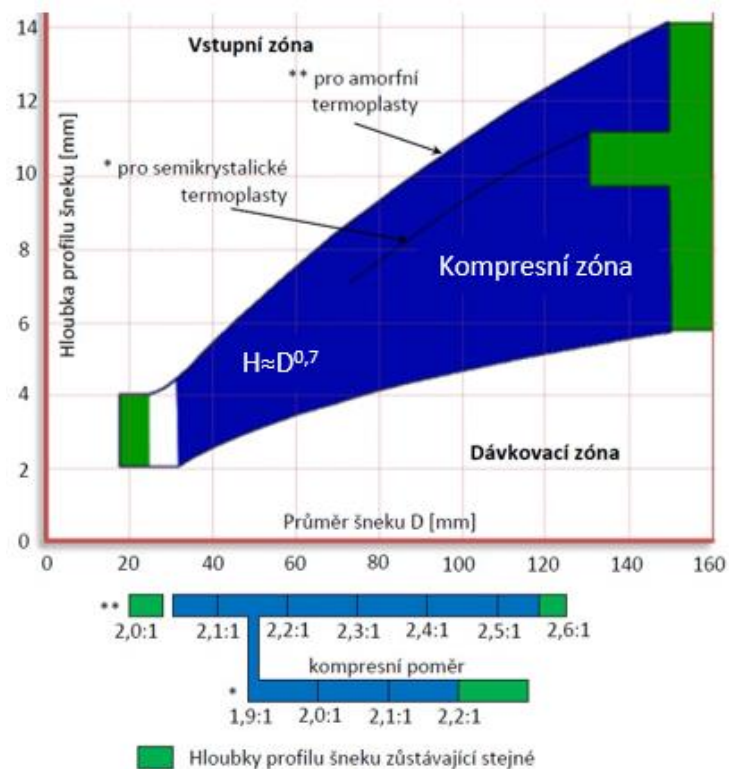
Vodítkem pro proces zvětšování bývá zpravidla počet vyráběných kusů během jednoho pracovního cyklu. Například stroj vyrobí v rámci jednoho pracovního cyklu jeden výlisek, ale cílem je vyrábět výlisků například deset. Prvky, které musí být nezbytně změněny pro dosažení úspěšné aplikace up-scaling jsou následující:

- 1) Geometrie formy
- 2) Hydraulický tlak
- 3) Plastikační jednotka

Problémem procesu up-scaling ovšem je, že závislost jednotlivých parametrů mezi referenčním a cíleným strojem není lineární. Ve většině případů bývá závislost vyjádřena exponenciální funkcí. Příklad takové závislosti je vidět na Obr. 31 nebo na Obr. 32 [2].



Obr. 31: Závislost mezi průměrem šneku o obvodovou rychlostí [2]



Obr. 32: Závislost mezi hloubkou závitů a průměrem šneku [13]

## PRAKTICKÁ ČÁST

### 6. Daný příklad

#### 6.1. Výrobní podmínky v laboratoři Fakulty strojní

V laboratoři fakulty strojní se nachází klasický horizontální vstřikovací lis s označením Arburg Allrounder 270 C Golden Edition od společnosti Arburg s.r.o. Tento stroj je zachycen na Obr. 33. Jeho konstrukce obsahuje všechny nezbytné součásti, které jsou popsány v kapitole 1 Vstřikovací lis a vstřikovací cyklus.



Obr. 33: Vstřikovací lis [16]

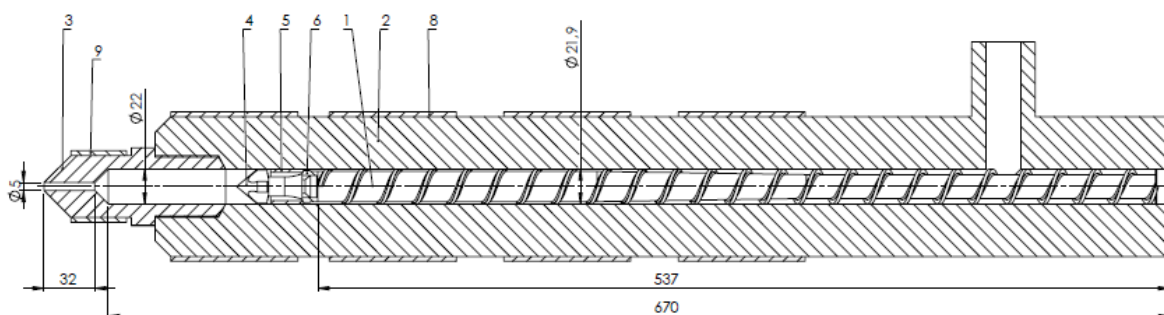
Následující Tabulka 3 popisuje základní vlastnosti školního vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C Golden Edition.

Tabulka 3: Základní vlastnosti stroje [17] [18]

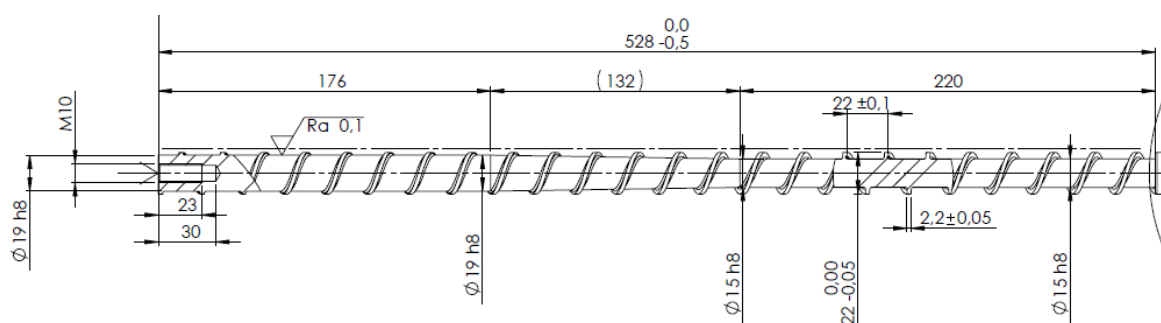
Velikost vstřikovací jednotky	70
Vzdálenost mezi vodícími sloupky	270 x 270 mm
Maximální objem zdvihu	34 cm <sup>3</sup>
Kompresní poměr šneku	1,3
Průměr šneku	22 mm
Poměr šneku L/D	20:1
Zdvih šneku	90 mm
Kroutící moment šneku	110 Nm
Uzavírací síla	400 kN

Maximální vstřikovací tlak	2000 bar
Pohon	Plně hydraulický

Možnou nevýhodou plastikačního šneku je jeho komprese, která se podle údajů společnosti EMS pohybuje na hraně požadované hodnoty pro zpracování PA-GF. Komprese je vlastnost šneku, která závisí na hloubce závitů. Čím je poměr drážky hlubší, tím je hodnota komprese vyšší. Řešením pro zlepšení technologických podmínek by tedy bylo vyměnit šnek za jiný s větším kompresním poměrem. Problematice hloubky závitů šneku se zabývá kapitola 8.2 Hypotéza 2: Hloubka dopravní zóny – velikost granulátu. Na Obr. 34 je vidět výkres sestavy plastikační komory s popisem nezbytných součástí a na Obr. 35 je výkres šneku vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C.



Obr. 34: Plastikační jednotka: 1 Šnek, 2 Válec, 3 Tryska, 4 Zpětný ventil, 5 Těsnící válec, 6 Těsnící kroužek, 8 Tepelné pásy velké, 9 Tepelný pás malý [16]



Obr. 35: Šnek vstřikovacího lisu Arburg Allrounder 270 C [16]

Nezbytnou součástí většiny vstřikovacích lisů je sušárna, o kterých se dočteme více v kapitole 4.1 Sušení termoplastů. Součástí školního stroje je sušárna PIOVAN DPA-6, viz. Obr. 36. Tento typ se řadí do kategorie sušáren s nuceným oběhem ohřátého suchého vzduchu. Jedná se o nejrozšířenější a nejpoužívanější druh sušárny, která je vhodná Vstřikování plastů vyztužených skleněnými vlákny a jejich použití v automobilovém průmyslu

pro vysoušení polyamidů. Při překročení sušící teploty je nutné vzduch ochladit, aby bylo možné z něj odčerpat vodu pomocí vysoušedla. Při manipulaci s materiálem je třeba použít ochranné rukavice, aby nedošlo ke kontaminaci materiálu mastnotou. Nezbytně nutné je také pravidelné čištění filtrů či jejich výměna, protože prachem zanesené filtry snižují účinnost sušení [2] [19].



Obr. 36: Sušárna PIOVAN DPA-6 [20]

### **Materiál**

Při provádění experimentů v laboratoři Fakulty strojní se použilo dvou druhů materiálu: Grilon TSG – 30/4 a ULTRAMID A3WG10.

#### **Grilon TSG – 30/4**

Obchodní označení tohoto materiálu představuje PA66 + PA6 – GF30, který je tvořen polyamidem 66 a polyamidem 6 s obsahem 30 hmotnostních procent skleněných vláken. Tabulka 4 popisuje základní hodnoty pro vstřikování doporučené výrobcem [21].

Tabulka 4: Strojní parametry vstřikování pro materiál Grilon TSG – 30/4 (PA66+PA6-GF30) [21]

Přípustný obsah vody	≤ 0,1 %
Teplota sušení	Max 80 °C
Doba sušení	4 – 12 hodin
Teplota taveniny	280 – 300 °C
Teplota formy	80 – 100 °C



## ULTRAMID A3WG10

V klasickém značení se tento materiál značí PA66-GF50, což je polyamid 66 s obsahem skleněných vláken, jenž zaujímají 50 hmotnostních procent. Tabulka 5 zobrazuje výrobcem doporučené hodnoty pro vstřikování tohoto materiálu [22].

Tabulka 5: Strojní parametry vstřikování pro materiál ULTRAMID A3WG10 (PA66-GF50) [22]

Přípustný obsah vody	Max. 0,15 %
Teplota sušení	80 °C
Doba sušení	4 hodiny
Teplota taveniny	280 – 305 °C
Teplota formy	80 – 90 °C
Doba setrvání na pracovní teplotě	Max. 10 minut

## 6.2. Výrobní podmínky v průmyslovém měřítku

### Lisovny

Průmyslovým společenstvem zabývajícím se zpracováním plastů, se říká lisovny. Tyto lisovny používají vstřikovací stroje různých velikostí, které musí být schopné zpracovat různé materiály a zvládat různé nástroje, na rozdíl od laboratorních podmínek popsaných v kapitole 6.1 Výrobní podmínky v laboratoři Fakulty strojní. Na Obr. 37 je zobrazena výrobní hala německé lisovny Kurz Kunststoff GmbH [1].



Obr. 37: Lisovna německé společnosti Kurz Kunststoff GmbH [1]

Lisovny jsou vysoce organizované podniky tvořené spoluprací dílčích jednotek, mezi které patří: dodavatel systému, dodavatel strojířny, strojířna, normalizované díly, nástrojářna (konstrukce forem), výrobce plastů, směšování plastů, zpracovatel plastů a další systémové složky. Nástrojářna je součástí zhruba každé třetí lisovny, ostatní dvě třetiny lisoven si nechává formy vyrobit na zakázku u specializovaných výrobců nástrojů [1].

### **Vstřikovací stroje**

Vstřikovací stroje se dělí podle základních funkčních parametrů, mezi které patří: vzdálenosti mezi vodicími sloupky, uzavírací síla, vstřikovací jednotky podle norem EUROMAP a hmotnost vstřikovací dávky [23]. Průmyslové vstřikovací stroje můžeme také rozdělit podle typu pohonu na:

- Hydraulické (hydraulické válce, motory a čerpadla)
- Elektrické (servomotory, lineární vedení)
- Hybridní – kombinují jak elektrický, tak i hydraulický systém pohonu

Každý z těchto systémů má své výhody i nevýhody [1].

Charakteristika elektrických pohonů:

- Vyšší účinnost
- Neobsahují hydraulický olej
- Dynamičtější pohyb, proto mají kratší cyklus
- Lepší reprodukovatelnost a vyšší kvalita výlisků
- Menší potřeba využití chladicí vody
- Nízká hlučnost

Charakteristika hydraulických pohonů:

- Nižší pořizovací cena
- Hydraulika pro vedlejší funkce
- Malý zastavěný prostor
- Vyšší špičkový výkon, a proto hydraulika obsahuje akumulátor tlaku [1]

Každý vstřikovacích stroj v sobě zahrnuje řídicí systém, který má za úkol řídit elektrické i hydraulické složky a zajistit správné parametry stroje. Měří výrobní parametry, uchovává je v paměti a umožňuje grafické programování.

Vstřikovací stroj v laboratoři Fakulty strojní, tedy Arburg Allrounder 270 C Golden Edition, patří mezi nejmenší zařízení z řady Golden Edition viz Tabulka 6. V průmyslovém měřítku se podle potřeby používají stroje větších rozměrů, než který je v laboratoři Fakulty strojní.

*Tabulka 6: Rozsah parametrů vstřikovacích strojů Arburg z řady Golden Edition [24]*

Vzdálenosti mezi vodicími sloupy:	270–570 mm
Uzavírací síly:	400–2 000 kN
Vstřikovací jednotky:	70–800

## **7. Nestabilita procesu zpracování PA-GF**

### **7.1. Popis problematiky zpracování PA-GF**

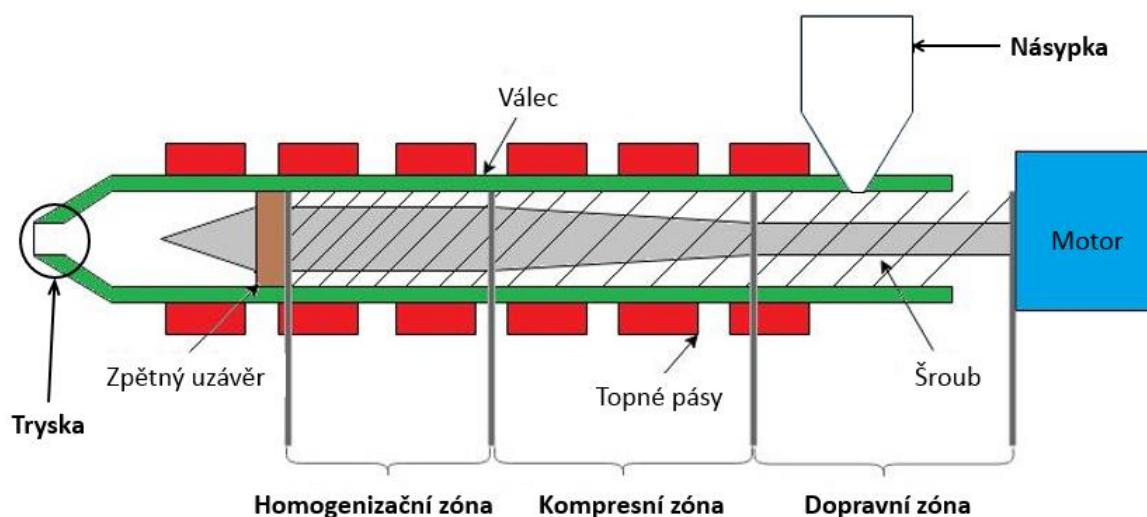
V laboratoři Fakulty strojní se provádí zkoušky vstřikování polyamidu se skelnými vlákny na vstřikovacím stroji Arburg. Hlavní problém spočívá v tom, že výroba zkušebních těles není cyklická, respektive proces plastifikace není stabilní. Problematický proces výroby probíhá následujícím způsobem:

1. Šnek nabere dávku.
2. Stroj se přepne do poloautomatického provozu.
3. První výstřik je pouze poloviční.
4. Objem další nabrané dávky šnekem je v pořádku.
5. Druhý výstřik je vyroben celý.
6. Další objem dávky je v pořádku, ale šnek není naplněn úplně.
7. Dutina formy se neplní, protože materiál není vstřikován.
8. Stroj se vypne a vstřikovací jednotka se odsune.
9. Vstřikovací tryska je ucpaná, ale po 5 vteřinách se materiál v trysce roztaví a začne vytékat ven [25].

Cílem praktické části práce je pokusit se vyřešit tento problém a optimalizovat výrobu vstřikovacího stroje tak, aby byl proces plastifikace stabilní a dutina formy se při každém cyklu plnila úplně, a nejen z části.

## 7.2. Úvahy k plastifikaci PA-GF

Než se z granulátu stane výrobek, musí projít plastikační jednotkou. Pro zpřehlednění cesty granulátu strojem je rozdělena plastikační jednotka do šesti částí. V následujících kapitolách je popsáno, co se s granulátem v jednotlivých částech děje. Jsou zde uvedena případná rizika, která by mohla narušit stabilitu procesu plastifikace a zároveň je také uveden návrh na řešení těchto problematických míst. Na Obr. 38 je tučným písmem znázorněno rozdělení plastikační jednotky na části, které jsou popořadě seřazeny takto: násypka, dopravní zóna, kompresní zóna, homogenizační zóna a tryska.



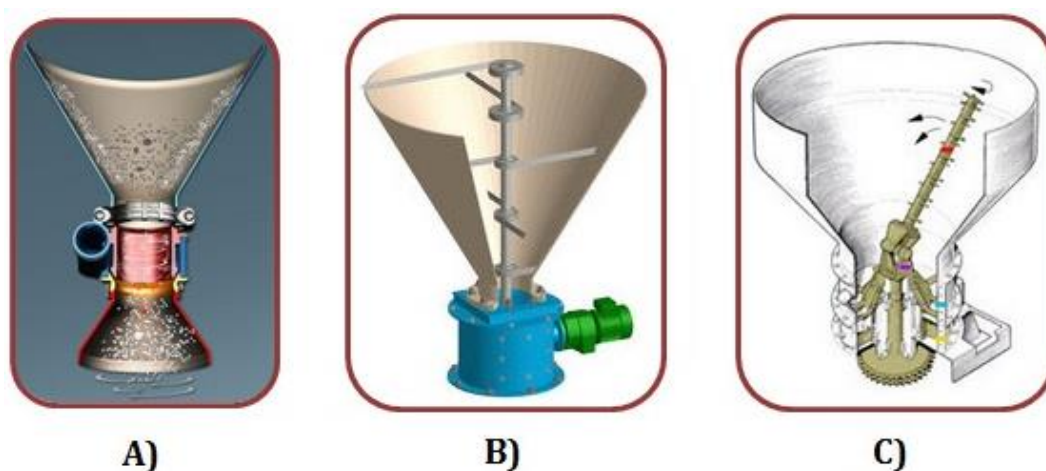
Obr. 38: Rozdělení plastikační jednotky [26]

### 7.2.1. Násypka

Násypka slouží jako zásobárna granulátu, ze které se odebírá materiál. Její konstrukce je tvořena tak, aby se v ní nevyskytovaly žádné ostré hrany a nedocházelo k nahromadění či usazení materiálu. Granulát se z násypky uvolňuje samovolně působením gravitace do tavicí komory a pokračuje dále plastikační jednotkou.

Rizika:

- a) Problematické mohou být polymery s obsahem aditiv, neboť aditiva mají jiný tvar a hmotnost než granulát, a tudíž by nemuselo dojít k optimálnímu rozložení aditiv ve směsi a následně v tavenině. V případě použití problematického granulátu, který se hromadí anebo tvoří tak zvané mostky, je možné násypku konstrukčně upravit tak, aby kontinuálně dodávala materiál do komory. Konstrukční úprava spočívá v tom, že se do násypky přidá systém na střásání granulátu, nebo se násypka osadí rotačními či šnekovými konvejery. Příklad takových mechanismů je vidět na Obr. 39 [13].

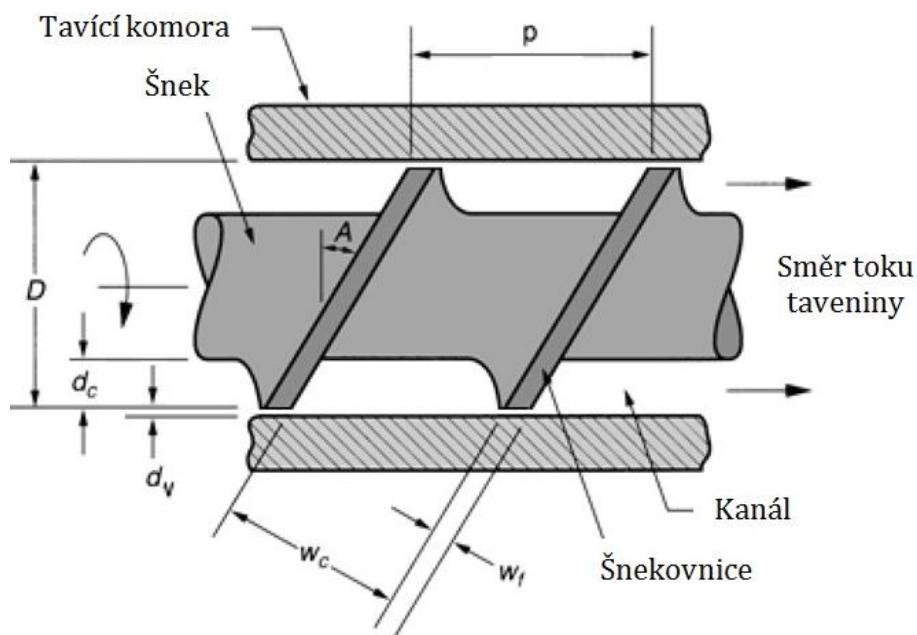


Obr. 39: Konstrukčních úpravy násypky: A) střásací mechanismus, B) a C) rotační konvejery [13]

- b) Alternativním řešením hromadění granulátu nebo tvorby mostků v násypce, je použití jiného materiálu, který má lepší tribologické vlastnosti. Tedy takový materiál, který lépe klouže a nehromadí se v důsledku tření v násypce.
- c) Pro zajištění správné funkce násypky je důležité, aby dopravní zóna v místě pod ní se nezahřívala více než je nutné. V důsledku vysoké teploty by mohlo dojít k předčasnému natavení granulátu, který by se lepil na ústí násypky nebo na její stěny. Tento problém by se projevil nižší průchodností materiálu nebo dokonce úplným ucpáním násypky [13].

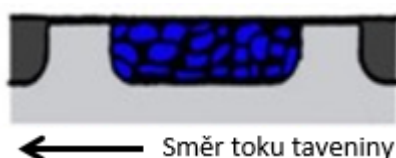
### 7.2.2. Dopravní zóna

Dopravní zóna plastikační jednotky se nachází v oblasti přímo pod násypkou. Funkcí této zóny je přesunout pomocí šneku nabraný granulát směrem vpřed do oblasti tavicí komory. Současně s dopravou granulátu dochází hnětení a míchání. Hloubka závitů šroubovice šneku je v těchto místech konstantní a nejhlubší z celého šneku. Na následujícím Obr. 40 jsou zobrazeny základní geometrické rozměry šneku a tavicí komory.



Obr. 40: Základní geometrické rozměry šneku: ( $d_v$ ) vůle mezi válcem a šroubovicí, ( $A$ ) úhel stoupání závitů, ( $D$ ) průměr válce tavicí komory, ( $w_c$ ) šířka závitů, ( $w_f$ ) šířka šnekovnice, ( $p$ ) rozteč závitů šroubovice a ( $d_c$ ) hloubka kanálu [13]

Během pohybu šneku dochází k postupnému stěsnání materiálu a vyloučení vzduchu. Obvyklá délka dopravní zóny bývá 60 % z celkové délky šneku. Na Obr. 41 je znázorněn řez šnekem v oblasti dopravní zóny. Na příslušném obrázku je vidět, že materiál je stále ve stavu granulátu [13].



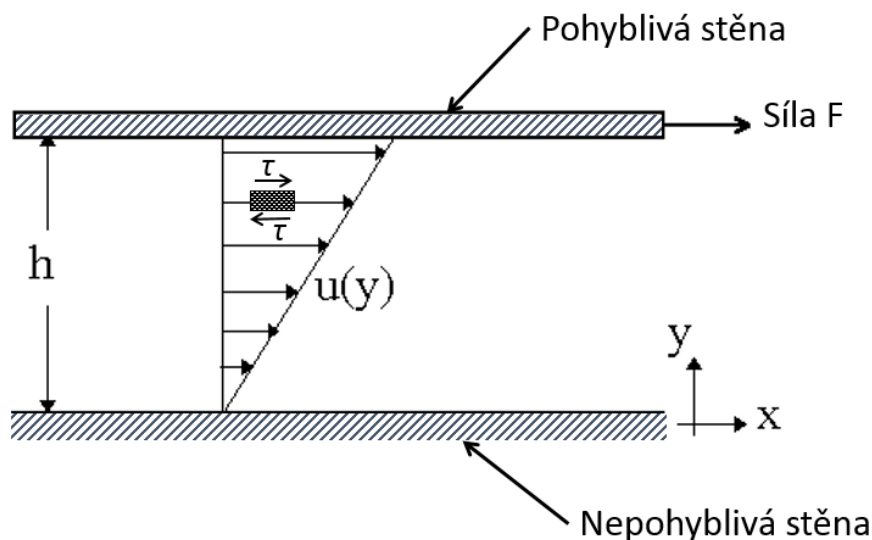
Obr. 41: Granulát v dopravní zóně [13]

Rizika:

- a) Jedna z možných příčin nestabilního procesu jsou tribologické vlastnosti materiálu. V případě nevhodné tribologie tedy příliš kluzkého materiálu dochází k odvalování granulátu v dopravní zóně, šnek se otáčí, ale materiál zůstává na místě. V důsledku toho vzniká zácpa. Pro představu hodnota koeficientu tření PA 6 při styku s ocelí za sucha je 0,28, což je relativně nízká hodnota [5]. Východiskem tohoto rizika je vybrat jiný typ materiálu, který by měl vyšší koeficient tření čímž by se předešlo odvalování granulátu, nebo případně změnit dodavatele materiálu.
- b) Dalším rizikem v dopravní zóně může být nastavení teploty v místě pod násypkou podobně jak je zmíněno v kapitole 7.2.1 Násypka. Tato teplota se označuje  $T_0$  a v ideálním případě by se měla pohybovat okolo 80 °C, jedná se o hodnotu odpovídající teplotě sušení granulátu.
- c) Velmi problematické je nastavení hodnoty zpětného odporu, ta může být jak kladná, tak i záporná. Nelze však nastavit nulovou hodnotu, protože by ve komoře zůstávalo velké množství vzduchu a následně by tavenina obsahovala bublinky. Kladný zpětný odpor závisí na tření, které vyvolá smyk mezi granulátem a šnekem, tím se překoná zpětný odpor a šnek je tlačěn směrem vzad a nabírá materiál. Záporný zpětný odpor je v podstatě podpora hydraulického systému a spočívá v tom, že šnek je tažen směrem vzad.

### **7.2.3. Základní úvahy o tavení granulátu třením**

Termoplastická tavenina nemá zcela newtonskou charakteristiku, proto následující zjednodušený model představuje, jaké fyzikální hodnoty jsou relevantní pro efekt tavení třením. Na Obr. 42 je znázorněno laminární tok taveniny a vnitřní tření.



Obr. 42: Schéma smykového tření při laminárním proudění taveniny [29]

Tavenina se při laminárním toku lepí na stěnu a tvoří se vnitřní tření. Následující Rovnice 3 zobrazuje Newtonův zákon viskozity [1]

Rovnice 3

$$\tau = \eta * \frac{d(u)}{d(y)} \quad (3)$$

kde gradient  $\frac{d(u)}{d(y)}$  značí růstu rychlosti v kolmém směru na rychlost proudění,  $\eta$  je dynamická viskozita, respektive součinitel viskozity vnitřního tření a  $\tau$  je tečné napětí. Relevantním parametrem při vzniku tření je podle Newtonova modelu absolutní rychlost, která se spočítá podle Rovnice 4 [1].

Rovnice 4

$$u = n_s * r \quad (4)$$

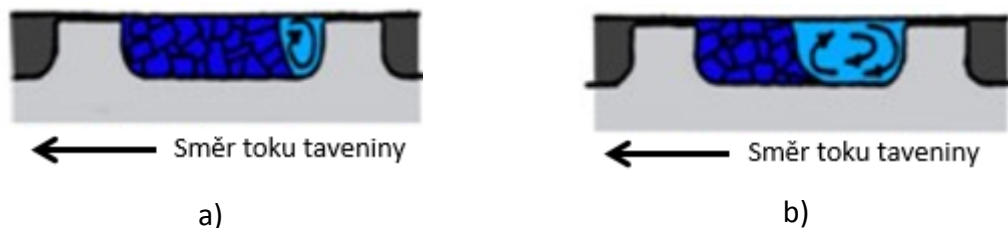
kde  $u$  značí absolutní rychlost,  $n_s$  jsou otáčky šneku za minutu a  $r$  je poloměr šneku.

#### 7.2.4. Kompresní zóna

V kompresní zóně dochází k silnému stlačování a intenzivnímu tření granulátu. Hloubka kanálu a rozteč stoupání šneku se směrem ke homogenizační zóně zmenšují. Tím pádem dochází ke zvýšení tření v granulátu a vytlačení vzduchu, který je mezi granulemi. Materiály jako jsou polyamidy a jim podobné, nevyžadují příliš velkou hloubku závitů.



V důsledku tření vznikne tak zvaný bazének, ve kterém tavenina rotuje viz Obr. 43 a). Čím blíže ke špičce šneku se materiál vyskytuje, tím je obsah taveniny vyšší viz Obr. 43 b) [13].



Obr. 43: Granulát v kompresní zóně:  
a) Začátek komprese; b) Zvyšování podílu taveniny v kompresní zóně [13]

Délka kompresní části zaujímá zhruba 20 % z celkové délky šneku. Tato oblast je charakteristická kompresním poměrem, který je dán rozdílem výšek zavitu mezi dopravní a kompresní zónou. Typická hodnota kompresního poměru se pohybuje od 2:1 do 3:1, obvykle je to hodnota 2,5:1 [23].

Rizika:

- a) V kompresní zóně může být rizikem například špatná geometrie šneku, která by způsobila nedostatečné vytvoření taveniny. Řešením by bylo změnit geometrii šneku, tedy jeho výměna.
- b) Dalším rizikem je nesprávně nastavená teplota topných těles, což lze vyřešit změnou nastavení jednotlivých topných pásem.
- c) Nedostatečné vytlačování vzduchu z granulátu může způsobit například neúplné výstřiky. Tento problém může být způsoben příliš velkou dávkou, nebo krátkým šnekem. Jelikož vzdálenost od násypky ke špičce je krátká, vzduch nemá dostatek času, aby byl vytlačen z tavící komory ven. Řešením tedy je nastavit menší dávkování, nebo vyměnit šnek za delší. Nicméně je třeba dát pozor při použití příliš dlouhého šneku, neboť by mohlo dojít k degradaci materiálu v důsledku dlouho trvajících tření.
- d) Mezi rizika v oblasti kompresní zóny patří také nevhodně nastavený zpětný odpor, stejně jako je tomu v dopravní zóně. Zpětný odpor musí být nastaven tak, aby byl šnek schopen se optimálně posunovat zpět, během plastikační fáze [2] [23].

- e) V neposlední řadě je nutné zmínit riziko, kdy se může objevit granulát natolik velký, že převyšuje hloubku závitů v homogenizační zóně. Takže se tento granulát zasekne v nejužším možném místě a způsobí zácpu. Tento problém lze odstranit výměnou šneku za jiný s vyšší hloubkou závitů. Tomuto bodu je více věnována kapitola 8.2.

#### 7.2.5. Homogenizační zóna

V homogenizační zóně dochází k důkladnému promíchání a prohnětení materiálu díky rotaci šneku. Materiál se v této poslední části šneku vyskytuje pouze v kapalné fázi viz Obr. 44. Důsledkem homogenizace taveniny je rovnoměrné rozložení teploty v celém objemu a pomíchaná tavenina se tak posune dále do prostoru před špičku šneku, kde se postupně hromadí. Délka homogenizační zóny se rovná zhruba 20 % celkové délky šneku. Hloubka závitů je konstantní a zároveň nejnižší v porovnání se zbytkem šneku [13].



Obr. 44: Homogenizace taveniny [13]

Rizika:

- a) V homogenizační zóně se materiál nachází jako tekutina. Problém nastane, pokud se v této zóně objeví neroztavený granulát. Tento granulát by mohl ucpat buď průchod přes špičku šneku nebo trysku, protože by neprošel skrz. Důvodem přítomnosti celého granulátu může být buď nízká teplota topných těles, malý kompresní poměr nebo nekvalitní materiál.
- b) Dalším rizikem, které může nastat je degradace materiálu. Ta nastane, pokud tavenina zůstane v plastikační jednotce déle, než je doporučeno. V takovém případě materiál ztrácí své vlastnosti. Je tedy třeba dbát na dodržování předepsaných časů.

- c) Vzhledem k tomu, že v homogenizační oblasti je tavenina zahřáta na vstřikovací teplotu, hrozí zde riziko přehřátí a degradace materiálu. V takovém případě je nutné snížit teplotu topných pásů.

#### **7.2.6. Tryska**

Než se roztavený granulát dostane do dutiny formy, musí projít přes zpětný uzávěr. Před špičkou šneku se tvoří dávka, která je po dosažení potřebné velikosti vstříknuta přes trysku do dutiny formy. Tavenina musí být dokonale promíchána. Nesmí se zde objevit žádná nečistota nebo zbytky granulátu.

Rizika:

- a) Podobně jako v případě homogenizační zóny, tak i v trysce a v oblasti před ní, hrozí riziko degradace materiálu, protože tavenina je zahřáta na vstřikovací teplotu. Pokud by nastala mezi vstřikovací a plastikační fází delší časová prodleva než doporučená, mohlo by dojít ke znehodnocení taveniny neboli degradaci. Degradace znamená ztrátu mechanických vlastností materiálu, proto je třeba dodržovat předepsané časy.
- b) Další riziko, které by mohlo nastat je přehřátí taveniny, což v podstatě odpovídá degradaci. Přehřátí vzniká v důsledku vysoké teploty, čemuž se se dá předejít správným nastavením topných těles.
- c) Velikost trysky je jeden z několika faktorů, které mohou způsobit zácpu celého systému. Jeden důvod je, že tavenina neprojde skrz příliš malou trysku. Druhým důvodem je, že velký otvor trysky by nezpůsobil optimální odpor na vytvoření tlaku pro vstříknutí dávky do dutiny formy. Je tedy důležité velikost trysky volit s ohledem na možnost ucpání, ale i s ohledem na optimální vstřikovací podmínky.
- d) Po vstříknutí dávky do dutiny formy zůstává v trysce tavenina, která by mohla ztuhnout a pro další cyklus by byla tryska zablokována. Je tedy třeba vhodně nastavit teplotu topného pásu v oblasti trysky.

### 7.3. Hledání relevantních procesních parametrů PA-GF v laboratoři

V kapitole 7.1 Popis problematiky zpracování PA-GF je popsán problém, který vzniká při vstřikování polyamidu se skelnými vlákny na stroji Arburg. Jedná se o vadu, která spočívá ve výrobě neúplných výstřiků. Tato kapitola se bude zabývat procesními parametry vstřikování, které mají na daný problém možný vliv. V literatuře lze nalézt velké množství parametrů, které je možné optimalizovat, ale pro výše popsanou problematiku jsou v následujícím textu vybrány pouze ty relevantní. Pro přehlednost a zobecnění jsou rozděleny do pěti kategorií [2]:

- a) Technologické parametry
- b) Vstřikovaný materiál
- c) Vstřikovací stroj
- d) Forma
- e) Konstrukce výstřiku

Nejjednodušší cesta k vyřešení problematiky neplnění formy by byla, kdyby stačilo změnit nastavení technologických parametrů na vstřikovací stroji. Nicméně je možné, že tato změna by nepřinesla žádný pozitivní výsledek. To by v lepším případě znamenalo změnit materiál a v horším případě upravit technologii vstřikování například vyměnit šnek nebo vstřikovací trysku a tak podobně. V následujících tabulkách jsou do jednotlivých kategorií seřazeny relevantní důvody problému a jeho odstranění.

Tabulka 7: Technologické parametry

Technologické parametry	
Důvod	Eliminace
Nízký vstřikovací tlak $p_v$	Zvýšit vstřikovací tlak $p_v$ [2]
Nízký dotlak $p_d$	Zvýšit dotlak $p_d$ [2]
Nízká teplota taveniny $T_T$	Zvýšit teplotu taveniny $T_T$ [2]
Nízká teplota formy $T_F$	Zvýšit teplotu formy $T_F$ [2]
Nízká vstřikovací rychlost $v_r$	Zvýšit vstřikovací rychlost $v_r$ [2]
Malá dávka $I_d$	Zvětšit dávku $I_d$ [2]
Malý polštář $I_p$	Zvětšit polštář $I_p$ [2]
Bod přepnutí $BP$	Nastavit bod přepnutí na vyšší hodnoty [2]

Teplota pod násypkou $T_0$	Upravit teplotu pod násypkou $T_0$ – optimální teplota je 60 až 80 °C [27]
Nízký zpětný odpor $p_p$	Zvýšit hodnotu zpětného odporu $p_p$ [25]

Tabulka 8: Vstřikovaný materiál

Vstřikovaný materiál	
Důvod	Eliminace
Nízká hodnota toku taveniny $ITT$	Použít materiál s vyšší hodnotou toku taveniny [2]

Tabulka 9: Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka	
Důvod	Eliminace
Netěsnost zpětného uzávěru na šneku	Vyčistit, nebo vyměnit zpětný uzávěr šneku [2] [25]
Nízký plastikační výkon	Použít šnek s větším průměrem [2] Použít šnek s jinou geometrií [27]

Následující dvě kategorie nejsou pro náš případ tak důležité, jako kategorie předchozí. Nicméně představují možný vliv na problém neplnění dutiny.

Tabulka 10: Forma

Forma	
Důvod	Eliminace
Nedostatečná vtoková soustava	Zvětšit vtokovou soustavu: vtok, případně vtoky, kanály, vtoková ústí [2]
Malá efektivita chladičného a temperačního systému	Zkontrolovat rozložení teploty formy $T_F$ [2]

Tabulka 11: Konstrukce výstřiku

Konstrukce výstřiku	
Důvod	Eliminace
Nevhodný tvar a rozměry výstřiku vzhledem použitému polyamidu	Přizpůsobit dutinu formy použitému polyamidu [2]

## 8. Formulace hypotéz a experimentů

Zkušební plán optimalizace vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C Golden Edition se skládá z několika experimentů. Tyto experimenty jsou vytvořeny na základě hypotéz, podložené teoretickými úvahami získaných tvorbou řešerše viz kapitoly 2–4 o procesních parametrech vstřikovacích lisů viz kapitola 7.3.

Dalším zdrojem jsou provedené zkušební pokusy Dr. Skočilasem a Ing. Krebsem. Jejich cílem bylo dosáhnout stabilního procesu vstřikování zkušebních těles při použití materiálu PA-GF30 s obchodním označením Grilon TSG-30/4 více informací o tomto materiálu je v kapitole 6.1 Výrobní podmínky v laboratoři Fakulty strojní [21].

Na základě posouzení všech procesních parametrů a zjištěných informací byly vytvořeny relevantní hypotézy, u nichž lze s vysokou pravděpodobností předpokládat, že jsou klíčem k dosažení stabilního procesu.

Tabulka 12 zaznamenává hodnoty jednotlivých parametrů, které byly nastaveny v druhém a třetím pokusu Dr. Skočilasem a Ing. Krebsem. Z těchto údajů se vyšlo pro vytvoření zkušebního plánu níže navržených experimentů.

Tabulka 12: Nastavení strojních parametrů Dr. Skočilasem a Ing. Krebsem [28]

Parametr	Pokus 1 – technické listy Grilon	Pokus 2 – doporučení od společnosti EMS
Teplota komory sušárny [°C]	80	80
Teplotní zóna 1 – 2 – 3 – tryska [°C]	270 – 275 – 280 – 275	280 – 285 – 300 – 300
Teplota formy [°C]	80 – 100	80
Otáčky během plastifikace [mm/s]	-	150
Zpětný odpor [bar]	80 – 100	15
Dotlak [bar] (časové pásmo 1 – 2 – 3)	300 – 800	200 – 180 – 60

### 8.1. Hypotéza 1: Násypka – Nedostatečné doplňování granulátu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 7.2, násypka slouží jako zásobárna granulátu, který se odebírá do plastikační komory. Na základě výroby částečných výstřiků, lze usuzovat, že

plastikační válec není dostatečně doplňován granulátem. Je tedy pravděpodobné, že se granulát nahromadí v násypce a usadí se tam. Granulát se tedy z násypky neuvolňuje samovolně jak bychom předpokládali.

### **Experiment**

Pro potvrzení hypotézy 1 navrhuji následující experiment:

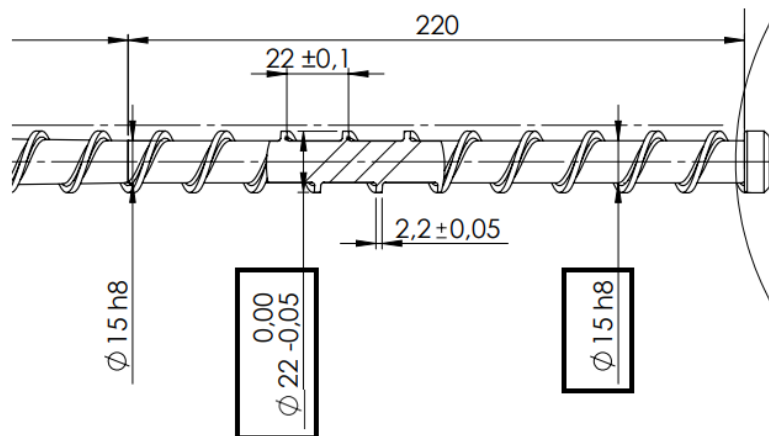
Během započetí procesu výroby je navrženo míchat granulát například skleněnou tyčinkou tak, aby se zabránilo ucpání násypky nebo usazení granulátu. Procesní parametry se nastaví stejné, jako byly použity Dr. Skočilasem a Ing. Krebsem během jejich pokusů. Pokud se díky tomuto pokusu docílí stabilního procesu, bude zcela jisté, že problém spočívá v hromadění granulátu v násypce. V takovém případě bude nutné násypku konstrukčně upravit tak, aby bylo zajištěno uvolňování granulátu a plynulé zásobování plastikačního válce.

### **8.2. Hypotéza 2: Hloubka dopravní zóny – velikost granulátu**

Hypotéza 2 bere v úvahu velikost dopravní zóny šneku a velikost granulátu. Pokud v je hloubka šneku v místě, kam padá z násypky granulát menší než průměrná velikost použitého granulátu, potom dojde k ucpání celého systému. Příliš velký granulát ucpe šnek, takže nezvládne natavit dostatečné množství taveniny pro vstřikování v prvním cyklu. V druhém cyklu se však granulát roztaví působením tepla z topných těles, takže se vytvoří dostatečná dávka pro vstřikování.

### **Analýza**

Na následujícím Obr. 45 je zobrazena oblast dopravní zóny šneku, který se používá ve vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 270 C Golden Edition.



Obr. 45: Výkresu šneku – dopravní zóna [16]

Na daném obrázku jsou zvýrazněny dvě kóty: kóta  $\phi 22_{-0,05}^{0,00}$  určuje hlavový průměr šroubovice a kóta  $\phi 15 h8$  určuje průměr šneku v dopravní zóně. Odečtením těchto dvou hodnot a vydělením dvěma získáme hloubku šneku, což se rovná 3,5 mm.

#### Metodika měření velikosti granulátu

Pro zjištění rozměru zrn granulátu byla navržena následující metodika měření. Bylo náhodně vybráno 20 zrn granulátu obou materiálů. Zrnka granulátu jsou teoreticky tvořena válečky, ale ve skutečnosti je ideální tvar mírně zdeformován. Na vybraných vzorcích byl měřen průměr a výška válečků, ale vzhledem k lehké deformaci, která se nejčastěji projevuje zploštěním válcové plochy, byla vzata v úvahu průměrná naměřená hodnota. Měření bylo prováděno běžným kovovým posuvným měřítkem značky Somet viz Obr. 46, jenž měří s přesností na 0,05 mm.



Obr. 46: Posuvné měřítko Somet INOX



### Experiment – Granulát materiálu Grilon TSG-30/4

V Tabulka 13 jsou zaznamenána data z měření velikosti granulátu materiálu Grilon TSG-30/4, jsou zde uvedena čísla vzorku a jejich průměr a výška.

Tabulka 13: Výsledky měření granulátu Grilon TSG-30/4

Číslo vzorku:	Průměr [mm]	Výška [mm]
1	2,85	3,35
2	2,7	3,3
3	2,75	3,25
4	2,95	3,45
5	2,8	3,35
6	2,75	3,45
7	2,7	3,3
8	2,95	3,3
9	2,85	3,25
10	2,9	3,25

Číslo vzorku:	Průměr [mm]	Výška [mm]
11	2,8	3,5
12	2,7	3,35
13	1,8	3,2
14	2,9	3,3
15	3	3,35
16	3,1	3,3
17	2,9	3,35
18	2,85	3,3
19	2,1	3,5
20	3	3,3

### Experiment – Granulát materiálu Ultramid A3WG10

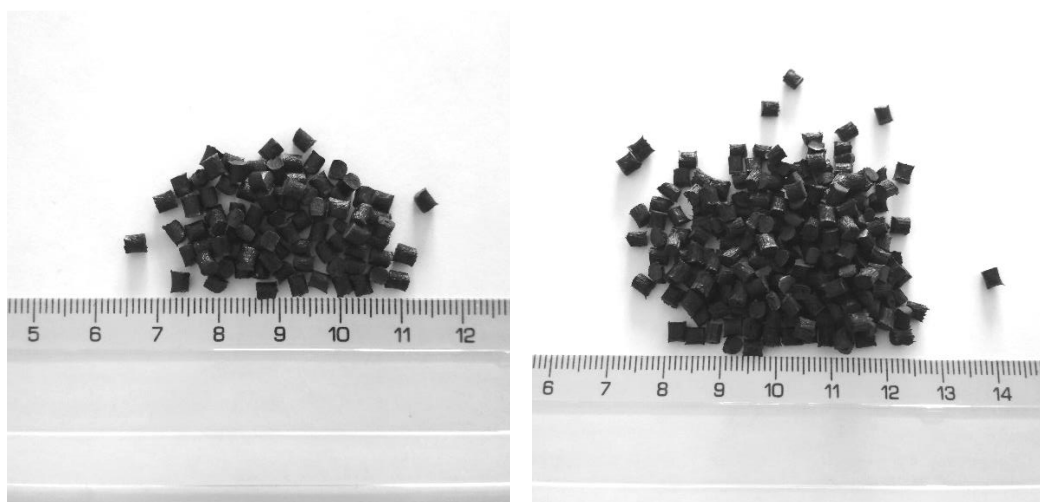
Tabulka 14 zaznamenává data z měření velikosti granulátu materiálu Ultramid ARWG10, jsou zde uvedena čísla vzorku a jejich průměr a výška.

Tabulka 14: Výsledky měření granulátu Ultramid A3WG10

Číslo vzorku:	Průměr [mm]	Výška [mm]
1	2,8	3,05
2	3,1	3,1
3	2,45	3,15
4	2,55	3,25
5	2,9	3
6	2,85	3,1
7	2,9	3,1
8	2,8	3
9	2,55	3,05
10	2,4	2,95

Číslo vzorku:	Průměr [mm]	Výška [mm]
11	2,5	3,1
12	2,8	3
13	2,4	3,05
14	2,8	2,95
15	2,65	3,1
16	2,85	3,2
17	2,55	2,9
18	2,7	3
19	2,75	3,2
20	2,7	3,1

Na Obr. 47 jsou zobrazeny vzorky obou granulátů, u nichž byla přeměřena velikost.



*Obr. 47: Granulát; vlevo: Grilon TSG-30/4; vpravo: Ultramid A3WG10*

### **Závěr měření velikosti granulátu**

Z naměřených dat byly spočteny průměrné hodnoty. Pro materiál Grilon TSG-30/4 je průměrná naměřená hodnota pro průměr vzorku 2,77 mm a průměrná naměřená hodnota pro výšku vzorku je 3,34 mm. Pro materiál Ultramid A3WG10 je průměrná naměřená hodnota pro průměr vzorku 2,7 mm a průměrná naměřená hodnota pro výšku vzorku je 3,07 mm. Z provedených výpočtů vyplývá závěr, že velikost obou granulátů jak Grilon TSG-30/4 tak ani granulát Ultramid A3WG10 nepřesahuje ani v jednom rozměru hloubku šneku. Na základě těchto výsledků lze tvrdit, že Hypotéza 2: Hloubka dopravní zóny – velikost granulátu není opodstatněná a nevede tedy ke zjištění problematiky nestabilního procesu vstřikovacího stroje.

### **8.3. Hypotéza 3: Rychlost plastifikace**

Tato hypotéza vysvětluje důvody, proč se během pokusů v prvním cyklu nejdříve vyrobí částečný výstřik a v dalším cyklu celý výstřik. Předpokládá se, že příčinou vzniku částečných výstřiků, které způsobí nestabilní proces, je příliš rychlá plastifikace. Předpokladem je, že pokud se sníží rychlost plastifikace, dosáhne se tím více času na roztavení granulátu a docílí se tak stabilní proces. Domněnka spočívá v tom, že granulát se nestačí dostatečně natavit a tato částečně natavená hmota dočasně zacpe buď průchod zpětného uzávěru nebo homogenizační zónu a znemožní tak vytvoření dávky. Na konci

---

Vstřikování plastů vyztužených skleněnými vlákny a jejich použití v automobilovém průmyslu

vstřikovací fáze se zbylý granulát v komoře roztaví díky absorpci tepla z topných těles, takže je průchod volný a v následujícím cyklu se vystříkne celý výrobek.

### **Experiment**

Pro potvrzení hypotézy 3 navrhuji následující experiment:

Zachovat stejné hodnoty parametrů vstřikovacího stroje, jako při poslední zkoušce provedenou Dr. Skočilasem a Ing. Krebsem s tím rozdílem, že se bude postupně měnit rychlost otáček šneku z vyšších hodnot na nižší hodnoty.

### **8.4. Hypotéza 4: Zpětný odpor**

Zpětný odpor na šneku patří mezi jeden z nejrelevantnějších procesních parametrů. Předpokládané tribologické vlastnosti procesu jsou takové, že vzniklé tření mezi granulátem a šnekem vyvodí tlak, který tlačí šnek směrem zpět. Budeme-li v první části hypotézy předpokládat, že hodnota zpětného odporu na vstřikovacím stroji je nastavena příliš vysoko, potom vzniklé tření nedokáže tuto hodnotu překonat a šnek se nebude vracet, nebo jen částečně a nevytvoří se tak dostatečně velká dávka, což znamená vystříknutí částečného výstříku.

Druhou částí této hypotézy je myšlenka záporného zpětného odporu, jenž funguje jako podpora tažení šneku zpět. Šnek nepřekonává zpětný, ale je naopak tažen hydraulickým systémem zpět, aby se materiál snáze dostala před špičku šneku. Nicméně v případě záporného zpětného odporu existuje riziko, že se do komory spolu s granulátem dostane také nežádoucí vzduch.

### **Experiment**

Pro potvrzení hypotézy 4 navrhuji následující experiment:

Nastavit vstřikovací stroj na stejné hodnoty parametrů, jako při poslední zkoušce provedenou Dr. Skočilasem a Ing. Krebsem s tím rozdílem, že se změní hodnota zpětného odporu šneku. Zpětný odpor bude nastaven na záporný a bude postupně snižován k nulové hodnotě, dokud se nedocílí optimální velikosti dávky, respektive stabilní plastifikace.

### **8.5. Hypotéza 5: Teplota pod násypkou**

Literatura uvádí, že teplota v místě pod násypkou má být 80 °C [27]. Pokud tato hodnota neodpovídá realitě a je vyšší může docházet k předčasnému natavení granulátu, který se může uchytit na ústí násypky nebo na její stěnu. V případě, že teplota bude nižší než 80 °C, dojde k nedostatečnému nahřátí granulátu, který se zcela neroztaví a může zacpat například trysku nebo zpětný ventil. Problémem ovšem je, že v místě násypky není topný pás, který by se mohl regulovat. Možným řešením je nastavit teplotu nejbližšího topného pásu na vyšší hodnotu, než která je požadovaná a počkat, dokud teplota pod násypkou nestoupne v důsledku vedení tepla.

#### **Experiment**

Pro potvrzení hypotézy 5 navrhuji následující experiment:

Před zahájením procesu se zapojí v místě pod násypkou termočlánek a bude se kontrolovat teplota  $T_0$ . Zapne se vstřikovací stroj a počká se do doby, než se dosáhne provozních teplot. Jakmile je stroj připraven k provozu, měla by být teplota v komoře pod násypkou zhruba 80 °C. Pokud je teplota jiná, je třeba nastavit nejbližší teplotní pás na vyšší či nižší hodnotu, podle toho, jaká teplota se naměří.

### **8.6. Hypotéza 6: Zpětný uzávěr šneku**

Hypotéza 6 bere v úvahu mechanické poškození zpětného uzávěru šneku. Poškození má za následek špatné vracení uzávěru zpětného ventilu na dosedací plochu nebo jsou dosedací plochy poškozené. Jednou z funkcí zpětného uzávěru je, aby se zabránilo vracení taveniny zpět do komory více informací je v kapitole 4.3.2 Zpětný uzávěr na šneku. Pokud je tato činnost narušena, potom se kavita formy nenaplní zcela, ale třeba jen z části.

#### **Experiment**

Pro potvrzení hypotézy 6 navrhuji následující experiment:

Demontovat plastikační jednotku, vyndat šnek a rozebrat ho. Poté zkontrolovat, zda mechanismus zpětného uzávěru funguje správně a zda těsní dosedací plochy. Pokud se vyskytne nějaká vada, je třeba zařízení opravit, nebo vyměnit za nové.

## 8.7. Hypotéza 7: Ucpaná tryska

Tato hypotéza zvažuje možnost ucpané trysky. Tryska se může zacpat neroztaveným granulátem nebo vniknutím nějaké nečistoty. Ucpání trysky neroztaveným granulátem je nepravděpodobné, protože během druhého pokusu prováděného Dr. Skočilasem a Ing. Krebsem se teplota topného pásu v oblasti trysky zvedla z původní hodnoty 275 °C na 300 °C. Toto zvýšení teploty nezabránilo ucpání trysky. Další zvyšování teploty topných pásů je neopodstatněné. Vniknutí nečistoty je také velmi nepravděpodobné vzhledem k čistotě laboratorního prostředí.

Další možností ucpané trysky je studená, nebo málo předeřhřátá forma. Ve fázi vstřikování je tryska v kontaktu s formou, pokud je forma studená, může se tryska ochladit, což způsobí ztuhnutí taveniny uvnitř trysky a zacpe ji.

## 9. Zkoušky

### 9.1. Kritéria pro stanovení stability plastifikace

Specifickým úkolem této práce jsou problémy plastifikace pozorované Ing. Krebsem a Dr. Skočilasem, které byly popsány v kapitole 7.1. Je nutné podotknout, že tato práce se nezabývá problémem plnění dutiny formy a její funkčnosti, ale hlavně problematikou plastifikace granulátu.

Kritéria posuzování stability plastifikace při zkouškách jsou tyto:

1. Vstřikovací jednotka doplní v ručním režimu komoru před čelem šneku v požadovaném rozsahu, to znamená s upraveným objemem taveniny 22 cm<sup>3</sup>.
2. Komora se dá v ručním režimu také plně naplnit několika cykly v řadě.
3. Pokud jsou splněna kritéria 2 a 3, může stroj běžet v automatickém režimu

### 9.2. Zkušební plán

Pořadí zkoušek je seřazeno podle relevantnosti. To znamená, že nejdříve jsou uvedeny zkušební plány pro zkoušky, u kterých lze předpokládat, že mají vyšší pravděpodobnost na vyřešení stability procesu plastifikace.

## Zkouška 1

Zkouška 1 vychází z kapitoly 8.3 Hypotéza 3: Rychlost plastifikace. Parametry pro nastavení vstřikovacího stroje jsou použity z Tabulka 12 konkrétně z pokusu číslo 2. Důvodem této volby je, že se jedná o doporučení společnosti EMS na zpracování materiálu Grilon TSG – 30/4. Dalším důvodem je, že výsledky prováděné při těchto pracovních parametrech byly příznivější, než při parametrech z pokusu 1. Otáčky šneku se nastaví na 115 mm/s což odpovídá maximální hodnotě uvedené v materiálovém listu materiálu Grilon TSG – 30/4. V případě, že se nedocílí stabilního procesu sníží se otáčky na minimální přípustnou hodnotu, jež odpovídá 58 mm/s, viz Obr. 48 nastavení procesních parametrů vstřikovacího stroje. Černým rámečkem je zvýrazněna rychlost šneku „Screw speed“ v otáčkách za minutu.

Temperatures	
Flange	60 - 80°C
Zone 1	270°C
Zone 2	275°C
Zone 3	280°C
Nozzle	275°C
Tool	80 - 100°C
Melt	280 - 300°C

Pressures / Speeds	
Injection speed	medium - high
Hold-on pressure (spec.)	300 - 800 bar
Dynamic pressure (hydr.)	5 - 15 bar
Screw speed	50 - 100 min <sup>-1</sup>

Obr. 48: Parametry nastavení vstřikovacího stroje pro materiál Grilon TSG – 30/4 [21]

## Zkouška 2

Zkouška 2 vychází z kapitoly 8.4 Hypotéza 4: Zpětný odpor. Parametry pro nastavení vstřikovacího stroje jsou použity z Tabulka 12 konkrétně z pokusu číslo 2. Nejdříve se nastaví původní hodnota zpětného odporu tedy -50 barů a postupně se bude snižovat v krocích po 10 barech až na -5 bar, dokud se nedosáhne uspokojivých výsledků.

Pokud výsledky zkoušek se záporným zpětným odporem budou negativní, nastaví se stroj na kladný zpětný odpor. Postupně snižovat hodnotu z původních 80 barů až na hodnotu 5 bar v krocích po 10 barech.

### **Zkouška 3**

Zkouška 3 vychází z kapitoly 8.1 Hypotéza 1: Násypka – Nedostatečné doplňování granulátu. Tato zkouška spočívá v míchání granulátu, který bude míchán během všech zkoušek. V první fázi bude každý pokus proveden bez míchání granulátu. V druhé fázi se bude granulát při stejných podmínkách v násypce promíchávat tak, aby se zabránilo vzniku mostků, respektive aby se zamezilo usazení, nebo nahromadění granulátu. Míchání granulátu se bude provádět v ideálním případě tenkou tyčinkou ze stejného materiálu tedy z PA-GF.

### **9.3. Provádění zkoušek**

Všechny zkoušky na vstřikovacím stroji Arburg v laboratoři Fakulty strojní byly prováděny společně s panem Ing. Krebsem a s panem Dr. Skočilasem.

#### **9.3.1. Sušení granulátu Grilon TSG – 30/4**

Před zahájením samotných zkoušek bylo nutné vysušit granulát, protože byl použit materiál z již rozbaleného pytle. Z toho důvodu bylo zřejmé, že granulát nesplňoval podmínku maximálního obsahu vlhkosti do 0,1 % podle materiálového listu. Pro sušení granulátu byla použita sušárna PIOVAN DPA-6 zobrazená na Obr. 49. Na zmíněném obrázku je zároveň vidět sušený granulát ve skleněném tubusu, který slouží mimo to jako násypka pro vstřikovací stroj.



Obr. 49: Sušení granulátu PA – GF30 v sušárně PIOVAN DPA-6

Sušárna potřebuje k provozu konstantní přívod stlačeného a čistého vzduchu. Požadovaný vstupní tlak se rovná hodnotě 5–7 bar viz

Obr. 50, proto byl vstupní tlak sušárny nastaven na 6 bar.

Funkční požadavky		
Stlačený vzduch		
Přívodní teplota	°C (°F)	20 (68)
Vstupní tlak	kPa (bar)	500 - 700 (5 - 7)
třída	-	3
* Maximální průměr rozptýlených částic	µm	5
Maximální koncentrace rozptýlených částic	mg/m <sup>3</sup>	5
Obsah oleje		1
* ISO 8573-1		

Obr. 50: Požadavky na stlačený vzduch pro sušárnu PIOVAN DPA-6 [30]

Kromě hodnoty vstupního tlaku je velmi důležitý i průtok vzduchu, který má být minimálně 83 l/min respektive 5000 l/hod viz zvýrazněný údaj na Obr. 51.



SEZNAM DODÁVANÝCH TECHNOLOGIÍ							
			Elektrické napájení			Stlačený vzduch 6-8 bar	
Označení	Popis	Množství	Napětí	kW	Jištění (doporučení)	Přípojovací průměr	Spotřeba
DPA6	Tlakovzdušná sušicí jednotka	1	230V/50Hz	0,6	Max 10A gG	10mm /8 bar	Min. 5000nL/h Max. 30.000nL/h

Obr. 51: Pracovní a technologické parametry sušárny PIOVAN DPA-6 [31]

Před zahájením sušení nastali drobné komplikace s přívodem vzduchu z centrálního rozvodu. Jedním z možných řešení bylo použít přenosné kompresory, ale ty byly buď málo výkonné, nebo nevhodné. Olejový kompresor nebylo možné použít, z důvodu požadavků na stlačený vzduch viz Obr. 50. Olej přítomný ve stlačeném vzduchu by mohl umastit celé vnitřní zařízení sušárny včetně granulátu, který by následně umastil celé vnitřní zařízení vstříkovacího lisu.

Alternativním řešením bylo zprovoznění centrálního rozvodu pro laboratoř. Po zapojení centrálního rozvodu se granulát sušil přibližně 14 hodin. Materiálové listy Grilon TSG – 30/4 doporučují sušení po dobu 4–12 hodin a při teplotě 80°C. Přednastavený program sušárny Piovan uvádí pro materiál PA 6.6 dobu sušení 6 hodin a teplotu 70 °C, proto byla nastavena teplota sušení na 70°C.

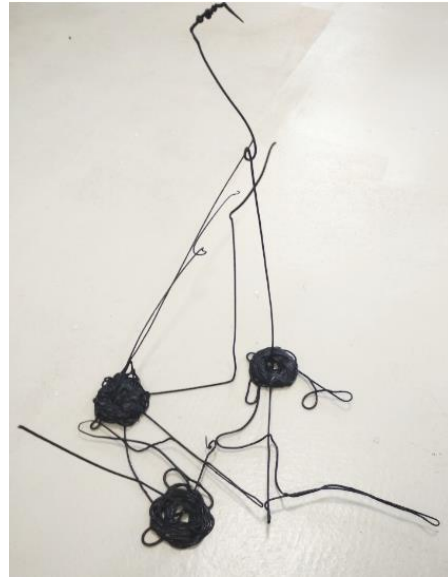
### 9.3.2. První část zkoušek s PA-GF30

Pro první pokus plastifikace se vyšlo z údajů materiálového listu Grilon TSG – 30/4. Tabulka 12 – pokus 1 uvádí nastavené pracovní parametry stroje, rychlost otáček šneku však byla nastavena na nejvyšší přípustnou hodnotu na 115 mm/s a zpětný tlak byl vzhledem ke zkušenostem Dr. Škočilase a Ing. Krebse nastaven na -15 bar.

Výsledky prvního pokusu byly negativní, při výstřiku naprázdno, respektive mimo formu, bylo zjištěno, že se nevytvořila dostatečně velká dávka. Pokus se opakoval několikrát, ale ani jeden výstřík nedosáhl požadovanému objemu 22 cm<sup>3</sup>, což odpovídá hmotnosti 29,7 g. Hmotnost výstříků se většinou pohybovala v rozmezí mezi 12 až 15 g. Na Obr. 52 je vidět, jak při plastifikaci vytéká taveniny z trysky ven a jaké tvary vyteklá tavenina vytvořila.



a)



b)

Obr. 52: a) Tavenina vytékající z trysky; b) Útvary vzniklé vytékáním taveniny z trysky

Při druhém pokusu se snížil zpětný odporu na -50 bar, nicméně k žádnému zlepšení plastifikace nedošlo. V dalším pokusu se snížily otáčky šneku podle zkušebního plánu v kapitole 9.2 Zkouška 1. Otáčky šneku byly sníženy na minimální možnou hodnotu na 58 mm/s. Výsledky byly ještě horší než v předchozích dvou pokusech. Šnek pravděpodobně nabíral při takto nízkých otáčkách malé množství granulátu, a proto se nevytvořila dostatečně velká dávka.

Později se zjistilo, že na vstřikovací stroji je oddělené nastavením zpětného odporu v automatickém a v manuálním režimu. Při druhém pokusu byl změněn zpětný tlak pouze v automatickém režimu, ale plastifikace byla prováděna v manuálním (ručním) režimu, proto žádný rozdíl nenastal.

Během několika dalších pokusů se zkoušelo nastavit pouze hodnoty zpětného odporu v manuálním režimu v rozmezí od +15 bar do -50 bar a zkoušelo se při jakých hodnotách se dosáhne lepších výsledků. Zjištěná neoptimálnější hodnota zpětného odporu byla -15 bar. Při tomto zpětném odporu je šnek částečně podporován posunem vzad. Přesto však byla velikost vstřikované dávky stále malá.

Pro další pokusy se zvýšila teplota topných těles, aby se zlepšila plastifikace. Teplota se zvýšila na hodnoty vyšší, než které jsou navrženy v kapitole 9.2. Teplota nastavení topných těles je uvedena na Obr. 53.



Obr. 53: Nastavené teploty topných pásů podle doporučení společnosti EMS

Zvýšením teploty topných těles se výrazně zlepšila viskozita taveniny a zároveň se zvětšil průměr vytékající taveniny v porovnání s předchozími pokusy, jak je to vidět na Obr. 52. Přes toto zlepšení se však nedocílilo optimální hmotnosti vstřikované dávky taveniny. Při těchto teplotách došlo k optimalizaci zpětného odporu i otáček šneku, ale bez známek zlepšení. Vzhledem k vytvoření malé hmotnosti dávky během všech pokusů, nedošlo k přepnutí na automatický režim ani plnění dutinu formy.

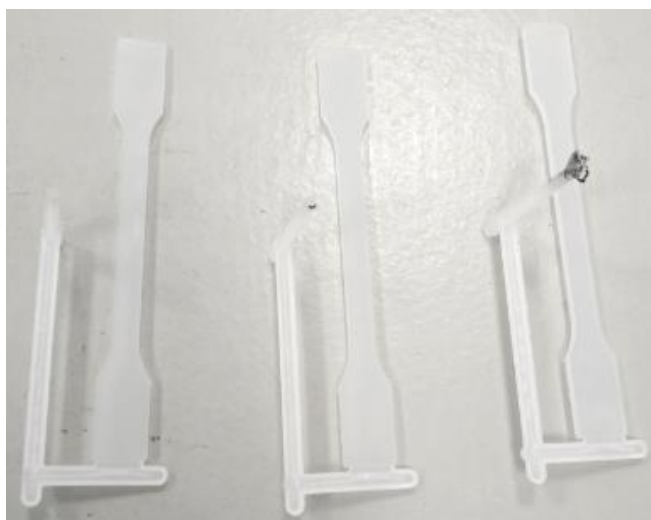
### 9.3.3. Zkoušky s PP

Neúspěšné výsledky pokusů byly důvodem pro test na bezproblémovém materiálu, který by zaručil správnou funkčnost stroje. Tímto materiálem je například polypropylen – PP, jenž lze vstřikovat bez větších potíží. Při přechodu na jiný materiál, je nutné nejdříve vyčistit stroj od zbytků předchozího materiálu. K tomuto účelu slouží speciální čistící granulát obsahující kousky křídly. Čistící směs není abrazivní, ale chemicky reaguje, čímž vyčistí celý vnitřek stroje. Na Obr. 54 je vidět tavenina, která se během čištění smíchala s bílým čistícím granulátem. Čištění bylo ukončeno, jakmile z trysky vycházela pouze bílá tavenina.



Obr. 54: Zbytky taveniny po čištění stroje

Když byl stroj vyčištěn a nastaven na požadované pracovní podmínky začal se vstříkovat polypropylen. Vzápětí se ukázalo, že stroj je v pořádku, protože plastikační jednotka dodávala dostatečné množství taveniny, kavita se plnila bez problému a zároveň bylo docíleno stabilního procesu. Na Obr. 55 jsou vidět zkušební tělíska z PP. Na pravém a prostředním tělísku je vidět malá černá oblast na špičce vtokové soustavy, což je pozůstatek materiálu PA-GF30.



*Obr. 55: První tři vyrobená zkušební tělíska z PP*

Závěrem pokusu s polypropylenem je, že stroj pracuje bez problému, a proto je třeba pro optimalizaci vstřikovacího procesu materiálu Grilon TSG – 30/4 najít jinou metodu.

#### **9.3.4. Druhá část zkoušek s PA-GF50**

Vzhledem k tomu, že pokusy s materiálem Grilon TSG – 30/4 dopadly neúspěšně, bylo navrženo vyzkoušet jiný velmi podobný materiál s obchodním označením Ultramid A3WG10, viz kapitola 6.1.

##### **Příprava technologických parametrů**

Před zahájením zkoušek s materiálem Ultramid A3WG10, bylo třeba zkontrolovat pracovní parametry, aby se neopakovaly neúspěchy jako v první části zkoušek s PA-GF30. Výrobce BASF ve svých materiálových listech bohužel neposkytuje informaci o rychlosti otáček šneku, viz zdroje [10] a [22]. Na základě údajů z kapitoly 7.2.3 bylo zjištěno, že pro plastifikaci je rozhodující absolutní (obvodová) rychlost šneku. Hodnoty otáček šneku

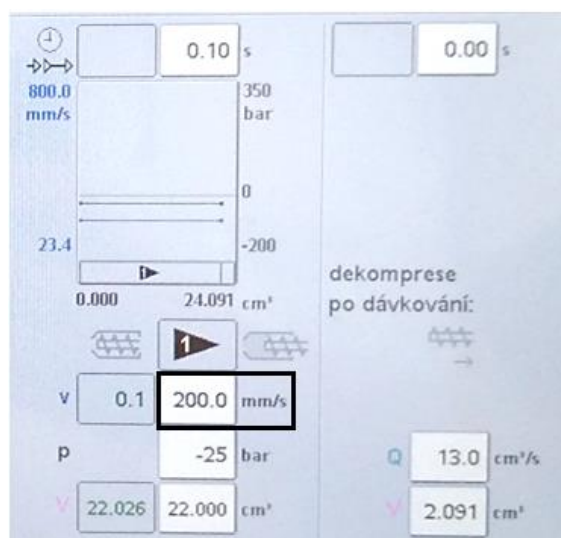
uvedené v materiálovém listu pro materiál Grilon TSG – 30/4, jsou pro náš laboratorní přístroj s malým šnekem o průměru 22 mm nelogické a nerelevantní. Bylo zjištěno, že tyto hodnoty jsou vhodné spíše pro stroje v průmyslovém měřítku.

### Zkoušky

Granulát byl zabalený v původním nerozbaleném obalu, takže nebylo nutné jej sušit. V tomto stavu je totiž materiál vysušený a připravený pro výrobu viz kapitola 4.1. Potřebná část granulátu byla přesypána do uzavíratelných nádob, aby materiál nenavlhnul a mohl se později použít na doplňování násypky.

Vstřikovací stroj byl nastaven na podobné provozní parametry, jako u poslední zkoušky s PA-GF30 teplota však byla vyšší: tryska = 305 °C,  $T_3 = 305$  °C,  $T_2 = 295$  °C,  $T_1 = 295$  °C; zpětný tlak: -25 bar a rychlost otáček šneku: 115 mm/s, ostatní parametry se nezměnily. Při vystříknutí dávky naprázdno se ukázalo, že její hmotnost a velikost je nedostačující.

Na základě informací zjištěných technologickou přípravou bylo zřejmé, že je potřeba zvýšit otáčky šneku, čímž se zvýší gradient rychlosti a zvětší se tření granulátu. Na rozdíl od zkoušky 1 uvedené v kapitole 9.2 došlo ke zvýšení rychlosti šneku. Nejdříve se zvýšila rychlost otáčení šneku ze 115 mm/s na 150 mm/s. Tato změna se při výstřiku naprázdno projevila pozitivně, protože objem dávky taveniny se zvětšil. Objem dávky však nebyl stále optimální, proto byly zvýšena rychlost otáčení šneku na 200 mm/s viz Obr. 56. Po vystříknutí naprázdno, se ukázalo, že dávka má optimální velikost i hmotnost. Rychlejší otáčky šneku způsobily nabírání většího množství granulátu.



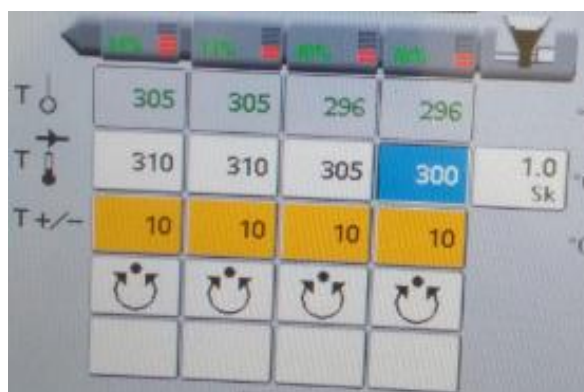
Obr. 56: Optimalizované nastavení rychlosti otáčení šneku

Po přepnutí do vstřikovací fáze, tryska nedojela až k formě tak, aby se mohla začít plnit kavita. Systém nenahlásil chybu, ale bylo zjištěno, že je možné změnit nastavení dojezdu trysky. Tato vzdálenost byla upravena a při dalším spuštění vstřikovací fáze, tryska správně dosedla na formu a kavita se začala plnit. V manuálním režimu, se podařilo vyrobit 2 zkušební tělíška, která však nebyla kompletní viz Obr. 57, vrchní část kavity totiž nebyla zcela vyplněna.



Obr. 57: První nedostříknuté vzorky

Tento problém byl způsoben nepředehřátou formou, jejíž teplota se měla pohybovat mezi 80–100 °C, bohužel se při zapínání stroje se na předehřev formy zapomnělo. Po celou dobu zkoušek s PA-GF50 se tedy vstřikovalo do studené formy, která měla teplotu okolí zhruba 25 °C. Vzhledem k nevědomosti studené formy se zvýšila teplota topných pásů na tyto hodnoty: tryska = 310 °C,  $T_3 = 310$  °C,  $T_2 = 305$  °C,  $T_1 = 300$  °C viz Obr. 58.



Obr. 58: Nastavení teplot topných pásů pro PA-GF50

Při dalším pokusu se podařilo vyrobit 2 celé zkušební vzorky, ale ihned poté se ucplala tryska, a proto se proces zastavil. Uvažovalo se, že ucpaná tryska je způsobena nízkou teplotou topného pásu na trysce. Na základě této úvahy se zvýšili teplota topného pásu na trysce na hodnotu 320 °C.

Při tomto nastavení se podařilo vyrobit několik dalších kompletních zkušebních tělísek v automatickém režimu, ale nedocílilo se zcela stabilního procesu. Výroba se většinou zastavila z důvodu ucpané trysky. Navíc povrch vystříknutých tělísek byl velmi hrubý, což je zcela evidentně způsobenou studenou formou. Při bližším zkoumání je na vzorcích vidět směr toku taveniny.

Během zkoušek bylo za potřebí pravidelně míchat granulát tak, jak je uvedeno v kapitole 9.2 Zkušební plán – Zkouška 3. Míchání granulátu bylo nezbytné, protože násypka, která byla použita pro materiál PA-GF50, byla naprosto nevhodná, jednalo se totiž o seříznuté hrdlo PET lahve na vodu viz Obr. 59. Bez míchání by v granulátu vznikaly mosty a hromadil by se v úzkém hrdle. Originální násypka nemohla být použita, protože je příliš velká a musela by se nejdříve demontovat sušárna Piovan.



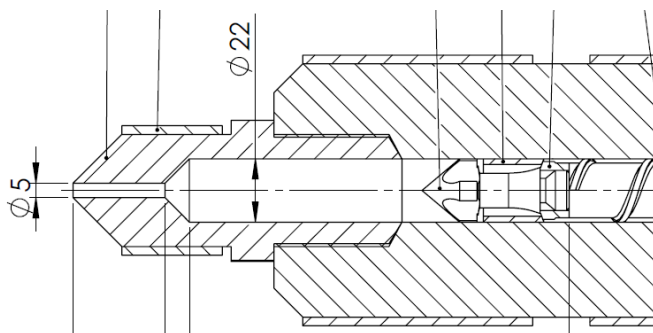
Obr. 59: Násypka tvořená seříznutým hrdlem PET lahve

#### 9.4. Výsledky první části zkoušek

Podle kritérií z kapitoly 9.1 jsou výsledky zkoušek s materiálem Grilon TSG – 30/4 neúspěšné. Nedocílilo stabilního procesu plastifikace, protože se nevytvořila dostatečně velká dávka. Ukázalo se však, že zvýšení teploty topných těles se pozitivně projevilo

na velikosti dávky. Po provedení první části zkoušek, se projeví následující možnosti jako důvody neúspěchu:

- Nevhodný kompresní poměr šneku. Podle dat společnosti EMS je kompresní poměr v pořádku, přesto že se pohybuje na hranici použitelnosti. Podle doporučení společnosti BASF je příliš malý. Nicméně se při druhé části zkoušek ukázalo, že kompresní poměr je v pořádku.
- Malý průměr šneku – společnost BASF uvádí na svých internetových stránkách, že průměr šneku by měl být větší než 30 mm. Podle e-mailové komunikace s vedoucím švýcarské laboratoře ze společnosti EMS by měl proces při použití šneku o průměru 22 mm fungovat.
- V plastikační komoře mohli vznikat mikromosty, které by zamezily plynulé dodávání granulátu.
- Špatná funkčnost zpětného ventilu. Tato možnost se ovšem nemůže snadno ověřit, protože by bylo nutné plastikační jednotku demontovat a rozebrat. Zpětný uzávěr má dvě možnosti poruchy:
  - 1) Zpětný uzávěr propouští taveninu v otevřeném stavu s velkým odporem, což může být důsledek buď příliš malých štěrbin anebo se v tavenině objevuje část neroztaveného granulátu (nečistoty), který ucpe štěrbinu trysky. Detail zpětného uzávěru a trysky je vidět na Obr. 60.
  - 2) Zpětný uzávěr netěsní, což by mohlo být důvodem pro částečné plnění kavity.



Obr. 60: Detail sestavy vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C Golden Edition [16]



## 9.5. Výsledky druhé části zkoušek

Podle kritérií z kapitoly 9.1 jsou výsledky zkoušek s materiálem ULTRAMID A3WG10 úspěšné. Tabulka 15 uvádí nastavení pracovních parametrů, které vedli k úspěšné optimalizaci a lze je doporučit pro další zkoušky.

*Tabulka 15: Optimalizované procesní parametry pro nastavení vstřikovacího stroje Arburg při zpracování materiálu Ultramid A3WG10*

Parametr	Hodnota
Rychlost otáčení šneku	200 mm/s ( $\approx 174 \text{ min}^{-1}$ )
Teplota topných pásů	tryska = 320 °C, $T_3 = 310 \text{ °C}$ , $T_2 = 305 \text{ °C}$ , $T_1 = 300 \text{ °C}$
Teplota příruby pod násypkou	25 °C
Zpětný odpor na šneku	-25 bar
Polštář	6 cm <sup>3</sup>
Dotlak	1,5 cm <sup>3</sup> /s; 1) 200 bar – 1 s; 2) 180 bar – 15 s; 3) 25 bar – 0,5 s
Objem	22 cm <sup>3</sup>
Vstřikování	1) 10 cm <sup>3</sup> /s, 350 bar, 6 cm <sup>3</sup> 2) 5 cm <sup>3</sup> /s, 300 bar, 12 cm <sup>3</sup>
Přítlačná síly trysky	40 kN, 107 bar
Přítlačná síla formy	350 kN

Fáze plastifikace byla stabilní. Šnek plnil komoru vstřikovací jednotky úplně a pravidelně, proto byla výroba v automatickém režimu možná. Na Obr. 57 a Obr. 61 jsou vidět celá zkušební tělíska, která se vyrobila po úspěšné optimalizaci.

Bohužel se proces opakovaně zastavil z důvodu ucpané trysky. Tento problém byl nejspíš způsoben studenou formou, u které nebyl zapnut předehřev na teplotu 90°C.



*Obr. 61: Vyrobená zkušební tělíska*

## ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo optimalizovat výrobní proces a popsat plastifikaci ve vstřikovací jednotce a její vliv na stabilitu výrobního cyklu. Tento cíl byl splněn při použití materiálu ULTRAMID A3WG10 neboli PA-GF50, kdy procesní parametry vstřikovacího stroje byly nastaveny správně a plastifikace byla stabilní. Ukázalo se, že nejrelevantnějším parametrem pro plastifikaci polyamidu se skelnými vlákni na malých strojích jsou otáčky šneku. Zkoušky dále ukázaly, že pro stabilní plastifikaci je také potřebná optimalizace teploty topných těles a zpětného odporu. Bohužel stability celého výrobního procesu nebylo dosaženo, pravděpodobně z důvodu nepředehřáté formy.

Na základě znalostí získaných tvorbou rešerše o vstřikování plastů a o procesních parametrech bylo vytvořeno sedm hypotéz, které zdůvodňují problematiku nestability procesu plastifikace školního vstřikovacího stroje. Pro potvrzení hypotéz, byly navrženy experimenty a pro nejrelevantnější z nich byly vytvořeny zkušební plány, které se využily při zkouškách.

V této diplomové práci byla provedena rešerše termoplastů, hlavně polyamidu vyztuženého skelnými vlákny, který se hojně využívá v automobilovém průmyslu na výrobu řady součástek.

V rámci teoretické části diplomové práce, byla vypracována rešerše metody up-scaling a byla vysvětlena její aplikace na vstřikovací stroje.

## Použitá literatura

- [1] KREBS, Stefan. Technologie zpracování plastů a kompozitů, studijní materiály. Praha. ČVUT, Ústav strojírenské technologie
- [2] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů. Praha: BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [3] ČANÍKOVÁ, Eva. Návrh vstřikovací formy pro díl křovinořezu. Zlín, 2018. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [4] LUKÁŠ, Jiří. Parametry procesu vstřikování plastů. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [5] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery. Liberec. 2014. Střední odborné učiliště Svitavy. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [6] KOLOUCH, Jan. Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [7] HEYMAN, Vlastnosti polyamidu. [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: [https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/documentation\\_cz/Kazub/Vlastnosti%20polyamidu.pdf](https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/documentation_cz/Kazub/Vlastnosti%20polyamidu.pdf)
- [8] ENSINGER, Polyamidy s plnivem ze skelných vláken [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/modifikovane-plasty/polyamidy-s-plnivem-ze-skelných-vlaken>
- [9] MATERIALISE, PA-GF [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/pa-gf>
- [10] BASF, Ultramid® (PA) Product Brochure [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: [https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en\\_GB/function/conversions:/publi sh/common/upload/engineering\\_plastics/Ultramid\\_brochure.pdf](https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en_GB/function/conversions:/publi sh/common/upload/engineering_plastics/Ultramid_brochure.pdf)
- [11] LENFELD, Petr. Technologie II – Zpracování plastů. Liberec. Technická universita Liberec. [online]. [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
- [12] ZLÝ, Lukáš. Význam tokových křivek při zpracování polymerních materiálů vstřikováním. Liberec, 2008. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [13] SEIDL, Martin. Stroje pro zpracování polymerních materiálů. Střední odborné učiliště Svitavy. [online]. 2015. [cit. 2019-03-25]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/03.html>
- [14] COVAS, Jose; GASPARGAR, Antonio. Extrusion Scale-up: An Optimization-based Methodology. International Polymer Processing – int polym proc. [online]. [cit. 2019-06-27]. [https://www.researchgate.net/figure/Scale-up-optimization-methodology-applied-to-operating-conditions\\_fig1\\_250197341](https://www.researchgate.net/figure/Scale-up-optimization-methodology-applied-to-operating-conditions_fig1_250197341)
- [15] CONZEN, Carsten. Numerische und experimentelle Untersuchungen zu Transportvorgängen in Schneckenmaschinen. Kassel. 2008. Kassel University Press. [online]. 2015. [cit. 2019-03-25]. ISBN 978-3-89958-425-7. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/a7c6/a4d621ea48fc1fb1a6017cd9f0c2134cac42.pdf>
- [16] MORÁVEK, Petr. Návrh šneku extrudéru. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.

- [17] JIRKŮ, Michaela. Metodika konstrukčního návrhu externí vstřikovací jednotky pro vícekomponentní vstřikování plastů [online]. 2018. [cit. 2019-03-11]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: [http://stc.fs.cvut.cz/pdf18/8521.pdf?\\_id=1522610493](http://stc.fs.cvut.cz/pdf18/8521.pdf?_id=1522610493)
- [18] ARBURG. Technická specifikace stroje. Allrounder 270c Golden Edition, [online]. 2018. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische\\_Daten/ARBURG\\_ALLROUNDER\\_270C\\_GOLDEN\\_EDITION\\_TD\\_523670\\_en\\_GB.pdf](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_270C_GOLDEN_EDITION_TD_523670_en_GB.pdf)
- [19] NOVÁK, Vít. HAWIGER, Vojtěch. DYNTAR, Ondřej. HÁBL, Ondřej. ŠVORC, Jan. HAVRÁNEK, Tomáš. Rešerše a návrhy na vysušení a manipulaci s granulátem a na způsob skladování vyrobených zkušebních těles. Semestrální práce. Praha, 2018. ČVUT, Ústav strojírenské technologie
- [20] PIOVAN GROUP, DPA compressed air drying [online]. 2018. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.piovan.com/en/family/drying-dehumidifying/dpa-compressed-air-drying>
- [21] EMS. Technical Data Sheet, Grilon TSG-30/4. [online]. 2002. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: <https://ems.materialdatacenter.com/eg/en/main/ds/Grilon+TSG-304>
- [22] BASF, Technical Data Sheet, Ultramid A3WG10 BK00564. [online]. 2019. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: <http://www.plasticsportal.com/products/dspdf.php?type=iso&param=Ultramid+A3WG10+BK00564>
- [23] ARBURG, Product range allrounders 680660. Výrobní program, Stroje řady Allrounder. [online]. 2018. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg\\_product\\_range\\_allrounders\\_680660\\_cz.pdf](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg_product_range_allrounders_680660_cz.pdf)
- [24] ARBURG, Hydraulické zařízení Allrounder. [online]. 2019. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg\\_hydraulic\\_allrounders\\_680480\\_cz/#](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg_hydraulic_allrounders_680480_cz/#)
- [25] SKOČILAS, Jan. KREBS, Stefan. Zápis třetího pokusu výroby zkušebních těles z PA + GF. Praha, 2018. ČVUT, Ústav strojírenské technologie
- [26] PREVIEW PROJECT EU. A Guide to Injection Moulding, [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.preview-project.eu/a-guide-to-injection-moulding/blog/>
- [27] FORUM SPRITZGUSSEWEB, Anwendungstechnik. Einzugsproblem bei PA. 2019. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.spritzgussweb.de/PHP5/wbb3/index.php/Thread/1813-Einzugsproblem-bei-PA/>
- [28] SKOČILAS, Jan. KREBS, Stefan. Zápis druhého pokusu výroby zkušebních těles z PA + GF. Praha, 2018. ČVUT, Ústav strojírenské technologie
- [29] CIMBALA, John M. Fluid properties. Pennsylvania State University. [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: [https://www.me.psu.edu/cimbala/Learning/Fluid/Fluid\\_Prop/fluid\\_property.htm](https://www.me.psu.edu/cimbala/Learning/Fluid/Fluid_Prop/fluid_property.htm)
- [30] PIOVAN GROUP. Servisní příručka. Neoriginální návod k obsluze Piovan získaný překladem italského originálního návodu. Praha.
- [31] PIOVAN GROUP. Obecný návod k obsluze.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Konstrukční řešení vstřikovacího stroje [1] .....	11
Obr. 2: Časové rozdělení vstřikovacího cyklu [3] .....	13
Obr. 3: Rozdělení polymerů [5] .....	15
Obr. 4: Rozdělení základních termoplastů [5] .....	16
Obr. 5: Vzduchový a olejový sací modul [10] .....	18
Obr. 6: olejová vana [10] .....	18
Obr. 7: Kryt olejového filtru [10] .....	19
Obr. 8: Olejový senzor [10] .....	19
Obr. 9: Rukojeť dveří [10] .....	19
Obr. 10: Podpěra momentové tyče [10] .....	19
Obr. 11: Sací potrubí [10] .....	19
Obr. 12: Pouzdro termostatu [10] .....	19
Obr. 13: Přenosový nosník [10] .....	19
Obr. 14: Potrubí chladící vody [10] .....	19
Obr. 15: Závislost modulu pružnosti na teplotě pro vybrané termoplasty; amorfni: PMMA, PC, PSU; semikrystalické: POM, PA-6, PA-66 [5] .....	20
Obr. 16: Vliv stupně krystalinity na modul pružnosti ve smyku v závislosti na teplotě: a) vysoký stupeň krystalinity, b) nízký stupeň krystalinity [11] .....	21
Obr. 17: Schéma přístroje na měření indexu toku taveniny [12] .....	22
Obr. 18: Viskózní křivky materiálu PA 6 pro vybrané teploty od 230 °C do 280 °C [2] .....	23
Obr. 19: Vliv koncentrace plniva na index toku taveniny [2] .....	23
Obr. 20: Závislost mezi otáčkami šneku a teplotou taveniny [2] .....	29
Obr. 21: Rozdělení šneku a schéma optimální velikost dávky taveniny pro zpracování [13] .....	32
Obr. 22: Princip kontroly polštáře [2] .....	32
Obr. 23: Konstrukční provedení trysky s mixážními elementy (vlevo) a s přidavným filtrem (vpravo); a) tělo trysky, b) špička trysky, c) síto filtru, d) odporový topný pás [13]. .....	34
Obr. 24: Vztah mezi jednotlivými tlaky při vstřikování [2] .....	35
Obr. 25: Průběh tlaku ve formě a jednotlivé fáze cyklu [2] .....	36
Obr. 26: Zpětný uzávěr vstřikovacího stroje; Pos. 1 – špička šneku, Pos. 2 – posuvný kroužek, Pos. 3 – sedlo uzávěru [2] .....	37
Obr. 27: Princip funkce zpětného uzávěru [13] .....	38
Obr. 28: Rozměry formy potřebné při upínání na vstřikovací stroj [2] .....	38
Obr. 29: Problematika dosedací geometrie trysky a formy [2] .....	40
Obr. 30: Optimalizace up-scaling metody aplikované na provozní podmínky; $N$ = otáčky šneku, $T_i$ = teplota jednotlivých topných pásů [14] .....	43
Obr. 31: Závislost mezi průměrem šneku o obvodovou rychlostí [2] .....	45
Obr. 32: Závislost mezi hloubkou závitu a průměrem šneku [13] .....	45
Obr. 33: Vstřikovací lis [16] .....	46
Obr. 34: Plastikační jednotka: 1 Šnek, 2 Válec, 3 Tryska, 4 Zpětný ventil, 5 Těsnící válec, 6 Těsnící kroužek, 8 Tepelné pásy velké, 9 Tepelný pás malý [16] .....	47
Obr. 35: Šnek vstřikovacího lisu Arburg Allrounder 270 C [16] .....	47
Obr. 36: Sušárna PIOVAN DPA-6 [20] .....	48
Obr. 37: Lisovna německé společnosti Kurz Kunststoffe GmbH [1] .....	49
Obr. 38: Rozdělení plastikační jednotky [26] .....	52
Obr. 39: Konstrukčních úpravy násypky: A) stříšací mechanismus, B) a C) rotační konvejery [13] .....	53
Obr. 40: Základní geometrické rozměry šneku: ( $d_v$ ) vůle mezi válcem a šroubovicí, (A) úhel stoupání závitu, (D) průměr válce tavicí komory, ( $w_c$ ) šířka závitu, ( $w_t$ ) šířka šnekovnice, ( $p$ ) rozteč závitu šroubovice a ( $d_c$ ) hloubka kanálu [13] .....	54
Obr. 41: Granulát v dopravní zóně [13] .....	54
Obr. 42: Schéma smykového tření při laminárním proudění taveniny [29] .....	56
Obr. 43: Granulát v kompresní zóně: a) Začátek komprese; b) Zvyšování podílu taveniny v kompresní zóně [13] .....	57

Obr. 44: Homogenizace taveniny [13] .....	58
Obr. 45: Výkresu šneku – dopravní zóna [16] .....	64
Obr. 46: Posuvné měřítko Somet INOX .....	64
Obr. 47: Granulát; vlevo: Grilon TSG-30/4; vpravo: Ultramid A3WG10 .....	66
Obr. 48: Parametry nastavení vstřikovacího stroje pro materiál Grilon TSG – 30/4 [21] .....	70
Obr. 49: Sušení granulátu PA – GF30 v sušárně PIOVAN DPA-6 .....	72
Obr. 50: Požadavky na stlačený vzduch pro sušárnu PIOVAN DPA-6 [30] .....	72
Obr. 51: Pracovní a technologické parametry sušárny PIOVAN DPA-6 [31] .....	73
Obr. 52: a) Tavenina vytékající z trysky; b) Útvary vzniklé vytékáním taveniny z trysky .....	74
Obr. 53: Nastavené teploty topných pásů podle doporučení společnosti EMS .....	75
Obr. 54: Zbytky taveniny po čištění stroje .....	75
Obr. 55: První tři vyrobená zkušební tělíska z PP .....	76
Obr. 56: Optimalizované nastavení rychlosti otáčení šneku .....	77
Obr. 57: První nedostříknuté vzorky .....	78
Obr. 58: Nastavení teplot topných pásů pro PA-GF50 .....	78
Obr. 59: Násypka tvořená seříznutým hrdlem PET lahve .....	79
Obr. 60: Detail sestavy vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C Golden Edition [16] .....	80
Obr. 61: Vyrobená zkušební tělíska .....	81

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Navlhavost a nasákovost vybraných polyamidů [2] .....	17
Tabulka 2: Fyzikálně-mechanické vlastnosti PA 6 a PA 66 v suchém stavu a po kondicionaci [2] .....	18
Tabulka 3: Základní vlastnosti stroje [17] [18] .....	46
Tabulka 4: Strojní parametry vstřikování pro materiál Grilon TSG – 30/4 (PA66+PA6-GF30) [21] .....	48
Tabulka 5: Strojní parametry vstřikování pro materiál ULTRAMID A3WG10 (PA66-GF50) [22] .....	49
Tabulka 6: Rozsah parametrů vstřikovacích strojů Airburg z řady Golden Edition [24] .....	51
Tabulka 7: Technologické parametry .....	60
Tabulka 8: Vstřikovaný materiál .....	61
Tabulka 9: Vstřikovací jednotka .....	61
Tabulka 10: Forma .....	61
Tabulka 11: Konstrukce výstřiku .....	61
Tabulka 12: Nastavení strojních parametrů Dr. Skočilasem a Ing. Krebsem [28] .....	62
Tabulka 13: Výsledky měření granulátu Grilon TSG-30/4 .....	65
Tabulka 14: Výsledky měření granulátu Ultramid A3WG10 .....	65
Tabulka 15: Optimalizované procesní parametry pro nastavení vstřikovacího stroje Arburg při zpracování materiálu Ultramid A3WG10 .....	81