

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav procesní a zpracovatelské techniky**

## **NÁVRH ŠNEKU EXTRUDÉRU**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Autor:** Petr Morávek

**Studijní obor:** Procesní technika a energetika

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Skočilas, Ph.D.

**Praha 2017**



### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za cenné rady a za pomoc při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat celému ústavu procesní a zpracovatelské techniky za pomoc v nesnázích

## **Abstrakt**

Práce se zabývá konstrukčním návrhem vstřikovací jednotky plně hydraulického lisu se zaměřením na výpočet operačních parametrů procesu dle zadaných hodnot a hlavně na konstrukci šneku a jeho pevnostní výpočty. Práce obsahuje literární rešerši zabývající se procesem vstřikovací jednotky, šneku s ohledem na volbu tvaru šneku, materiálu šneku a jeho povrchových úpravách. Součástí práce je výkresová dokumentace obsahující sestavu vstřikovací jednotky a výrobní výkres šneku dle požadavku zadané práce.

## **Klíčová slova**

Extrudér, vstřikolis, šnek, plast,

## **Abstract**

This thesis deal with construction design of injection molding unit. Main focus is on the calculation of process parameters according to set values, construction of extruder's screw and computing of its strength parameters. First part of this thesis contains basic literature search of an injection process, screws and differences between theirs construction and applications, its material and possibilities of surface finishes. Second part contains calculation and design of extruder's screw and technical documentation of the screw and injection unit.

## **Key word**

Extruder, injection molding, extruder screw, polymer

## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Proces vstřikování .....	9
2.1 Základní přehled.....	9
2.2 Vlastnosti vstřikovaného materiálu .....	13
2.3 Pracovní cyklus.....	14
3. Stroj.....	15
3.1 Násypka .....	15
3.2 Druhy šneku .....	18
3.3 Poměr L/D .....	20
3.4 Kompresní poměr .....	21
3.5 Materiál šneku .....	22
3.6 Povrchové úpravy šneku .....	22
3.7 Vstupní část (feeding zone).....	23
3.8 Tavicí zóna (melting zone) .....	24
3.9 Doprava taveniny (Metering zone) .....	25
3.9.1 Promíchávací zařízení.....	25
3.10 Zpětný ventil .....	26
3.11 Tryska .....	26
4. Návrh šneku .....	28
4.1 Teoretický výpočet šneku .....	28
4.2 Zadané parametry.....	29
4.3 Objem materiálu .....	30
4.4 Výkon .....	31
4.4.1 Tlaková ztráta.....	32
4.4.2 Tavení.....	36
4.4.3 Součet výkonu .....	37
4.5 Pevnost.....	37
4.5.1 Krut.....	37
4.5.2 Ohyb.....	38
4.5.3 Redukované napětí .....	39
4.5.4 Otláčení .....	40

5. Popis konstrukce .....	41
6. Závěr.....	42
7. Zdroje .....	43
8. Seznam použitého značení.....	45

## 1. Úvod

Využití plastů je stále větší a větší. Od roku 1950, kdy se spotřebovalo 1,5 milionu tun plastů za rok, jsme již na mnohem větší spotřebě, a to celosvětově téměř 300 miliónů tun za rok (rok 2013) [1]. Roste i tak průmyslové využití plastů od automobilového, přes elektro-technický až k takovým, jako je optika. Není ani divu, vždyť výroba plastů je levnější než výroba kovů, navíc nekorodují a při mnohých použití mají dostačující schopnosti.

S tím souvisí i potřeba vyšší jakosti a přesnosti je vyrábět. Zatímco desky, plastové sáčky, folie a jednoduché tvary jdou poměrně lehce vyrábět válcováním, vyfukováním či vytlačováním, na složitější tvary musíme použít sofistikovanější technologie, jako je právě vstřikování plastů. V samotném vstřikování plastů pak najdeme předešlé technologie, jak z plastikářského průmyslu, tak i z jiných odvětví. Například extrudér můžeme najít jak u vytlačovacích strojů, tak i jako šnekové dopravníky.

Oproti šnekovému dopravníku je extrudér však složitější. Šnekový dopravník přesouvá vždy jen hmotu, na kterou je stavěn, avšak extrudér musí zvládnout dopravu granulátu, tavení granulátu a následně přesun taveniny a v neposlední řadě samotné vstříknutí taveniny skrz trysku do formy.

Cílem práce je zpracovat rešerši o současných technologických možnostech vstřikování. Dále o dopočtu samotného extrudéru a samotného návrhu šneku.



## 2. Proces vstřikování

### 2.1 Základní přehled

Extrudér má základ v Archimédovu šroubu, který je znám již od starověku. Jedná se o hřídel, na které je připevněn šnekový mechanismus. Otáčením hřídele dochází k pohybu tekutiny. Z této koncepce pak byl vytvořen šnekový dopravník, který slouží k dopravě i štěrkovitého materiálu. Ač má extrudér v tomto základ, úplně první jedno-šnekový extrudér spatřil světlo světa v roce 1951 [2].

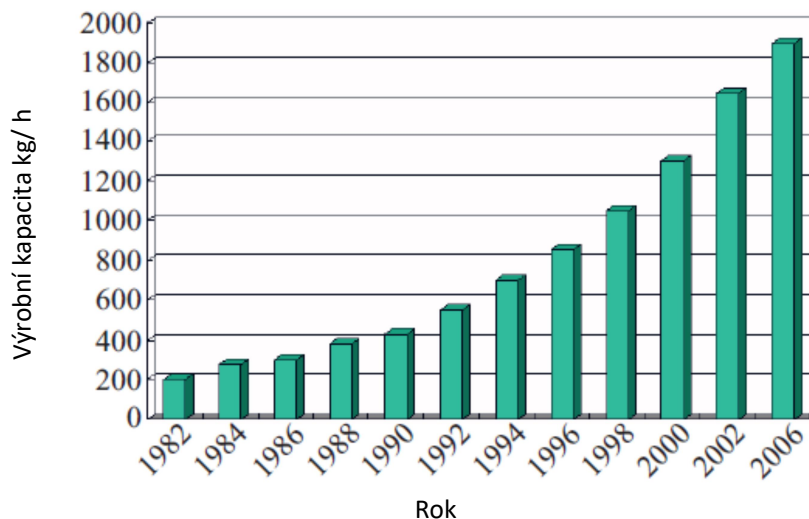
v Japonsku pro extruzi obalování drátu polyetylenem. Od té doby jsme vyrobili mnoho různých druhů extrudérů pro mnohé účely, jako například výrobu vláken z polyamidu a polyesteru anebo například výrobu filmů (velmi tenký nános) z PVC či polyolefinů.

Jedno-šnekový extrudér je tvořen třemi zónami. Jednotlivé zóny jsou:

- Vstupní zóna (feeding zone)
- Tavicí zóna (melting zone)
- Kalibrační zóna (metering zone)

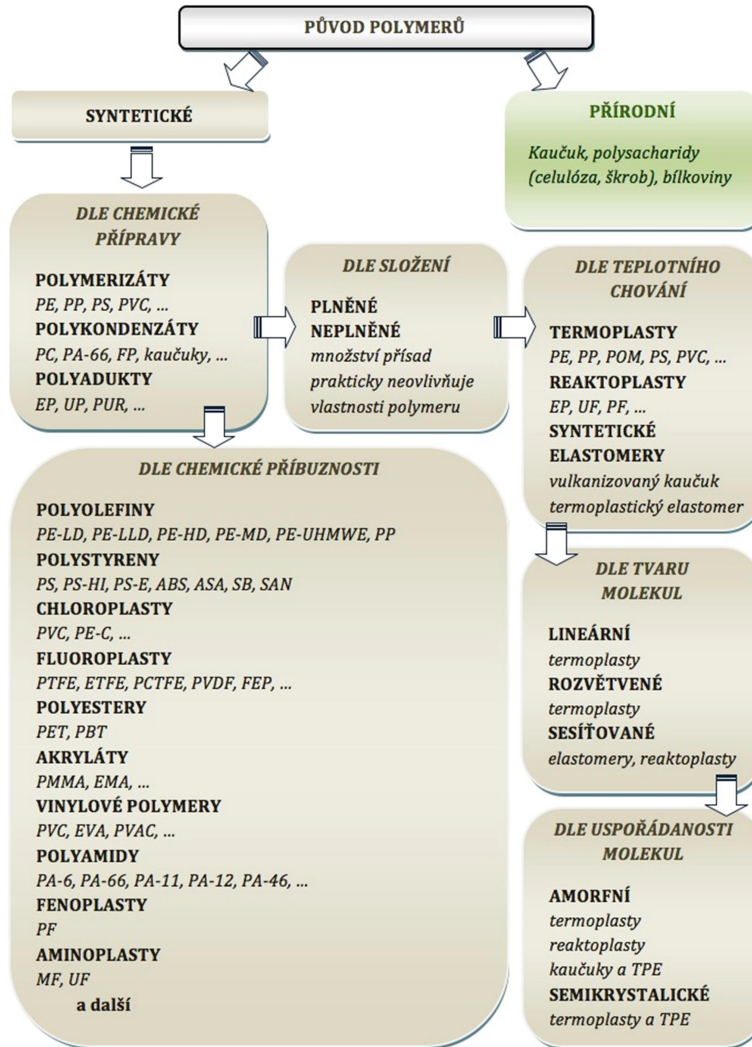
Teoretická simulace jedno-šnekové extruze započala v roce 1953. Další pokus o teoretické popsání taveniny byl publikován v roce 1966, avšak praktické chování taveniny je mnohem složitější, než tyto původní modely. Díky technologickému pokroku v extruzi a mnohých mísících zařízení (též ve výpočetní technice) byly nedávno vyvinuty teoretické modely, které popisují trojrozměrné proudění ve šneku extrudéru. Díky tomuto pokroku v simulacích je použití mísících zařízení mnohem oblíbenější. [2]

V následujícím obrázku je znázorněn vývoj dle produktivity vstřikovacího stroje.



Obr. 1 zvyšování produkce pro extrudér o průměru 65 mm [2]

Nejčastějším materiálem pro vstřikolis jsou plasty, tedy podskupina polymerních látek s aditivy pro zlepšení určitých vlastností. Polymery můžeme dělit na plasty a elastomery. Plasty jsou polymerní látky, u nichž vnější namáhání způsobuje převážně deformace nevratné, zatímco u elastomerů vnější namáhání způsobuje převážně vratnou deformaci. Plasty nadále můžeme dělit dle zpracovatelnosti po ohřátí na termoplasty a reaktoplasty, a elastomery můžeme dělit na kaučuky a termoplastické elastomery. V rámci rozsahu tohoto tématu budeme nadále uvažovat za materiál pouze termoplasty, ač nové technologie umožňují vstřikování ostatních polymerních látek, a to nejen samotných, ale i s dalšími aditivami podporujícími pevnost, jako například skelná vlákna nebo kovové prášky.



Obr. 2 Základní schéma rozdělení polymerů [11]

Nejpoužívanějšími materiály pro vstřikování a vytlačování jsou: (viz tab. 1)

Zkratka	Název
POM	Polyacetal
PA66	Polyamid 66
PA6	Polyamid 6
PC	Polykarbonát
HDPE	Polyethylen s vysokou hustotou
LDPE	Polyethylen s vysokou hustotou
PMMA	Polymethylmethakrylát
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid

Tab. 1 – nejčastěji používaný materiál [3]

Plasty do extrudéru a do vstřikolisu jsou většinou dávkovány v tzv. granulátu, kde jednotlivé granule nepřesahují rozměr několika milimetrů. Malý rozměr zaručuje použitelnost pro jakýkoliv stroj bez nutnosti předúpravy materiálu.

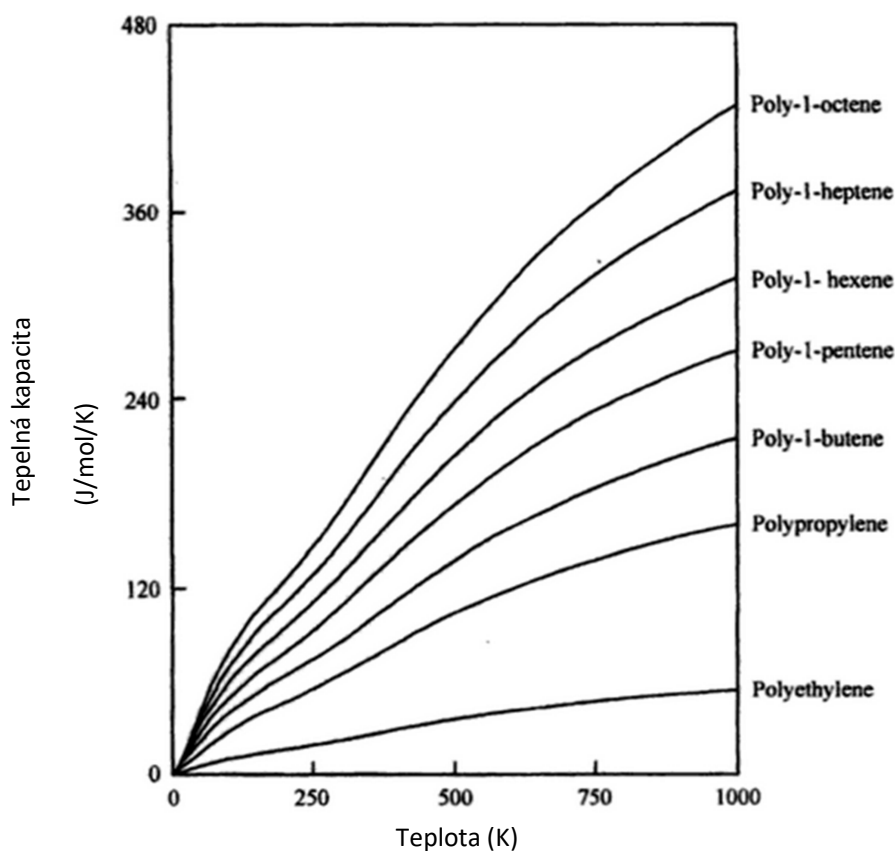
Výjimkou jsou pouze materiály, které v sobě zadržují vlhkost, a proto se musí sušit. Vlhkost v materiálu způsobuje dutinky v produktu, přetok, či roztřepení materiálu, či špatnou kvalitu povrchu.



Obr. 3 ukázka granulátu [7]

## 2.2 Vlastnosti vstřikovaného materiálu

Důležitou vlastností je měrná tepelná kapacita. Ta je jedinečná pro každý materiál a je teplotně závislá pro většinu materiálů. Je to fyzikální veličina vyjadřující množství tepla ( $Q$ ), potřebného dodat tělesu o hmotnosti  $m$ , pro zvýšení teploty o 1 kelvin ( $\Delta T$ ).



Obr. 4 tepelná závislost měrné tepelné kapacity na teplotě [6]

Další vlastností, se kterou se musí počítat je tepelná roztažnost. Ta způsobuje, že roztavený polymer zaujímá větší objem, než polymer v pevné fázi. Toto se ve vstřikování řeší pomocí dotlaku, kdy se do formy dodává další roztavený materiál. Materiál ve formě chladne a na uvolněné místo způsobené teplotní roztažností je dodáván další, ještě nezatuhlý materiál.

Nejdůležitější vlastností pro vstřikování plastů je chování plastů jako tekutiny. Jelikož se jedná o neneutonskou kapalinu, nahrazuje se její chování nejčastěji mocninným zákonem.

$$\tau = K\dot{\gamma}^m \quad \text{R1}$$

Kde  $\tau$  je smykové napětí,  $K$  je konstanta konzistence,  $\dot{\gamma}$  je smyková rychlost a  $m$  je mocninný index. Zdánlivá viskozita se pak dá dopočítat jakožto:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{K * \dot{\gamma}^m}{\dot{\gamma}} = K * \dot{\gamma}^{m-1} \quad \text{R2}$$

kde  $\eta$  je zdánlivá viskozita.

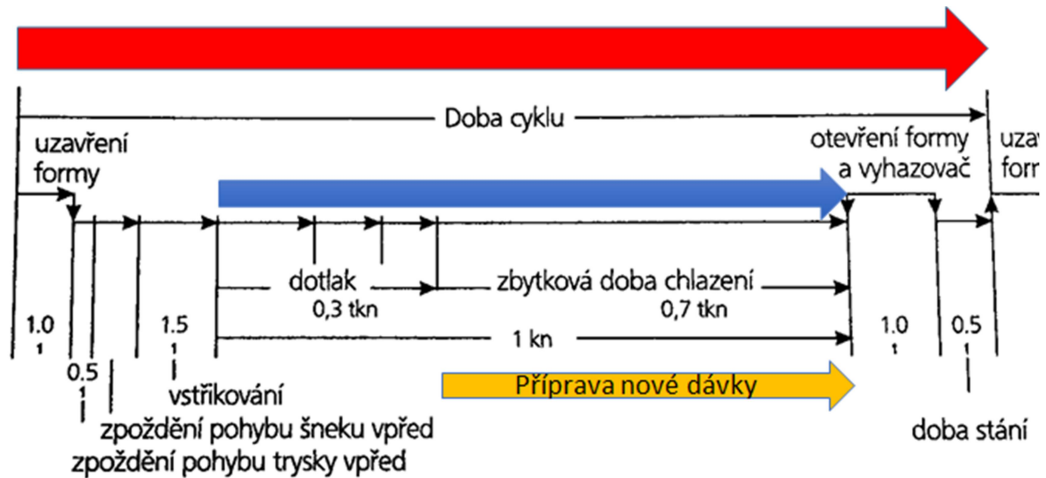
Smyková rychlost pro případ šneku je  $\dot{\gamma} = \frac{u}{h}$ , kde  $u$  je obvodová rychlost šneku a  $h$  je výška závitů.

### 2.3 Pracovní cyklus

Pracovní cyklus extrudéru se od vstřikolisu podstatně liší. Zatímco extrudér je kontinuálně pracující stroj, u vstřikolisu rozdělujeme proces výroby jednoho výrobku na sérii jednotlivých operací. Tedy u extrudéru se setkáme pouze s nasypáním do šneku, natavením, průchodem tryskou a chlazením.

U vstřikolisu jsou naopak tyto operace:

- a. Uzavření formy
- b. Příjezd vstřikovací jednotky a vyvolání přtlaku
- c. Vstřikování – plnicí a kompresní fáze
- d. Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak
- e. Dotlaková fáze
- f. Fáze chlazení souběžně s plastifikací – dávkováním taveniny před čelo šneku
- g. Odjezd vstřikovací jednotky od formy
- h. Otevření formy
- i. Vyhození nebo vyjmutí výstřiku z formy



Obr. 5 znázornění pracovního cyklu [12]

Červená šipka znázorňuje celý pracovní cyklus, modrá šipka znázorňuje dobu chlazení. Z důvodu ušetření času se ve zbytkové době chlazení již připravuje nová dávka (viz žlutá šipka).

### 3. Stroj



Obr. 6 Stroj [17]

#### 3.1 Násypka

První částí, kde se vstřikovaný materiál setkává se strojem, je násypka. Násypka slouží jako zásobník materiálu pro vstřikovací cyklus, tedy musí být dostatečně velká, aby se do ní vešlo dostatečně materiálů pro několik cyklů. S tím však souvisí další

problém a tj. zvednutí tlaku v první zóně šneku. Pokud by dodávaná hmota byla tekutinou, jednalo by se o hydrostatický tlak, tedy:

$$p = \rho g(H - h_0) \quad \text{R3}$$

Jelikož se však jedná o materiál v granulátu, je stanovení tlaku obtížnější, neboť tlak granulátu závisí na větším množství proměnných:

$$\frac{dp}{dh} = \frac{C(C_w + fKPC)}{A} + A\rho g \quad \text{R4}$$

Kde C je vlhkost okolí,  $C_w$  je přilnavost materiálu ke stěně, f smykové tření materiálu a stěny, A je plocha průřezu a K je poměr kompresního namáhání ve vertikálním směru (pro kapaliny je  $K=0$ ).

Po integrování a dosazení získáváme vzorec (při předpokladu, že H jde do nekonečna) pro maximální tlak ve tvaru

$$p_{0,max} = \frac{\rho g D}{4f_w K} \quad \text{R5}$$

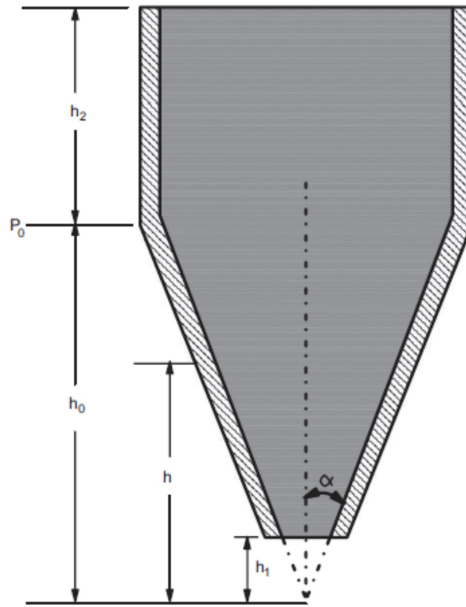
Kde  $\rho$  je hustota granulátu, D je průměr násypky,  $f_w$  je tření u stěny a K je poměr kompresního namáhání.

Kdyby se opět jednalo o kapaliny, tlak by nadále rostl s přibývajícím kapalinou (hloubkou). U pevných látek to tak není a proto místo, kde válcovitá část končí a začíná kuželovitá, je zároveň i místem násypky, kde je nejvyšší tlak.

Pro dopočet konstanty K je nutné znát úhel tření  $\delta$ . Konstanta K se pak dopočítá z rovnice:

$$K = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta} \quad \text{R6}$$





Obr. 7 Ukázka typické násypky [1]

Nutno podotknout, že úhel násypky by měl být větší, než je úhel tření mezi materiálem a stěnou násypky, aby nedocházelo k ucpávání.

Pro dopočet tlaku v zúžené části:

$$p = \left(\frac{h}{h_0}\right)^a p_0 + \frac{\rho g h}{a - 1} \left[1 - \left(\frac{h}{h_0}\right)^{a-1}\right] \quad \text{R7}$$

Kde  $p_0$  je tlak ve válcovité části a „ $a$ “ je konstanta v geometrické závislosti na kuželu jako:

$$a = \frac{B'D^*}{\tan \alpha} \quad \text{R8}$$

Kde:

$$B' = \frac{\sin \alpha \sin(2\alpha + k_0)}{1 - \sin \alpha \cos(2\alpha + k_0)} \quad \text{R9}$$

Kde:

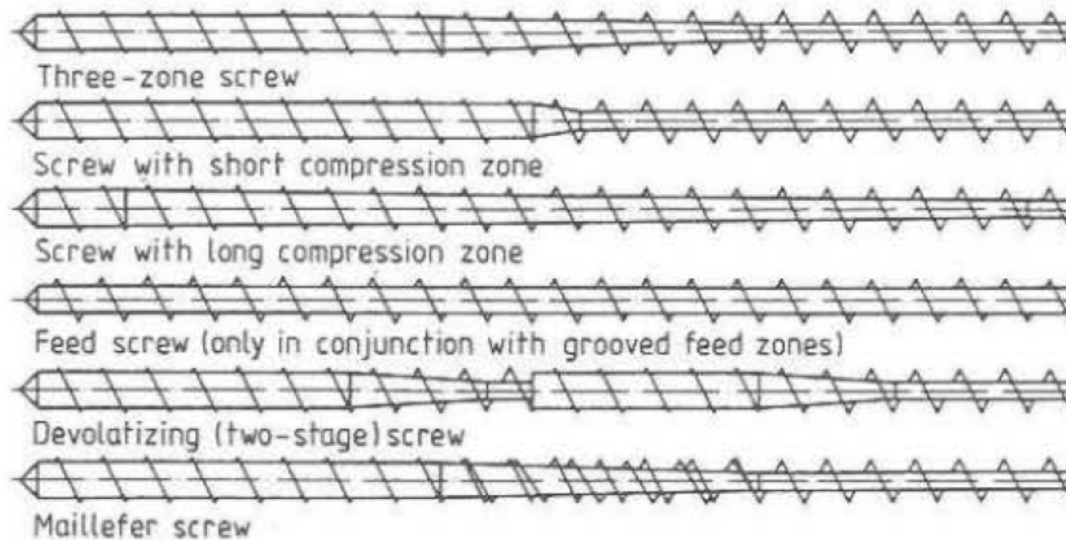
$$k_0 = \beta_w + \sin^{-1} \left( \frac{\sin \beta_w}{\sin \delta} \right) \quad \text{R10}$$

$\beta_w$  je úhel tření na stěně, teda  $\beta_w = \arctg(f)$ .

### 3.2 Druhy šneku

Tím, že šnek ve vstřikolisu zastává vícero funkcí, existuje i více druhů šneků.

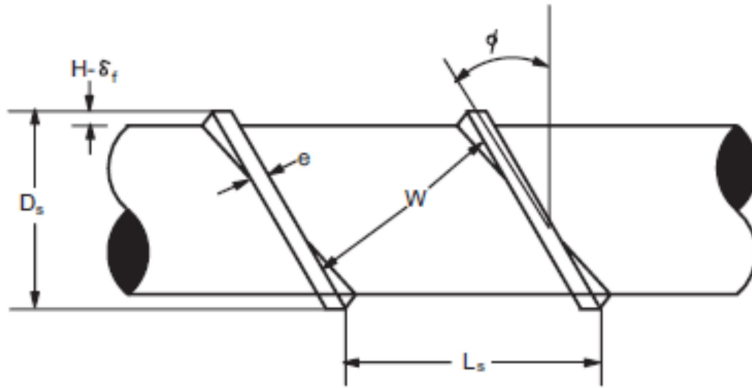
Především záleží na druhu vstřikovaného materiálu, na velikosti zpracovaného množství a na potřebě zpracovávat různý plast.



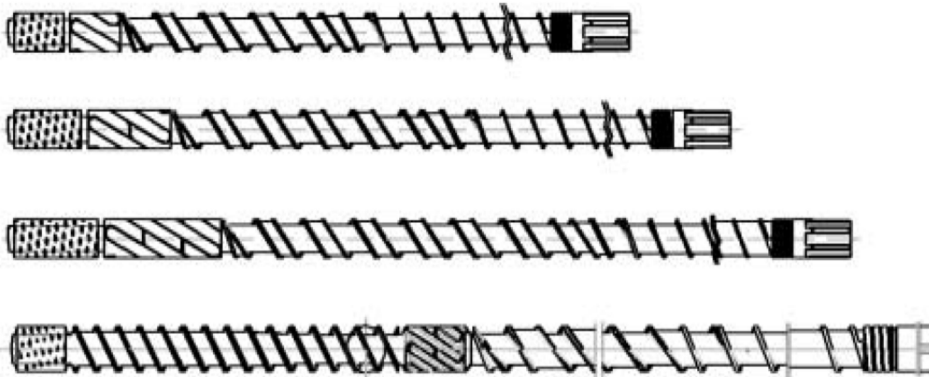
Obr. 8 druhy šneků – pevné stoupání [10]

Nejdůležitějšími parametry jsou:

- průměr šneku – jedná se o vnější průměr šroubovice –  $D_s$
- vnitřní průměr jádra – to je limitováno pevností –  $d$
- hloubka šneku – tedy rozdíl mezi vnějším a vnitřním průměrem -  $H$
- úhel stoupání závitu –  $\phi$
- šířka šroubovice –  $W$
- rozteč –  $L_s$



Obr. 9 nejdůležitější parametry šneku [1]



Obr. 10 šneky s proměnným stoupáním [3]

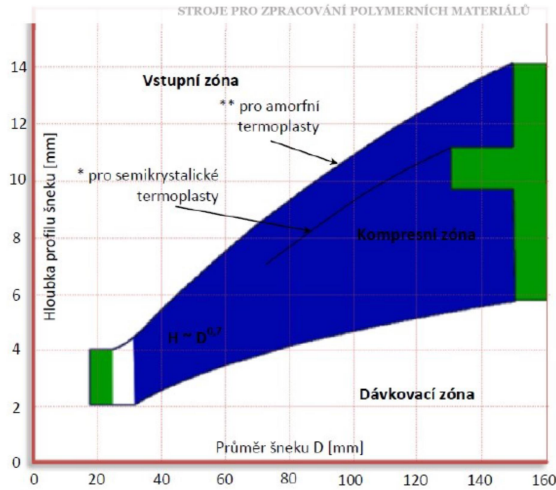
Poté, co materiál opustí násypku a ocitne se ve vstupní zóně, je následně rotací šneku dopravován až k trysce, popřípadě k místům před šnekem, jakožto zásoba roztaveného materiálu připraveného ke vstříknutí (záleží, zda se jedná o vstříkolis, či o extrudér). Každá z jednotlivých zón má jiné podmínky a jiný úkol, který musí naplnit. Z tohoto důvodu existují tedy i šneky, které nemají pevně stanovený závit a stoupání (viz obr. 10). Z důvodu zjednodušení výroby šneku se změna stoupání šneku nejčastěji řeší tak, že se tyto dva různé závity překrývají (viz obr. 11). Tento způsob sice zvyšuje tlak, a tedy zvyšuje výkon, avšak materiál se lépe promíchá. To napomáhá k homogenizaci materiálu a tedy přesnějším výrobkům a menší zmetkovitosti.



Obr. 11 předěl mezi feeding a melting zone – různé stoupání. V místě změny jsou dva závity [3]

### 3.3 Poměr L/D

Mezi důležité charakteristiky šneku patří poměr délky šneku k jeho průměru. Tento poměr je specifický pro různé materiály ke vstřikování. Pro termoplasty je poměr L/D mezi hodnotou 19:1 až 22:1, avšak pro určité materiály a pro větší výrobu se používají šneky s poměrem přes 24:1, nebo v rozmezí 22:1 až 26:1. U reaktoplastů, elastomerů a silikonů je nežádoucí dlouhá doba ohřevu v tavící komoře, neboť by mohlo dojít k jeho zesítnění (zatuhnutí – elastomery, vytvrzení – reaktoplasty). Proto u těchto materiálů je poměr L/D kolem 14:1.



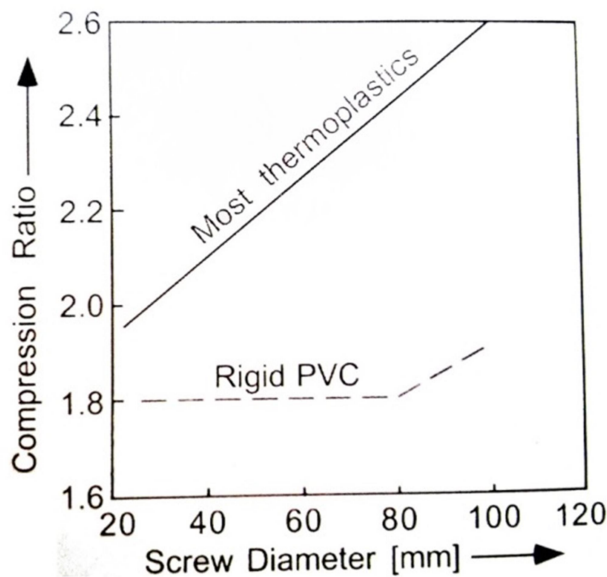
Obr. 12 Doporučené rozměry zón šneku [11]

### 3.4 Kompresní poměr

Stlačování v melting zone je způsobeno nárůstem vnitřního průměru šneku. Poměr mezi maximální hloubkou, tedy hloubkou v feeding zone, a minimální hloubkou, tedy v metering zone, se nazývá kompresní poměr.

$$KP = \frac{d_3}{d_1} \quad R11$$

Kde KP je kompresní poměr, d1 je průměr jádra ve feeding zone a d3 je průměr jádra v metering zone.



Obr. 13 – doporučený kompresní poměr pro různé materiály [8]

### 3.5 Materiál šneku

Na materiál šneku je kladeno několik požadavků. Prvním z nich je schopnost materiálu vydržet maximální krouticí moment, respektive redukované napětí z kombinovaného namáhání – krut, ohyb (viz výpočtová část).

Další podmínkou je vysoká abrazivní odolnost materiálu. Z tohoto důvodu je potřeba, aby byla možnost ocel kalit, cementovat, či nitridovat.

Obě dvě podmínky splňuje například ocel 14341.

Postupem času byly vyvinuty další materiály, například:

materiály	Obsah dalších prvků [%]		
	C	Cr	V
X 220 CrVMoW 20 4	2,2	20	4,1
X 250 CrVMoW 22 6	2,5	21,6	6
X 260 CrVMo 26 4	2,6	26	4
X 270 CrVMoW 17 9	2,7	17	9
X 310 CrVMoW 15 10	3,1	15,2	10,3
X 340 VCrWMo 13 13	3,4	12,8	13,3
X 350 VCrMoW 13 9	3,5	8,5	13
X 380 VCrWMo 17 13	3,8	12,5	17
X 410 VCrWMo 17 14	4,1	14	17
X 450 VCrWMo 18 13	4,5	13	18
X 500 VCrWMo 20 13	5	13	19,5

Tab. 2 – Materiály šneku [3]

### 3.6 Povrchové úpravy šneku

V rámci zvýšeného opotřebení funkčních ploch šneku, z důvodu zvýšeného tlaku, teploty, agresivních látek uvolňujících se především z aditiv a taky větší abraze při přidání skelných vláken, či kovových prášků, je potřeba tyto funkční plochy chránit. První krok na zlepšení korozivzdornosti a abrazivní odolnosti je zvýšení tvrdosti. Od počátku vstřikovacích strojů se tedy používalo kalení celého šneku. Dnes je již šnek více upravován. Jedná se především o nitridování pro zlepšení odolnosti proti abrazi. Pro lepší korozivzdornost jsou lepší oceli s větším množstvím chromu a již se i používá bimetalická úprava, při níž se navažuje vrstva dalšího materiálu a to do

velikosti až 2 mm. Ochranná vrstva je především ze slitin niklu, slitin železa a boru se zvýšeným obsahem chromu nebo kompozitními materiály s karbidy wolframu.

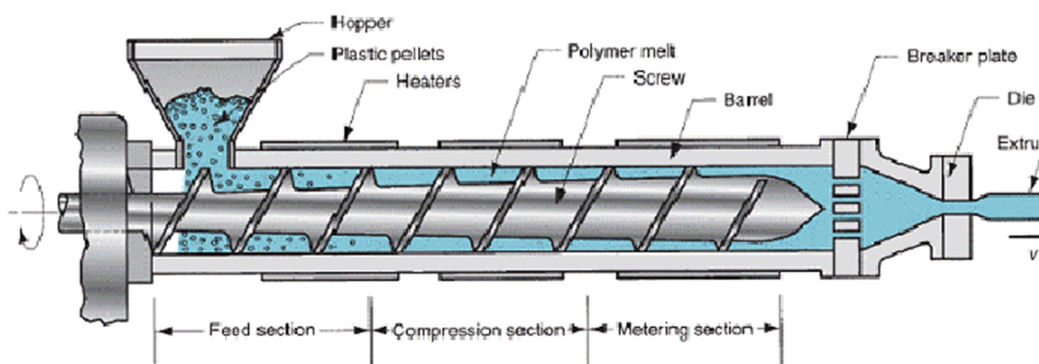
Dlouhodobé používání se projeví na všech funkčních částech. Zatímco menší části, jako je tryska či zpětný ventil, je ekonomicky výhodnější vyměnit za nové, tavící komora a šnek je výhodnější renovovat. Při tomto procesu se navaří tvrdší kov, který chrání hlubší vrstvy. Nejčastěji se používá wolfram, kobalt, chrom či slitiny těchto kovů. Tento proces bývá též označován jako pancéřování.



Obr. 14 – renovace šneku [11]

### 3.7 Vstupní část (feeding zone)

Feeding zone – první část šneku, která nabírá z násypky materiál. Z tohoto důvodu je pro tuto část charakteristický malý průměr jádra. Toto je velmi důležité, neboť při velkém průměru jádra by nešlo nabírat materiál v dostatečném množství, v horším případě by nešel materiál nabírat vůbec.



obr. 15 řez vstřikovací jednotkou [4]

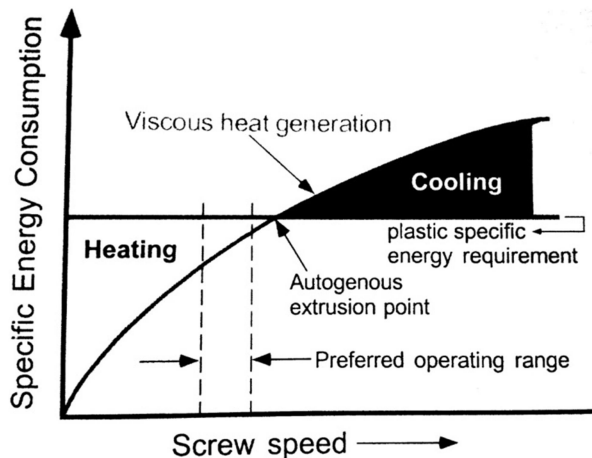
Další podmínkou je již výše zmíněné pancéřování, nejčastěji nitridování povrchu, neboť v této fázi je granulát ještě neroztaven a tedy vzniká mnohem větší otěr.

V rámci nových technologií, kdy se například vstřikuje materiál se skelnými vlákny, je třeba celý šnek pancéřovat. [11]

Při rotaci šneku se materiál posunuje dál do útrob šneku. Přitom se zrna granulátu třou o stěnu válce, šnek nebo i jednotlivé granule mezi sebou. Tím se uvolňuje teplo, které se využije při tavení granulátu.

### 3.8 Tavicí zóna (melting zone)

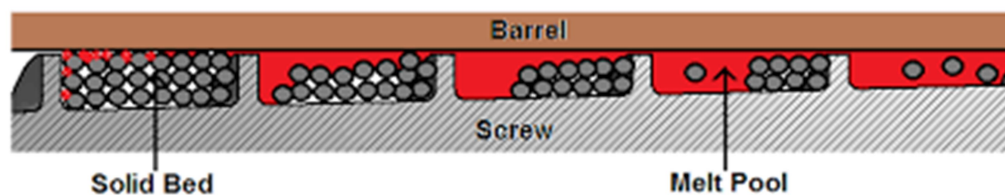
Ze vstupní zóny se při otáčení šneku dostává materiál do druhé zóny, kde se nadále taví a i stlačuje. Stlačováním se tření zintenzivňuje a dochází ještě k většímu uvolňování tepla. Tedy ač podél stěny jsou tepelné pásy, pro ohřev materiálu, největší část tepla dostává materiál ze vzájemného tření při pohybu a to přes 60% potřebného tepla.



obr.16 - závislost vlastního ohřátí na rychlosti otáček šneku [8]

Avšak toto teplo nedostává nárazově, ale postupně v melting zone (viz obr. 17). Díky tomuto se vytváří „bazének“ taveniny mezi granulátem v rámci průřezu šnekem. Tento „bazének“ postupně narůstá, dokud není roztaven celý granulát.





Obr.17 - Průřez šnekem v tavicí sekci [5]

### 3.9 Doprava taveniny (Metering zone)

Metering zone je poslední příprava materiálu před vytlačáním či vstříknutím. Jedná se tedy o zónu, která zajišťuje bezhrudkovost a homogenizaci materiálu.

V metering zone je tok podobný jako v melting zone, avšak je možný skrz celou šíři stoupání. Tok funguje na tom principu, že otáčivý pohyb šneku nutí materiál k pohybu dopředu, zatímco nehybný válec, ve kterém je šnek uložen, strhává materiál ve druhém směru. Samotný závit je pak pouze ohraničení toku a tedy místem, kde se materiál z horní části (u válce) dostává do dolní (ke šneku) a v přední části se materiál od šneku dostává opět k válci. Tímto cyklem se zajišťuje homogenizace.

#### 3.9.1 Promíchávací zařízení

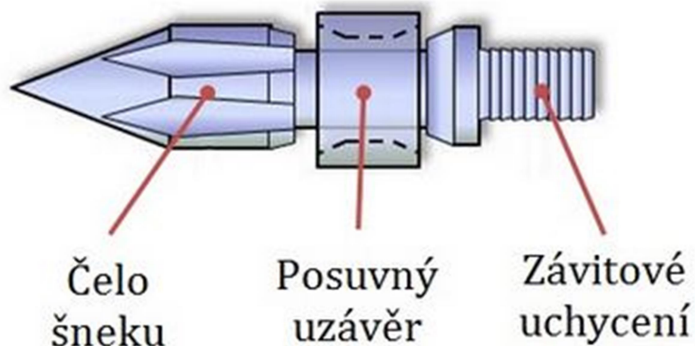
Z melting zone a metering zone by měl materiál docházet již zcela roztaven. Bohužel to nemusí být vždy pravda. Tedy pro dokonalé roztavení granulátu a pro úplnou homogenizaci (v případě přidání dalších aditiv) se na konec metering zone přidává míchací zařízení.



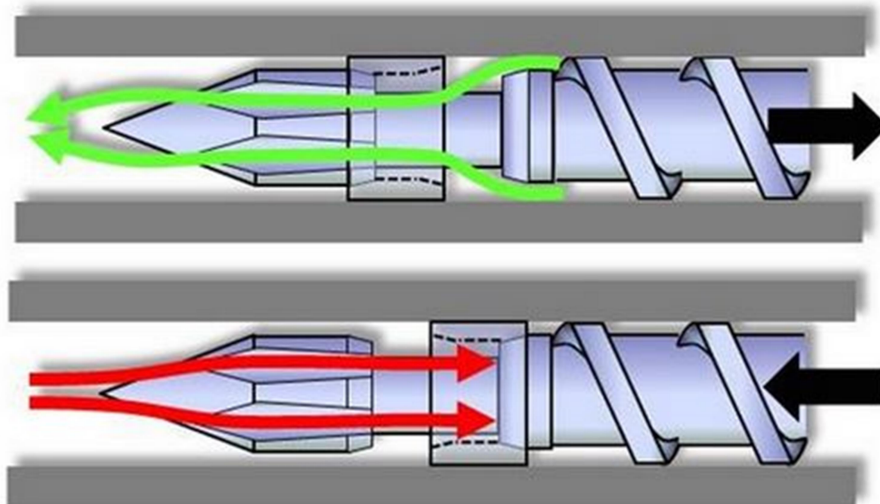
Obr. 18 – ukázka promíchávacího zařízení [3]

### 3.10 Zpětný ventil

Zpětný ventil, často označován jako torpédo, najdeme jen u vstřikolisu. Při rotaci šneku je otevřen a natavený materiál protéká skrz, před čelo. Při pohybu šneku vpřed, čili při procesu vstřikování - plnění formy, se uzavře a zabraňuje zpětnému protékání materiálu.



obr. 19 - Průřez zpětného ventilu [11]



obr. 20 - schéma fungování zpětného ventilu [11]

### 3.11 Tryska

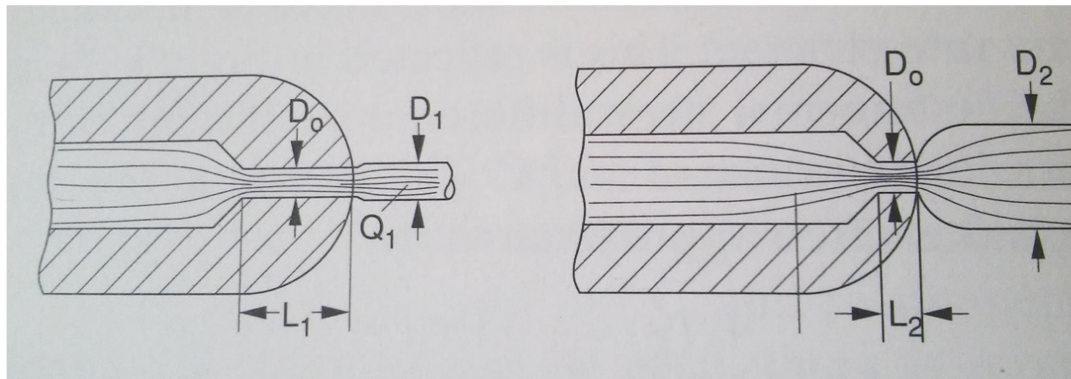
Poslední částí, kterou materiál prochází, je tryska. Zatímco u vstřikolisu se jedná o kruhový tvar, u extrudéru může nabývat různých tvarů dle produktu, který se vyrábí. U extrudéru se může jednat o L, U profil či trubky různých průměrů.

Důležitým parametrem je délka trysky. Délka by měla být co nejdelší, v rámci přesnějšího toku, avšak by neměla být přespříliš dlouhá, neboť by způsobila příliš velký odpor a tedy by přespříliš zatěžovala stroj tlakovou ztrátou. U extrudéru by příliš dlouhá tryska způsobovala přehřátí materiálu ve šneku.

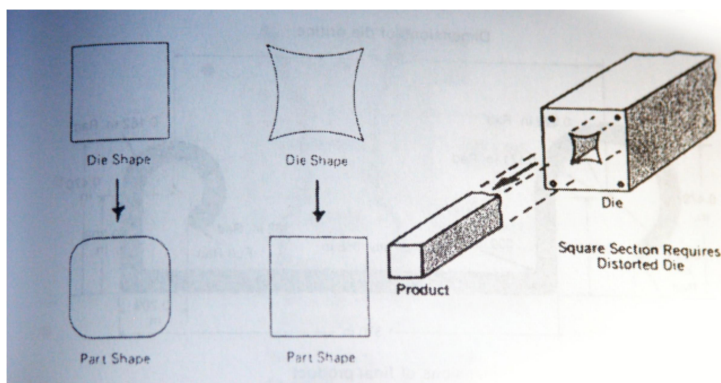
Deformace taveniny ve vstupní části trysky způsobuje napětí, které se po opuštění trysky snižuje. S tímto je třeba počítat při navrhování samotné trysky. S tím souvisí i Debořino číslo

$$De = \frac{\lambda}{t_p} \quad R12$$

kde  $\lambda$  je relaxační čas a  $t_p$  je charakteristický procesní čas. Ten může být pro vytlačování dopočítán jako poměr průměru trysky a průměrnou rychlostí. Pokud Debořino číslo přesáhne hodnotu 1, polymer nemá dostatek času na uvolnění, což může vyústit ve špatnou kvalitu povrchu.



Obr. 21 Swelling v ústí trysky[8]



Obr. 22 - navrhování trysky s ohledem na swelling [9]

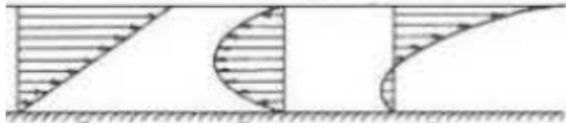
## 4. Návrh šneku

### 4.1 Teoretický výpočet šneku

Průtok šneku je tvořen třemi rozdílnými prouděními. První z nich je unášivé proudění způsobené rotací šneku, druhá je pak tlakové proudění, které u běžného extrudéru funguje proti unášivému proudění. Poslední z nich je tzv. přetok, který je způsoben netěsností mezi šroubovicí a stěnou válce. Přetok je však velmi malý, tedy jej můžeme ve výpočtu zanedbat. Tedy celkový tok ve šneku je

$$\dot{V} = \dot{V}_U + \dot{V}_p \quad \text{R13}$$

Kde  $\dot{V}_U$  je unášivé proudění,  $\dot{V}_p$  je tlakové proudění.



Obr. 23 proudění unášivé, tlakové a kombinace [10]

Tedy celkový průtok si můžeme rozdělit na unášivé proudění a na tlakové proudění a po rozvinutí šneku máme proudění mezi dvěma deskami.

Pro unášivé proudění pak platí

$$\dot{V}_U = \frac{1}{2} UWH \quad \text{R14}$$

A pro tlakové proudění máme vzorec

$$\dot{V}_p = -\frac{WH^3}{12\mu} * \frac{\partial p}{\partial L} \quad \text{R15}$$

Tedy po sečtení unášivého a tlakového proudění dostáváme výsledný vzorec

$$\dot{V} = \frac{1}{2} UWH - \frac{WH^3}{12\mu} * \frac{\partial p}{\partial L} \quad \text{R16}$$

Ač tento vzorec je pro newtonské kapaliny, dá se použít i pro neneutonské kapaliny s mírnou chybou, resp. při předpokladu konstantní rychlosti smyková deformace lze použít zdánlivou viskozitu.

## 4.2 Zadané parametry

Parametry, které byly zadány pro školní vstřikolis, můžeme rozdělit do 3 skupin.

Fyzikální parametry, kam patří například hustota, geometrické, kam patří průměr šneku a poslední skupinou je skupina procesních parametrů, kam zařadíme například otáčky.

Skupina fyzikálních parametrů:

Název	značka	hodnota	veličina
Hustota PP	$\rho_{PP}$	855	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Hustota šneku	$\rho_{\text{šn}}$	7800	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Výkon	P	2000	W
Konstanta konzistence	K	7500	-
Mocninný index	m	0,35	-
Hmotnost šneku	$m_{\text{š}}$	1,3	kg
Měrná tepelná kapacita PP	$c_p$		$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Skupina geometrických parametrů:

Název	značka	hodnota	veličina
Úhel stoupání	$\varphi$	17,71	°
Hlavní průměr	$D_t$	0,022	m
Průměr šneku	d	0,021925	m
Průměr jádra v 1. zóně	$d_1$	0,015	m
Průměr jádra v 2. zóně	$d_2$	0,017	m
Průměr jádra v 3. zóně	$d_3$	0,019	m
Celková délka	L	0,528	m
Délka FZ	$L_1$	0,22	m
Délka Mel Z	$L_2$	0,132	m
Délka Met Z	$L_3$	0,176	m
Stoupání	s	0,022	m
Délka před šnekem	$L_{\text{š}}$	0,09	m
Délka bariéry	e	0,0022	m
Délka trysky	$L_t$	0,05	m
Poloměr trysky	R	0,0015	m

Průměr

dopočítáno z  $\varphi$

Skupina procesních parametrů:

Název	značka	hodnota	veličina
Průtok	$\dot{V}$	4,00E-06	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Obvodová rychlost	u	0,4	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota tavení	$T_2$	220	°C

zadáno

Teplota pokojová	$T_1$	20	°C
------------------	-------	----	----

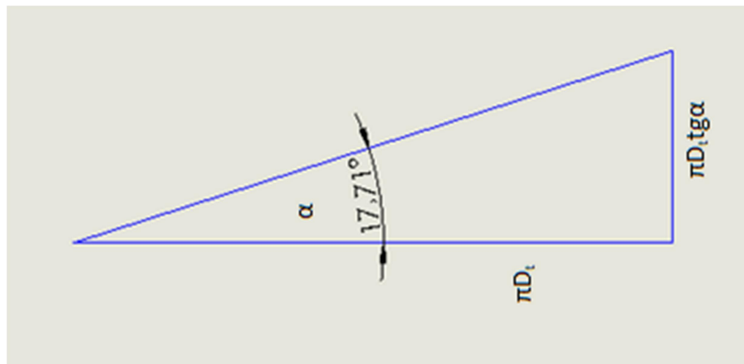
### 4.3 Objem materiálu

Celkový objem materiálu, který může být ve válci, ve kterém je uložen šnek lze spočítat jakožto součet jednotlivých objemů. Tedy:

$$V_c = V_{FZ} + V_{MelZ} + V_{MetZ} + V_{Stroke} \quad R17$$

$V_{FZ}$ ,  $V_{MelZ}$  a  $V_{MetZ}$  jsou objemy jednotlivých zón. Vzorec se lišit nebude, pouze dosazené hodnoty.  $V_{stroke}$  je objem hmoty před čelem šneku, který se spočte jakožto objem prázdného válce.

Důležité je znát délku „namotané“ šroubovice



Obr. 24 [17]

$$L_s = \frac{\pi D_t}{\cos \varphi} * \frac{L}{\pi D_t \tan \varphi} = \frac{L}{\sin \varphi} \quad R18$$

Kde  $L$  je obecná délka zóny a  $L_s$  je délka „namotané“ šroubovice.

Dostáváme tedy rovnici

$$V_c = \left( \sum_{i=1}^3 \frac{W \cdot h_i L_i}{\cos \varphi * \sin \varphi} \right) + \frac{1}{4} L_s D_t^2 \quad R19$$

Kde  $W = (s - e) \cos \varphi$

$$V_c = \frac{(s - e) * h_1 * L_1}{\sin \varphi} + \frac{(s - e) * h_2 * L_2}{\sin \varphi} + \frac{(s - e) * h_3 * L_3}{\sin \varphi} + \frac{\pi L_s D_t^2}{4} \quad \text{R20}$$

$$V_c = \frac{1}{\sin 17,71} [(0,022 - 0,0022) * 0,0035 * 0,22 + (0,022 - 0,0022) * 0,0025 * 0,132 + (0,022 - 0,0022) * 0,0015 * 0,176] + \pi * 0,09 * 0,022^2 * \frac{1}{4}$$

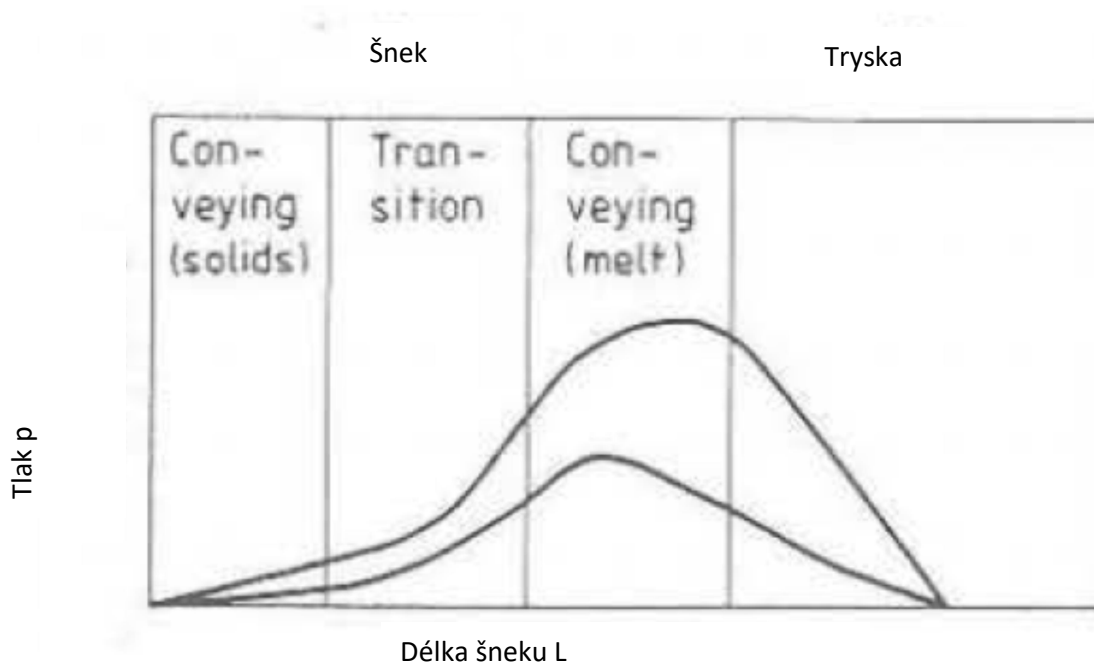
$$V_c = 123 * 10^{-6} m^3.$$

Celkový objem materiálu ve vstřikovací jednotce je tedy 123 cm<sup>3</sup>

#### 4.4 Výkon

Potřebný výkon můžeme rozdělit do dvou složek. Na výkon potřebný k proudění taveniny, tedy k překonání tlakové ztráty, a na výkon potřebný k natavení granulátu. Druhá složka se ještě dělí na dvě další, na energii dodanou tepelnými pásy a na energii přeměněnou ze tření granulátu mezi sebou. Jedná se tedy o energii, kterou musí dodat motor na pohon šneku. Poměr mezi energií přeměněnou ze tření ku energii dodanou tepelnými pásy závisí na rychlosti šneku. U doporučené rychlosti se tento poměr pohybuje kolem 6:4, tedy 60% energie na tavení materiálu dodává motor.

#### 4.4.1 Tlaková ztráta



Obr. 25 průběh tlaku v extrudéru [10]

Z podobnosti extrudéru se šroubovými čerpadly se dá použít výpočet průtoku a tedy tlakové ztráty. K tomu je potřeba provést inspekční analýzu a definovat si bezrozměrné jednotky průtoku ( $\dot{V}^*$ ), tlaku ( $p^*$ ) a délky ( $l^*$ ).

Tedy:

$$\dot{V}^* = \frac{\dot{V}}{nD_t^3} \quad \text{R21}$$

$$p^* = \frac{p}{\eta n} \quad \text{R22}$$

$$l^* = \frac{l}{D_t} \quad \text{R23}$$

Kde  $n$  – jsou otáčky,  $D_t$  průměr šneku,  $\dot{V}$  je objemový tok,  $p$  je tlak,  $\eta$  je zdánlivá viskozita a  $l$  je délka jednotlivých zón.

Pak bezrozměrný tok je:



$$\dot{V}^* = \alpha_0 - \beta_0 \frac{\partial p^*}{\partial l^*} \quad \text{R24}$$

Kde  $\alpha_0$  a  $\beta_0$  jsou geometrické konstanty. Ty se dají dopočítat z následujících vzorců:

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D_t}{d} - \frac{d_i}{d} \right) \left( \frac{s}{d} - \frac{e}{d} \right) \frac{D_t}{d} \cos^2 \varphi \quad \text{R25}$$

$$\beta_0 = \frac{1}{96} \left( \frac{s}{d} - \frac{e}{d} \right) \left( \frac{D_t}{d} - \frac{d_i}{d} \right)^3 \sin \varphi \cos \varphi \quad \text{R26}$$

Kde  $d_i$  je průměr jádra,  $d$  je vnější průměr šneku,  $D_t$  je průměr válce.

Po úpravě dostáváme vzorec pro tlakovou ztrátu:

$$\Delta p^* = \frac{\alpha_0 - \dot{V}^*}{\beta_0} l^* \quad \text{R27}$$

#### 4.4.1.1 Výkon ve vstupní zóně

Pro výkon ve feeding zone použijí výpočet výkonu pro dopravu šnekového dopravníku. Jedná se o teoretický vzorec

$$P = \dot{V} \rho_{\text{granulát}} L w \quad \text{R28}$$

Kde  $L$  je obecná délka (v tomto případě délka vstupní zóny) a  $w$  je součinitel vlečného odporu. V rámci bezpečnosti byl součinitel vlečného odporu stanoven na hodnotu 10 (pro srovnání  $w_{\text{cementu}}=3$ )

Výkon potřebný pro dodání granulátu do další zóny je (dosazení do R28)

$$P = 4 * 10^{-6} * 960 * 0,22 * 10 = 8,45 * 10^{-3} W$$

V rámci hodnot, které následně dopočítáme pro melting a metering zone je tato hodnota až zanedbatelná.

#### 4.4.1.2 Tlaková ztráta v Melting zone

Pro dopočet tlakové ztráty stačí dosadit, avšak nejprve je nutné dopočítat otáčky šneku a bezrozměrnou délku. Ta má velikost  $l^* = l_2 / D_t = 6$ . Jelikož známe doporučenou rychlost, tak víme, že:

$$\omega = \frac{u}{r} = 2\pi n \quad \text{R29}$$

Kde  $u$  je doporučená rychlost,  $r$  je poloměr a  $\omega$  je úhlová rychlost

Z čehož vychází, že:

$$n = \frac{u}{2r\pi} = \frac{u}{\pi D_t} = \frac{0,4}{\pi * 0,022} \doteq 5,8s^{-1} \quad R30$$

Geometrické konstanty v melting zone jsou (R25 a R26):

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{0,022}{0,021925} - \frac{0,017}{0,021925} \right) \left( \frac{0,022}{0,021925} - \frac{0,0022}{0,021925} \right) \frac{0,022}{0,021925} \cos^2 17,71 = 0,14778$$

$$\beta_0 = \frac{1}{96} \left( \frac{0,022}{0,021925} - \frac{0,0022}{0,021925} \right) \left( \frac{0,022}{0,021925} - \frac{0,017}{0,021925} \right)^3 \sin 17,71 \cos 17,71 = 3,2447 * 10^{-5}$$

Bezrozměrná tlaková ztráta má pak velikost (dosazení do R27)

$$\Delta p^* = \frac{0,14778 - 4 * 10^{-6}}{3,2447 * 10^{-5}} * 6 = 15227,46$$

Pro dopočet tlakové ztráty potřebujeme znát zdánlivou viskozitu. Z dřívější kapitoly víme, že

$$\eta = K * \dot{\gamma}^{m-1} \quad R31$$

Smykovou rychlost  $\dot{\gamma}$  počítáme ze vzorce:

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{h} = \frac{0,4}{0,0025} = 160 s^{-1} \quad R32$$

Zdánlivá viskozita má pak hodnotu:

$$\eta = 7500 * 160^{0,35-1} = 276,94 Pa \cdot s$$

Celková tlaková ztráta v melting zone je pak:

$$\Delta p_{melting} = \eta * n * \Delta p^* = 276,94 * 5,8 * 15227,46 = 24,46 MPa$$

#### 4.4.1.3 Tlaková ztráta v Metering zone

Pro dopočet tlakové ztráty stačí dosadit, avšak nejprve je nutné dopočítat otáčky šneku a bezrozměrnou délku. Ta má velikost  $l^* = l_2/D_t = 8$ . Zde se otáčky šneku nemění, tedy

$$n = 5,8s^{-1}$$

Geometrické tolerance melting zone jsou (R26 aR27):

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{0,022}{0,021925} - \frac{0,019}{0,021925} \right) \left( \frac{0,022}{0,021925} - \frac{0,0022}{0,021925} \right) \frac{0,022}{0,021925} \cos^2 17,71 = 0,08867$$

$$\beta_0 = \frac{1}{96} \left( \frac{0,022}{0,021925} - \frac{0,0022}{0,021925} \right) \left( \frac{0,022}{0,021925} - \frac{0,019}{0,021925} \right)^3 \sin 17,71 \cos 17,71 = 7,01 * 10^{-6}$$

Bezrozměrná tlaková ztráta má pak velikost:

$$\Delta p^* = \frac{0,08867 - 4 * 10^{-6}}{7,01 * 10^{-6}} * 8 = 26521,11$$

Pro dopočet tlakové ztráty potřebujeme znát zdánlivou viskozitu. Z dřívější kapitoly víme, že:

$$\eta = K * \dot{\gamma}^{m-1}$$

smykovou rychlost  $\dot{\gamma}$  dopočítáme ze vzorce

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{h} = \frac{0,4}{0,0015} = 266,67 s^{-1}$$

Zdánlivá viskozita má pak hodnotu

$$\eta = 7500 * 160^{0,35-1} = 198,7 Pa \cdot s$$

Celková ztráta v metering zone je pak

$$\Delta p_{metering} = \eta * n * \Delta p^* = 198,7 * 5,8 * 26521,11 = 30,56 MPa$$

#### 4.4.1.4 Celková tlaková ztráta v tavenině

Celková ztráta v melting a metering zone činí:

$$\Delta p = \Delta p_{melting} + \Delta p_{metering} = 24,46 + 30,56 = 55,02 MPa$$

Z operačních parametrů vstřikovací jednotky stroje ARBURG 270C, dle kterého byla použita vstupní data pro výpočet, je maximální dávka výstřiku  $32\text{cm}^3$ , čemuž odpovídá maximální použitelný vstřikovací tlak  $200\text{MPa}$ . Při porovnání těchto hodnot s výpočtem, lze konstatovat, že vypočtená hodnota tlakové ztráty je reálná.

Pro dopočet výkonu potřebný pro dopravu tekutiny lze použít vzorec:

$$P_d = \Delta p * \dot{V} = 55,02 * 10^6 * 4 * 10^{-6} = 220,08 \text{ W}$$

Tedy výkon hydraulického motoru pro dopravu taveniny je  $220,08 \text{ W}$ .

#### 4.4.1.5 Tlaková ztráta v trysce

Vzorec pro neneutonské kapaliny se spočítá: [14]

$$\Delta p_t = \frac{2KL_t}{R} \left[ \dot{V} * \frac{3 + m^{-1}}{\pi R^3} \right]^m \quad \text{R33}$$

$$\Delta p_t = \frac{2 * 7500 * 0,032}{0,0015} \left[ 4 * 10^{-6} * \frac{3 + 0,35^{-1}}{\pi 0,0015^3} \right]^{0,35} = 4,74 \text{ MPa}$$

#### 4.4.2 Tavení

Z grafu závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě (Obr.4) a za pomoci převodu obrázku na data (<http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/app/>) a následném převodu dat skrz MS Excel získáváme závislost:

$$c_{pm} = -9 * 10^{-5} T^2 + 0,2462 T + 3,44 \quad \text{R34}$$

Pro střední teplotu:

$$T_s = \frac{T_2 + T_1}{2} = \frac{220 + 20 + 2 * 273,15}{2} = 393 \text{ K} \quad \text{R35}$$

získáváme hodnotu  $c_{pm}$ :

$$c_{pm} = -9 * 10^{-5} * 393^2 + 0,2462 * 393 + 3,444$$

$$= 86,2962 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Jelikož potřebujeme hodnotu  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  musíme podělit  $c_{pm}$  molární hmotností polypropylenu. Tedy

$$c_p = \frac{c_{pm}}{M_{PP}} * 1000 = \frac{86,2962}{42,08} * 1000 = 2050,765 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \quad \text{R36}$$

Energie potřebná pro natavení materiálu je tedy

$$Q = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{V}\rho_{PP}c_p(T_2 - T_1) \quad \text{R37}$$

$$Q = 4 * 10^{-6} * 855 * 2050,765 * 200 = 1402,72 \text{ W}$$

Jelikož energie ze tření rovná cca 60%, tak tedy z motoru na natavení materiálu je spotřebovááno

$$Q_m = 0,6 * Q = 0,6 * 1402,72 = 841,632 \text{ W} \quad \text{R38}$$

#### 4.4.3 Součet výkonu

Minimální výkon motoru tedy musí být:

$$P_{min} = P_d + Q_m = 220,08 + 841,632 = 1061,712\text{W} \quad \text{R39}$$

Ač zadaný výkon motoru je 2000W, na pohyb šneku stačí kolem 50%.

#### 4.5 Pevnost

Pevnost šneku se musí zkontrolovat z důvodu bezpečného fungování stroje. Jedná se o kontrolu na krut a na ohyb a tedy na kombinované namáhání.

##### 4.5.1 Krut

Tedy ze zadaného výkonu a otáček můžeme dopočítat maximální krouticí moment, který šnek musí udržet. Zadaný výkon je P=2000W a obvodová rychlost šneku v=0,4m/s.

$$\omega = \frac{u}{r} = 2\pi n$$

Kde  $\omega$  je uhlová rychlost, u obvodová rychlost, r je poloměr a n jsou otáčky.

Z tohoto dostáváme, že:

$$n = \frac{u}{2\pi r} = \frac{u}{\pi D} = \frac{0,4}{0,022 * \pi} = 5,8 \text{ s}^{-1}$$

Kde D je průměr šneku.

Uhlová rychlost je pak:

$$\omega = 2\pi n = 2\pi 5,8 = 36,44 \text{ rad}^{-1}$$

To nám stačí pro určení krouticího momentu ze vzorce  $P = M_k \omega$

Tedy maximální krouticí moment je:

$$M_k = \frac{P}{\omega} = \frac{1061,712}{36,44} = 29,14 \text{ Nm} \approx 30 \text{ Nm} \quad \text{R40}$$

Z pružnosti a pevnosti materiálu určíme smykové napětí:

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{16M_k}{\pi D_{min}^3} = \frac{16 * 30}{\pi * 0,01^3} = 152788745,4 \text{ Pa} = 152,8 \text{ MPa} \quad \text{R41}$$

Kde  $\tau_k$  je smykové napětí a  $W_k$  je průřezový modul v krutu a  $D_{min}$  je minimální průměr na šneku. Ze smykového napětí již dostaneme potřebnou hodnotu meze krutu podle Mohrovy teorie a to tedy, že  $\tau = \frac{\sigma}{2}$ . Hledáme tedy ocel s mezí kluzu  $R_e$  větší než 560MPa. Zde neuvažuji bezpečnost  $k$ , neboť se jedná o maximální krouticí moment, kterého se dle předchozích výpočtů nedosáhne.

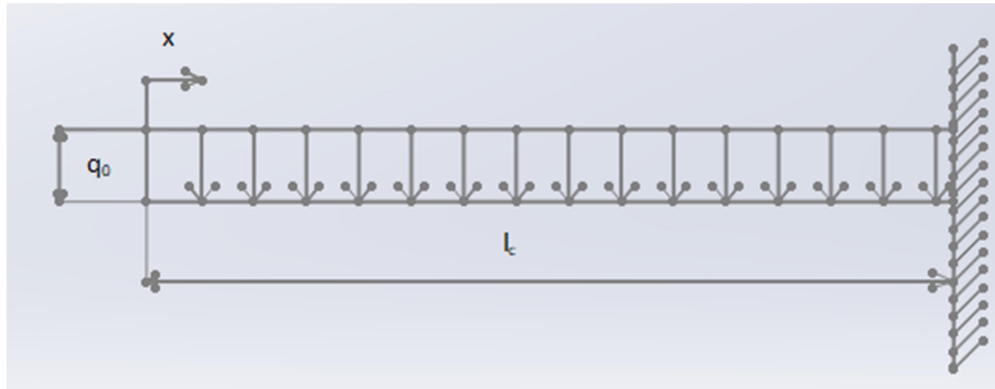
#### 4.5.2 Ohyb

Ohybový moment nebude příliš velký, tedy do pevnosti materiálu nezasáhne tolik jakožto smykové napětí od motoru. Přesto pro kontrolu je potřeba jej spočítat. V rámci dopuštěných chyb budeme považovat nejhorší případ, tedy nejužší část nosníku bude u vetknutí ve spojce.

Při výpočtu ohybového momentu použijeme nahrazení za nosník o kruhovém průřezu. Z programu Solidworks víme, že celý šnek váží, při zadané hustotě  $\rho_{ocel}=7800\text{kg/m}^3$  a hmotnosti 1,302 kg.

Ze známé celé délky  $L_c=0,688\text{m}$  můžeme dopočítat průměrnou velikost spojitého zatížení.

$$q_0 = \frac{mg}{L_c} = \frac{1,302 * 9,81}{0,688} = 18,56 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad \text{R42}$$



Obr. 26 – znázornění nosníku [17]

Z pružnosti a pevnosti pro tento případ víme tyto vzorce:

$$q(x) = q_0 \quad \text{R43}$$

$$T_O(x) = q_0 * x \quad \text{R44}$$

$$M_O(x) = \frac{1}{2} q_0 x^2 \quad \text{R45}$$

Maximální moment se bude nacházet v místě  $x=l$ , tedy:

$$M_{max} = \frac{1}{2} q_0 l^2 = \frac{1}{2} * 18,56 * 0,688^2 = 4,39 Nm$$

Napětí pak dopočítáme :

$$\sigma_O = \frac{M_O}{W_O} = \frac{32M_O}{\pi d_{min}^3} = \frac{32 * 4,39}{\pi * 0,01^3} = 44,72 MPa \quad \text{R6}$$

Tedy největší napětí z ohybového momentu má hodnotu 44,72MPa.

#### 4.5.3 Redukované napětí

Redukované napětí z kombinace namáhání krut-ohyb má tvar:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_O^2 + (\alpha \tau_k)^2} \quad \text{R47}$$

Pro Guestovu podmínku platí  $\alpha=2$ , tedy:

$$\sigma_{red} = \sqrt{44,72^2 + (2 * 152,8)^2} = 308,85 MPa$$

Dovolené napětí pro materiál 14341 je  $\sigma_D=588 MPa$ . Tedy pevnostní podmínka je splněna, neboť  $\sigma_D > \sigma_{red}$ .

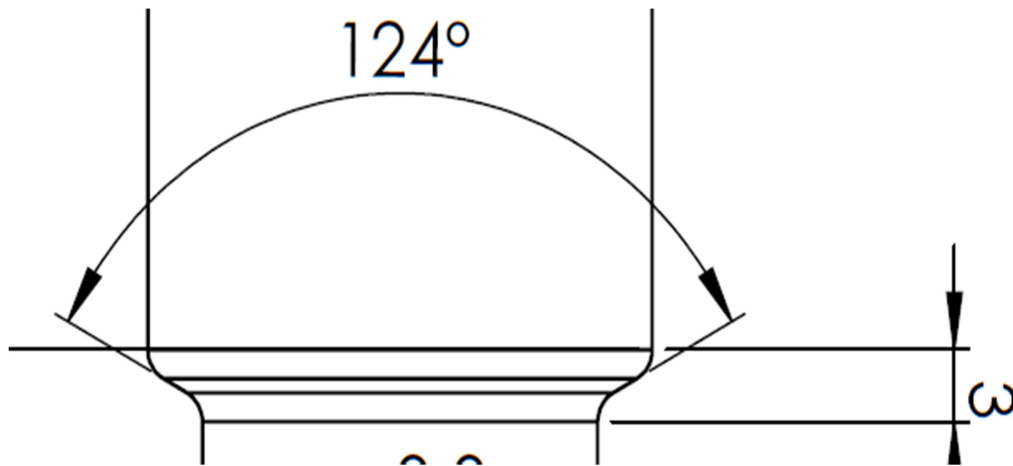
#### 4.5.4 Otláčení

Při vstřikování plastů, tedy, při operaci, kdy se šnek vstřikolisu mění na funkci pístu, dochází u napojení na hřídel motoru k velkým silám. Je tedy potřeba zkontrolovat, zda nedochází k otláčení a tedy deformaci zadní části šneku.

Dovolený tlak na otláčení stanovme na  $p_D=80\text{MPa}$ .

Tlak při vstřikování neboli tlaková ztráta na trysce je  $p_t=4,74\text{MPa}$

$$F_1 = p_t S_v = \frac{p_t \pi D_t^2}{4} = \frac{4,74 * 10^6 * \pi * 22^2 * 10^{-6}}{4} = 1801,8\text{N} \quad \text{R48}$$



Obr. 27 detail místa otláčení [17]

Plocha na kterou síla  $F_1$  působí je pak

$$S_2 = \pi d_{prům} l = \pi d_{prům} \frac{3}{\sin(90 - \frac{\beta}{2})} = \pi * 16 * \frac{3}{\sin 28} = 321,2\text{mm}^2 \quad \text{R49}$$

Celkový tlak, který může způsobit otláčení je

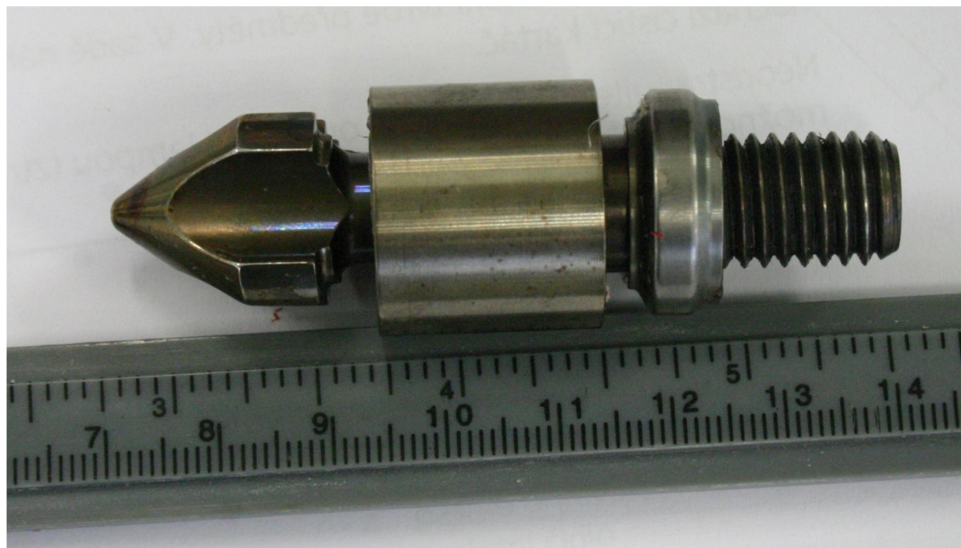
$$p_o = \frac{F_2}{S_2} = \frac{F_1 \cos 28}{S_2} = 4,95\text{MPa} \quad \text{R50}$$

Tedy tlak působící otláčení je přibližně 16x menší než je tlak dovolený



## 5. Popis konstrukce

V rámci školního vstříkolisu jsem měl možnost podílet se na čištění šneku. Tedy příloha této práce je i výkres šneku, který byl upraven již podle existujícího výrobku.



Obr. 28 rozebraný zpětný ventil [17]



Obr. 29 pohled na celý šnek [17]

Tento šnek posloužil i jako zdroj zadaných dat, podle kterých byli uskutečněny výpočty.

Druhou přílohou je pak celá sestava, šnek, zpětný ventil, objímkové spojení a válec.

Vstříkovací jednotka je navržena jako montovaná sestava z několika částí. Na vstříkovací válec je možné přišroubovat násypku granulátu v kolmém směru na osu šneku a vstříkovací trysku, do které ústí tavenina ve výstupní části válce. Uvnitř válce je umístěn šnek s vůlí, aby mohl vykonávat posuvný a rotační pohyb. Na čelo šneku je připevněn zpětný ventil, jehož poloha je vymezena distančním kroužkem. Šnek je připojen k hydraulickému pohonu svěrným spojem.

## 6. Závěr

V první, teoretické části práce, byly předloženy základní druhy plastů používané v procesu vstřikování, nastíněny jejich základní vlastnosti, včetně tokových vlastností popsanych mocninovým zákonem.

Pokračovalo stručné shrnutí technologie vytlačování a vstřikování plastů, základních parametrů šneku, rozebrání možných materiálů šneku a používaných druhů šneků. Byly diskutovány i speciální šneky s konstrukční úpravou pro lepší promíchání taveniny ve vstřikovací jednotce. Krátce byly uvedeny i jeho nejběžnější povrchové úpravy, tedy kalení, nitridování a bimetalové pancéřování.

Druhá, tedy výpočtová část, obsahuje dopočty maximálního objemu vstřikovaného materiálu ve šneku, který činí na  $123 \text{ cm}^3$ . Jelikož zadaná dávka na výlisek produktu činí cca  $20 \text{ cm}^3$ , tudíž na kompletní vyprázdnění válce šneku je potřeba minimálně 6 výstřiků.

Dále byla na základě zadaných dat stanovena tlaková ztráta  $55 \text{ MPa}$  a následně byl vypočítán minimální výkon motoru pro provoz stroje dle zadaných paramterů a ten činí  $1062 \text{ W}$ .

Z vypočítaného výkonu motoru bylo stanoveno kombinované namáhání šneku a byla provedena kontrola, zda navržené rozměry šneku vyhovují pevnostní podmínce.

Nakonec byla prověřena možnost otlačení šneku.

Nedílnou součástí práce je výkresová dokumentace obsahující zjednodušený výkres sestavy vstřikovací jednotky a výrobní výkres navrženého šneku.

## 7. Zdroje

- [1] Donald G Baird; Dimitris I. Collias; Polymer processing Principles and Design; Jonh Wiley & Sons; New Jersey, 2014, ISBN 978-0-470-93058-8
- [2] Sakai; Tadamoto; Screw extrusion technology; ; Shizuoka University, 2013
- [3] Fischer, Peter; Wortberg, Johannes; Single-Screw Extruders and Barrier Screws; VDI-Verlag; Düsseldorf; 1997;
- [4] ; Průřez šnekem [online] [viděno 12.8.2017] obrázek ve formátu gif. Dostupné z: <http://techminy.com/wp-content/uploads/2016/10/extrusion-moulding-process-in-plastics.gif>
- [5] ; Understanding screw [online] [viděno 12.8.2017] Dostupné z: <http://www.macroeng.com/assets/uploads/white-papers/understanding-screws/Figure3.png>
- [6] Peacock, Andrew J.; Handbook of polyethylene; Marcel Dekker Inc.; New York; 2000; ISBN 0-8247-9546-6
- [7] ; Granulát [online] [viděno 12.8.2017] obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: [https://mssagroup.oferteo.pl/images/offers/718581/orig/71279\\_945641\\_10200694416816954\\_345117774\\_n.jpg](https://mssagroup.oferteo.pl/images/offers/718581/orig/71279_945641_10200694416816954_345117774_n.jpg)
- [8] Osswald, Tim A.; Turng, Lih-Sheng; Gramann Paul; Injection Molding Handbook; Hanser Gardner Pubns; Munich; 2008; 978-3-446-40781-7
- [9] Bogale, Kirubel; Simulation and Design of Extrusion Dies; Helsinki, 2011, Arcada university of applied sciences Helsinki; Mathew Vihtonen
- [10] Michaeli, Walter; Plastics Processing; Hanser Gardner Pubns; Munich; 1995; 1-56990-144-9
- [11] Seidl, Martin; Stroje pro zpracování polymerních materiálů; Střední odborné učiliště; Svitavy; 2016; 978-80-88058-71-7
- [12] učební zdroje ČVUT v Praze

[13] Chang Dae Han; Rheology and Processing of Polymeric Materials; Oxford university press; Oxford, 2007, 978-0-19-518782-3

[14] Barnes, Howard A.; A handbook of elementary theology, Cambrian printers; Aberystwyth; 2000, 0-9538032-0-1

[15] Osswald, Baur, Brinkman; International plastics Handbook; Hanser Gardner Pubns; Ohio; 2006; 978-3-446-22905-1

[16] Margolis, James M.; Engineering Plastics Handbook; McGraw handbooks; USA; 2006; 0-07-158910-4

[17] Jsem autorem

## 8. Seznam použitého značení

značka	jednotka	popis
$c_p$	J/(kg.K)	měrná tepelná kapacita
$c_{pm}$	J/(mol.K)	měrná tepelná kapacita
$d$	m	průměr šroubovice
$d_1$	m	průměr jádra první části
$d_2$	m	průměr jádra druhé části
$d_3$	m	průměr jádra třetí části
$D_{min}$	m	minimální průměr
$D_t$	m	průměr válce extrudéru
$e$	m	šířka šroubovice
$F_1$	N	síla působící na šnek
$F_2$	N	síla působící na spojku
$g$	$m.s^{-2}$	tíhové zrychlení
$H$	m	obecná výška závitu
$h_1$	m	výška závitu první části
$h_2$	m	výška závitu druhé části
$h_3$	m	výška závitu třetí části
$K$	-	konstanta konzistence
$L$	m	obecná délka
$l^*$	-	bezrozměrná délka
$L_1$	m	délka první části
$L_2$	m	délka druhé části
$L_3$	m	délka třetí části
$L_c$	m	celková délka
$L_\xi$	m	délka rozmotané šroubovice
$L_t$	m	délka trysky
$m$	-	Mocninný index
$\dot{m}$	kg/s	hmotnostní průtok
$M_k$	Nm	kroučící moment
$M_{kmax}$	Nm	maximální kroučící moment
$M_{max}$	Nm	maximální ohybový moment
$M_o$	Nm	ohybový moment
$M_{pp}$	g/mol	molární hmotnost polypropylenu
$n$	$s^{-1}$	otáčky
$p$	Pa	tlak
$p^*$	-	bezrozměrný tlak
$p_d$	pa	dovolený tlak otláčení
$p_{melting}$	pa	tlaková ztráta v druhé části
$p_{metering}$	pa	tlaková ztráta ve třetí části
$p_t$	Pa	tlaková ztráta v trysce
$P$	W	výkon
$P_d$	W	výkon k dopravě taveniny
$P_{min}$	W	minimální výkon motoru

q	N/m	spojité zatížení
q <sub>0</sub>	N/m	spojité zatížení
Q	W	tepelný výkon
Q <sub>m</sub>	W	tepelný výkon z motoru
r	m	poloměr
R	m	poloměr trysky
s	m	stoupání šroubovice
S <sub>1</sub>	m <sup>2</sup>	plocha ve válci
S <sub>2</sub>	m <sup>2</sup>	plocha otačení
T <sub>1</sub>	K	teplota v pokoji
T <sub>2</sub>	K	teplota ve stroji
T <sub>s</sub>	K	střední teplota
T <sub>o</sub>	N	posuvná síla
u	m/s	obvodová rychlost
V*	-	bezrozměrný objem
Ṡ	m <sup>3</sup> /s	objemový průtok
Ṡ <sub>p</sub>	m <sup>3</sup> /s	tlakový průtok
Ṡ <sub>u</sub>	m <sup>3</sup> /s	unášivý průtok
V <sub>c</sub>	m <sup>3</sup>	celkový objem
V <sub>FZ</sub>	m <sup>3</sup>	objem první části
V <sub>MelZ</sub>	m <sup>3</sup>	objem druhé části
V <sub>MetZ</sub>	m <sup>3</sup>	objem třetí části
V <sub>stroke</sub>	m <sup>3</sup>	objem před čelem šneku
W	m	šířka šroubovice
w	-	součinitel vlečného odporu
W <sub>k</sub>	m <sup>3</sup>	průřez modulu v krutu
W <sub>o</sub>	m <sup>3</sup>	průřez modulu v ohybu
α	-	korelační koeficient pro kombinované namáhání
α <sub>0</sub>	-	geometrická konstanta
β <sub>0</sub>	-	geometrická konstanta
γ	s <sup>-1</sup>	smyková rychlost deformace
η	Pa.s	Zdánlivá viskozita
μ	Pa.s	viskozita
ρ <sub>granulát</sub>	kg/m <sup>3</sup>	hustota granulátu
ρ <sub>ocel</sub>	kg/m <sup>3</sup>	hustota ocele
ρ <sub>pp</sub>	kg/m <sup>3</sup>	hustota taveniny
σ <sub>o</sub>	Pa	ohybové napětí
σ <sub>red</sub>	Pa	redukované napětí
τ	Pa	smykové napětí
τ <sub>k</sub>	Pa	napětí v krutu
φ	°	úhel stoupání
ω	rad <sup>-1</sup>	úhlová rychlost
P <sub>min</sub>	W	minimální výkon motoru
q	N/m	spojité zatížení

$q_0$	N/m	spojité zatížení
$Q$	W	tepelný výkon
$Q_m$	W	tepelný výkon z motoru
$r$	m	poloměr
$R$	m	poloměr trysky
$s$	m	stoupání šroubovice
$S_1$	m <sup>2</sup>	plocha ve válci
$S_2$	m <sup>2</sup>	plocha otláčení
$T_1$	K	teplota v pokoji
$T_2$	K	teplota ve stroji
$T_s$	K	střední teplota
$T_o$	N	posuvná síla
$u$	m/s	obvodová rychlost
$V^*$	-	bezrozměrný objem
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s	objemový průtok
$\dot{V}_p$	m <sup>3</sup> /s	tlakový průtok
$\dot{V}_U$	m <sup>3</sup> /s	unášivý průtok
$V_c$	m <sup>3</sup>	celkový objem
$V_{FZ}$	m <sup>3</sup>	objem první části
$V_{MeIz}$	m <sup>3</sup>	objem druhé části
$V_{MeZ}$	m <sup>3</sup>	objem třetí části
$V_{stroke}$	m <sup>3</sup>	objem před čelem šneku
$W$	m	šířka šroubovice
$w$	-	součinitel vlečného odporu
$W_k$	m <sup>3</sup>	průřez modulu v krutu
$W_o$	m <sup>3</sup>	průřez modulu v ohybu
$\alpha$	-	korelační koeficient pro kombinované namáhání
$\alpha_0$	-	geometrická konstanta
$\beta_0$	-	geometrická konstanta
$\gamma$	s <sup>-1</sup>	smyková rychlost deformace
$\eta$	Pa.s	Zdánlivá viskozita
$\mu$	Pa.s	viskozita
$\rho_{granulát}$	kg/m <sup>3</sup>	hustota granulátu
$\rho_{ocel}$	kg/m <sup>3</sup>	hustota ocele
$\rho_{PP}$	kg/m <sup>3</sup>	hustota taveniny
$\sigma_o$	Pa	ohybové napětí
$\sigma_{red}$	Pa	redukované napětí
$\tau$	Pa	smykové napětí
$\tau_k$	Pa	napětí v krutu
$\varphi$	°	úhel stoupání
$\omega$	rad-1	úhlová rychlost